

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

3/2017

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

46. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących 17-19 października 2017, Starachowice



Szkolenia, egzaminy i certyfikacja personelu NDT

TÜV Rheinland Polska organizuje szkolenia z badań nieniszczących w 1., 2. i 3. stopniu kwalifikacji w metodach ET, MT, PT, VT, RT, UT oraz technikach UT-PA (Phased Array) i UT-TOFD według wymagań normy EN ISO 9712. Oferowane szkolenia obejmują zakres Dyrektywy Urządzeń Ciśnieniowych 2014/68/UE.

Egzaminy kwalifikacyjne i proces certyfikacji przeprowadzane są przez niezależną i akredytowaną przez PCA Jednostkę Certyfikującą Osoby (nr AC 195). TÜV Rheinland Polska jest również uznaną organizacją trzeciej strony upoważnioną do poświadczania kompetencji personelu NDT prowadzącego badania połączeń nierozłącznych na urządzeniach ciśnieniowych kategorii III i IV wg dyrektywy 2014/68/UE.



AC 195

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.

ISSN 2451-4462



9 772451 446003



Twój Mentor pomocze Ci podjąć właściwą decyzję

Przedstawiamy WideoEndoskop - Mentor Visual iQ™

Mentor Visual iQ™ to szybsze i dokładniejsze badania. Łączność w czasie rzeczywistym, intuicyjny ekran dotykowy, indywidualne profile użytkownika oraz trójwymiarowe obrazowanie w Pomiarze Fazowym 3D, to tylko niektóre możliwości, znacznie podnoszące efektywność badań wizualnych. Inteligentne rozwiązania wbudowane w urządzenie VideoProbe™, to nie tylko większa efektywność badań, ale przede wszystkim trafniejsze decyzje.

Więcej na temat nowego podejścia
GE do badań nieniszczących na:

mentorvisualiQ.com lub endoskopy.pl

technologia badań
wizualnych

Everest
Polska

Everest Polska Sp. z o.o.

ul. Geodetów 176, 05-500 Piaseczno k. Warszawy
tel. (+48 22) 750 50 83, faks: (+48 22) 750 70 21
email: everestvit@everestvit.pl, www.everestvit.pl





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

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF

Jerzy Nowacki

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

Tomasz Chady, Ryszard Pakos

SEKRETARZ NAUKOWY / SCIENTIFIC SECRETARY

Grzegorz Psuj

REDAKTOR JĘZYKOWY / EDITOR OF LANGUAGE AFFAIRS

Marcin Żytkowiak

REDAKTOR STATYSTYCZNY / EDITOR OF STATISTIC AFFAIRS

Sławomir Krajewski

REDAKTOR WYDAWNICZY / PUBLISHING EDITOR

Adam Sajek

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Sliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojaś

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPEMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Bogusław Olech, Mgr Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr Bogusław Ładecki, Dr Ryszard Nowicki

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
/ INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny 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 Udupa, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vértesy, Hungarian Academy of Sciences, Hungary

Dr Grzegorz Wojaś, UDT, Polska

Prof. Sławomir Wronka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Prof. Chunguang Xu, Beijing Institute of Technology, China

Prof. Noritaka Yusa, Tohoku University, Japan

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 3/2017

ISSN 2451-4462

VOLUMEN 2

SPIS TREŚCI

Krzysztof Schabowicz, Marcin Matuszewski, Brigitte Nierösel, Dominik Schlößer

Nieniszczące badania struktury materiałów włókno-cementowych z użyciem tomografii komputerowej* 3

Wojciech Napadłek, Tomasz Durejko, Wojciech Chrzanowski, Piotr Garyga

Laserowe technologie 3D rewitalizacji łopat turbin parowych stopnia NP stosowanych w energetyce – problematyka technologiczna i diagnostyczna* 7

Łukasz Sarniak, Rafał Molak, Barbara Romelczyk, Piotr Garyga, Zbigniew Pakieła, Andrzej Zagórski

Diagnostyka stanu technicznego wirników turbin parowych na podstawie badań małych próbek pobranych w sposób mało inwazyjny* 12

Łukasz Litwiniuk, Dorota Sobótko, Grzegorz Szajna, Joanna Szewczul

Wzorcowanie mierników nadfioletu stosowanych w NDT* 15

Anna Adamczak-Bugno, Tomasz Gorzelańczyk, Aleksandra Krampikowska, Mateusz Szymków

Nieniszczące badania struktury materiałów włókno-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego* 20

Gerd Dobmann, Christoph König, Uwe Hofmann, Gerald Schneibel

Development and qualification of the Eddy-Current testing techniques "EC" and "EC+" in combination with Leeb-Hardness-Measurements for detection and verification of hardness spots on heavy steel plates* 24

Grzegorz Wojaś

Nowelizacja normy ISO/IEC 17025 w świetle aktualnych wymagań dotyczących kompetencji laboratoriów badawczych* 32

Bogusław Olech

Z życia Oddziałów: SZCZECIN 35

Adam Kondej, Tomasz Babul, Sylwester Jończyk

Aparatura i możliwości badań nieniszczących metodą prądów wirowych w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej* 38

Michael Sirois, Mathieu Bouchard, Angélique Raude, Radosław Boba

Korozyja naprężeniowa – kiedy głębokość wady ma znaczenie* 43

Rafał Obłąkowski

ACFM® – alternatywa dla metod elektromagnetycznych 47

Tomasz Chady, Ryszard Sikora

Naukowa współpraca Chińsko - Polska w 2017 roku 49

Zaproszenie na 47. Krajową Konferencję Badań Nieniszczących 51

Informacje dla Autorów i Czytelników 52

* - artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA

/PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION

casp system
ADVANCED TECHNOLOGIES

TÜVRheinland®
Precisely Right.

TELEMOND
HOLDING



PTBNiDT



badania wizualne
Everest
Polska www.endoskopy.pl

MR
CHEMIE
NDT-materials



MAPOWANIE KOROZJI ORAZ WIZUALIZACJA PROFILU BADANEJ ŚCIANKI

PETROCHEMIA - ENERGETYKA - PRZEMYSŁ MORSKI



UT-Lite Defektoskop ultradźwiękowy do mapowania korozji oraz pomiaru grubości badanych materiałów

- » Głowice oponowe - brak sprzęgacza
- » Zapis danych A-, B-, C-Scan - pełna analiza wyników, zapis danych w plikach .xls
- » Ciągły pomiar grubości ścianki z wyodrębnieniem powłoki lakierniczej
- » Wbudowany joystick do sterowania czołgaczem Scorpion

Enkodery zintegrowane z sondami

- » **R-SCAN** - ręczna głowica oponowa do mapowania B-Scan
- » **THETASCAN** - ręczna głowica oponowa do mapowania C-Scan (enkodery oś X i Y)
- » **SCORPION** - zmotoryzowany czołgacz do mapowania B-Scan dużych konstrukcji
- » **TOFD** - ręczny system do badania spoin

WIELOPRZETWORNIKOWE SONDY WIROPRĄDOWE SHARCK™

WYKRYWANIE I POMIAR WAD POWIERZCHNIOWYCH W STALACH WĘGLOWYCH



Sondy Sharck - zaawansowane wieloprzetwornikowe sondy z cewkami w układzie tangencjalnym (technologia TECA) do kontroli powierzchni i spoin materiałów wykonanych ze stali węglowych

- » Wykrywanie wad w każdej orientacji
- » Pomiar głębokości wad do 7mm
- » Wbudowany enkoder pozwala na tworzenie pełnego zobrazowania C-Scan
- » Sprężynujące osłony cewek pomiarowych dopasowujące się do kształtu badanej powierzchni
- » Brak konieczności usuwania farby i powłok
- » Zgodność z ASTM E3052
- » Alternatywa dla badań PT i MT z pełną rejestracją wyników



ECTANE® 2



REDDY®



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

Krzysztof Schabowicz^{1*}, Marcin Matuszewski², Brigitte Nierösel³, Dominik Schlößer³

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wrocław

²CASP System Sp.z o.o., Jaworzno

³YXLON International GmbH, Hamburg, Germany

Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem tomografii komputerowej

Non-destructive testing of fibre-cement structure materials using computer tomography

ABSTRACT

The paper presents a proposal of fibre-cement boards testing using non-destructive x-ray computed tomography.

Five types of fibrous-cement boards were tested: internal, facade, façade colored, interior colored and waterproof.

Interesting research results have been obtained which have allowed us to observe the microstructure of the examined boards.

Keywords: non-destructive testing, fiber-cement board, x-ray computer tomography

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę badań nieniszczących płyt włóknisto-cementowych metodą tomografii komputerowej. Badaniom poddano 5 rodzajów płyt włóknisto-cementowych: płyta wewnętrzna, elewacyjna, elewacyjna barwiona w masie, wewnętrzna barwiona w masie i wodoodporna. Otrzymano rezultaty badań pozwoliły zaobserwować mikrostrukturę badanych płyt i odnieść wyniki do badań metalograficznych, jak i do innych badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, płyty włóknisto-cementowe, tomografia komputerowa

1. Wprowadzenie

Włókno-cement jest powszechnie stosowany w budownictwie jako materiał budowlany i wykończeniowy w postaci płyt dachowych, płyt elewacyjnych oraz płyt wewnętrznych [1, 2, 6-8].

Płyty włóknisto-cementowe produkowane są między innymi z: cementu, włókna celulozowego i polialkoholu winylowego (PVA) oraz wypełniaczy takich jak np. wapień, kaolin oraz wody. Znaczną część mieszanki produkcyjnej (ponad 50%) stanowi cement odpowiedzialny za wiązanie materiału i jego ostateczną trwałość. Celuloza stanowi zbrojenie i wypełniacz oraz jest dodatkiem gwarantującym właściwą ilość wody podczas procesu wiązania cementu. Z kolei włókna PVA stosuje się jako zbrojenie konstrukcyjne płyt włóknisto-cementowych, które nadaje jej określoną wytrzymałość [1, 2].

Płyty włóknisto-cementowe stosowane na elewacjach i powierzchniach dachowych są narażone na powstawanie wad produkcyjnych poprzez nieprawidłowe wymieszanie składników, wydzielenia lub zaleganie pęcherzy powietrza powodując pocienienie nominalnej grubości. Ponadto wpływ czynników środowiskowych takich jak zmiany temperatury, opady deszczu, śnieg itd. mogą powodować starzenie produktu i powstanie mikropęknięć. W związku z tym istotne jest określenie, w jaki sposób ubytki produkcyjne i eksploatacyjne wpływają na projektowaną funkcjonalność, trwałość i poziom wykorzystania produktów na bazie włókno-cementu.

Obecnie przeprowadzone badania materiałowe płyt włókno-cementu dotyczyły określania normowych parametrów fizyko-mechanicznych [3, 6]. W literaturze spotkać można rezultaty badań wykonanych z wykorzystaniem metod nieniszczących, m.in. metody ultradźwiękowej i metody emisji akustycznej [4, 5, 9]. Istnieje zatem możliwość użycia innej metody badań nieniszczących w celu szerszego poznania zagadanie i możliwości porównania otrzymanych wyników. Takie porównanie pozwala odpowiedzieć, które techniki badań NDT potwierdzą wyniki i zasadność ich stosowania, bo tylko zwalidowana technika badawcza może być uznana za wiarygodną. Dzięki wykorzystaniu tomografii komputerowej możemy przeprowadzić analizę takich materiałów w zakresie kontroli mikrostruktury i wszelkich występujących niezgodnościach.

Nowoczesne metody tomograficzne stosowane w odniesieniu do materiałów budowlanych umożliwiają pozyskanie informacji dotyczących diagnozy procesu niszczenia, relacji pomiędzy mikrostrukturą i właściwościami użytkowymi [10, 11]. Rozwój metod tomograficznych zmierza głównie do detekcji różnego rodzaju defektów w badanym materiale. Autorzy niniejszego artykułu podjęli próbę wykorzystania tomografii komputerowej do nieniszczącego badania struktury płyt włóknisto-cementowych.

2. Opis badań

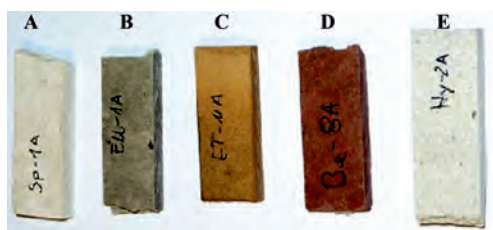
Analizie poddano pięć płyt włóknisto-cementowych o różnym składzie i zastosowaniu tj. płytę wewnętrzną, elewacyjną, elewacyjną barwioną w masie, wewnętrzną barwioną w masie i wodoodporną, oznaczane w dalszej części artykułu

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

odpowiednio literami od A do E i pokazane na rysunku 1, z których pobrano próbki do badań:

- próbka A - płyta wewnętrzna,
- próbka B - płyta elewacyjna,
- próbka C - płyta elewacyjna barwiona w masie,
- próbka D - płyta wewnętrzna barwiona w masie,
- próbka E - płyta wodoodporna.

Podczas badania oceniano wygląd przekroju i struktury płyt włóknisto-cementowych.



Rys. 1. Widok próbek pobranych z płyt włóknisto-cementowych do badania rentgenowskiego tomografem komputerowym
Fig. 1. View of samples taken from fibre-cement boards for X-ray computer tomography

W badaniach wykorzystano system tomografii komputerowej FF 20 CT firmy Yxlon International GmbH pozwalający na badanie detali o wadze do 20 kg i wymiarach przestrzenni roboczej Ø150 na 300mm. Ten zaawansowany system tomografii komputerowej wyposażony w pakiet metrologiczny umożliwia prowadzenia badań zgodnie z normą VDI 2630 i uzyskanie takich samych lub dokładniejszych pomiarów niż maszyny współrzędnościowe.



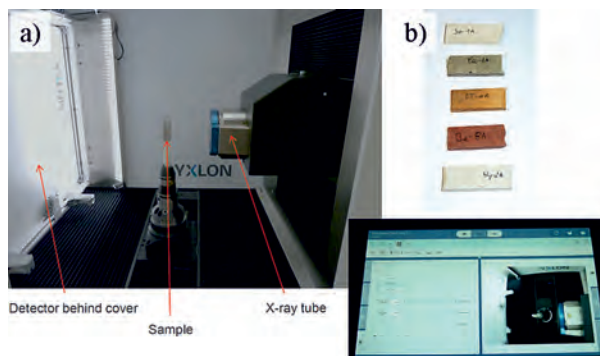
System FF 20 CT składa się z następujących elementów:

- mikroogniskowej lampy rentgenowskiej Y.FXE 190.61,
- detektora cyfrowego o wymiarze piksela 127 μm ,
- granitowej bazy manipulatora wraz z stolikiem inspekcyjnym,
- komputera z oprogramowaniem Volume Graphic 3.0.

Badane próbki zostały poddane działaniu promieniowania jonizującego, w wyniku czego uzyskano szereg obrazów 2D przy różnym kącie obrotu, następnie dokonano rekonstrukcji obrazów i otrzymano model 3D.

Parametry badania dla badanych próbek ustalono doświadczalnie i przyjęto:

- parametry ekspozycji lampy rentgenowskiej 135 kV, 60 μA ,
- odległość lampy od detektora 600mm,
- liczbę projekcji: 1200,
- powiększenie geometryczne 5x,
- rozmiar voksela: 27 μm .

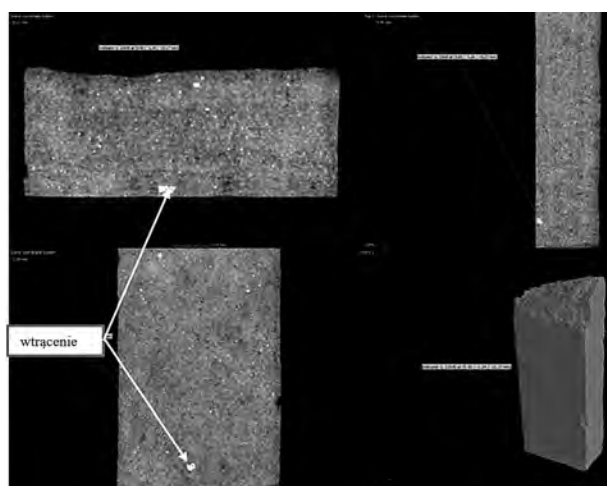


Rys. 2. Widok wykorzystanego do systemu badawczego na zewnątrz (a) i widok od środka wraz z próbkami do badań (b)

Fig. 2. The view of used for the outdoor test system (a) and center view with test specimens (b)

3. Wyniki badań

Na rysunku 3 przedstawiono model 3D próbki A (płyta wewnętrzna) wraz z obrazami w płaszczyźnie cięcia kolejno od lewej X, Y, Z. Warto podkreślić, że przy zastosowaniu rentgenowskiej tomografii komputerowej mamy możliwość wyboru miejsca przekroju analizowanej próbki, bez potrzeby jej niszczenia, a tym samym możemy analizować i obserwować zmiany w dowolnym jej miejscu.



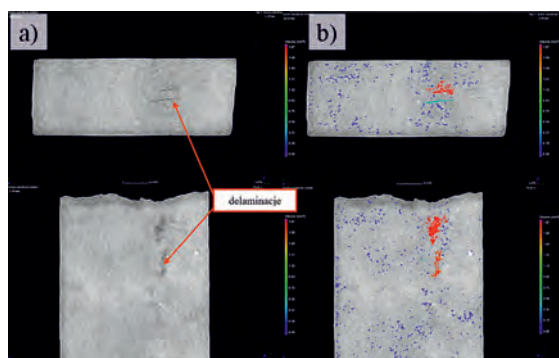
Rys. 3. Obrazy z tomografu komputerowego uzyskane dla próbki pobranej z płyty A

Fig. 3. Images obtained with the use of X-ray computer tomography for the board A

Na podstawie analizy wyników przedstawionych na rysunku 3 stwierdzono warstwowy układ mineralnego wypełniacza płytkowego zgodny z kierunkiem prasowania płyty. Ponadto w badanej próbce stwierdzono wtrącenia pochodzenia organicznego powstałe na etapie produkcji, które zaznaczono na rysunku 3.

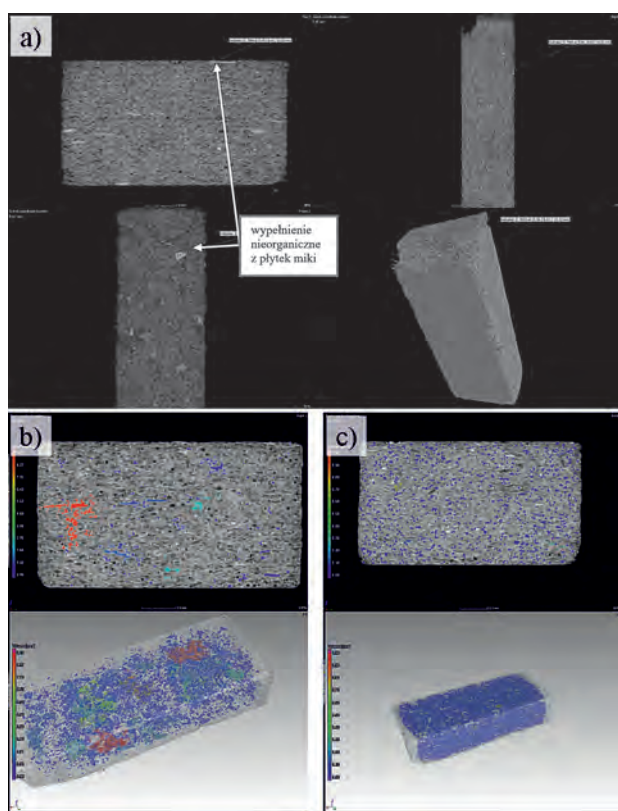
Na rysunku 4 pokazano obrazy z tomografu komputerowego uzyskane dla próbki pobranej z płyty D wraz z analizą wtrąceń i analizą porowatości. Na podstawie analizy wyników stwierdzono delaminację w próbce, którą zaznaczono na rysunku 4. Stwierdzone rozwarstwienie o długości 1,982 mm na styku warstw płyty włóknisto-cementowej jest stosunkowo niewielkie, ale poddane czynnikom eksploatacyjnym (obciążenie wiatrem, woda opadowa itp.) może propagować

i w konsekwencji doprowadzić do uszkodzenia całej płyty. Z tego powodu tak ważne jest wyeliminowanie wad na etapie produkcyjnym, aby w późniejszym etapie wykluczyć uszkodzenia, a tym samym wydłużyć czas eksploatacji.



Rys. 4. Obrazy z tomografu komputerowego uzyskane dla próbki pobranej z płyty D (a) wraz z analizą wtrąceń i analizą porowatości (b)

Fig. 4. Images obtained with the use of X-ray computer tomography for the board D (a) - analysis of inclusions with porosity analysis (b)



Rys. 5. Obrazy uzyskane przy użyciu rentgenowskiego tomografu komputerowego (a), analiza wtrąceń (b) wraz z analizą porowatości (c) dla próbki pobranej z płyty E

Fig. 5. Images obtained with the use of X-ray computer tomography, analysis of inclusions (b) with porosity analysis (c) for the board E

Próbka D została także zbadana pod kątem analizy porowatości i niezgodności objętościowych. Wykazała udział procentowy porów na poziomie 1,65 % i sumaryczną objętość wad 111 mm³.

Z kolei na rysunku 5 pokazano obrazy uzyskane przy użyciu rentgenowskiego tomografu komputerowego dla próbki pobranej z płyty E. Na rysunku 5b i 5c przedstawiono analizę wtrąceń i analizę porowatości. W próbce E określono, że wtrącenia stanowią 0,05% badanej próbki z objętością niezgodności na poziomie 1,07 mm³.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję badania płyt włóknisto-cementowych nieniszczącą metodą tomografii komputerowej. Badaniom poddano łącznie pięć próbek pobranych z pięciu różnych płyt włóknisto-cementowych, o różnym składzie i zastosowaniu tj. A - płyta wewnętrzna, B - elewacyjna, C - elewacyjna barwiona w masie, D - wewnętrzna barwiona w masie i D - wodoodporna. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań zaobserwowano zmiany zachodzące w mikrostrukturze badanych materiałów pod wpływem czynników powstałych w trakcie produkcji. Poszerzona analiza dla próbek D i E o badania porowatości oraz wtrąceń pozwalają pozyskać informacje o stanie i właściwościach badanych próbek. Umożliwia to dopracowanie procesu produkcyjnego, a w konsekwencji otrzymanie lepszego wyrobu budowlanego.

5. Literatura/References

- [1] "Dachówka cementowa EURONIT | CREATON Polska", Euronit.pl, 2017. [Online]. Available: <http://www.euronit.pl>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [2] "Cembrit Holding A/S, Denmark", Cembrit.com, 2017. [Online]. Available: <http://www.cembrit.com>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [3] PN-EN 12467:2013-03E, Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [4] R. Drelich, T. Gorzelańczyk, M. Pakuła, K. Schabowicz, "Automated control of cellulose fibre cement boards with a non-contact ultrasound scanner", *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 55-63, 2015. DOI 10.1016/j.autcon.2015.04.017
- [5] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Non-Destructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards", in *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, Prague, October 6-10, 2014.
- [6] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu", *Materiały Budowlane*, no. 10, pp. 27-29, 2015. DOI 10.15199/33.2015.10.07
- [7] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych", *Materiały Budowlane*, no. 11, pp. 163-165, 2015. DOI 10.15199/33.2015.11.53
- [8] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków, "Elewacje wentylowane", *Architektura Murator*, no. 6, Warsztat Architekta, no. 3, pp. 36-53, 2017.
- [9] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, M. Szymków, "Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej", *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, no. 10, pp. 35-38, 2016. DOI 10.26628/ps.v88i10.682
- [10] D. Szponder, K. Trybalski, "Określanie właściwości popiołów lotnych przy użyciu różnych metod i urządzeń badawczych", *Górnictwo i Geoinżynieria*, vol. 33, no. 4, pp. 287-298, 2009.
- [11] A. Kędzior, K. Trybalski, A. Konieczny, "Zastosowanie nowoczesnych metod badawczych w inżynierii mineralnej", *Inżynieria Mineralna*, no. 3, pp. 155-161, 2003.

Przenieś swoje Badania wizualne w nowy wymiar z Mentorem Visual iQ

Zaawansowane wideo boroskopy umożliwiają inspektorom wykrywanie, pomiar oraz analizę nieciągłości przy pomocy 3-wymiarowych modeli, oraz współdzielenie tych obrazów i danych z odległymi ekspertami. Dokonuj pomiarów na zarejestrowanych obrazach i weryfikuj na prezentowanym równoległym modelu 3D.

Pomiar Fazowy 3D – opatentowana technologia wykorzystująca projekcję wzorca oraz analizę przesunięcia fazowego w celu generowania 3-wymiarowego modelu badanego obszaru. Dostatecznej jakości, pełnoekranowy obraz z możliwością pomiaru w dowolnym momencie, bez konieczności wymiany obiektów, zapewnia wiarygodne wyniki badań. Dostępne na sondach o średnicy 6,1 mm.

Pomiar Stereo 3D – połączenie opatentowanej technologii pomiaru stereo z zaawansowanymi algorytmami analizy obrazu do generowania 3-wymiarowych modeli badanych powierzchni. Sprawdzaj uzyskane wyniki pomiarów na prezentowanym równoległym modelu 3D.

Podejmuj trafniejsze decyzje z 3-wymiarowym modelem.

Pomiary w oparciu o 2-wymiarowe, płaskie obrazy w tradycyjnej technologii stereo lub cienia, mogą prowadzić do kosztownych pomyłek. Pomiar Fazowy lub Stereo 3D, dostępne tylko w urządzeniach GE serii Mentor Visual iQ, generują pełny 3-wymiarowy model obserwowanej powierzchni. Ten 3-wymiarowy model, wraz z umieszczonymi na nim punktami pomiarowymi, może być obracany i obserwowany pod różnymi kątami, minimalizując ryzyko pomyłek, umożliwia podjęcie optymalnej decyzji.



technologia badań wizualnych
Everest
Polska



Channel Partner
GE Oil & Gas

Everest Polska Sp. z o.o.

ul. Geodetów 176, 05-500 Piaseczno k. Warszawy
tel. (+48 22) 750 50 83, faks: (+48 22) 750 70 21
email: everestvit@everestvit.pl, www.everestvit.pl

Wybierz właściwy, dla Twojego badania, typ pomiaru.



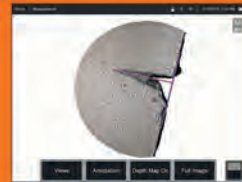
Długość

- Prosty pomiar wielkości uszkodzenia lub elementów
- Długość pęknięcia
- Zmiana wielkości komponentu w wyniku odkształcenia lub erozji/korozji/zużycia
- Ocena wielkości wskaźników zużycia
- Położenie uszkodzenia na badanej części



Punkt do linii

- Uszkodzenia krawędzi łopatek turbin
- Szerokość przerwy
- Szerokość spoiny
- Brakujące krawędzie łopatek



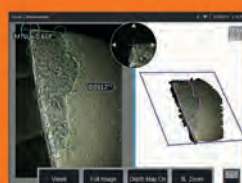
Multi-Segment

- Całkowita długość pęknięcia
- Długość zapalowania łopatek lub określenie kąta wejścia
- Pomiary odległości na powierzchniach nieregularnych lub zakrzywionych, dokładniejsze niż przy użyciu prostego pomiaru długości



Obszar

- Brzozy łopatek
- Uszkodzenia powłoki
- Powierzchnia wżerów lub korozji
- Zakres wpływu FOD



Głębokość

- Pomiar luzów wierzchołkowych
- Zagłębienia lub wżery korozyjne, erozyjne lub wpływu FOD
- Wewnętrzna średnica rury
- Wysokość spoiny
- Kamień na stojanie
- Szerokość przerwy



Profil głębokości

- Głębokość ubytków korozyjnych lub zagłębienia erozyjnych
- Głębokość uszkodzeń z powodu FOD
- Wysokość spoiny lub głębokość rys, rowków, nacięć
- Szybka ocena kształtu powierzchni



Profil obszaru głębokości

- Korozja, erozja i wżery
- Szkodę spowodowane FOD
- Maksymalna wysokość spawu
- Maksymalna głębokość bruzdy



Płaszczyzna pomiarowa

- brakujące narożniki łopatek - z pomiarem Obszaru
- uszkodzenia krawędzi łopatek - z pomiarem Punkt do linii
- pomiar luzu wierzchołkowego - z pomiarem Głębokości
- pomiar małych elementów - z pomiarem Długości lub Punkt do linii
- analiza wielkości zagłębienia - z Profilem obszaru głębokości



Wojciech Napadłek^{1*}, Tomasz Durejko¹, Wojciech Chrzanowski¹, Piotr Garyga²

¹Wojskowa Akademia Techniczna im. gen. J. Dąbrowskiego, Warszawa

²Zakłady Remontowe Energetyki Katowice S.A., Katowice

Laserowe technologie 3D rewitalizacji łopat turbin parowych stopnia NP stosowanych w energetyce – problematyka technologiczna i diagnostyczna

3D laser technologies revitalization LP degree blades of steam turbines in the power sector - technological and diagnostic problems

ABSTRACT

Wear processes of NP turbine blades and evaluation of selected properties of Stellite Co-6 top surface produced by PTA multilayered plasma method, and incremental laser were analyzed, including LENS method on alloy steel X22CrMoV12-1. The topography of the worn blade surface was observed. Regenerative quality of weld overlays in cross section using Keyence optical microscope was recorded. We were looking for welding defects in padding welds. The usefulness of applied methods has been confirmed. "The work was cofinanced by the European Regional Development Fund, Contract No POIG 01.04.00-24-101/13 signed between National Center for Research and Development and ZRE Katowice S.A.

Keywords: 3D laser technologies, turbine blades, revitalization, diagnostics

STRESZCZENIE

Analizowano procesy zużywania łopat turbiny parowej NP i ocenę wybranych użytkowych właściwości warstw wierzchnich typu Stellite Co-6 wytworzonych metodami wielowarstwowego plazmowego napawania metodą PTA oraz przyrostowego laserowego, w tym metodą LENS na stali stopowej X22CrMoV12-1. Obserwowano topografię zużytej powierzchni łopat. Rejestrowano przez mikroskop optyczny Keyence jakość napoin regeneracyjnych w przekroju poprzecznym. Szukano wad spawalniczych w napoinach. Potwierdzono przydatność użytych metod optycznych. Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Umowa o dofinansowanie nr POIG 01.04.00-24-101/13 podpisana pomiędzy Narodowym Centrum Badań i Rozwoju, a ZRE Katowice S.A.

Słowa kluczowe: laserowe technologie 3D, łopaty turbin parowych, rewitalizacja, diagnostyka

1. Wprowadzenie

Łopatką turbinową, jeden z podstawowych elementów turbiny, pracując w niekorzystnych warunkach (wysoka temperatura, korozja, erozja) przenosi nie tylko bardzo duże obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe, ale również często [1-3] narażona jest na degradację (ubytki) warstwy wierzchniej.

Bezwzględna wielkość ubytków związana ze zużyciem powierzchni roboczej łopatki jest niewielka w porównaniu do całkowitej jej powierzchni, często przy niezmiennych właściwościach rdzenia, nadanych w procesie wytwarzania. W takich przypadkach regeneracja jest często najbardziej opłacalnym rozwiązaniem technologicznym dla użytkownika [4]. Obecnie szeroko stosowanymi metodami odtwarzającymi właściwości użytkowe są techniki napawania oraz natryskiwania cieplnego. W efekcie napawania powstaje napoina metalurgicznie połączona z podłożem, a jej właściwości zależą od składu chemicznego oraz metody regeneracji. Często podczas regeneracji powstaje szeroka strefa wpływu ciepła i duży udział materiału podłoża w napoinie. W przypadku modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej duży udział materiału podłoża w napoinie utrudnia uzyskanie jej odpowiedniego

składu chemicznego/fazowego. W przypadku technik natryskiwania cieplnego, wpływ natryskanej powłoki na podłoże pod kątem zmiany jego składu chemicznego jest minimalny, między innymi ze względu na niską temperaturę tego procesu, rzędu 100 – 250°C. Powłoka połączona jest z podłożem w sposób adhezyjny lub mechaniczny, co przy znacznym obciążeniu mechanicznym może okazać się niewystarczające. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę stosowanych metod regeneracji warstwy wierzchniej łopat turbiny parowej stopnia NP i innych elementów maszyn.

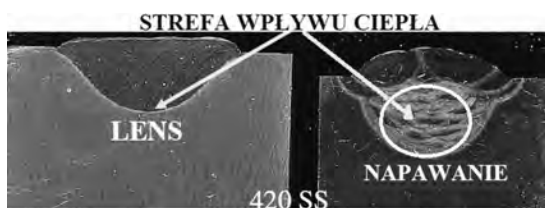
Napawanie laserowe jest to proces pokrywania przedmiotów metalowych warstwą metalu techniką spawalniczą przy jednoczesnym topieniu podłoża. Dla uzyskania wysokiej jakości połączenia z podłożem materiał наносzony jest podawany w postaci proszku, drutów oraz taśm litych i proszkowych. Technika ta jest szeroko stosowana do wytwarzania elementów maszyn z uszlachetnioną warstwą wierzchnią zwiększającą odporność na: korozję, zużycie ścierne, erozję, kawitację, a czasami – żaroodporność i żarowytrzymałość, podczas napawania produkcyjnego. Często technika ta służy do regeneracji części maszyn, podczas napawania regeneracyjnego [4-5].

Techniki laserowe coraz częściej stosowane są w procesach

* Autor korespondencyjny. E-mail: wojciech.napadlek@wat.edu.pl

nanoszenia powłok odtwarzających wskaźniki eksploatacyjne części maszyn i urządzeń. O ich wzrastającym znaczeniu w tym obszarze decydują szczególne cechy promieniowania laserowego oraz intensywny rozwój dziedzin związanych z wykorzystaniem laserów w inżynierii materiałowej. Absorpcja promieniowania laserowego prowadzi do różnych efektów w zależności od współczynnika pochłaniania powierzchni, gęstości mocy oraz czasu oddziaływania wiązki na daną powierzchnię. W przypadku nanoszenia powłok regeneracyjnych wykorzystywane są głównie termiczne efekty absorpcji promieniowania. Energia wiązki laserowej powinna zostać zaabsorbowana w jak największym stopniu, aby nastąpiło efektywne topienie się materiału nanoszonego. Nagrzewanie i topienie się materiału następuje w wyniku przejmowania kwantów energii przez wolne lub związane elektrony materiału przetwarzanego. Powoduje to zwiększenie energii elektronów oddziałujących na sieć krystaliczną i inne elektrony w objętości materiału. Ciągłe pochłanianie kwantów energii i jej przekazywanie powoduje wzrost temperatury, co prowadzi do zerwania wiązań atomowych i przejścia w stan ciekły.

Do niewątpliwie innowacyjnych rozwiązań należy zaliczyć metodę LENS (Laser Engineered Net Shaping) zaliczaną do technik przyrostowych, która ze względu na swoją specyfikę może być wykorzystywana, zarówno do nanoszenia warstw ochronnych o niespotykanych dotąd właściwościach użytkowych (wynikających między innymi z możliwości tworzenia układów gradientowych o różnym stopniu dyskretyzacji), jak również jako doskonałe narzędzie regeneracyjne nowej generacji. LENS jako laserowa technika nanoszenia napoin/powłok posiada szereg zalet wyróżniających ją spośród konwencjonalnych metod napawania czy natryskiwania cieplnego. Nagrzewanie ma charakter lokalny, co minimalizuje szerokość strefy wpływu ciepła (rys. 1), zmniejsza ryzyko występowania „zniekształceń termicznych” oraz ogranicza udział materiału podłoża w napoinie do poziomu poniżej 2%. Dzięki możliwości sterowania szybkością chłodzenia i gradientem temperatury istnieje możliwość kształtowania struktury w szerokim przedziale wymiarowym tj. od drobnopiękniowej do amorficznej (rys. 2) [6-7].



Rys. 1. Zakres strefy wpływu ciepła w warstwie ze stali 420SS nanoszonej techniką LENS w porównaniu do napawania [8]

Fig. 1. Range of heat transfer zone in 420SS steel layer applied by LENS compared to surfacing [8]

Napawanie plazmowe polega na stapianiu w łuku plazmowym materiału dodatkowego w postaci proszku, pręta lub drutu, który wraz z nadtopionym metalem podłoża tworzy napoinę. Uzyskana napoina musi posiadać własności zapewniające trwałość w przewidywanych warunkach pracy o czym decyduje skład chemiczny oraz kształt. Napawanie plazmowe może być prowadzone w sposób ręczny, półautomatyczny, automatyczny lub zrobotyzowany i charakteryzuje się bardzo wysoką koncentracją energii

oraz dużą wydajnością i oszczędnym zużyciem materiału dodatkowego. Koncentracja energii na niewielkim obszarze zmniejsza także skutki cieplnego oddziaływania procesu na własności materiału rodzimego. Napawanie tą metodą umożliwia otrzymywanie powłok gładkich, zmniejszających koszty związane z zastosowaniem obróbki skrawaniem. Technologia napawania plazmowego znajduje zastosowanie przede wszystkim do nakładania na elementy maszyn warstw o szczególnych właściwościach np. wysokiej twardości, odporności na ścieranie, erozję oraz korozję w warunkach atmosferycznych lub aktywnych chemicznie [10].



Rys. 2. Mikrostruktura stopu Ti-6Al-4V po nanoszeniu techniką LENS na podłożu Ti-6Al-4V: (a) stop przetopiony laserem, (b) strefa wpływu ciepła, (c) materiał podłoża [9]

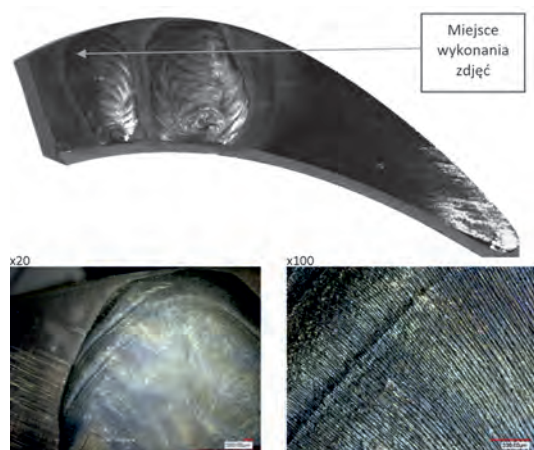
Fig. 2. Ti-6Al-4V microstructure after LENS application on Ti-6Al-4V base: (a) melted laser, (b) heat affected zone, (c) parent material [9]

2. Metodyka badań

Napoiny wykonywane na stali stopowej X22CrMnV12-1 uzyskano metodą wielowarstwowego napawania laserowego, napawania plazmowego (PTA) oraz napawania techniką LENS z wykorzystaniem Stellite Co-6, Stellite Co-12 oraz w różnych konfiguracjach FeAl. Badanie wykonane na napoinach wykazały, iż najlepsze wyniki uzyskiwano z wykorzystaniem Stellite Co-6, w stosunku do pozostałych, stąd wszystkie dalsze próby prowadzone były na tym materiale. Proces wielowarstwowego napawania laserowego, napawania techniką LENS oraz napawania plazmowego prowadzono w WAT na materiale stali stopowej X22CrMoV12-1 połączonym z łopaty turbiny parowej stopnia NP dostarczonej przez ZRE – Katowice S.A. Wielowarstwowe napawanie laserowe prowadzono na stanowisku TruLaser Cell 3008 firmy TRUMPF. Do napawania techniką LENS stosowano stanowisko LENS 850R. Napawanie plazmowe wykonano na stanowisku PPC 250 HG firmy KSK Česká Třebová. Powierzchnię wytworzonych napoin obserwowano na mikroskopie optycznym VHX-1000 firmy Keyence. Przekroje próbek po cięciu inkludowano w żywicy, wykorzystując automatyczną prasę Opal 410 firmy ATA oraz szlifowano i polerowano na talerzowej szlifierko-polerce Saphir 520 firmy ATA. Próbkę szlifowano na papierach ściernych o gradacji od 80 do 2400, a następnie polerowano na dyskach polerskich z użyciem zawiesziny diamentowej o ziarnistości 6 oraz 3 μm . Przed obserwacją mikrostruktury próbki trawiono. Pomiar twardości wykonywano na twardościomierzu FLC-50A firmy Future Tech.

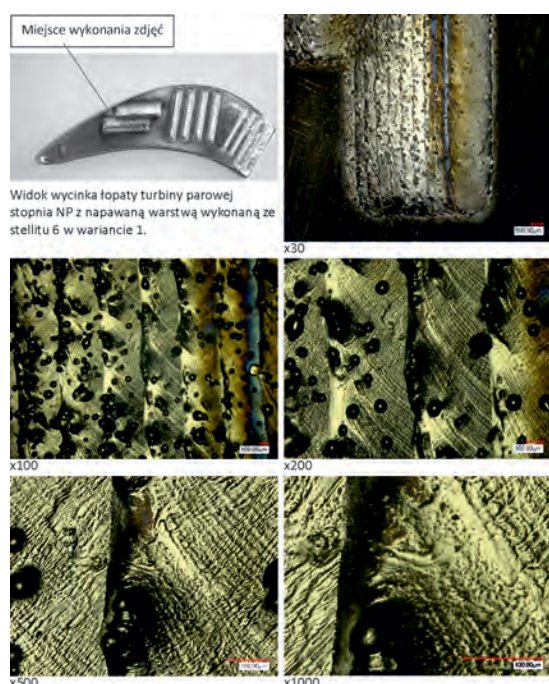
3. Wyniki badań

Napawanie zrobotyzowane plazmowe PTA wykonywano na specjalistycznym stanowisku w firmie KSK w Česká Třebová (Czechy). Materiałem podłoża była stal stopowa pobrana z łopaty dostarczonej przez ZRE Katowice S.A. Widok przykładowych napoin przedstawiono na rys. 3. Wytworzone napoiny mają regularny, powtarzalny kształt z widocznym kierunkiem krystalizacji. Na powierzchni napoin nie stwierdzono pęknięć, poza próbką wykonaną w wariancie 2, na powierzchni której w obszarze zakończenia procesu zauważono niewielkie pęknięcia.



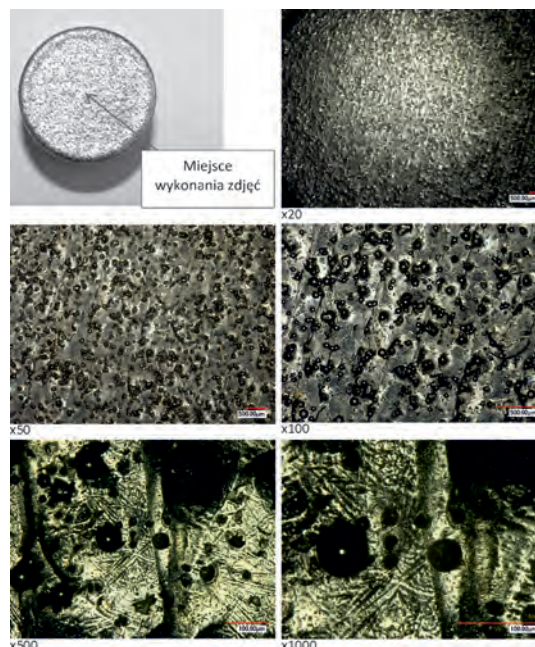
Rys. 3. Widok powierzchni napoiny wykonanej z Stellitu Co-6 na stali stopowej (materiał łopaty) po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym przy różnych powiększeniach

Fig. 3. A view of the surface of a Stellite Co-6 alloy on a steel alloy (shovel) after robotic plasma welding at different magnifications



Rys. 4. Widok powierzchni napoiny ze Stellitu Co-6 (przy różnych powiększeniach) wytworzonej na stali stopowej (pobranej z materiału łopaty) po zrobotyzowanym laserowym napawaniu w wariancie 1 (10 ściegów)

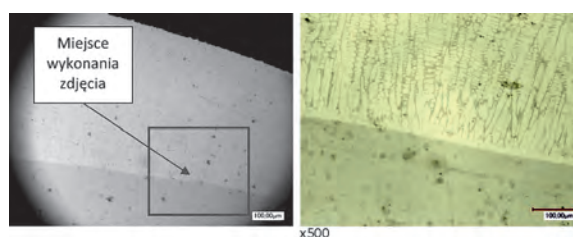
Fig. 4. View of the surface of the Stellite Co-6 (with different magnifications) on the alloy steel (taken from the material of the blade) after robotic laser welding in variant 1 (10 runs)



Rys. 5. Widok charakterystycznej powierzchni napoiny ze stellitu 6 (przy różnych powiększeniach) wytworzonej na stali stopowej X22CrMnV12-1 ulepszonej cieplnie w procesie napawania przyrostowo-gradientowego techniką LENS

Fig. 5. View of the characteristic surface of a Stellite 6 (at different magnifications) on X22CrMnV12-1 alloyed steels with thermally enhanced LENS

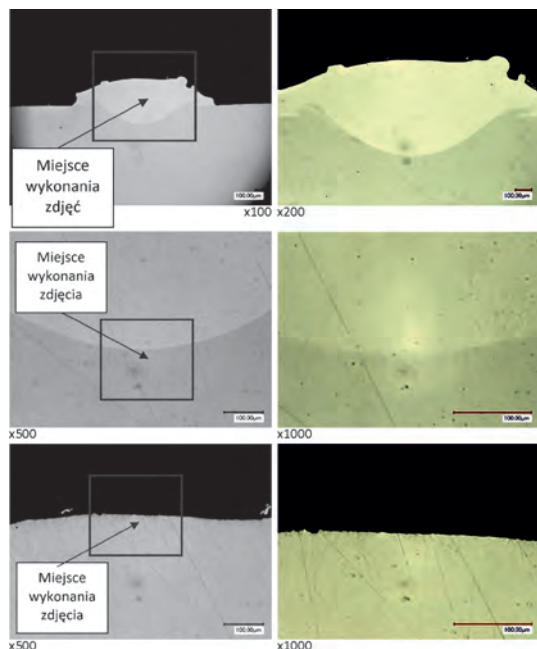
Napawanie laserowe wykonano także na materiale stali stopowej X22CrMoV12-1 pobranej z fragmentu łopaty dostarczonej przez ZRE Katowice S.A. W trakcie doboru i optymalizacji parametrów napawania wykonywano pojedyncze ściegi oraz napawanie wielościegowe (od 4 do 10 ściegów). Materiał podłoża w kilku wariantach podgrzewano przed napawaniem do temperatury ok. 400°C. Przykładowe topografie uzyskanych powierzchni przedstawiono na rys. 4. Uzyskane napoiny miały regularny, powtarzalny kształt z widocznymi cząstkami nieprzetopionego proszku na powierzchni napoin- jest to charakterystyczne dla napoin wykonanych z proszku.



Rys. 6. Widok przekroju napoin wykonanych z Stellitu Co-6 metodą napawania plazmowego PTA

Fig. 6. View of the section of padding weld made from Stellite Co-6 by PTA plasma welding

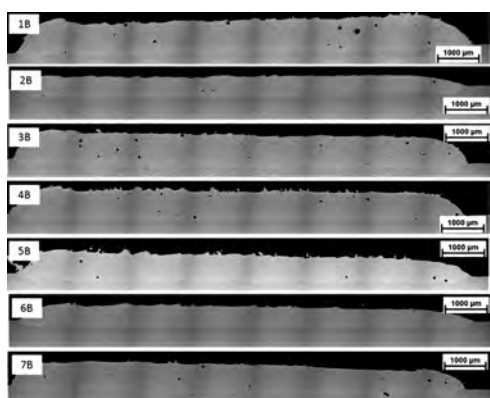
Do wytworzenia próbek metodą LENS wykorzystano system LENS 850R. Podczas doboru optymalnych parametrów napawania proszków wsadowych sterowano m. in. mocą lasera, położeniem ogniska lasera, prędkością podawania proszku, również wydatkiem gazu na dyszy centralnej oraz przepływem gazu transportującego proszek jako parametrami mogącymi mieć wpływ na tzw. porowatość gazową.



Rys. 7. Widok przekroju napoin wykonanych z Stellite Co-6 metodą napawania wielowarstwowego laserowego
Fig. 7. View of the section of padding weld made from Stellite Co-6 by multi-layer laser welding

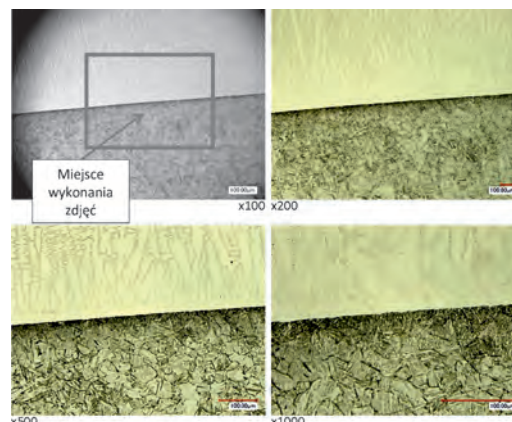
Widok wycinka łopaty turbiny parowej stopnia NP z napawaną warstwą wykonaną ze Stellite Co-6 techniką LENS przedstawiono na rys. 5 i 8.

Wyniki obserwacji powierzchni przekrojów próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym na materiale pobranym z łopaty turbiny parowej stopnia NP po eksploatacji przedstawiono na rys. 6 i 9. Analiza otrzymanych mikrostruktur wykazała, że w strukturze napoiny istnieją uprzywilejowane kierunki krystalograficzne wzrostu dendrytów. Uzyskana mikrostruktura ma kształt iglastych dendrytów o kierunku wzrostu prostopadłym do powierzchni, jest to związane z kierunkowym procesem oddawania ciepła.

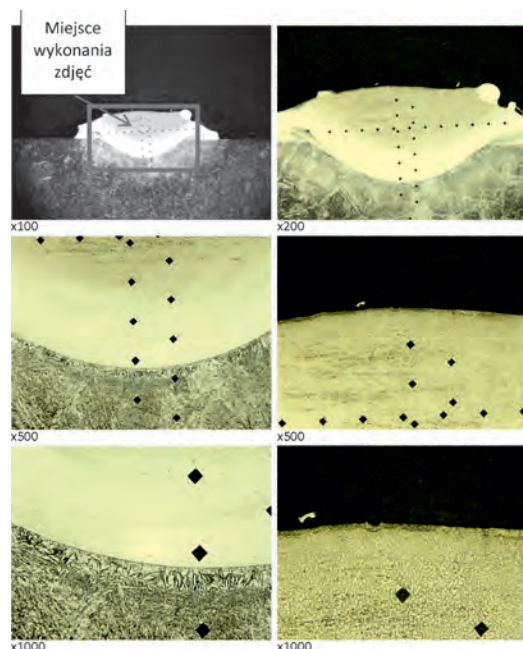


Rys. 8. Widok przekroju napoin wykonanych z Stellite Co-6 techniką LENS
Fig. 8. Cross section of Stellite Co-6 padding welds by LENS

Wyniki obserwacji powierzchni przekrojów próbek po napawaniu laserowym proszku ze Stellite Co-6 na materiale stali pobranym z łopaty turbiny parowej stopnia NP po eksploatacji przedstawiono na rys. 7 i 10. Na analizowanych próbkach z napoinami ze Stellite Co-6 wykonanymi laserowo



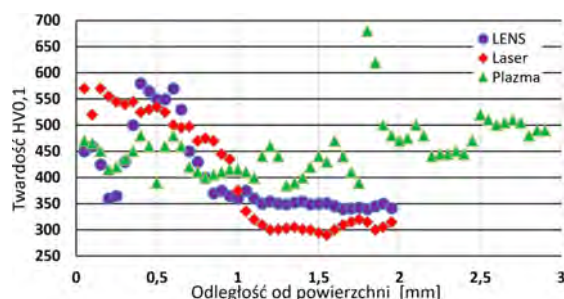
Rys. 9. Widok charakterystycznej mikrostruktury materiału rodzimego i napoiny wytworzonej ze stellite Co-6 w procesie zrobotyzowanego napawania plazmowego – materiał rodzimy (podłoże): stal pobrana z łopaty turbiny parowej
Fig. 9. View of the characteristic microstructure of the parent material and the weld made from Stellite Co-6 by the robotized plasma welding process - parent material (substrate): steel taken from the steam turbine blade



Rys. 10. Widok charakterystycznej mikrostruktury materiału rodzimego i napoiny wytworzonej ze stellite Co-6 w procesie wielowarstwowego laserowego napawania – materiał rodzimy (podłoże): stal pobrana z łopaty turbiny parowej
Fig. 10. View of the characteristic microstructure of the parent material and the weld made of Stellite Co-6 by the multi-layer laser welding process - parent material (substrate): steel taken from the turbine blade

stwierdzono występowanie układów dendrytycznych ziaren. Kształt ich był podobny do kształtu uzyskanego po napawaniu plazmowym, ale ich wielkość była dużo mniejsza. Jest to związane z bardzo dużą szybkością nagrzewania, chłodzenia i krystalizacji materiału poddanego procesowi modyfikacji laserowej (napawania laserowego). Analiza otrzymanych mikrostruktur wykazała, że w mikrostrukturze napoiny istnieją uprzywilejowane kierunki krystalograficzne wzrostu dendrytów. Zaobserwowano występowanie dendrytów

skrzystalizowanych w różnych kierunkach, tj. prostopadle oraz pod różnymi kątami do powierzchni materiału rdzenia, a także w niewielkiej ilości w płaszczyźnie poziomej. Jest to związane z kierunkowym procesem odprowadzania ciepła w głąb materiału, a także w kierunku powierzchni. Przykładowe wykresy rozkładu mikrotwardości zaprezentowano na rys. 11.



Rys. 11. Przykładowy wykres twardości zmierzonej w przekroju poprzecznym na napawanych (laserowo, plazmowo i LENS) próbkach ze stali stopowej X22CrMnV12-1 Stellite Co-6

Fig. 11. Sample hardness graph measured in cross section on welded (laser, plasma and LENS) samples of X22CrMnV12-1 alloy steel Stellite Co-6

4. Wnioski

Analizując uzyskane wyniki, stwierdzono że:

- 1) W trakcie realizacji badań wykonano napoiny z proszku Stellite Co-6 na stali stopowej X22CrMnV12-1 metodą wielowarstwowego napawania laserowego, napawanie plazmowe (PTA) oraz napawania techniką LENS. Uzyskano napoiny o poprawnej geometrii, o regularnym i powtarzalnym kształcie z widocznym kierunkiem krystalizacji wytworzonej warstwy. Na powierzchni wytworzonych napoin nie stwierdzono pęknięć.
- 2) Na podstawie przeprowadzonych obserwacji powierzchni przekrojów poprzecznych próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym stwierdzono, że napoiny wykonane ze stopu Stellite Co-6 charakteryzują się dobrą jakością metalurgiczną z wtopieniem w materiał rodzimy i wyraźną granicą rozdziału napoina - podłoża.
- 3) Analizując powierzchnie przekrojów poprzecznych próbek po laserowym napawaniu, nie stwierdzono pęknięć i nieciągłości w strefie połączenia materiału podłoża z napoiną. W trakcie doboru parametrów napawania w kilku próbkach stwierdzono niewielkie nieciągłości i brak przetopu materiału podłoża. Było to związane ze zbyt małą gęstością wiązki laserowej lub ze złym ogniskowaniem wiązki.
- 4) W wyniku obserwacji trawionych powierzchni przekrojów próbek po zrobotyzowanym napawaniu plazmowym na materiale pobranym z dostarczonej łopaty turbiny parowej stopnia NP zaobserwowano, że mikrostruktura ma kształt iglastych dendrytów o różnych kierunkach wzrostu względem powierzchni podłoża.
- 5) W wyniku obserwacji powierzchni przekrojów próbek po napawaniu laserowym proszku ze Stellite Co-6 stwierdzono występowanie struktury dendrytycznej. Kształt dendrytów był podobny do kształtu uzyskanego po napawaniu plazmowym, ale ich rozdrobnienie było znacznie większe, co wynikało z procesu szybkiej krystalizacji napoiny, charakterystycznej dla napawania laserowego.

- 6) W strukturze napoiny wykonanych techniką LENS wyodrębniono obszary o różnym składzie chemicznym. Osnowę stanowią drobne dendryty austenitu kobaltowego z rozmieszczonymi, w miarę równomiernie, na ich granicach wydzieleniami zawierającymi Cr, W, Fe. Uzyskana struktura nie wykazuje cech anizotropii krystalograficznej oraz występowania tzw. substruktury. Zarówno analiza dyfrakcyjna w mikroobszarach, jak i dyfrakcja w ujęciu makro, potwierdziły zróżnicowaną budowę strukturalną napoin połączonej z występowaniem złożonych węglików kobaltowo-wolframowych pomiędzy dendrytami Co.
- 7) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku wielowarstwowego napawania laserowego wynosiła w zakresie 420-620 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wynoszącej ok. 0,5 mm wynosiła ok. 290 HV0,1.
- 8) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku napawania technologią LENS wynosiła w zakresie od 320-580 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wynosiła od 300 do 460 HV0,1.
- 9) Twardość dla napoin wytworzonych w wyniku napawania plazmowego wynosiła w zakresie 320-520 HV0,1, a w strefie wpływu ciepła wzrastała do 500-550 HV0,1 po czym łagodnie spadała do twardości materiału wyjściowego.
- 10) Napawanie plazmowe wiąże się z dostarczeniem dużej ilości ciepła do materiału podłoża, co powoduje znaczny wzrost temperatury próbki w całej objętości, deformacje i odkształcenia, a tym samym powstanie dużych naprężeń własnych, mających istotny wpływ na kształt geometryczny oraz właściwości użytkowe wytworzonych napoin. Wzrost temperatury podłoża podczas napawania spowodował także pewne zmiany w mikrostrukturze, zarówno materiału podłoża, jak i wytworzonych napoin. W strefie wpływu ciepła materiału podłoża uzyskano częściowe przebudowanie sieci krystalograficznej martenzytu oraz niewielką koagulację płytek cementytu.

5. Literatura/References

- [1] J. Dobosiewicz, "Niektóre przyczyny uszkodzeń łopatek roboczych turbin parowych", *Energetyka*, no. 6, pp. 395-400, 2003.
- [2] J. Chmielniak, *Maszyny przemysłowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1997.
- [3] A. Miller, *Maszyny i urządzenia cieplne i energetyczne*. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1998.
- [4] L. Dobrzański, A. Dobrzańska-Danikiewicz, "Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich", *Open Access Library*, vol. 5, 2011.
- [5] "TRUMPF GmbH + Co. KG", 2017. [Online]. Available: <http://www.pl.trumpf.com/pl/>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [6] J. Kusiński, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe "Akapit", 2000.
- [7] R. Mudge, N. Wald, "Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair", *Welding Journal*, pp. 44-48, January, 2007.
- [8] D. Keicher, "Laser Engineered Net Shaping PHASE II", OPTOMEC, Albuquerque USA, 2001.
- [9] M. Hedges, N. Calder, "Near Net Shape Rapid Manufacture and Repair by LENS", in *Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing*, Meeting Proceedings, RTO-MP-AVT-139, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, pp. 13-1 – 13-14, [Online]. Available: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
- [10] J. Pilarczyk, J. Pilarczyk, *Spawanie i napawanie elektryczne metali*. Katowice: Śląsk, 1996.

Łukasz Sarniak^{1*}, Rafał Molak¹, Barbara Romelczyk¹, Piotr Garyga², Zbigniew Pakieła¹, Andrzej Zagórski^{1*}

¹Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Warszawa

²Zakłady Remontowe Energetyki Katowice Spółka Akcyjna, Katowice

Diagnostyka stanu technicznego wirników turbin parowych na podstawie badań małych próbek pobranych w sposób mało inwazyjny

Analysis of technical condition of steam turbine rotors based on miniature samples obtained semi-destructively

ABSTRACT

Accurate evaluation of the turbine rotor material degradation requires specialized material testing, including light microscopy, SEM and tensile test. Since obtaining standard size samples would significantly weaken the rotor construction, the paper presents a methodology for semi-destructive sampling the material, leaving the surface of the rotor without notches and with a relatively small wall loss. The application of suitable cutting parameters, cooling and equipment fixing enabled the sampling of small samples without interfering in their microstructure. The paper discusses the methodology of mechanical testing of the obtained material with the use of miniaturized specimens such as Miniature Specimen Tensile Test (MSTT) and Small Punch Test (SPT) method

Keywords: turbine rotors, miniature specimens, tensile test

STRESZCZENIE

Precyzyjna ocena stopnia degradacji materiału wirnika turbiny parowej wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań materiałowych, uwzględniających mikroskopię świetlną i skaningową oraz badania wytrzymałościowe. Ponieważ pozyskiwanie próbek o standardowych rozmiarach osłabiłoby pod względem wytrzymałościowym konstrukcję wirnika, w artykule zaprezentowano metodykę pobierania próbek materiału w sposób mało inwazyjny w stosunku do badanego obiektu, pozostawiający powierzchnię wirnika bez karbów i znacznych pocienień. Zastosowanie odpowiednich parametrów cięcia, chłodzenia i mocowania urządzenia umożliwiło pobranie niewielkich próbek o niezmienionej, nieodkształconej i nieprzeprężanej mikrostrukturze. W pracy omówiono metodykę badań wytrzymałościowych pobranego w ten sposób materiału przy wykorzystaniu małych próbek, tj. statycznej próby rozciągania oraz metody zginania miniaturowych dysków (Small Punch Test).

Słowa kluczowe: wirniki turbin, małe próbki, badania wytrzymałościowe

1. Wstęp

Celem uzupełnienia diagnostyki i kompleksowej analizy stanu technicznego wirników, uznano za kluczowe przeprowadzenie szeregu dodatkowych badań materiałowych, w tym badań wytrzymałościowych techniką małych próbek (MSTT oraz SPT) oraz zaawansowanych badań mikrostruktury za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Badania wymagają jednak pobrania materiału z wirnika w sposób nieosłabiający zbytnio jego konstrukcji. Obszar, z którego pobierana jest próbka do badań powinien być jednocześnie reprezentatywny w stosunku do reszty wirnika pod kątem właściwości fizycznych materiału.

2. Metodyka pobierania próbek

W niniejszym artykule skupiono się na opracowaniu metodyki pobierania próbek materiału z wirników turbin w kontekście badań wytrzymałościowych [1]. W tym celu wykorzystano zaprezentowane na rysunku 1 urządzenie o nazwie Small Sample Scooping Machine (SSSM).

Urządzenie umożliwia pobieranie wycinków materiału z obiektów przemysłowych, w sposób praktycznie nieingerujący w ich mikrostrukturę. Zapewnia możliwość regulacji

prędkości zagłębiania się ostrza w materiał oraz chłodzenie materiału (podłoża i próbki) w obszarze cięcia. Dodatkowo jest urządzeniem w pełni mobilnym [2].

W ramach prowadzonych prac badawczych pobrano próbki z wirnika wysokoprężnej turbiny parowej. Urządzenie zamontowano na wale oraz na tarczy wirnika za pomocą zestawu magnesów i uchwytów mocujących. Zdjęcia wykonane w trakcie procesu pobierania próbek materiału przedstawiono na rysunku 2.

Badania wizualne obszarów pobrania próbek materiału po procesie cięcia wykazały, że powstałe zagłębienie po wycięciu nie posiada ostrych krawędzi ani na brzegach ani na jego dnie. Dzięki temu wgłębienie nie stanowi karbu technologicznego w konstrukcji urządzenia, mogącego stanowić potencjalne źródło lokalnej koncentracji naprężeń.

Fragment pobranego materiału ma średnicę ok. 20 mm i wysokość 3 mm. W zależności od potrzeb urządzenie pozwala również uzyskiwać próbki o większych rozmiarach - o średnicach dochodzących do ok 30 mm i wysokości do 4 mm. Zdjęcie wycinka materiału wirnika pobranego za pomocą urządzenia SSSM przedstawiono na rysunku 4.

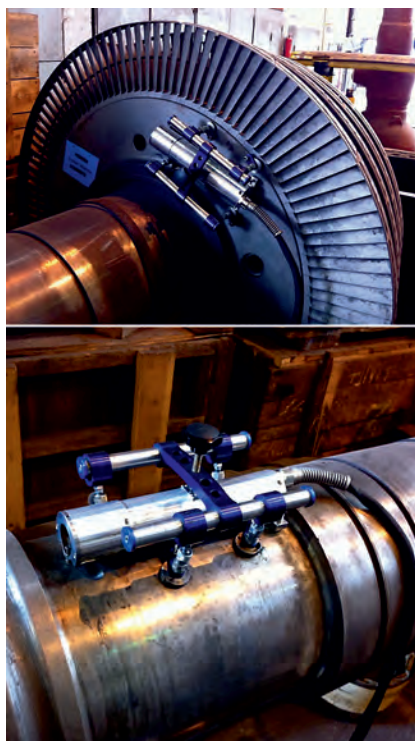
Proces intensywnego chłodzenia materiału pobieranego podczas cięcia zapobiega jego przegrzaniu a w konsekwencji zmianom jego mikrostruktury i właściwości mechanicznych.

*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.sarniak@inmat.pw.edu.pl

Ponadto, ilość pobranego materiału jest wystarczająca do przeprowadzenia specjalistycznych badań materiałowych.



Rys. 1. Urządzenie SSSM podłączone do jednostki sterującej
Fig. 1. SSSM device connected to the control unit



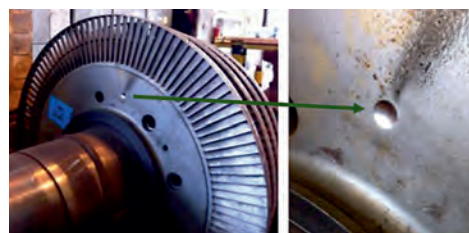
Rys. 2. Zdjęcie urządzenia SSSM w trakcie pobierania próbek materiału z tarczy i wału wirnika turbiny
Fig. 2. Picture of the SSSM device during turbine rotor disk and shaft material sampling

3. Badania wytrzymałościowe przy wykorzystaniu małych próbek

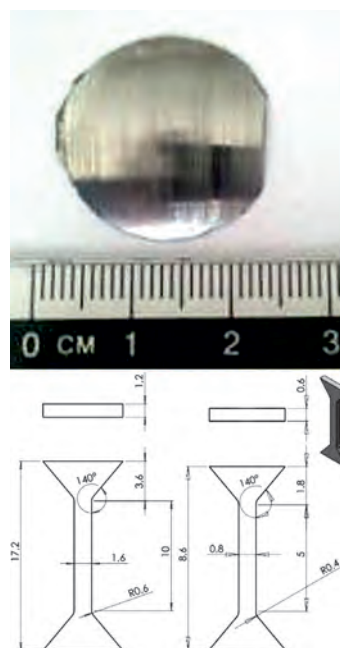
Zastosowanie małych próbek do monitoringu i oceny stanu wirników turbin pozwala na uzyskanie typowych, wyznaczanych na podstawie badań niszczących parametrów wytrzymałościowych, bez istotnej ingerencji w badany obiekt [3]. Do statycznej próby rozciągania małych próbek zastosowano statyczną maszynę wytrzymałościową Zwick/Roell Z005, a próbki pobrano z wycinka metodą cięcia elektroiskrowego (WEDM), celem jak najmniejszej ingerencji w mikrostrukturę materiału [4]. Szkice stosowanych miniaturowanych próbek przedstawiono na Rysunku 4.

Ze względu na mały wymiar próbek do badań, do pomiarów odkształceń wykorzystuje się bezkontaktową, optyczną metodę opartą na cyfrowej korelacji obrazów (ang. DIC – Digital Images

Correlation). Idea metody polega na porównaniu cyfrowych obrazów powierzchni próbki przed badaniem z obrazami po odkształceniu i obliczenie przemieszczeń i obrotów małych obszarów, tzw. „subsetów”. Na podstawie zmierzonych przemieszczeń i obrotów analizowanych obszarów możliwe jest wyznaczanie zarówno odkształceń makroskopowych (porównujemy odkształcenia pomiędzy dwoma „subsetami”), lokalnych odkształceń oraz pól odkształceń na całej analizowanej powierzchni próbki. Metoda umożliwia wyznaczenie charakterystycznych dla próby rozciągania parametrów wytrzymałościowych, takich jak granica plastyczności (R_e , $R_{0.2}$), wytrzymałość na rozciąganie (R_m), moduł Young’a (E) oraz wydłużenie do zerwania (A).



Rys. 3. Zdjęcie powierzchni tarczy wirnika turbiny po pobraniu wycinka materiału
Fig. 3. Picture of turbine rotor disk surface after material sampling



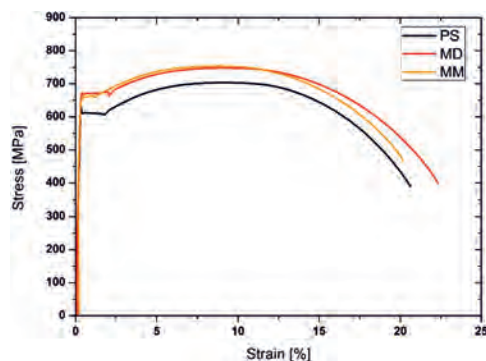
Rys. 4. Zdjęcie powierzchni wycinka materiału wirnika turbiny pobranego techniką SSSM oraz kształty i wymiary stosowanych miniaturowanych próbek

Fig. 4. Picture of the turbine rotor material sample sampled using SSSM technique and the shapes and dimensions of used miniaturized specimens

Bezpośrednie porównywanie właściwości mechanicznych mierzonych przy wykorzystaniu próbek standardowych z danymi uzyskanymi przy użyciu małych próbek jest ograniczone ze względu na tzw. efekt skalowania [5]. W praktyce, dla danego materiału wykonywane są próbki standardowe i małe próbki, a następnie określana jest korelacja pomiędzy wynikami badań wytrzymałościowych. Określoną korelację można odnieść do

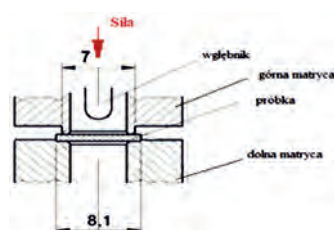
innych próbek tego samego materiału [6].

Wpływ wielkości próbek z materiału 26H2MF, stosowanego na wirniki turbin, w stanie dostawy zaprezentowano na rysunku 5. Na wykresie porównano próbki standardowe (PS), małe próbki „duże” (MD) oraz małe próbki „małe” (MM). Widoczne różnice w parametrach wytrzymałościowych, głównie granicy plastyczności (R_e) oraz wytrzymałości na rozciąganie wynikają z oddziaływania wspomnianego powyżej efektu skalowania.



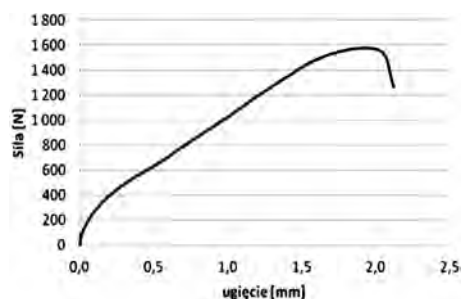
Rys. 5. Krzywe naprężenie – odkształcenie uzyskane w wyniku statycznej próby rozciągania próbek o różnych wymiarach ze stali 26H2MF

Fig. 5. Stress curves obtained from the tensile tests of different size 26H2MF steel samples



Rys. 6. Schemat zamocowania próbek do badań Small Punch Test

Fig. 6. Small Punch Test sample mounting scheme



Rys. 7. Wykres uzyskany w trakcie badań metodą SPT próbki ze stali ferrytycznej

Fig. 7. Graph obtained during SPT of ferritic steel sample

Alternatywną metodą umożliwiającą badania wytrzymałościowe w przypadku ograniczonej objętości materiału jest metoda Small Punch Test (SPT). Badanie polega na obciążaniu okrągłej próbki podpartej na krawędziach, poprzez wciskanie włgłbnika o zdefiniowanej geometrii (Rysunek 6). Do badań stosuje się włgłbnik zakończony kulą (Small Punch Test) lub pierścieniem (Minidisc Bend Test) o zdefiniowanym promieniu wewnętrznym i zewnętrznym. Próbki wykorzystywane do badań SPT zwykle mają postać krążków o średnicy $8 \div 10$ mm

i grubość $0.4 \div 1$ mm. W zależności od wyznaczanych parametrów stosowane są próbki z karbem lub bez karbu [7, 8].

Metoda SPT pozwala na wyznaczenie parametrów, takich jak: granica plastyczności (R_e), wytrzymałość na rozciąganie (R_m), moduł Young'a (E), krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (KIC), krytyczną całkę Rice'a (J), próg kruchości, odporność na pełzanie. Jednakże parametry te wyznacza się na drodze korelacji z wynikami prób standardowych a nie bezpośrednio z badań SPT [9, 10]. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 7.

4. Podsumowanie

Opracowana metodyka cięcia umożliwia pobieranie miniatury próbek w sposób praktycznie nieingerujący w mikrostrukturę materiału oraz nieosłabiający zbytnio konstrukcji wirnika pod względem wytrzymałościowym. Ponadto, opracowana metodyka badań pozyskanych w ten sposób próbek pozwoli na bardziej precyzyjną ocenę stanu zużycia eksploatacyjnego turbin parowych. Rezultatem wdrożenia omawianej technologii w praktyce może być zobiektywizowanie ресурсu międzyremontowego i czasu trwania eksploatacji wirników turbin energetycznych.

5. Literatura/References

- [1] PN-EN ISO 6892-1, Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia
- [2] P. Roberts, I. Dane, "Scoop Sampling for Small Punch Test Method UNI", in CEN Workshop 21 on Small Punch Test Method for Metallic Materials, 2004.
- [3] R. Molak, M. Kartal, Z. Pakiela, W. Manaj, M. Turski, S. Hiller, S. Gungor, L. Edwards, K. Kurzydłowski, "Use of Micro Tensile Test Samples in Determining the Remnant Life of Pressure Vessel Steels", Applied Mechanics and Materials, vol. 7-8, pp. 187-194, 2007. DOI 10.4028/www.scientific.net/amm.7-8.187
- [4] G. Cusanelli, A. Hessler-Wyser, F. Bobard, R. Demellayer, R. Perez, R. Flükiger, "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique", Journal of Materials Processing Technology, vol. 149, no. 1-3, pp. 289-295, 2004. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.047
- [5] R. Molak, M. Kartal, Z. Pakiela, K. Kurzydłowski, "The effect of specimen size and surface conditions on the local mechanical properties of 14MoV6 ferritic-pearlitic steel", Materials Science and Engineering: A, vol. 651, pp. 810-821, 2016. DOI 10.1016/j.msea.2015.11.037
- [6] R. Molak, "Zastosowanie minipróbek do wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów", Rozprawa doktorska (Ph.D. dissertation), Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2011.
- [7] M. Manahan, "A New Postirradiation Mechanical Behavior Test – The Miniaturized Disk Bend Test", Nuclear Technology, vol. 63, no. 2, pp. 295-315, 1983. DOI 10.1318/nt83-a33289
- [8] M. Abendroth, M. Kuna, "Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks", Engineering Fracture Mechanics, vol. 73, no. 6, pp. 710-725, 2006. DOI 10.1016/j.engfracmech.2005.10.007
- [9] T. García, C. Rodríguez, F. Belzunce, C. Suárez, "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test", Journal of Alloys and Compounds, vol. 582, pp. 708-717, 2014. DOI 10.1016/j.jallcom.2013.08.009
- [10] B. Romelczyk, T. Brynk, R. Molak, A. Jastrzębska, K. Nowak, Z. Pakiela, "Magnesium AZ91 Alloy Cast Mechanical Properties Measured by the Miniaturized Disc-Bend Test", Key Engineering Materials, vol. 592-593, pp. 805-808, 2014. DOI 10.4028/www.scientific.net/kem.592-593.805

Łukasz Litwiniuk*, Dorota Sobótko, Grzegorz Szajna, Joanna Szewczul

Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Fotometrii i Radiometrii, Warszawa

Wzorcowanie mierników nadfioletu stosowanych w NDT

Calibration of NDT UV-A meters

ABSTRACT

The paper presents an implemented at GUM calibration procedure for UV-A meters used in NDT for checking the inspection lamps.

The problems related to the various types of available light sources and a way of unified approach to the testing of meters with different sensitivity curve within UV-A range is discussed.

The procedure of estimation of measurement uncertainty is described and components contributing to uncertainty budget are indicated.

Keywords: irradiance, UV-A

STRESZCZENIE

W artykule omówiono opracowaną w Głównym Urzędzie Miar procedurę wzorcowania mierników UV-A stosowanych do kontrolowania lamp inspekcyjnych wykorzystywanych w badaniach nieniszczących.

Przedstawiono problemy związane z różnymi rodzajami spotykanych na rynku promienników oraz metodykę pozwalającą na ujednolicone podejście do sprawdzania mierników o różnych charakterystykach czułości widmowej w obszarze UV-A.

Zaprezentowano przyjętą w GUM procedurę szacowania niepewności pomiaru przy wzorcowaniu i wskazano na czynniki wnoszące swój wkład do budżetu niepewności.

Słowa kluczowe: natężenie napromienienia, promieniowanie UV-A

1. Wstęp

Wśród wielu metod detekcji wad strukturalnych w detalach wykonywanych ze stali i metali lekkich (ale również z ceramiki, tworzyw sztucznych i szkła) dla potrzeb różnych gałęzi przemysłu znajdują się i takie, które opierają się na wykorzystaniu zjawiska fluorescencji cząsteczek odpowiedniego penetranta osadzającego się w najmniejszych zagłębieniach (skazach) na powierzchni badanego elementu. Inne metody wykorzystują zjawisko fluorescencji cząsteczek specjalnych preparatów, którymi napęnia się instalacje przemysłowe poddawane w czasie badania ich szczelności. Miejsce, w którym doszło do wycieku zaczyna świecić, gdy oświetli się je lampą emitującą bezpieczne promieniowanie nadfioletowe zwane skrótowo UV-A. Definicje podawane w różnych źródłach rozmaicie ustalają granice zakresu widmowego tego promieniowania. W Polskich Normach [1,2] jest to 315 do 380 nm lub 315 do 400 nm, w publikacjach Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej [3,4] – 315 do 400 nm, w normach amerykańskich [5,6] „black light” – odpowiednik UV-A – zawiera się w przedziale 320 do 380 nm.

Wymagania zamieszczone w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku w różnych normach amerykańskich poświęconych problematyce badań nieniszczących [6, 7, 8, 9, 10], zastąpionych z czasem innymi normatywnymi publikacjami [11, 12, 13, 14], posłużyły producentom jako materiał wyjściowy do konstrukcji specjalizowanych mierników tzw. światła czarnego, czyli zakresu widmowego odpowiadającego promieniowaniu UV-A, jak też, używanych równolegle w tych samych procedurach kontroli, mierników „światła białego”, aspirujących czasem do miana luksomierzy.

Wychodząc naprzeciw potrzebom krajowych użytkowników mierników UV-A oraz mierników światła białego,

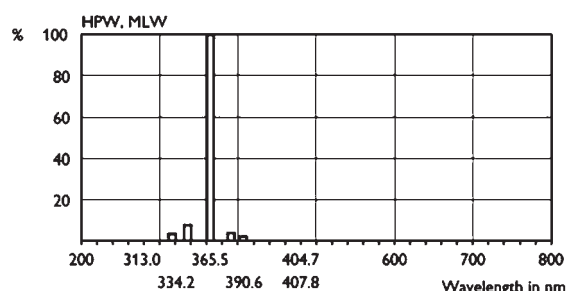
z końcem lat 90-tych ubiegłego wieku w Głównym Urzędzie Miar uruchomiono stanowisko pomiarowe do wzorcowania takich przyrządów.

2. Kalibracja mierników - teoria i praktyka

Sprawdzenie, czy miernik nadfioletu stosowany w badaniach nieniszczących spełnia swoją ważną, choć pomocniczą funkcję, wymaga przyjęcia co najmniej dwóch upraszczających założeń:

- wszystkie lampy kontrolowane przez dany miernik mają jednakową charakterystykę widmową (ten sam względny rozkład widmowy mocy promienistej);
- charakterystyka widmowa czułości detektora nadfioletu ma wyraźne maksimum w punkcie odpowiadającym prążkowi rtęci (365-366 nm) i opada do zera w okolicy punktów 320 nm i 400 nm uznawanych za granice przedziału widmowego UVA.

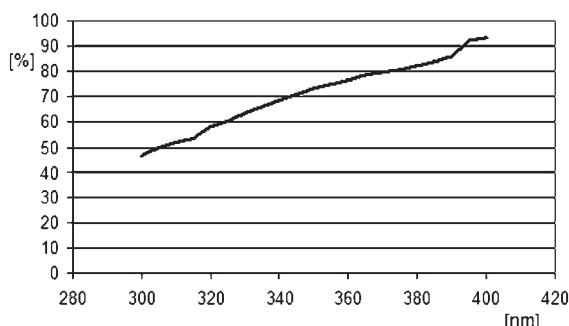
Żadne z tych założeń nie jest w praktyce spełniane. Jeśli chodzi o lampy, to używane są zarówno rtęciowe, jak i specjalnie filtrowane promienniki ksenonowe, a w ostatnich latach również lampy ledowe.



Rys. 1. Dane katalogowe lampy rtęciowej wysokoprężnej typu „blacklight”

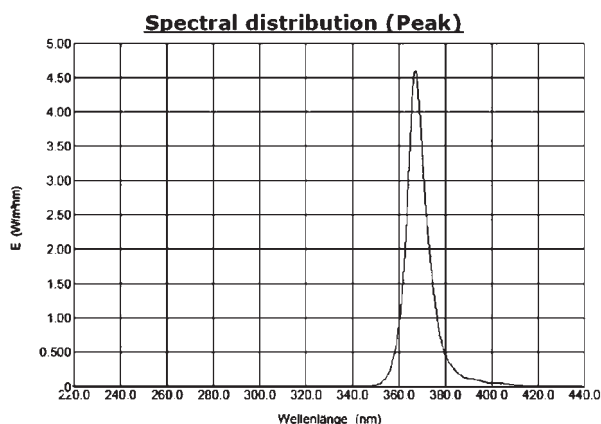
Fig. 1. Specification of the mercury lamp „blacklight”

* Autor korespondencyjny. E-mail: radiation@gum.gov.pl



Rys. 2. Względny rozkład mocy promieniowania lampy ksenonowej krótkoświatowej wysokoprężnej [7] (bez filtra)

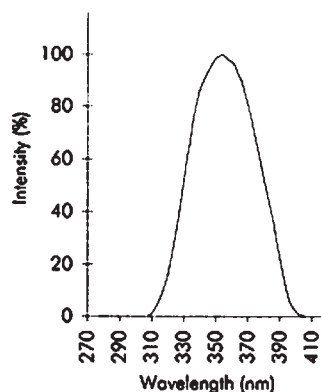
Fig. 2. Relative spectra l power distribution of short-arc high-pressure Xenon lamp [7] without filter



Rys. 3. Względny rozkład mocy promieniowania lampy ledowej [15]

Fig. 3. Relative spectra l power distribution of LED-based lamp [15]

Również w przypadku mierników realizowane przez producentów charakterystyki czułości widmowej detektorów też potrafią się różnić znacznie między sobą (rys. 4-6).



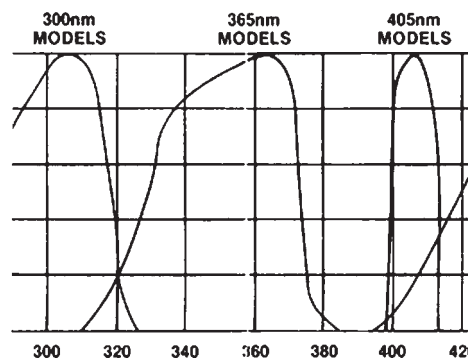
Rys. 4. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących

Fig. 4. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter

3. Przyjęta metoda wzorcowania

Wzorcowania mierników nadfioletu dokonuje się w GUM metodą podstawienia, wykorzystując wzorcowy miernik promieniowania (radiometr piroelektryczny), którego wskazania zostały odniesione do wzorca czułości widmowej dla

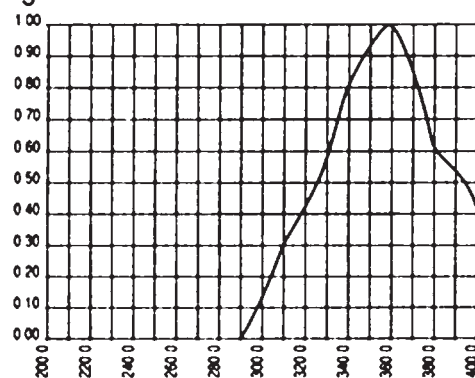
zakresu widmowego (350 – 900) nm. Schemat blokowy stanowiska do sprawdzania mierników nadfioletu stosowanych w badaniach nieniszczących przedstawiony jest na rys. 7.



Rys. 5. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących

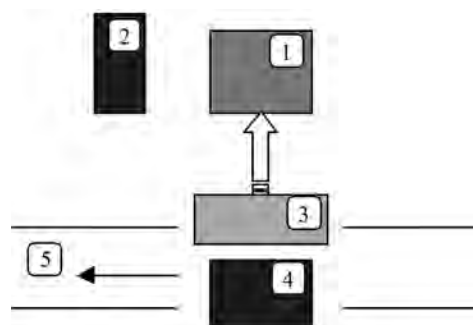
Fig. 5. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter

Die typische Ansprechkurve der Sonde ist folgende:



Rys. 6. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących

Fig. 6. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter

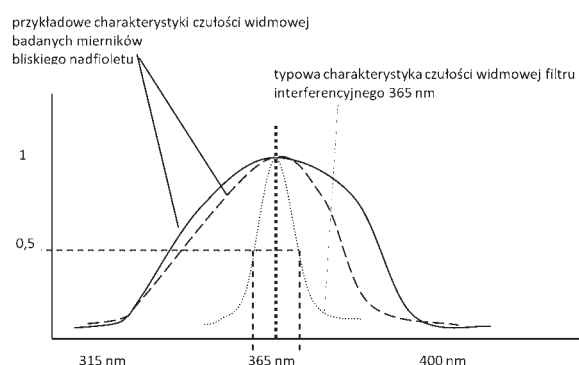


Rys. 7. Schemat blokowy stanowiska do sprawdzania mierników UVA (1 - radiometr odniesieniowy, 2 - miernik sprawdzany, 3 - optyka pomocnicza, 4 - źródło promieniowania nadfioletowego, 5 - przesuw poziomy)

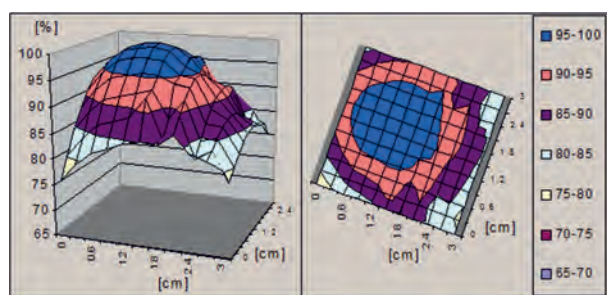
Fig. 7. Block diagram of UVA calibration facility (1 - reference radiometer, 2 - meter under test, 3 - auxillary optics, 4 - UV source, 5 - tranlation stage)

Ze względu na przyjętą powszechnie tradycję stosowania lamp rtęciowych wysokoprężnych wypromieniowujących

większość energii w linii 365 nm i starań producentów do dopasowania do tej długości fali maksimum charakterystyki mierników nadfioletu stosowanych w NDT, wzorcowanie tych mierników sprowadza się do oceny dokładności wskazań badanego miernika przy oświetleniu go wiązką promieniowania o długości fali odpowiadającej temu właśnie maksimum czułości (365 nm). Zastosowane źródło promieniowania charakteryzuje się dominującym udziałem tej właśnie długości fali, ale dodatkowo wykorzystuje się filtry mające za zadanie wycięcie z widma promieniowania lampy wycinka odpowiadającego maksimum czułości widmowej badanego miernika, tak jak to pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Zasada doboru wiązki promieniowania
Fig. 8. The principle of the selection of the radiation beam



Rys. 9. Względny rozkład natężenia napromienienia na płaszczyźnie, w której umieszczone są kolejno głowice detektora badanego i odniesieniowego

Fig. 9. Relative irradiance distribution at the plane where the reference detector and detector under test are placed consecutively

Przy wzorcowaniu dokonywanym w GUM jako promienniki bliskiego nadfioletu używane są takiego samego rodzaju lampy inspekcyjne, jak te stosowane na stanowiskach NDT. Zapewnia to z jednej strony większą spójność warunków wzorcowania z warunkami panującymi w czasie eksploatacji mierników na stanowiskach pracy, ale też powoduje konieczność uwzględnienia wpływu kształtu wiązki wypromieniowywanej przez taką lampę na wartość natężenia napromienienia przyjmowanego w laboratorium za wartość odniesienia. Rozkład natężenia napromienienia w płaszczyźnie powierzchni światłoczułych detektorów jest cyklicznie monitorowany (jako zmieniający się z upływem czasu lub na skutek modyfikacji wprowadzanych w ustawieniu pomocniczego układu optycznego). Przykładowy rozkład natężenia napromienienia pokazany jest na rys. 9. Zastosowanie pomocniczej optyki pozwala na „spłaszczenie” wiązki promieniowania, a poprawka uwzględniana

w czasie porównywania wskazań mierników o różnych polach powierzchni czynnych ich detektorów nie przekracza na ogół 10% wartości sygnału notowanego na mierniku odniesienia.

4. Szacowanie niepewności pomiaru

Wzorcowanie miernika nadfioletu opiera się na porównaniu jego wskazań ze wskazaniami miernika odniesienia przy zachowaniu niezmiennych warunków naświetlania głowic obu mierników.

Rozszerzone równanie pomiaru ma postać:

$$\hat{e} = \bar{E}_w - \bar{E}_b + \mu_w + \mu_{Rw} + \mu_{Rb} + \mu_{Uw} + \mu_{Ub} + \mu_p \quad (1)$$

gdzie:

$\hat{e}$ – estymata wartości prawdziwej błędu wskazania miernika badanego,

$\bar{E}_w$ – średnia arytmetyczna serii pomiarów dokonanych miernikiem wzorcowym,

$\bar{E}_b$ – średnia arytmetyczna serii pomiarów dokonanych miernikiem badanym,

μ_w – poprawka uwzględniająca niepewność pomiaru miernika wzorcowego,

μ_{Rw} – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego,

μ_{Rb} – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika badanego,

μ_{Uw} – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia miernika wzorcowego,

μ_{Ub} – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia miernika badanego,

μ_p – poprawka uwzględniająca zróżnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników.

Równanie niepewności pomiaru ma postać:

$$u_c^2(\hat{e}) = c_1^2 u^2(\bar{E}_w) + c_2^2 u^2(\bar{E}_b) + c_3^2 u^2(\mu_w) + c_4^2 u^2(\mu_{Rw}) + c_5^2 u^2(\mu_{Rb}) + c_6^2 u^2(\mu_{Uw}) + c_7^2 u^2(\mu_{Ub}) + c_8^2 u^2(\mu_p) \quad (2)$$

gdzie:

$u_c(\hat{e})$ – złożona niepewność standardowa błędu wskazania miernika badanego,

$u(\bar{E}_w)$ – niepewność standardowa pomiaru miernikiem wzorcowym,

$u(\bar{E}_b)$ – niepewność standardowa pomiaru miernikiem badanym,

$u(\mu_w)$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej dokładność pomiarów miernikiem wzorcowym,

$u(\mu_{Rw})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego,

$u(\mu_{Rb})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej rozdzielczość wskazań miernika badanego,

$u(\mu_{Uw})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej powtarzalność ustawienia miernika wzorcowego,

$u(\mu_{Ub})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej powtarzalność ustawienia miernika badanego,

$u(\mu_o)$ – poprawka uwzględniająca niedokładność odtworzenia jednakowej odległości głowic od źródła promieniowania

$u(\mu_p)$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej zróżnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników,

$c_1, \dots, c_7$ – współczynniki wrażliwości

$$c_1 = \frac{\delta \tilde{E}_w}{\tilde{E}_w} = 1, \quad c_2 = \frac{\delta \tilde{E}_b}{\tilde{E}_b} = -1, \dots, \quad c_8 = \frac{\delta \tilde{\mu}_p}{\mu_p} = 1$$

Wielkości wejściowe użyte w równaniu pomiaru są charakteryzowane pod kątem ich wkładu do budżetu niepewności w sposób następujący:

$E_w(E_b)$ – natężenie napromienienia zmierzone miernikiem wzorcowym (badanym):

po 15 minutach od włączenia miernika wzorcowego i źródła promieniowania można przystąpić do odczytywania wartości natężenia napromienienia rejestrowanego przez naprzemian oświetlane głowice miernika wzorcowego i badanego dla wybranego aktualnie wariantu osłabienia wiązki oświetlającej; dokonuje się w ten sposób n krotnego porównania wskazań. Z otrzymanych wyników pomiarów $E_{w,i}(E_{b,i})$ wyznacza się wartość średnią natężenia napromienienia $\bar{E}_w(\bar{E}_b)$. Przyjmując normalny rozkład prawdopodobieństwa oblicza się odchylenie standardowe eksperymentalne średniej $s(\bar{E}_w)$ oraz $s(\bar{E}_b)$, które przyjmuje się za estymatę niepewności standardowej średniej arytmetycznej pomiaru obu natężeń, zatem

$$s(\bar{E}_w) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{w,i} - \bar{E}_w)^2}{n(n-1)}} = u(\bar{E}_w) \quad (3)$$

oraz

$$s(\bar{E}_b) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{b,i} - \bar{E}_b)^2}{n(n-1)}} = u(\bar{E}_b) \quad (4)$$

μ_W – poprawka uwzględniająca dokładność wzorcowania miernika wzorcowego:

miernik wzorcowy ma w swoim świadectwie wzorcowania podaną względną niepewność rozszerzoną wzorcowania U_{wzgl} , którą należy wziąć pod uwagę przy konstruowaniu budżetu niepewności pomiarów dokonywanych tym miernikiem. Niepewność ta jest podawana dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$, więc niepewność standardowa tej poprawki o wartości zerowej i rozkładzie normalnym prawdopodobieństwa może być wyliczona jako:

$$u(\mu_W) = U_{wzgl} \cdot \bar{E}_w \cdot / 2 \quad (5)$$

$\mu_{Rw}(\mu_{Rb})$ – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego (badanego):

większość obecnie produkowanych mierników UVA ma wskazanie cyfrowe wartości mierzonej. Z każdym wskazaniem związana jest poprawka wynikająca z określonej rozdzielczości wskazań. Jeżeli rozdzielczość wskazania

natężenia napromienienia odpowiada wartości A , to poprawkę tę można oszacować przy wartościach granicznych odchylen odpowiadających połowie wartości rozdzielczości, zatem równych $a = \pm A/2$. Niepewność standardowa poprawki jest obliczana metodą typu B. Przyjmując, że rozkład prawdopodobieństwa randomizowanej poprawki jest rozkładem prostokątnym oblicza się niepewność standardową poprawki korzystając z zależności:

$$u(\mu_{Rw}) = a_w / \sqrt{3} \quad (6)$$

oraz

$$u(\mu_{Rb}) = a_b / \sqrt{3} \quad (7)$$

$\mu_{Uw}(\mu_{Ub})$ – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia głowic mierników wzorcowego (badanego) względem osi wiązki promieniowania:

ustawianie głowic porównywanych mierników w osi optycznej wiązki promieniowania jest realizowane za pomocą przesuwania źródła przed ustawionymi w jednej płaszczyźnie głowicami. Zapewnienie jednakowych położeń głowic mierników jest możliwe dzięki kontrolowaniu położenia płamek laserów oświetlających głowice od przodu i z góry. Ocenia się, że ze względu na luzy mechaniczne ławy ze źródłem nadfioletu oraz grubość plamki lasera poziomego i pionowego odtwarza się to samo położenie środka każdej z głowic z tolerancją $\pm 0,5$ mm (środki głowic znajdują się wewnątrz okręgu o promieniu 0,5 mm). Z badań własnych rozkładu natężenia napromienienia w płaszczyźnie ustawienia obu głowic wynika, że odpowiada to powstawaniu różnic w rejestrowanym przez nie natężeniu mieszczących się w granicach od $\pm 0,5$ % do ± 5 % wartości aktualnie wskazywanej (każda z kilku konfiguracji osłabiania wiązki charakteryzuje się innym rozkładem powierzchniowym, a więc posiada własne granice zmienności mierzonego sygnału). Niepewność standardową poprawki można zatem obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym i skorzystać z zależności:

$$u(\mu_{Uw}) = (0,005 \div 0,05) E_w / \sqrt{3} \quad (8)$$

oraz

$$u(\mu_{Ub}) = (0,005 \div 0,05) E_b / \sqrt{3} \quad (9)$$

μ_o – poprawka uwzględniająca niedokładność odtworzenia odległości głowic od źródła promieniowania.

Szacuje się, że niedokładność ustawienia w tej samej odległości od źródła promieniowania obu porównywanych głowic nie przekracza $\pm 0,5$ mm i chociaż w praktyce nie udało się zaobserwować zmiany sygnału, przy teoretycznym podejściu wykorzystującym prawo zmniejszania się sygnału z kwadratem odległości, przy założeniu, że odległość zmieni się z 450 mm na 450,5 mm, sygnał zmaleje o 0,2 %.

Niepewność standardową poprawki można zatem obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym i skorzystać z zależności:

$$u(\mu_o) = 0,002 E_w / \sqrt{3} \quad (10)$$

μ_p - poprawka uwzględniająca różnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników. Nawet jeśli przyjąć, że idealnie odtworzy się to samo ustawienie obu głowic względem źródła promieniowania, nie można się ustrzec przed różnicowaniem ich wielkości (rozmiarów powierzchni światłoczułych odbiorników). Z badań własnych rozkładu natężenia napromienia w płaszczyźnie ustawienia obu głowic wynika, że można skorygować odpowiednimi współczynnikami wartość sygnału z głowicy o większej powierzchni, tak aby odpowiadał on sygnałowi rejestrowanemu przez mniejszą powierzchnię drugiej głowicy. Korekcja ta jest źródłem dodatkowego błędu mieszczącego się w granicach $\pm 2,5\%$ sygnału. Niepewność standardową poprawki można obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym, korzystając z zależności:

$$u(\mu_p) = 0,025E_w / \sqrt{3} \quad (11)$$

5. Budżet niepewności

W tabeli 1 przedstawiono przykładowo budżet niepewności wzorcowania miernika nadfioletu stosowanego w badaniach nieniszczących (NDT) w wybranym punkcie zakresu wskazań tego miernika. Podobne obliczenia i budżety wykonuje się dla kilku punktów skali, uwzględniając zmieniające się wartości niepewności poprawek związanych z niedopasowaniem wielkości powierzchni światłoczułych porównywanych mierników i różnymi rozkładami powierzchniowymi natężenia napromienienia na głowicach w zależności od wariantu osłabiania wiązki.

Tab. 1. Przykładowy budżet niepewności wzorcowania miernika
Tab. 1. Sample of calibration uncertainty budget of the meter

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa, mW/cm ²	Rozkład prawdopodobieństwa	Wsp. wrażliwości c_i	Udział w niepewności złożonej $u_i(y)$, mW/cm ²
$\bar{E}_w$	0,612	0,0007	normalny	1	0,0007
$\bar{E}_b$	0,66	0,0036	normalny	-1	-0,0036
μ_w	0	0,0092	normalny	1	0,0092
μ_{Rw}	0	0,0003	prostokątny	1	0,0003
μ_{Rb}	0	0,0029	prostokątny	1	0,0029
μ_{Uw}	0	0,0018	prostokątny	1	0,0018
μ_{Ub}	0	0,0019	prostokątny	1	0,0019
μ_o	0	0,0007	prostokątny	1	0,0007
μ_p	0	0,0088	prostokątny	1	0,0088
$\hat{e}$	-0,048				0,0138

6. Podsumowanie

Samodzielne Laboratorium Fotometrii i Radiometrii w Głównym Urzędzie Miar od ponad 20 lat oferuje krajowym podmiotom wykorzystującym u siebie technikę NDT wzorcowanie mierników bliskiego nadfioletu (jak również "światła białego"). Przedstawione powyżej informacje stanowią podsumowanie zebranych w tym okresie doświadczeń i pokazują "od kuchni" metody służące zapewnieniu rzetelności wystawianych świadectw wzorcowania. Laboratorium GUM bierze udział w porównaniach międzynarodowych europejskiej organizacji EURAMET (Europejskie Stowarzyszenie Krajowych Instytutów Metrologicznych) poświęconych właśnie wzorcowaniu mierników UV-A. Porównania zorganizowano ze względu na rozpoznane na arenie międzynarodowej problemy z jednorodnością ocen tych mierników, dokonywanych przez różne laboratoria wzorcujące. Wyniki porównań pozwolą na skonfrontowanie polskich doświadczeń z doświadczeniami renomowanych laboratoriów europejskich i na dalsze udoskonalanie dotychczasowej procedury wzorcowania i szacowania niepewności przy wzorcowaniu mierników UV-A stosowanych w badaniach nieniszczących w Samodzielnym Laboratorium Fotometrii i Radiometrii w Głównym Urzędzie Miar.

7. Literatura/References

- [1] PN-79/T-06588, Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Promieniowanie nadfioletowe. Nazwy, określenia, jednostki.
- [2] PN-91/E-001005, Technika świetlna. Terminologia.
- [3] CIE 17.4-1987, International Lighting Vocabulary, 4th ed.
- [4] CIE S 017/E:2011 ILV, International Lighting Vocabulary
- [5] ASTM E1209-99, Standard Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Water-Washable Process
- [6] MIL-STD-1949A, Inspection, Magnetic Particle
- [7] MIL-STD-45662A, Calibration Systems Requirements
- [8] MIL-STD-6866, Inspection, Liquid Penetrant
- [9] MIL-I-6868E, Inspection Process, Magnetic Particle
- [10] MIL-STD-271F (SH), Requirements for Nondestructive Testing Methods
- [11] ISO 10012:2003, Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment
- [12] NAVSEA T9074-AS-GIB-010/271, Requirements for Nondestructive Testing Methods
- [13] ASTM E1417, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing
- [14] ASTM E1444, Standard Practice for Magnetic Particle Testing
- [15] PN-91/E-04042/02, Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Iluminaty i źródła normalne.

Anna Adamczak-Bugno¹, Tomasz Gorzelńczyk^{2*}, Aleksandra Krampikowska¹, Mateusz Szymków³

¹Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Kielce

²Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wrocław

³EM Engineering Mateusz Szymków, Wrocław

Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego

Non-destructive tests of fibre-cement materials structure with the use of scanning electron microscope

ABSTRACT

The article presents the proposal for the application of non-destructive microscope method with the use of scanning electron microscope (SEM) with EDS analyzer in fibre-cement boards tests. The tests were conducted on 2 types of fibre-cement boards that underwent various environmental factors (dampness, freezing-thawing) and unusual factors (burning out in the temperature of 230° and setting on fire for 5 and 10 minutes). Interesting results were obtained and they allowed to observe the changes that took place in the microstructure of the tested boards under the influence of various factors.

Keywords: non-destructive testing, fiber-cement board, SEM

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania do badania płyt włóknisto-cementowych nieniszczącą metodę mikroskopową z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) z analizatorem EDS. Badaniom poddano 2 rodzaje płyt włóknisto-cementowych poddanych różnym czynnikom środowiskowym (zawilgoceniu, zamrażaniu-rozmrażaniu) oraz czynnikom wyjątkowym (wypalenia w temperaturze 230°C oraz podpalaniu przez 5 i 10 minut). Uzyskano ciekawe rezultaty badań, które pozwoliły zaobserwować zmiany zachodzące w mikrostrukturze badanych płyt pod wpływem różnych czynników.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, płyty włóknisto-cementowe, SEM

1. Wprowadzenie

Wyroby budowlane z włókno-cementu zaczęto stosować w budownictwie ponad sto lat temu. Ich pomysłodawcą był Ludwig Hatschek, który w roku 1900 opracował i opatentował technologię produkcji lekkiej, wytrzymałej, trwałej i niepalnej płyty azbestowo-cementowej, którą nazwał eternitem. Płyta ta stała się jednym z najbardziej popularnych pokryć dachowych na świecie w XX w. Było tak do momentu, kiedy jednoznacznie stwierdzono, że azbest ma właściwości rakotwórcze. W efekcie zaprzestano ich produkcji oraz stopniowo wycofywano z użytkowania wyroby, a niebezpieczny dla zdrowia składnik zastąpiono zaś bezpiecznymi włóknami. Odwrót taki zapoczątkowano na świecie już w latach 70. ubiegłego wieku, a w Polsce z końcem lat 80. [1,2].

Współczesne płyty włóknisto-cementowe powstają z naturalnych surowców takich jak cement, włókna celulozowe i PVA oraz woda. Znaczną część mieszanki produkcyjnej stanowi cement odpowiedzialny za wiązanie materiału i jego ostateczną trwałość. Celuloza jest wypełniaczem szczelin i dodatkiem zapewniającym odpowiednią ilość wody w procesie wiązania cementu. Włókna z polialkoholu winylowego (PVA) stosuje się natomiast do zbrojenia materiału oraz nadania mu odpowiedniej wytrzymałości. W celu zoptymalizowania właściwości oraz do przyspieszenia procesu wiązania dodawane są wypełniacze neutralne takie jak np.

wapień lub mika.

Materiały produkowane z włókno-cementu są stosowane w budownictwie jako materiał budowlany i wykończeniowy dla elewacji, ścian wewnętrznych oraz dachów [1,2,6-8]. Z uwagi na to, że są wytwarzane z materiałów naturalnych i bezpiecznych, mogą zostać poddane recyklingowi lub zostać zniszczone bez szkody dla środowiska. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe realizacje z wykorzystaniem elewacji wentylowanej, w których jako okładzinę elewacyjną zastosowano płyty włóknisto-cementowe.

Jak wcześniej wspomniano, materiały włóknisto-cementowe posiadają obecnie szerokie spektrum zastosowań w budownictwie, stąd też narażone są na działanie warunków środowiskowych, między innymi takich jak opady deszczu oraz zmiany temperatury, a w szczególności częstym przejściem temperatury przez 0°C w cyklu dobowym (cyklicznym zamrażaniem-rozmrażaniem). Ponadto materiały włóknisto-cementowe, przede wszystkim stosowane jako elementy okładzinowe, narażone są na warunki wyjątkowe, do których należy zaliczyć wysoką temperaturę wywołaną działaniem ognia.

W związku z powyższym, za istotne uważa się prowadzenie badań materiałów konstrukcyjnych uwzględniających warunki środowiskowe i wyjątkowe, na które będą narażone podczas eksploatacji. Badania te powinny zapewniać możliwość kontroli mikrostruktury danego materiału, co umożliwia skaningowa mikroskopia elektronowa [10,11].

*Autor korespondencyjny. E-mail: tomasz.gorzelnyczek@pwr.edu.pl

Warto zaznaczyć, że dotychczas większość badań materiałów wykonanych z włókno-cementu sprowadzała się do określania normowych parametrów fizyko-mechanicznych [3,6]. Spotkać można także rezultaty badań wykonanych z wykorzystaniem metod nieniszczących między innymi metody ultradźwiękowej i metody emisji akustycznej [4,5,9].



Rys. 1. Widok przykładowych elewacji wentylowanych z wykorzystaniem płyt włókniasto-cementowych na budynkach użyteczności publicznej

Fig. 1. Ventilated facade with fiber-cement boards, examples of implementation and civil building

Nowoczesne metody mikroskopowe, zintegrowane z innymi technikami badawczymi, stosowanymi w odniesieniu do materiałów budowlanych umożliwiają udzielenie odpowiedzi na pytania dotyczące mechanizmu reakcji, diagnozy procesu niszczenia, relacji pomiędzy mikrostrukturą i właściwościami użytkowymi [10]. Rozwój metod mikroskopowych, jaki nastąpił w ostatnich latach, zmierza z jednej strony w kierunku maksymalizacji powiększeń i zarazem wizualizacji obiektów o nanometrycznej wielkości, z drugiej strony - do detekcji wszelkich efektów, jakie mogą się pojawić wskutek oddziaływania czynnika penetrującego badany materiał [11].

Elektronowy mikroskop skaningowy jest od wielu lat dostępnym i rozpowszechnionym narzędziem w badaniach mikrostruktury ciał stałych, w tym różnorodnych materiałów budowlanych. Mikroskopia skaningowa pozwala ocenić kształt i wielkość ziaren, morfologię powierzchni, obecność zrostów, wtrąceń, spękań, sposób zabudowy przestrzeni, kształt porów. Główną zaletą metody jest bardzo prosta preparatyka. Próbkę mają postać okruchów lub przełamów. Inną ważną cechą elektronowej mikroskopii skaningowej jest możliwość uzyskiwania bardzo dużych powiększeń, rzędu setek tysięcy razy [12,13].

2. Opis badań

Badaniom poddano dwie płyty włókniasto-cementowe o różnym składzie i zastosowaniu, tj. płyta wodoodporna oraz płyta elewacyjna, oznaczane w dalszej części artykułu odpowiednio literami A i B. Płyty w momencie badania

znajdowały się w stanie powietrzno-suchym oraz były poddane różnym procesom mającym odzwierciedlać warunki środowiskowe (nasączenie przez 24 godziny w wodzie oraz 25 cykli mrożenia-rozmrażania) i warunki wyjątkowe (wypalanie przez 3 godziny w piecu laboratoryjnym w temperaturze 230°C oraz podpalanie palnikiem przez 5 minut i 10 minut). W badaniach wykorzystano wysokorozdzielczy środowiskowy skaningowy mikroskop elektronowy Quanta 250 FEG, FEI z analizatorem EDS, którego widok pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Widok skaningowego mikroskopu elektronowego z analizatorem EDS

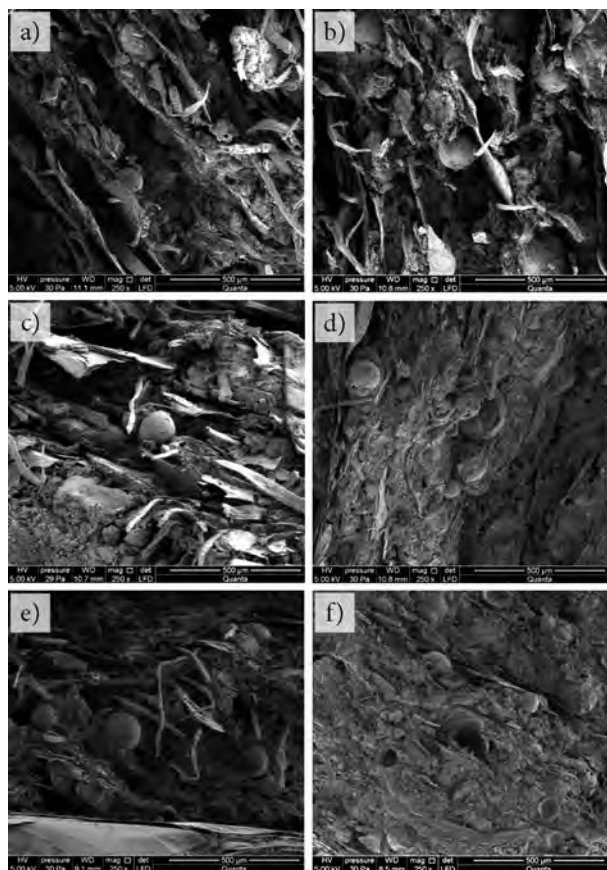
Fig. 2. The view of scanning electron microscope with the EDS analyser

3. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 3 pokazano przykładowe obrazy uzyskane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego dla płyty A.

Na podstawie analizy wyników przedstawionych na rysunku 3 należy stwierdzić, że makrostrukturę każdej z próbek płyty A określono jako zwartą. Podczas obserwacji mikroskopowych struktur próbek określono jako drobno-porowatą o wielkości porów do 50 μm . Na powierzchniach przełamów stwierdzono występowanie głębokich wyżłobień o szerokości do 500 μm . Zaobserwowano duże zagęszczenie nieregularnie rozmieszczonych włókien celulozowych oraz włókien PVA na badanych przełamach (rys. 3a, 3b i 3c), z wyjątkiem próbki wypalanej oraz próbek podpalanych. W próbce podpalanej zaobserwowano, że większość włókien jest wypalona lub wtopiona w matrycę (rys. 3d). Podpalanie zaś powoduje stopniowe wypalanie włókien oraz degradację ich struktury w zależności od czasu działania ognia (rys. 3e i 3f). W każdej z próbek stwierdzono występowanie miki o blaszkowatej budowie oraz nieprzereagowanych ziaren cementu. Zaobserwowano kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach, a także wyżłobienia po wyrwanych ziarnach cementu. Obserwując ziarna cementu na kolejnych przełamach również stwierdzono, że wypalanie oraz stopniowe wydłużanie czasu podpalania powoduje niszczenie ich struktury (rys. 3d, 3e i 3f). Strukturę matrycy określono jako ziarnistą z licznymi rozwarstwieniami. Stwierdzono występowanie przestrzeni pomiędzy włóknami a matrycą oraz między matrycą a blaszkami miki, co wskazuje na słabe wiązanie między tymi elementami. W strukturze matrycy próbek wyróżniono różne formy $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a także „bezpociową” fazę C-S-H oraz zbudowaną z silnie przylegających

cząstek. Nie stwierdzono występowania kryształów ettringitu w żadnej z badanych próbek. W trakcie analizy próbki podpalanej 10 min (rys. 3e) zaobserwowano miejscowo zmienioną strukturę matrycy.



Rys. 3. Obrazy uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego dla płyty A: a) w stanie powietrzno-suchym, b) zawilgocona, c) zamrażana – rozmrażana 25 cykli, d) wypalana w piecu w temp. 230°C, e) podpalana przez 5 min, f) podpalana przez 10 min

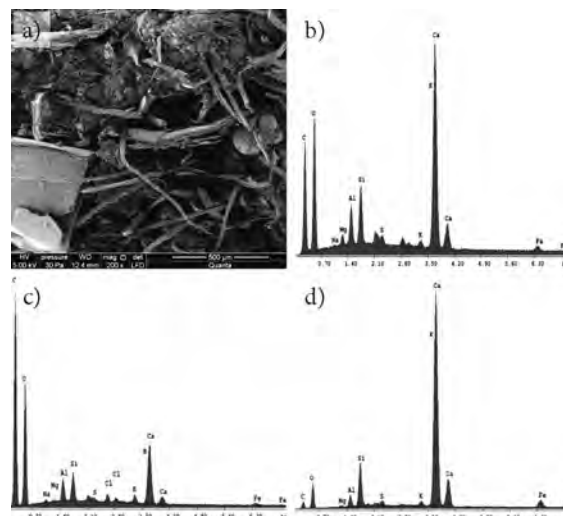
Fig. 3. Images obtained with the use of scanning electron microscope for the board A: a) in air-dry state, b) damp, c) frozen - thawed 25 cycles, d) burnt out in a furnace in the temperature of 230°, e) set on fire for 5 minutes, f) set on fire for 10 minutes

Z kolei na rysunku 4 pokazano przykładowe rezultaty składu pierwiastkowego uzyskane z wykorzystaniem analizatora EDS dla badanej płyty A.

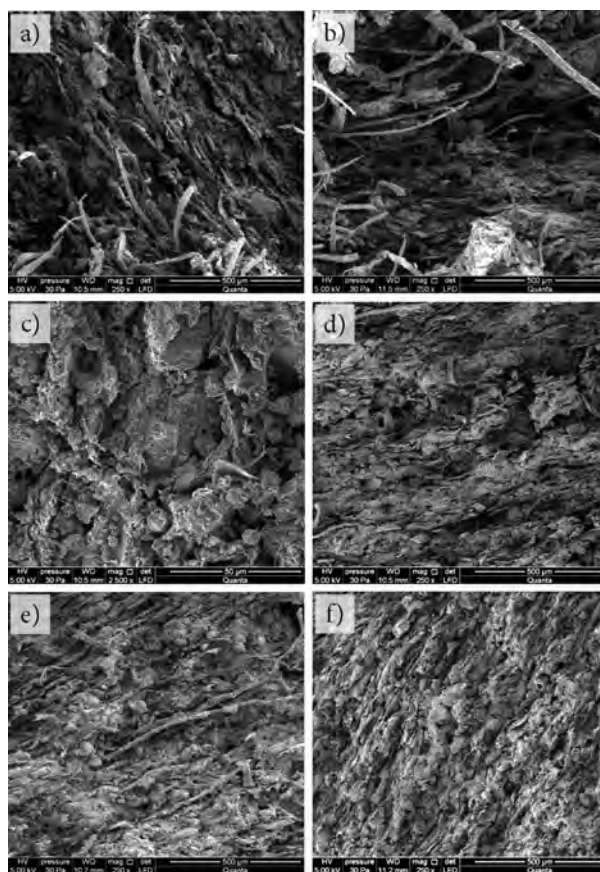
Na podstawie analizy składu pierwiastkowego matrycy próbek stwierdzono obecność pierwiastków wchodzących w skład cementu (rys. 4d). Analizując skład włókien (rys. 4b i 4c), stwierdzono występowanie pierwiastków wchodzących w skład włókien lub częściowo wchodzących w skład cementu, ponieważ powierzchnię włókien, ziaren i blaszek miki pokrywa cienka warstwa matrycy cementowej i produktów hydratacji.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe obrazy uzyskane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego dla płyty B.

Na podstawie analizy wyników przedstawionych na rysunku 5 należy stwierdzić, że makrostrukturę każdej z próbek płyty B określono jako zwartą. Podczas obserwacji mikroskopowych struktur próbek określono jako drobnoporowatą o wielkości porów do 50 µm. Stwierdzono nieregularne



Rys. 4. Rezultaty uzyskane z wykorzystaniem analizatora EDS dla płyty A: a) miejsca analizy składu pierwiastkowego, b) wyniki EDS w punkcie 3, c) wyniki EDS dla pkt. 4, d) wyniki EDS dla pkt. 5
Fig. 4. Results obtained with the use of the EDS analyser for the board A, a) the places of elemental composition analysis, b) results of EDS in point 3, c) results of EDS in point 4, d) results of EDS in point 5

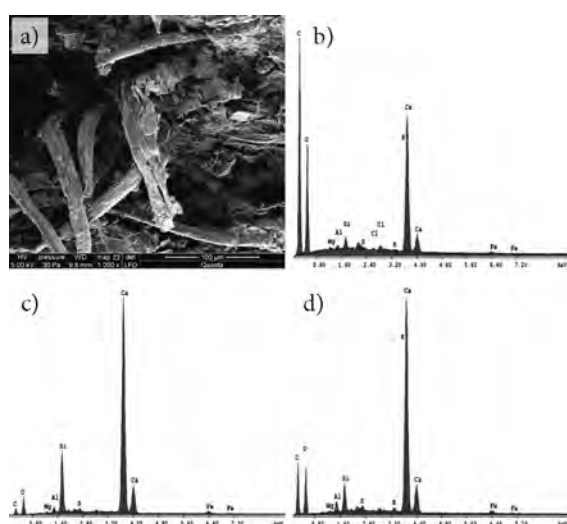


Rys. 5. Obrazy uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego dla płyty B: a) w stanie powietrzno-suchym, b) zawilgocona, c) zamrażana – rozmrażana 25 cykli, d) wypalana w piecu w temp. 230°C, e) podpalana przez 5 min, f) podpalana przez 10 min

Fig. 5. Images obtained with the use of scanning electron microscope for the board B: a) in air-dry state, b) damp, c) frozen - thawed 25 cycles, d) burnt out in a furnace in the temperature of 230°, e) set on fire for 5 minutes, f) set on fire for 10 minutes

rozmieszczenie włókien celulozowych oraz włókien PVA na badanych przełamach. W próbce wypalanej stwierdzono, że większość włókien jest wypalona lub wtopiona w matrycę (rys. 5d). Podpalanie zaś powoduje stopniowe wypalanie włókien oraz degradację ich struktury w zależności od czasu działania ognia (rys. 5e i 5f). Zaobserwowano kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach. Strukturę matrycy dla próbki suchej, moczonej w wodzie i mrożonej określono jako silnie zwartą; występują w niej „kamieniste” struktury o nieregularnym kształcie (rys. 5c). W próbce wypalanej i próbkach podpalanych struktura matrycy ma postać bardziej ziarnistą. Nie zaobserwowano przestrzeni pomiędzy włóknami a matrycą, co wskazuje na silne wiązanie między nimi. W strukturze matrycy próbek wyróżniono różne formy $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a także „bezpостaciową” fazę C-S-H oraz zbudowaną z silnie przylegających cząstek. Nie stwierdzono występowania kryształów ettringitu w żadnej z badanych próbek. W trakcie analizy próbki wypalanej oraz próbki podpalanej przez 10 min (rys. 5d i 5f) zaobserwowano miejscowo zmienioną strukturę matrycy, dodatkowo wyraźnie widoczna była zmiana koloru próbek w skali makroskopowej.

Z kolei na rysunku 6 pokazano przykładowe rezultaty składu pierwiastkowego uzyskane z wykorzystaniem analizatora EDS dla badanej płyty B.



Rys. 6. Rezultaty uzyskane z wykorzystaniem analizatora EDS dla płyty B, a) miejsca analizy składu pierwiastkowego, b) wyniki EDS w punkcie 1, c) wyniki EDS dla pkt. 2, d) wyniki EDS dla pkt. 3
Fig. 6. Results obtained with the use of the EDS analyser for the board B, a) the places of elemental composition analysis, b) results of EDS in point 1, c) results of EDS in point 2, d) results of EDS in point 3

Analizując skład pierwiastkowy matrycy próbek, stwierdzono obecność pierwiastków wchodzących w skład cementu (rys. 6d). Analizując skład włókien (rys. 6b i 6c), stwierdzono występowanie pierwiastków wchodzących w skład włókien lub częściowo wchodzących w skład cementu, ponieważ powierzchnię włókien pokrywa cienka warstwa matrycy cementowej i produktów hydratacji.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania do

badania płyt włóknisto-cementowych nieniszczącą metodą mikroskopową z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) z analizatorem EDS. Badaniom poddano 2 rodzaje płyt włóknisto-cementowych poddanych różnym czynnikom środowiskowym (zawilgoceniu, zamrażaniu-rozmrażaniu) oraz czynnikom wyjątkowym (wypalenia w temperaturze 230°C oraz podpalaniu przez 5 i 10 minut).

Uzyskano ciekawe rezultaty badań, które pozwoliły zaobserwować zmiany zachodzące w mikrostrukturze badanych płyt pod wpływem różnych czynników. Ponieważ autorzy nie spotkali się dotychczas z podobnymi badaniami w literaturze, należy sądzić, że przedstawiona metoda badania materiałów włóknisto-cementowych, a w szczególności płyt poddanych różnym czynnikom środowiskowym i wyjątkowym powinna być dalej rozwijana, bo jest bardzo przydatna z punktu widzenia praktyki budowlanej. Pozwala ocenić stopień zdegradowania mikrostruktury takiego materiału po latach eksploatacji w zmiennych warunkach klimatycznych, a przede wszystkim po wystąpieniu sytuacji wyjątkowych, np. pożaru.

5. Literatura/References

- [1] "Dachówka cementowa EURONIT | CREATON Polska", Euronit.pl, 2017. [Online]. Available: <http://www.euronit.pl>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [2] "Cembrit Holding A/S, Denmark", Cembrit.com, 2017. [Online]. Available: <http://www.cembrit.com>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [3] PN-EN 12467:2013-03E, Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [4] R. Drelich, T. Gorzelańczyk, M. Pakuła, K. Schabowicz, "Automated control of cellulose fibre cement boards with a non-contact ultrasound scanner", *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 55-63, 2015. DOI 10.1016/j.autcon.2015.04.017
- [5] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Non-Destructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards", in 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, October 6-10, 2014.
- [6] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu", *Materiały Budowlane*, no. 10, pp. 27-29, 2015. DOI 10.15199/33.2015.10.07
- [7] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, "Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych", *Materiały Budowlane*, no. 11, pp. 163-165, 2015. DOI 10.15199/33.2015.11.53
- [8] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków, "Elewacje wentylowane", *Architektura Murator*, no. 6, *Warsztat Architekta*, no. 3, pp. 36-53, 2017.
- [9] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, M. Szymków, "Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej", *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, no. 10, pp. 35-38, 2016. DOI 10.26628/ps.v88i10.682
- [10] D. Szponder, K. Trybalski, "Określanie właściwości popiołów lotnych przy użyciu różnych metod i urządzeń badawczych", *Górnictwo i Geoinżynieria*, vol. 33, no. 4, pp. 287-298, 2009.
- [11] A. Kędzior, K. Trybalski, A. Konieczny, "Zastosowanie nowoczesnych metod badawczych w inżynierii mineralnej", *Inżynieria Mineralna*, no. 3, pp. 155-161, 2003.
- [12] A. Stepien, "Influence of lithium silicate on microstructural and mechanical properties of autoclaved silicate products", *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, vol. 111, no. 1-B, pp. 65-72, 2014. DOI 10.4467/2353737XCT.14.084.2534
- [13] W. Nocuń-Wczelik, B. Trybalska, "Scanning Electron Microscopy in the Studies of Hydrated Cementitious Materials Microstructure Formed in the Presence of some Heavy Metals Containing Admixtures", *Solid State Phenomena*, vol. 231, pp. 145-153, 2015. DOI 10.4028/www.scientific.net/ssp.231.145

Gerd Dobmann^{1*}, Christoph König², Uwe Hofmann², Gerald Schneibel³

¹Saar-University, Saarbrücken, Germany

²AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen/Saar, Germany

³Rohmann GmbH, Frankenthal, Germany

Development and qualification of the Eddy-Current testing techniques "EC" and "EC+" in combination with Leeb-Hardness-Measurements for detection and verification of hardness spots on heavy steel plates

Opracowanie i kwalifikacja technik badania wiroprowadowego "EC" i "EC+" w połączeniu z pomiarami twardości Leeba do wykrywania i weryfikacji twardych plam na grubych blachach stalowych

ABSTRACT

Hardness Spots are local areas with increased hardness on the surface of semi-finished or end products in steel manufacturing. The cause of these hardness spots is attributed to effects in the casting or rolling process. As of stochastic nature, only a reliable non-destructive testing (NDT) technique, applied as a 100% surface examination can detect infected areas, of which, the individual hardness value is verified, by performing Leeb hardness measurements, in accordance with the given standard. The NDT-techniques developed by DILLINGER and Rohmann, to detect the hardness spots, are due to an Eddy Current (EC) procedure which in two consecutively developed variants came into application, named EC and EC+. Whereas the EC procedure is asking for shot-blasted surfaces, to remove the rolling skin (scale), avoiding larger scatter in the EC-impedance data, the EC+ procedure is applied without shot blasting. The contribution reports to the systems and the development of an Inspection and Testing Program (IPT) which was qualified, according the guidelines of the British Standards Institution PD CEN/TR 14748. Special emphasis is on the discussion of reliability.

Keywords: NDT, Eddy Current application, hardness spots

STRESZCZENIE

Twarde plamy są miejscami o zwiększonej twardości na powierzchni półproduktów lub produktów końcowych w produkcji stali. Przyczynami ich występowania są przemiany zachodzące w procesie odlewania lub walcowania. Ze względu na naturę stochastyczną, jedynie wiarygodna technika badań nieniszczących (NDT), stosowana w 100% badaniej powierzchni może wykryć zakażone obszary, z których weryfikowana jest indywidualna twardość w wyniku pomiaru twardości Leeba, zgodnie z odpowiednimi normami. Techniki NDT opracowane przez firmę DILLINGER i Rohmann, mające na celu wykrycie twardych plam, wynikają z zastosowania prądu wirowego (ang. Eddy Current), która w dwóch kolejno rozwiniętych wariantach została nazwana EC i EC+. W czasie gdy procedura EC wymaga śrutowania powierzchni, by usunąć zgorzelinę, w celu uniknięcia większego rozproszenia danych impedancji EC, procedura EC+ jest wykonywana bez śrutowania. Procedura jest rozwijana i dedykowana do systemu Programu Kontroli i Testów (IPT), który został zakwalifikowany, zgodnie z wytycznymi British Standards Institution PD CEN/TR 14748. Szczególny nacisk kładzie się na dyskusję na temat niezawodności.

Słowa kluczowe: NDT, zastosowania prądu wirowego, twarde plamy

1. Introduction

The common specification for quality inspection, as an essential part of a contract between a customer and Dillinger Hütte (DILLINGER) as producer of heavy steel plates, for example, as half-finished products, to further produce pipeline tubes, has its basis on long year successful experiences, paired with continuously performed R&D to enhance quality. This specification asks for batch-testing as statistical process-control methodology and cannot detect randomly occurring events, of which the quality features are not part of the continuously controlling. The random occurrence of

hard spots as events, with extremely small occurrence rate during casting and rolling, but with a high impact on quality, therefore, has initiated in DILLINGER the development of a NDT-technique in co-operation with the equipment manufacturer Rohmann GmbH.

In the production of heavy steel plates by DILLINGER, the application of batch-testing for quality testing is based on taking samples, so-called coupons, from one plate, which has about 9 metric tons, per converter heat (about 185 tons). Therefore, DILLINGER's batch is defined by the selection of coupons from one plate in a total of about 20 plates. Different destructive tests, are performed in agreement to a customer specification, which is an essential part of the

*Corresponding author. E-mail: gerd.dobmann@izfp-extern.fraunhofer.de

contract. Besides the performance of standard-tensile-tests, describing, for instance, strength values as usage properties, toughness characteristics are selected by performing Charpy tests and corrosion investigations can be a part of the quality tests, when the specification is asking for [1, 2, 3].

2. Hardness Testing

The mechanical hardness of a material per determination procedure, characterizes the ability of a material to resist plastic deformation performed by a standardized, well-defined indenter, using a well-defined indenting mechanical load. It is therefore a mechanical-technological value and not an intrinsic (physical) material property.

Hardness is mainly influenced by the micro- and macro-structure. At the very beginning of the metallurgical process there is the influence of the chemical composition of the steel iron alloy mixed crystal. The carbon content absolute, in this composition and its spatial distribution, in the product plays a decisive role in combination with time-dependent diffusion- and heat-treatment-processes by cooling-down after casting, reheating before rolling, as well as the thermo-mechanical controlled rolling followed by the cooling after rolling.

As the surface of the steel plate, during this last cooling in the process, on the so-called cooling bed, is directly in contact with the atmosphere, and the bulk stays on a higher temperature, cooling velocities of the surface and the bulk are different, and therefore the microstructures obtained at the surface of the plate and beneath the surface in the bulk material are not to 100% identical. There is a gradient from the surface in the bulk.

The surface microstructure in the condition as rolled and cooled down by nature is harder (bainite and self-annealed martensite) than the microstructure in the bulk (bainite). Therefore, hardness inspection – according to common specifications, is not tested immediately on the surface. Hardness analysis into depth begins not earlier than 1 mm beneath the surface edge of a selected sample (coupon).

Furthermore, during hot rolling, the so-called scale develops, which is a mixture of different iron oxides. The steel expert separates between loose (non-fixed) scale, which can be simply eliminated, for instance by brushing the surface, and the blue-black-colored, fixed, but brittle scale layer, also called rolling skin, influencing the surface hardness with higher hardness values.

Elimination of rolling skin then – if needed - is done mechanically by grinding or shot-blasting or chemically by etching in an acid bath, which is – to give an example - a standard procedure in so-called pickling-lines in case of hot-rolled thin steel sheets before cold rolling.

However, a common specification in heavy plate manufacturing (as an example), asks for a hardness with a maximum hardness requirement of around 201-220 HV10. By specifying this – the hardness measurement procedure (HV means hardness according to Vickers) is defined. This procedure – by nature and standard - is destructively performed on the above-mentioned coupons in the testing laboratory and, in no case, is delivering a hundred-% hardness information

along the surface. Furthermore, the here selected sampling hardness test, per nature, in no case, can reliably detect local hardness changes, which can occur as mentioned above, as hardness spots and random events.

Without going in details, hardness testing is to separate generally into destructive and non-destructive procedures. The destructive tests follow given standards as there are: Vickers hardness testing [4], Rockwell hardness testing [5, 6] and Brinell hardness testing [7, 8]. The difference between them is the choice of the indenter geometry and the applied indenting load.

Non-destructive testing procedures to characterize hardness, based on physical property determination [9, 10], have been developed in the last 3 decades. The various test procedures, in common usage, are generally going back on many well-known physical phenomena which involve the phase velocity of ultrasonic waves (compressive wave and linearly-polarized shear waves) propagating in the thickness direction of the plate, as well as micromagnetic testing (Barkhausen noise, incremental permeability, magnetic field higher harmonic analysis) and electromagnetic testing (eddy current technique/eddy current impedance). When applied on heavy plates, the ultrasonic techniques average the information along the sound path length and – when propagating in thickness direction – they average the micro-structure gradient. Micromagnetic and electromagnetic techniques – by nature of the restricted penetration depth, depending on the operating frequency – cover only surface-near areas, near the material surface. These techniques with their specific inspection data have allowed to develop good correlations with mechanical strength properties, such as yield strength and tensile strength, as well as with hardness. When the inspection data of the different (UT + ET + micro-magnetic) approaches are combined by data fusion algorithms like generic algorithms, multiple regression or pattern recognition algorithms, especially pronounced correlations with high regression coefficients and small residual standard deviations (prediction uncertainties) can be found compared to values determined experimentally using destructive techniques.

However, despite the high predictability, these various test procedures are always indirect measurements, rather than direct measurements of the required hardness property. Therefore, a correlation procedure is always required to calibrate the indirect non-destructive measurements with direct measurements, which must be determined destructively. Hence the absolute destructive measurements act as reference values for the non-destructive measurements, and therefore, the measurement uncertainty cannot be better than the values of the reference technique.

The various measurements for different approaches always must be validated/justified statistically with independently selected validation samples, which are not part of the calibration specimen set. To give an example, in comparison with the Brinell hardness (HBN) measurement as reference for calibration, nondestructively residual standard deviations, characterizing the uncertainty, of ± 4 HBN have been obtained [10].

Currently, no standards for non-destructive hardness measurement/testing, using ultrasonic, micromagnetic or ECT techniques exist. There is an ASTM standard for electromagnetic sorting, i.e. grading, of ferrous materials [11] and it would be possible to apply this methodology, after a recalibration in hardness units, although this is not yet an actual project of ASTM or other consensus standardization bodies.

However, EC Testing is one individual methodological part of micro-magnetic testing and the German Engineering Societies VDE/VDI [12] have compiled guidelines, called 2616, under the acronym QEM - Quantitative Electro-Magnetic Testing (non-standardized methods) which have a pre-normative character. These guidelines are the basis on which the German Iron & Steel Institute (VDEh – Verein Deutscher Eisenhüttenleute) compiles regulations for the delivery of flat products; this includes then eddy current applications too.

The only existing standardized, non-destructive hardness testing procedure is the Leeb test [13], a dynamic test, which measures hardness indirectly as the loss of energy of an indenter, which is accelerated on to the surface of a given test object. The mass of the indenter is accelerated to the surface of the test object and impinges on that surface at defined speed [14], i.e. kinetic energy. The impact creates a plastic deformation of the surface, i.e. an indentation, because of the impact body loses part of its original speed – or energy. It will lose more speed by creating a bigger indentation, which will be the case with soft material. The softer the material, the bigger the indentation, the more loss of kinetic energy. In technical terms, the measurement is implemented by means of an impact body which has a spherical tungsten carbide tip and which is impelled onto the test surface by spring force. Contactless measurements are taken of the speed before and after the impact. This is done by a small permanent magnet embedded into the impact body, which generates an induced voltage by passing an induction coil. The induced voltage is proportional to the speed.

The Leeb hardness, HL, is then calculated, by the ratio of the impact speed to the rebound speed. As the measurement principle is influenced by the elastic properties of the individual material too, and not only by plastic deformation influences, an absolute and generalized conversion to other hardness scales can't be calculated. Instead, conversion from Leeb hardness to other hardness measurements must be performed, for different material classes by experimentation, for instance on well-defined calibration specimens, so-called hardness plates. The paper cited here [14] refers to this methodology and the standard [15] set out the details. However, as the instrument makers are especially interested in a reliable compatibility in calculating one hardness value in another, a lot of R&D work was initiated to develop conversion tables and to integrate them into modern equipment software. These tables – on a first glance – are covering certain material classes. Proceq as developer and distributor of Equotip hard- and software [16], applied by DILLINGER, has performed especially high-valued R&D-work to find reliable conversion functions also for the steel

grades of DILLINGER. In these investigations ([14] is only one example) it was shown, that grinding and polishing procedures before performing Equotip measurements, have stronger influences on the measurement uncertainties, than the above-mentioned elastic property influences.

3. The EC- and the EC+ Procedure

Eddy Current Testing (ECT) is a well-established technique, based on detecting changes in the impedance of a so-called search-coil as sensor. The impedance of that coil is nothing else than its electrical resistance, if the coil is excited (flowed through) by an alternating (time-dependent, sinusoidal, typical 60 kHz frequency) electric current (current flow). The resistance is the ratio between the alternating voltage at the coil pins and the alternating current driving the coil, based on a generator as a source of the current.

The coil with its current flow in its windings, produces an alternating magnetic field, perpendicular to the coil plane (see Fig. 1), the so-called primary field.

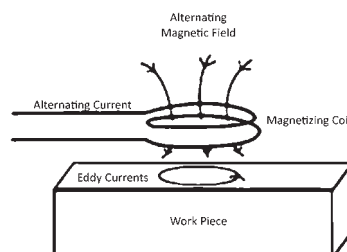


Fig. 1. The ECT phenomenon

Rys. 1. Zjawisko ECT

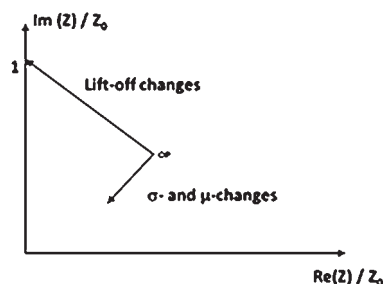


Fig. 2. The normalized impedance plane

Rys. 2. Znormalizowana płaszczyzna impedancji

If the coil is in direct touch, i. e., stand-off distance = 0 (called in the terminology lift-off) with, or near of an electrical conductive material, so-called eddy currents (eddy – because the currents are closed loops) are induced. The higher the electrical conductivity σ , the higher the density of the eddy currents, the more energy is dissipated by heating the material, so-called Ohm's losses. If the material is ferromagnetic steel, then the product of $(\sigma \times \mu)$ is relevant for the energy dissipation and it is much larger, than in case of only conductive materials, as the value of μ is large; beside the electrical losses, in addition, magnetic-ones are to observe.

The eddy currents are coupled with a so-called secondary field (named secondary, because it is a consequence of the primary field due to induction) which is, because of the energy law, in the opposite direction to the primary field.

The superposition of the two fields (primary + secondary) change the impedance of the coil. Every effect, which disturbs the eddy currents in their flow (amplitude and/or direction of flow) changes the coil impedance. The measurement quantity normally is not the impedance, but the voltage at the coil pins, which is directly proportional to the impedance, so far, the current is impressed.

ECT has a wide spread application in defect detection of crack-like surface-breaking defects, for instance in aerospace industries, if their direction disturbs the current flow. However, one class of application is in non-destructive materials characterization, which is based on detecting changes in σ and/or in μ . These principles can be applied to detect variations in surface hardness of metallic materials. Changes in lift-off and shape of the surface (including roughness) produce also measuring effects, as well as coatings, like scale, seen here as disturbing influences, called disturbing noise.

The testing of flat objects uses pick-up inductive coils as absolute coil inspection transducers. As the coil – because of wear protection – must always be, at a certain lift-off from the surface, this actual lift-off, and its changes, when the coil scans the surface, influences the interaction of the primary field with the material. It is trivial, the larger the lift-off, the smaller is the interaction.

If there is an increase in hardness, due to a local harder microstructure, e.g., due to a martensite or bainite microstructure development, as it can be the case of hardness spots on heavy plates, then from the physical basics, it is known: The harder the material is, the lower is the magnetic permeability. Furthermore, the electrical conductivity is reduced since the local harder microstructure has a higher dislocation density and the dislocations are the main scattering centers for the conductive electrons in the eddy current flow field.

The reduction of (σ, μ) , provides an indirect, but accurate possibility, to measure the material hardness influences. Eddy current phenomena are normally discussed in the so-called normalized impedance plane as shown in Fig. 2. The impedance Z of the inspection coil is normalized on the value of the impedance Z_0 which is measured when the coil is not influenced by material, i.e. in the case of a very large lift-off. For a fixed operating frequency and coil design, the impedance has a fixed operation point in this diagram (called here OP). By changing the lift-off, the impedance change is along the lift-off curve in the direction of the value 1 on the imaginary axis. If the σ - and μ -values change, the impedance will change along a direction perpendicular to the lift-off curve. To make the understanding simpler, these curves are shown as exact straight lines. However, there are small deviations from linearity, depending on the coil geometry. The effect, shown in Fig. 2, allows to reduce lift-off variations produced by scanning fluctuations, by the so-called Phase-Selection principle. This is no more than a transformation of the coordinate system by translation of the origin into the operating point OP and rotating of the real axis into the lift-off direction. The σ - and μ -value changes are now indicated along the transformed, new imaginary axis. Large imaginary values indicate mechanically soft material while smaller values indicate harder material.

By calibrating against well-defined reference specimens with known hardness, the system can predict hardness and detect hardness changes; however, this is not yet standardized.

As mentioned before, as the impedance curves of lift-off and the (σ, μ) -changes are not exactly along straight lines, the Phase Selection procedure does not eliminate to 100% the lift-off variations, it only reduces them to a residual noise which influence the measurement uncertainty, i.e. the scatter in the data.

A simple calibration for hardness characterization. i.e. hardness spot detection – following the Phase Selection – is by introducing two threshold values. The first threshold is set at a calibration point on a specially designed calibration plate (chapter 4) where the hardness by reference is 220 HV (as an example), characterizing acceptable, i.e., the specified material surface hardness. Here, the so-called Zero-Compensation is performed, i.e. the coil impedance – due to an electronic circuit – is set exactly in the middle of the equipment screen (Zero-point). The second threshold is set at a reference point on the calibration plate where the hardness by reference is 250 HV (as an example). By tuning an amplifier and selecting a phase rotator the impedance belonging to this calibration point is set downwards from the Zero-point on the imaginary axis on the 50% screen height level.

A technology, to reliably produce calibration test pieces with the special selected reference HV hardness values, was developed by DILLINGER, performing series of ECT-tests together with Rohmann GmbH at heavy plates and coupons. Based on these results, the development of a Test-Equipment by Rohmann was initiated (Fig. 3).

The experiments also revealed, that the ECT-procedure requires, the rolling skin of the test material to be removed by shot-blasting. Fixed scale, influences permeability and conductivity and, unless removed, results in a higher false alarm rate (false-positive indications).

Therefore, a further development of the ECT was asked for. The optimized technique works, by superimposing the normal eddy current flow field, produced by the absolute mode pick-up-coil (60 kHz), discussed before, an additional magnetic yoke magnetization, with magnetizing direction in the rolling (inspection) direction. In contrast to other available systems on the equipment manufacturer market, this magnetic yoke magnetization is not due to a sinusoidal alternating current flow in the magnetizing coils of the yoke. It is a pulse magnetization, utilizing a bipolar rectangular voltage pulse with $V_i = 24 \text{ V}$ [17] in the magnetizing coils of the yoke. The magnetic field is excited in the coils and the yoke, made by a high permeable material is the magnetic circuit, to feed-in the magnetic field flow in the material under inspection (Fig. 4).

The pulse repetition rate as a parameter, can be free selected between 100 – 200 pulses/s (100 – 200 Hz), which allows an inspection speed, in any case, of about 1m/s in walking direction. Due to the pulse excitation, the material under inspection is dynamically and periodically magnetized in a hysteresis loop. The superposition of the magnetic field of the pick-up eddy current coil, placed exactly symmetrically

between the pole shoes of the yoke, is continuously performed, exciting so-called small inner loops inside the hysteresis loop. The eddy current impedance measurement of the pick-up coil then, is triggered at a certain, free selectable, delay time after the moment of the pulse excitation, i.e., at a fixed operating moment during the hysteresis cycle. As the ECT coil is driven by a current source, producing a constant but small incremental magnetic field, influencing the magnetic properties only linearly, the impedance of the pick-up coil is proportional to the inclination of the inner loop, excited by the EC coil at the operation moment, which – according to physics – is the incremental permeability value of the material at this excitation moment. In contrast to the ECT technique, described before and named EC or Eddy, the new method was named EC+ or Eddy+.



Fig. 3. Inspection Trolley
Rys. 3. Wózek inspekcyjny

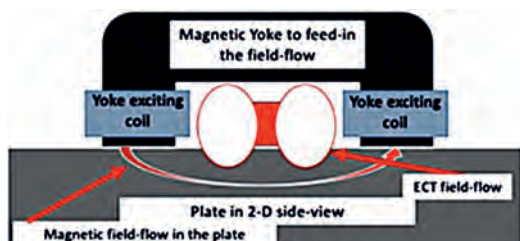


Fig. 4. The EC+ transducer
Rys. 4. Przetwornik EC+

The advantage of the EC+ (Eddy+) technique is its insensitivity against local permeability changes due to the rolling skin. In practical terms, this means, that plates can be inspected, on an industrial scale, without the need to remove the rolling skin, i.e., without the need for prior shot-blasting. In all other respects, the testing procedure is the same as in EC (Eddy) testing.

The Inspection system (Fig. 3) has its base on a linear array of 8 absolute-coil transducers for the EC-procedure which in a time-multiplexing mode are switched to one impedance measurement channel. In the case of the EC+ procedure, the 8 absolute coils are replaced by transducers as shown in Fig. 4. A standard-eddy current equipment, available by Rohmann [18] was used for the system integration into an inspection trolley, movable by wheels, of which the design

was according to DILLINGER design ideas.

4. The Calibration Coupon

By use of carbon powder, locally distributed on the surface of a slab, and reheating the slab at 1200°C, the carbon can diffuse in surface near zones. After rolling the slab in a standard procedure, in the surface, hard spots – based on martensitic microstructure – can be detected after shot-blasting, due to the Eddy-technique (as an example). The plate can be sectioned into coupons, of which the surface after grinding and polishing can be analyzed and described in the test laboratory according to Vickers and Leeb hardness testing

By following this procedure, the calibration coupon for the equipment manufacturer was produced and analyzed, which is shown in Fig. 5. The two calibration points with hardness 200 HV (threshold 1, soft microstructure for Zero compensation) and with hardness 250 HV (threshold 2, hard spot microstructure) clearly are indicated by red circles.

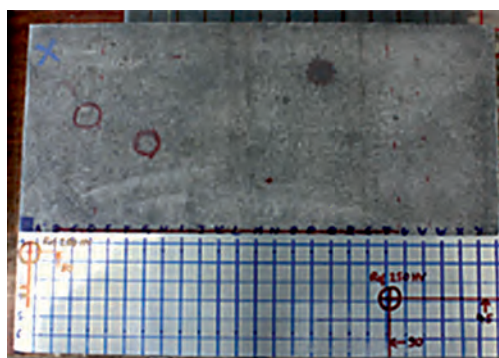


Fig. 5. Calibration Coupon
Rys. 5. Odcinek kalibracyjny

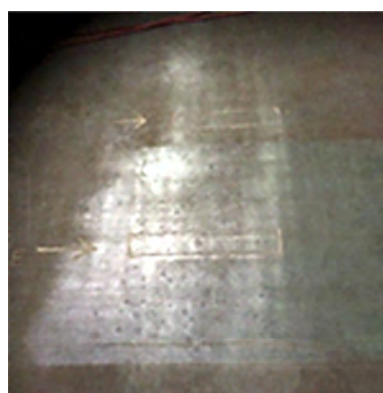


Fig. 6. Control Test Plate No. 8-18314 /3
Rys. 6. Płyta kontrolna nr 8-18314/3

Rohmann has used the Coupon to calibrate each channel of the ECT system, respectively the EC+ systems in the laboratory.

5. The Inspection Testing Program (IPT)

DILLINGER, in co-operation with Rohmann developed a non-destructive Inspection and Testing Program, which is capable of testing 100% of the plate production based on a combination of Eddy Current and Leeb testing on

an industrial scale. EC or EC+ can be applied to identify infected areas of the plate surface where the hardness exceeds a defined threshold. These areas are then tested for Leeb hardness to obtain an absolute hardness value which, following detailed reference calibration experiments, can be converted to Vickers hardness values, to determine, whether the contractual specification is met or not. The advantage of this combined procedure is, that a sensitive detection technique, based on a calibrated Eddy Current Testing is used to set a sensitivity threshold, but the actual evaluation and decision of the given contractual conformity or not (acceptance criteria), is only based on an objective, standardized Leeb hardness measurement, which itself does not therefore require any special qualification procedure.

However, the combination needs a qualification (chapter 7) according European qualification rules [11]. Where, the Eddy Current tests show indications of a transition from a soft microstructure to a hardened-one, the orange lamp alarm is initiated (the lamp light will change from green to orange).

- When the lamp shows orange light, according to the test specification and his training, the inspector is asked to reconfirm the indicated microstructure transition from soft-to-hard by going-back with the inspection system in the soft microstructure region (the green lamp again is indicated). By slowly move the system forward, to reach again the hardened region (the orange lamp switches-on).
- The inspector marks, as accurate as possible, by chalk on the surface, the transition position.
- The test then is further performed in the forward direction; the hardened microstructure is confirmed up to a position, where now the transition is from hard to soft.
- The procedure to mark this position, is the same as before.

The so identified and locally marked, potentially infected area – after having performed the full first side plate inspection – is now tested by Equotip for Leeb hardness determination. By doing this, a further verification/justification of the NDT inspection result - in any case, and independently - is given.

If after local grinding and smoothing (polishing) the Equotip test gives readings larger/equal the threshold agreed with the customer, e. g., 250 HV10 equivalent (as an example), further grinding (by emery paper, 300 µm grinding depth) is performed at the affected zone up to the specified thickness but not exceeding the negative thickness tolerance. Wall thickness is checked using standard ultrasound testing with longitudinal waves and vertical incidence. After grinding and polishing, Leeb hardness is measured again, to verify a new hardness value. If the hardness is within specification and the wall thickness is also within the specified tolerance, the procedure is stopped and the plate is accepted. If the hardness is still too high, further grinding, followed by Equotip measurement is performed. If the minimum wall thickness is reached, but the hardness remains outside specification, the procedure is stopped and the plate is rejected.

6. Control-Testplate for System Performance Check

So far, a heavy plate, is artificially infected, according to the procedure described in the previous chapter, the plate (Fig. 6) can be inspected by the EC or EC+ procedure. The infected hard spot is localized in its lateral dimension (area) by ECT- and verified by Leeb hardness-measurements as described. So, on plate No. 8-18314 / 3 two patches (size 380 × 90 mm²) have been identified and selected, to be representative for performance-checking of the linear sensor array. The patches are chosen in size exactly such, that the inspector can drive with the trolley to their position and can adjust the linear sensor array lengthwise on the patch. Patch S1 is for confirming the soft microstructure (all green lamps are illuminated) and the patch S2 describes hardness values in the hard spot microstructure (all orange lamps are illuminated). According the QM-rules, the System Performance check is asked for, at each beginning and each finishing of inspection of a plate, to confirm the 100% system performance.

7. Inspection reliability and System Qualification

The most important question describing the system reliability is to find a characterization of the false positive and false negative rate in the detection procedure of hardness spots, using EC and EC+. Both, are probability values, and according to the methodology of Bayes [19] one defines:

- The false positive rate, as the probability to find in a very large number of inspection trials the rate of inspection events, where the inspection system indicates a positive infection diagnosis (hardness spot detected) – but – the verification by the Leeb measurement, reveals a so-called “false alarm”.
- The false negative rate, as the probability to find in the same large number of inspection trials the rate of inspection events, where the inspection system has indicated a negative infection diagnosis (the plate shows not any hardness spot) – but a destructive test as reference – e.g., sectioning of many plates into small coupons, of which each is carefully hardness tested – reveals, there are a certain distinct number of plates, which have been infected. As the infection rate of hardness spots, as mentioned before in general, is extremely low, it is obvious: experimental investigations, like the here described, are extremely cost intensive, to identify the representative number of plates to be destroyed for verification.

Therefore, another methodology was chosen, to determine the statistical distributions of the EC impedance values in the sound as well as in the infected material surfaces and to describe statistically the ability to separate both as an intrinsic feature of the testing procedure.

To do this, the trolley system was additionally equipped by the Rohmann company with a position encoder at the rolls. Using this facility, an amplitude versus the scanning coordinate image can be build-up by software. Each of the 8 measuring channels is writing a Line-Scan; the 8 parallel Line-Scans are combined in the PC to an area-image visualizing the amplitude variation in a color-coded scale (C-Scan).

It is interesting to discuss the results obtained at a plate with an artificially produced hard spot. The full C-Scan of a test-run is shown in Fig.7, right-hand-side. In addition, the impedance variation in one channel is documented on the left-hand-side and the Line-Scans of the imaginary part (Y-value) and real part (X-value) are to see in the lower part of Fig.7.

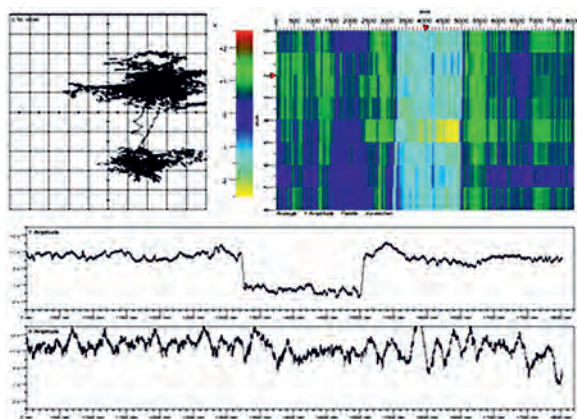


Fig. 7. Scans of a plate with an artificially produced hard spot; on upper right side, full C-Scan, on upper left side, impedance plane, lower part Line-Scans of the imaginary and real impedance parts
Rys. 7. Skany blachy z sztucznie wygenerowanymi twardymi plamami; pełen C-Scan (na górze po prawej) oraz płaszczyzna impedancji (na górze po lewej), dolna część odpowiada części rzeczywistej i urojonej impedancji otrzymanej podczas liniowych skanów

Obviously, the hard spot is clearly indicated, in all three of these individual figures:

- In the full C-Scan a light-blue strip but with a local yellow (very hard) maximum can be found.
- In the impedance plane, significantly two individual point clouds are detected. The upper-one, documents the sound, soft microstructure and its variability. The lower-one, shows the variability of the impedance in the hardness spot area.
- The two-transition path's (soft/hard and hard/soft), which connect both clouds, are to identify.
- The sound, soft microstructure is indicated always with values in the upper half plane. The mean value position of the impedance variations (center of gravity) is to find at (+ 1.5 V, + 0.73 V).
- The variation of the hard spot impedance values is always in the negative half plane. The mean value position (center of gravity) is to find at (+ 1.25 V, - 1.33 V).
- The distance between the two center of gravity has a value of 2.07 V, i.e. ≈ 2 V.

Without a loss in generality two-dimensional Gauss distributions can be assumed in the data statistics of the impedance plane and the standard deviation of the soft microstructure variation is $\sigma_{\text{soft}} = 0.31$ V, in the hardness spot the value is $\sigma_{\text{hard}} = 0.18$ V.

In the Line Scan of the imaginary part (Y-value) of one probe channel (as an example) clearly the hardness transition can be detected. In the real part (X-value) the residual

noise after lift-off-reduction is indicated.

Discussing the separation between the two centers of gravity (2. V) of the distribution functions and the two standard deviations (0.31 V, respectively 0.18 V), it is to conclude that the separation of the gravity centers is: 6.7 times σ_{soft} and 11.5 times σ_{hard} .

Fig. 8 visualizes the relationships as top view on the distributions in the impedance plane. The two centers of gravity, surrounded by each 3σ -bounded, respectively, 6σ -bounded environments are shown. According to statistic laws within the 3σ boundary 99.7 % of the distribution values are to find inside and only 0.3% outside. The 6σ boundary separates 99.9997 % inside from a negligible rest of 0.00034 % outside, or spoken in numbers of one million of registered impedance values, a part of only 3.4 values is to find outside.

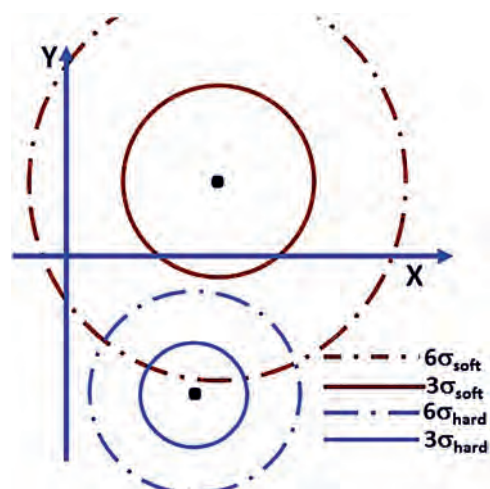


Fig. 8. Separability of the impedance values distributions - hardness spot (blue) versus sound/soft microstructure (red)

Rys. 8. Obszary występowania wartości impedancji - twardych plam (niebieskie) kontra zmięczona mikrostruktura (czerwony)

Obviously, there is some overlapping and exact predictions of the false alarm rate and the false negative rate can only be determined by mathematical numerical integration. However, the center of gravity of the hardness spot is outside the $6\sigma_{\text{soft}}$ - environment and most of its $3\sigma_{\text{hard}}$ environment too. Therefore, the probability to evaluate a sound (soft) microstructure as hard (false positive event, false alarm), according to statistical laws, can be characterized as in the 3.4×10^{-6} range, and the probability to evaluate a hard spot as soft (false negative event) is negligible, vanishing small.

As the testing procedure described in the TIP is not yet standardized, qualification of the combination technology was carried out by DILLINGER under the supervision of an independent NDT expert for both, the EC and the EC+ Procedures. It was carried out in accordance with DIN CEN/TR 14748 [20], which is identical to the document of the British Standards Institution PD CEN/TR 14748:2004 [21]. The performance demonstration as blind tests, which is asked for by the EC Procedure was organized, using 15 inspectors. In the case of the EC+ Procedure, 13 inspectors were involved. Four different plates were selected for testing: (i) shot-blasted plate for system performance-check (EC), (ii) shot-blasted test plate (EC), (iii) plate with rolling skin

for system performance-check (EC+), (iv) test plate with rolling skin (EC+).

The results obtained by the individual inspectors were anonymized and compared with master test results obtained from tests carried out axially in the rolling direction (length detection) and indicated by the 8-channel EC-test-system position, and, laterally, perpendicular to the rolling direction (width detection), from the Equotip-hardness measurements. This allowed both, the inspection reliability of the combination techniques to be determined, and additionally, considered the variability of any human factor influences, as many inspectors have been involved, allowing a statistical evaluation (mean value and standard deviation). The results are documented in Qualification Reports, which are integrated in the QM-handbook. The result reflects – on one hand – the influence of the human beings by discussing the maximal obtained standard deviation $\sigma_{\max}$ in detecting the hardness spot boundaries and the maximal deviation of their mean values $\Delta_{\max}$ mean from the master values. These master values were carefully and independently measured in an open trial by two supervisor inspectors (4 eyes principle). Table 1 summarizes the result for EC and EC+ and Leeb testing:

Tab. 1. Qualification result in hardness spot detection of length and width according to the TIP, EC, EC+ and Leeb in blind tests
Tab. 1. Kwalifikacja wyników detekcji twardości na długości i szerokości zgodnie z testami TIP, EC, EC+ i Leeba

EC length $\sigma_{\max}$	EC+ length $\sigma_{\max}$	EC length $\Delta_{\max}$ mean	EC+ length $\Delta_{\max}$ mean	Leeb width $\sigma_{\max}$	Leeb width $\Delta_{\max}$ mean
156.1 mm	34.4 mm	36.4 mm	13.6 mm	70.2 mm	12.7 mm

It is to assume, that the differences in the result to EC and EC+ are not due to the different techniques, but to the different selected individual inspectors' actual fitness, which all had EC Level 1 and Level 2 qualification.

Reproducibility investigation were performed in the same manner, but with 2 inspectors in an open trial, repeating the test 10 times with the EC+ technique in combination with Leeb testing. The $\sigma_{\max}$ value in EC+ length detection was with 34.2 mm comparable to the value in Table 1, the maximal difference to the master value in hardness spot width detection was with 4.3 mm much smaller.

8. Conclusion

DILLINGER in co-operation with Rohmann has developed a new combination NDT technique, which connect a not yet standardized EC+ procedure, basing on incremental permeability measurements, with the standardized Leeb hardness measurement. The combination technique was evaluated in detail and embedded as well defined and quality-assured procedure with Technical Inspection Plan (TIP) in the standard procedure for customer negotiations and specifications. Based on the TIP, the heavy steel production can be quality tested for the detection of hardness spots on an industrial scale. The technology was qualified according European qualification rules and with this qualification DILLINGER is the 1st heavy plate producer in the

world with the ability to deliver quality according to this specification.

9. Future Trends

DILLINGER is strictly performing the next steps to innovative quality procedures. In the second half of 2017 a fully-automated EC+-test system will be installed; parallel DILLINGER has initiated with the DIN standardization body a consensus standardization project.

10. References/Literatura

- [1] ISO 6892-1:2016, Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature
- [2] ASTM E23-02a, Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials
- [3] NACE TM0284, Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen Induced Cracking
- [4] EN ISO 6507-1:2005, Metallic Materials – Vickers Hardness test – Part 1: Test method
- [5] ISO 6508-1:2016, Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)
- [6] ASTM E18-02, Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
- [7] EN ISO 6506-1-4:2005, Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1 - Part 4: test method, verification and calibration of the testing machine, calibration and reference blocks, table of hardness values
- [8] ASTM E10-14, Standard method for Brinell hardness of metallic materials
- [9] I. Altpeter, R. Becker, G. Dobmann, R. Kern, W. Theiner, A. Yashan, "Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation", Inverse Problems, vol. 18, no. 6, pp. 1907-1921, 2002. DOI 10.1088/0266-5611/18/6/328
- [10] G. Dobmann, R. Kern, B. Wolter, "Mechanical property determination of heavy steel plates and cold rolled steel sheets by micro-magnetic NDT", in 16th World Conference on NDT, Montreal, August 30 – September 03, 2004.
- [11] ASTM E566-99, Standard Practice for Electromagnetic (Eddy-Current) Sorting of Ferrous Metals
- [12] VDI/VDE 2616, Guidelines, hardness testing on metallic materials – Part 1, 2010
- [13] ASTM A956, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products
- [14] S. Frank, J. Sommer, E. Nisbett, "Standardization of Leeb Hardness Method", PMI Just In Case, [Online]. Available: <http://www.pmijustincase.co.uk/Hardness%20-%20The%20Leeb%20Principle.pdf>
- [15] ASTM E140-12b1, Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness
- [16] "Equotip portable metal hardness tester Leeb, Rockwell & UCI | Proceq", Proceq.com, 2017. [Online]. Available: <http://www.proceq.com/compare/equotip-portable-hardness-testing/>. [Accessed: 09- Oct- 2017]
- [17] A. Gopalan, "Principle of EC testing with pulse magnetization", Rohmann GmbH, September 2014.
- [18] ELATEST IS 500, Rohmann GmbH, Manual, April 2015.
- [19] F. Fischer, "Introduction into the Statistical Telecommunication Theory" (in German), B.I. printing house 130/130a
- [20] CEN/TR 14748:2004, Non-destructive Testing. Methodology for the qualification of non-destructive tests (German version), 2015.
- [21] PD CEN/TR 14748:2004, Non-destructive Testing. Methodology for qualification of non-destructive tests (British version), 2004.

Grzegorz Wojas*

Urząd Dozoru Technicznego, Oddział w Warszawie

Nowelizacja normy ISO/IEC 17025 w świetle aktualnych wymagań dotyczących kompetencji laboratoriów badawczych

Revision of ISO / IEC 17025 in accordance with current requirements for the competence of research laboratories

ABSTRACT

The article presents the general directions of the amendment of the standard concerning the competence of research laboratories.

Current status of work, general analysis of change directions, scope of amendment and discussion of the impact of proposed solutions on quality systems requirements for assessing competence of recognized laboratories were presented as well.

The most important changes concern the approach to laboratory activities - testing, calibration, sampling.

This approach is aimed at process activities, the end result of which is quality, and not the way of performing further activities within the research process itself.

One of the expected results is the minimization of documentation, and the key is personnel competence, decision-making and reliability of the results.

Keywords: competence of laboratories, quality of research, amendment of standards PN-EN ISO / IEC17025, research laboratories

STRESZCZENIE

W artykule zostały zaprezentowane ogólne kierunki nowelizacji normy dotyczącej kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących. Przedstawiono aktualny status prac, ogólną analizę kierunków zmian, zakres nowelizacji i podjęto próbę dyskusji wpływu proponowanych rozwiązań na aktualnie stosowane systemy jakości i wymagania przy ocenie kompetencji laboratoriów uznanych.

Najważniejsze zmiany dotyczą podejścia do działań laboratoriów – badanie, wzorcowanie, pobieranie próbek. Podejście to ukierunkowano na działania procesowe, których wynik końcowy stanowi o jakości, a nie sposób wykonywania kolejnych czynności sam w sobie. Jednym z rezultatów zmiany podejścia jest minimalizacja dokumentacji, zaś za kluczowe uznaje się kompetencje personelu, kwestie decyzyjności oraz wiarygodności wyników badań.

Słowa kluczowe: kompetencje laboratoriów, jakość badań, nowelizacja normy PN-EN ISO/IEC17025, laboratoria badawcze

1. Nowa struktura – nowe wymagania

Znowelizowana norma uwzględniła dotychczasowe wymagania, dostosowując ich zakres, treść (podział) do nowej struktury normy zgodnej ze strukturą norm serii ISO 17000 dotyczących oceny zgodności. Wprowadza jednolite podejście do pojęć określających kwestię wymagań – z ang. „shall”, zaleceń – „should”, dopuszczenia – „may” oraz możliwości – „can”. Wymagania zostały uzupełnione i zaktualizowane (terminologicznie) oraz dodano wymagania w odniesieniu do nowych obszarów. Co ważne, stosowane nader często w dotychczasowej treści normy „uwagi”, wprowadzono jako wymagania, zaś te, które pozostawiono – nie stanowią wymagań.

Nowa struktura wymagań normy ISO/IEC 17025 jest zasadniczo odmienna od dotychczasowej, co może powodować pewne trudności przy analizie wprowadzonych w niej zmian, które obejmują podział dotychczasowych wymagań na trzy podstawowe grupy: wymagania dotyczące organizacji, zasobów i procesów. Nową strukturę zilustrowano na rys.1.

1.1 Struktura, organizacja i zarządzanie zasobami

Wymagania dotyczące organizacji laboratorium zostały w projekcie znowelizowanej normy ISO/IEC 17025

przedstawione w trzech oddzielnych grupach tematycznych, jako wymagania dotyczące bezstronności, poufności oraz struktury.

Przedmowa
Wprowadzenie
1. Zakres normy
2. Powołania normatywne
3. Terminy i definicje
4. Wymagania ogólne
5. Wymagania dotyczące struktury
6. Wymagania dotyczące zasobów
7. Wymagania dotyczące procesów
8. Wymagania dotyczące systemu zarządzania
Załącznik A - Spójność pomiarowa
Załącznik B - System zarządzania
Bibliografia

Rys. 1. Struktura znowelizowanej normy ISO 17025

Fig. 1. The structure of the revised standard ISO 17025

*Autor korespondencyjny. E-mail: grzegorz.wojas@udt.gov.pl

Wymagania ogólne w zakresie bezstronności (4.1) i poufności (4.2) są wymaganiami zaczerpniętymi z pozostałych aktualnych norm ISO serii 170XX. Treść tych wymagań, wspólna dla norm obszaru oceny zgodności, stanowi znaczące poszerzenie i uszczegółowienie dotychczasowych wymagań normy ISO/IEC 17025. Nie pozostaje jednak niezauważalny fakt, iż opisanie wymagań w tym obszarze w odrębnych podrozdziałach, stanowi o szczególnym ich znaczeniu przy spełnieniu wymagań znowelizowanej „siedemnastki”.

Wymagania w obszarze organizacji pozwalają na pewną elastyczność laboratorium odnośnie ustanowienia struktury organizacyjnej, tj. powoływania funkcji kierownika ds. jakości czy kierownictwa technicznego, oraz stopnia udokumentowania procedur systemu zarządzania. Dopuszczalna elastyczność w tych zakresach dotyczy umiejscowienia i formy działalności laboratorium – czy jest ono odrębnym samodzielnym podmiotem, czy częścią innego, większego podmiotu.

W nowej normie brak jest wymogu wskazania funkcji kierownictwa technicznego, kierownika ds. jakości i przypisania im zadań w SZ, wyeliminowane zostało pojęcie i zadania „najwyższe kierownictwo”, „kierownik laboratorium”. W zamian wprowadzono wymaganie zidentyfikowania „kierownictwa ponoszącego pełną odpowiedzialność za laboratorium” (5.2). Innymi słowy, zadania najwyższego kierownictwa przypisano kierownictwu laboratorium. Przeniesienie de facto poziomu zarządzania na niższy szczebel pozwoli na sprawniejsze podejmowanie decyzji operacyjnych, a także niejednokrotnie kłopotliwe – podpisywanie dokumentów choćby upoważnień do wykonywania czynności i badań przez najwyższe kierownictwo organizacji.

W znowelizowanym dokumencie nie znajdziemy już wymagań odnośnie struktury dokumentacji (deklaracja polityki jakości, księga jakości, procedury). Pozostaje jedynie konieczność określenia i udokumentowania zakresu działalności laboratoryjnej w obszarze którego spełnione są wymagania normy odniesienia - wymaganie (ogólne) dotyczące udokumentowania procedur. Laboratorium powinno udokumentować swoje procedury w zakresie / stopniu koniecznym dla ich spójnego stosowania w działalności i zapewnienia „validity results” (5.4) – czyli udokumentowania przydatności do zastosowania w działalności laboratoryjnej.

Laboratorium powinno posiadać właściwie udokumentowany system działalności (5.5) – w formie zapewniającej spełnienie warunków nowej normy 17025, a więc w stopniu zapewniającym spójne i powtarzalne działania oraz przydatność wyników do zastosowania zgodnie z przeznaczeniem, zaś personel (5.6) powinien posiadać uprawnienia i zasoby do zapewnienia wymaganej przydatności działalności laboratoryjnej do zamierzonego zastosowania.

Znowelizowane wymagania normy ISO/IEC 17025 jednoznacznie identyfikują zasoby laboratorium, decydujące o jakości prowadzonej działalności laboratoryjnej i wskazują oczekiwania odnośnie do zarządzania tymi zasobami. Zagadnieniem istotnym i kluczowym był i pozostaje Personel (6.2.) To od jego kompetencji, które powinny być szczegółowo

udokumentowane dla wszystkich czynności (6.2.1.) zależy niejednokrotnie końcowy wynik badań. Znowelizowana norma wprowadza wymaganie raportowania przez personel do kierownictwa laboratorium nt. prowadzonej działalności i potrzeb w zakresie doskonalenia, zaś te działania powinny być odpowiednio udokumentowane (6.2.5.).

Wyposażenie stosowane do badań (6.4.) podlega wymaganiom, które w znowelizowanym wydaniu jedynie uporządkowano i doprecyzowano w kontekście zapisów. W tym obszarze pojawia się jeszcze nowa konfiguracja dotycząca zapewnienia spójności pomiarowej z uwzględnieniem aktualnej koncepcji spójności pomiarowej w metrologii (6.5.) oraz wymagań odnośnie usług zewnętrznych i dostaw (6.6.), która łączy w sobie dotychczasowe wymagania w zakresie zakupów i podwykonawstwa.

Kluczowa zmiana obejmująca zagadnienia spójności pomiarowej i sposobów jej zagwarantowania, poprzez nieprzerwany łańcuch wzorcowań ma zapewnić odniesienie do jednostek układu SI, określając trzy możliwości (6.5.2) – wzorcowanie, odniesienie do certyfikowanych wzorców odniesienia CRM lub bezpośrednią realizację jednostki miary SI przez porównanie pośrednie lub bezpośrednie z wzorcem państwowym.

Gdy zaś wykazanie spójności pomiarowej w odniesieniu do Systemu SI jest technicznie niemożliwe, dopusza się użycie certyfikowanej wartości CRM wytwarzanych przez kompetentnych RMP – wg ISO 17034 bądź poprzez wyniki referencyjnych procedur, metod lub uzgodnionych wzorców, szczegółowo opisanych i zaakceptowanych przez właściwe organizacje.

1.2 Elementy zarządzania procesowego

Podejście procesowe, właściwe dla systemu zarządzania wg normy ISO 9001 znalazło odzwierciedlenie w nowelizacji normy ISO/IEC 17025 dotyczącej kompetencji laboratoriów. Znowelizowana norma określa elementy procesu badań i/lub wzorcowań oraz pobierania próbek poddawanych następnie badaniom lub wzorcowaniu. Projekt znowelizowanej normy prezentuje podejście procesowe. Z jednej strony identyfikuje elementy procesu i ich powiązania, z drugiej, poprzez sformułowanie wymagań, gwarantuje, że wyniki jednych działań są przydatne do realizacji kolejnych z nimi związanych, tworząc tym samym spójny łańcuch powiązań zapewniających skuteczność procesu. Zastosowanie w praktyce działalności laboratorium podejścia procesowego w systemie zarządzania ułatwia załącznik informacyjny do normy, który graficznie obrazuje proces badania / wzorcowania wraz z elementami wspierającymi ten proces, tj. zasoby, zarządzanie danymi i informacją, zapisy techniczne i system zarządzania.

1.3 Zarządzanie ryzykiem w laboratorium

Zarządzanie ryzykiem towarzyszy obecnie każdej działalności, w tym również związanej z oceną zgodności. Elementy dotyczące ryzyka w działalności laboratoriów zostały uwzględnione przy nowelizowaniu normy ISO/IEC 17025.

Zupełnie nowe wymaganie to wdrożona zasada podejmowania decyzji (7.9). Gdy przedstawiane jest stwierdzenie zgodności ze specyfikacją lub normatywym, laboratorium

powinno udokumentować zastosowaną zasadę podejmowania decyzji z uwzględnieniem poziomu ryzyka (tj. błędnej oceny zgodności lub niezgodności, z zastosowaniem metod statystycznych), a także regułę opisującą, jak wartość niepewności wyniku pomiaru będzie uwzględniana przy stwierdzaniu zgodności z wyspecyfikowanymi wymaganiami.

W projekcie nowelizowanej normy zawarto wymagania dla laboratorium w zakresie planowania i realizowania działań mających na celu identyfikowanie ryzyka i możliwości, zwracając przy tym uwagę, że samo laboratorium jest odpowiedzialne za podejmowanie decyzji - jakie ryzyka i możliwości będą identyfikowane w jego działalności. Płyne stąd wniosek, że laboratoria spełniając wymagania ISO/IEC 17025, świadczyć będą niejako poszerzony zakres usług. W efekcie będą one nie tylko przekazywać wynik, który jest wiarygodny i rzetelny, ale też taki, który posiada wszystkie cechy, dzięki którym zlecający przy podejmowaniu w oparciu o nie decyzji, będą mieć podstawę do wyciągania wniosków czy też stosowania regulacji prawnych. Znowelizowana norma prowadzi do wspomaganie klienta przez laboratorium poprzez pełną interpretację wyniku i ocenę ryzyka związanego z jego wiarygodnością. A więc – zaryzykować można stwierdzenie, że laboratorium stanie się nie tylko laboratorium, ale organizacją ekspercką i doradcą.

Stosowane dotąd pojęcie opinii i interpretacji wyniku zastąpiono stwierdzeniem zgodności (7.8.5) w taki sposób, by jasno identyfikować, do jakich wyników odnosi się dane stwierdzenie i które specyfikacje, normatywy bądź ich części są/nie są spełnione oraz zasadę podejmowania decyzji (o ile nie wynika ona z wymaganej specyfikacji lub normatywu). Końcowe interpretacje powinien wydawać kompetentny personel do tego upoważniony.

Co ważne - jeżeli zasada podejmowania decyzji nie jest określona przez klienta, regulatora lub dokument normatywny, stwierdzenie zgodności ze specyfikacją lub normatywem laboratorium powinno udokumentować i stosować zasady podejmowania decyzji z uwzględnieniem poziomu ryzyka (błędnej oceny zgodności lub niezgodności, z zastosowaniem metod statystycznych). Powyższe wymagania nie mają zastosowania przy badaniach prowadzonych wg ISO/IEC 17020 i 17065.

Poza elementami systemu zarządzania, dla których znowelizowana norma ISO/IEC 17025 wskazuje wymagania dotyczące ryzyka i możliwości (bezzstronność, przedstawianie wyników, zarządzanie pracą niezgodną, działania korygujące i przegląd zarządzania), norma formułuje nowe wymaganie dedykowane ogólnie działaniom podejmowanym w laboratorium w odniesieniu do ryzyka i możliwości, ustalając zakres wymaganych działań oraz ich cel. Działania laboratorium związane z ryzykiem powinny być, w rozumieniu znowelizowanych wymagań normy ISO/IEC 17025, procesem ciągłym, który wspiera osiąganie przez system zarządzania zamierzonych celów, dostarcza informacji o spełnianiu ustanowionych kryteriów, zapobiega błędom i niepożądanym sytuacjom oraz wspiera ogólnie pojęte doskonalenie.

2. Dostosowanie wdrożonego systemu do nowych wymagań

Ten obszar znowelizowany dokument reguluje dość łatwo i sposób dostosowania pozostawia w gestii kierownictwa.

Kluczowym kryterium jest aktualny stan wdrożenia normy PN-EN ISO/IEC 17025, czy i w jakim zakresie norma jest wdrożona w danym laboratorium bądź czy dopiero norma planowana jest do wdrożenia. Drugim aspektem decydującym o sposobie dostosowania się do wymagań znowelizowanej normy jest miejsce laboratorium w organizacji. Jedno podejście powinno zastosować laboratorium, które prowadzi działalność jako część większej organizacji prowadzącej działalność inną niż badania/wzorcowania (wdrożona norma ISO 9001 lub potrzeba klientów/stron zainteresowanych dotycząca wykazania zgodności z ISO 9001), inne – laboratorium funkcjonujące jako oddzielna organizacja. Zakres dostosowania w zależności od podejścia precyzyjnie określono w rozdziale 8 normy i w załącznikach.

3. Podejście do nowych wymagań

UDT realizuje zadania związane z wykonywaniem dozoru technicznego w zakresie określonym w ustawie z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (Dz. U. z 2015 r. poz. 1125) [3] jako jednostka inspekcyjna typu A, spełnia wymagania normy PN-EN ISO/IEC 17020:2012, co potwierdza certyfikat akredytacji nr AK 001, wydany przez Polskie Centrum Akredytacji.

Zadania UDT jako jednostki inspekcyjnej, to m.in.:

- badanie urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu w fazie ich eksploatacji;
- dozór nad naprawami i modernizacją urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu;
- dozór nad wytwarzaniem urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu i nie objętych dyrektywami UE;
- uprawnianie zakładów w zakresie: wytwarzania urządzeń technicznych, ich elementów oraz materiałów naprawiania i modernizowania urządzeń technicznych
- uznawanie laboratoriów przeprowadzających badania niszczące i nieniszczące wytwarzanych, montowanych, naprawianych lub modernizowanych urządzeń technicznych;

Działalność UDT prowadzona w ramach jednostki inspekcyjnej oraz jako jednostki notyfikowanej do wielu dyrektyw, korzysta niejednokrotnie z wyników badań dostarczanych przez Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego. Ustawa o dozorcze technicznym stwarza również możliwości wykorzystywania wyników badań wykonywanych przez laboratoria uznane, a więc spełniające wymagania określone w art. 9 ust. 2, czyli m.in. posiadające system jakości zgodny z Polskimi Normami, zatwierdzony i nadzorowany przez organ właściwej jednostki dozoru technicznego.

Działalność inspekcyjna może pokrywać się z badaniami i działalnością certyfikacyjną tam, gdzie te działalności mają wspólne cechy (patrz Wprowadzenie, ISO/IEC 17020). Na przykład, sprawdzenie wyrobu i badanie tego samego wyrobu mogą być podstawą dla określenia zgodności w procesie inspekcji. Zaleca się zwrócenie uwagi, że ISO/IEC 17020 określa wymagania dla jednostek przeprowadzających inspekcję, natomiast stosowną normą mającą zastosowanie do jednostek wykonujących badania jest ISO/IEC 17025 [4].

Dodatkowe obszary działalności prowadzone są w oparciu o szereg wymagań regulatora są również akredytowane przez PCA w świetle wymagań dla jednostek oceniających zgodność do dyrektywy 2014/68/UE i/lub 2014/29/UE [5].

Potwierdzenie kompetencji laboratorium i ich uznanie przez UDT jest i będzie nadal realizowane w oparciu o wymagania normy 17025. Po wdrożeniu normy przez PKN jako polskiej normy nastąpi także dostosowanie postanowień Informatora [6]. Podkreślić jednak należy, iż w gestii zespołu oceniającego w ramach postępowania o uznanie kluczowym są i pozostaną zagadnienia związane z „trójkątem” NDT – tj. personel, wyposażenie i procedura.

4. Podsumowanie

W znowelizowanych postanowieniach normy jednoznacznie wyróżniono wymagania, wskazano możliwości, dopuszczenia oraz zalecenia. Treść normy wskazuje również cele, które powinny być osiągnięte przez laboratorium przy realizacji poszczególnych etapów działalności laboratoryjnej. Nie bez znaczenia są także kwestie konieczności zmian dostosowawczych postanowień systemu zarządzania w odniesieniu do: bezstronności oraz poufności w działalności laboratorium, struktury (organizacji), działań dotyczących ryzyka i możliwości/szans, usług zewnętrznych i dostaw, podejmowania decyzji o zgodności wyników z wymaganiami, strategii dotyczącej zapewnienia spójności pomiarowej i monitorowania jakości wyników. Jedną z kluczowych

zmian w nowelizacji jest wymóg posiadania kompetencji do podejmowania decyzji o zgodności/ niezgodności wyniku z wymaganiami z uwzględnieniem ustalonego poziomu ryzyka wydania fałszywej decyzji.

Te same wymagania będą obowiązywały UDT jako jednostki realizującej swoje działania w oparciu o przepisy i wymagania dokumentów odniesienia, zatem ich spełnienie przez laboratoria uznane będzie weryfikowane w stopniu zapewniającym pełne potwierdzenie kompetencji technicznych i spełnienie wymagań nowego wydania normy.

5. Literatura/References

- [1] PN-EN ISO/IEC 17025:2005, Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [2] PCA info, Polskie Centrum Akredytacji, no. 15, August 2017. [Online]. Available: https://www.pca.gov.pl/gfx/pca/userfiles/_public/wydawnictwa/pca-info_15.pdf
- [3] Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 maja 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o dozorze technicznym (Dz. U. z 2017 r., poz. 1040)
- [4] ILAC-P15:07/2016, Zastosowanie ISO/IEC 17020:2012 w akredytacji jednostek inspekcyjnych.
- [5] DAN-03, Akredytacja do celów notyfikacji w odniesieniu do dyrektywy 2014/68/UE w sprawie urządzeń ciśnieniowych oraz dyrektywy 2014/29/UE w sprawie prostych zbiorników ciśnieniowych.
- [6] "Zasady uznawania laboratoriów", UDT, Warszawa, Informator, 2 kwietnia 2015 r., [Online]. Available: http://www.udt.gov.pl/images/CLDT/INFORMATOR_2015.doc

Bogusław Olech

Redakcja Biuletynu PTBNiDT, SIMP

Z życia Oddziałów: SZCZECIN

Wydarzenia

W dniach 10 – 12. maja PTBNiDT O/Szczecin był współorganizatorem XXVII Forum Diagnostyki. Forum zorganizowaliśmy w Międzyzdrojach. „Ojcem Chrzestnym” Forum Diagnostyki jest Kolega Redakcyjny dr inż. Ryszard Nowicki. Forum stanowi obszar spotkania głównie praktyków z przedstawicielami świata nauki. W przeważającej większości uczestnikami Forum są pracownicy odpowiedzialni za utrzymanie ruchu zakładów, zajmujący się efektywnym wykorzystaniem systemów nadzoru stanu maszyn ważnych dla wyniku ekonomicznego przedsiębiorstwa, optymalizacją systemu utrzymania ruchu, a także diagnostyką i optymalizacją procesów produkcyjnych.

Celem Forum jest :

- 1) Podnoszenie wiedzy z zakresu diagnostyki stanu technicznego maszyn i urządzeń, a także diagnostyki i optymalizacji realizowanych procesów produkcyjnych.
- 2) Prezentacja metod wzorowego projektowania systemów wspomagania zarządzania majątkiem oraz analiz efektywności ich wykorzystania (z uwzględnieniem poziomu monitorowania i diagnostyki), a także optymalizacja systemów utrzymania ruchu.
- 3) Umożliwienie prezentacji/upowszechnienia wyników badań diagnostycznych prowadzonych przez Zakładowe Zespoły Diagnostyczne oraz niezależne Serwisy Diagnostyczne.
- 4) Umożliwienie bezpośredniej wymiany doświadczeń specjalistom służb odpowiedzialnych za nadzór maszyn i urządzeń z różnych zakładów.
- 5) Prezentacja strategii i dokonań zakładów w zakresie zabezpieczenia, monitorowania i diagnostyki stanu technicznego użytkowanego parku maszynowego.
- 6) Prezentowanie i dyskusja problemów diagnostycznych, których jednoznaczne rozwiązanie wykracza poza

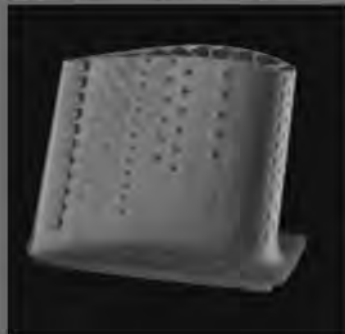
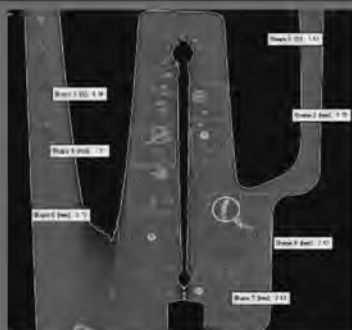
RADIOGRAFIA CYFROWA – WYDANIE STACJONARNE I MOBILNE

MOTORYZACJA – ODLEWNICTWO – LOTNICTWO – DIAGNOSTYKA

YXLON

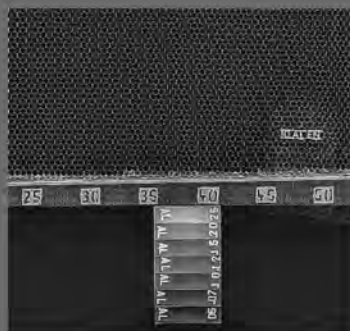
Stacjonarne systemy badawcze

- Radioskopia
- Radiografia cyfrowa
- Tomografia komputerowa
- Lampy rentgenowskie
- Rozwiązania dedykowane



YXLON International GmbH

- Lider stacjonarnych systemów przemysłowych 2D
- Najbardziej wydajne systemy badań tomografii komputerowej
- Najlepszy na rynku system filtracji na żywo Y.HDR
- Obrazy referencyjne ASTM do wszystkich materiałów
- Uniwersalny i dopracowany w każdym szczególe
- Niezawodny, precyzyjny i trwały



NOVO DR Ltd.

- Największy obszar aktywny do wymiarów obudowy
- Najmobilniejszy system radiografii cyfrowej
- Możliwość pracy do 16h bez zasilania
- Proste i szybkie badania

NOVO

Digital Radiography

Przenośna radiografia cyfrowa

- Ultralekkie detektory - tylko 1,5 kg
- 16 - bitowa skala szarości
- Intuicyjny software w języku polskim
- System bezprzewodowy do 400 m
- Dopuszczalne obciążenie do 200 kg



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



możliwości Zakładowych Zespołów Diagnostyki, Służb Utrzymania Ruchu oraz Serwisów Diagnostycznych,

- 7) Upowszechnianie nowoczesnych metod wspomagania zarządzania stanem technicznym maszyn i urządzeń, a także diagnozowania i optymalizacji procesów w reżimie „on-line”.
- 8) Upowszechnianie wiedzy na rzecz poprawności interfejsowania systemów nadzoru stanu z innymi zakładowymi systemami cyfrowymi, także z wykorzystaniem internetu przemysłowego oraz z zapewnieniem bezpieczeństwa cybernetycznego.
- 9) Prezentacja nowych możliwości i efektów prac diagnostycznych przez specjalizowane serwisy diagnostyczne włączając w to także realizację diagnostyki „na odległość”.
- 10) Wspomaganie doboru i projektowania systemów nadzoru i oceny stanu technicznego majątku, stosownie do realizowanej strategii Utrzymania Ruchu na poziomie instalacji, przedsiębiorstwa lub grupy przedsiębiorstw przynależących do jednego koncernu.

Po raz pierwszy, PTBNiDT SIMP O/Szczecin był współorganizatorem Forum Diagnostyki w listopadzie 1999r. Spotkanie również tak jak w tym roku odbyło się w Międzyzdrojach. Patronem Forum był wówczas jeszcze samodzielny Zespół Elektrowni DOLNA ODRA. W XXVII Forum Diagnostyki udział wzięło około 50 diagnostów z całej Polski.

Również w maju (23 – 25) tradycyjnie jak od lat przy współudziale PTBNiDT O/Szczecin odbyła się XXIII. naukowo-techniczna krajowa konferencja spawalnicza „postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spawania” Międzyzdroje 2017. W konferencji wzięło udział 120 Uczestników. Podczas 10 Sesji ogłoszono 28 referatów, z czego 7 dotyczyło zagadnień związanych z działalnością PTBNiDT SIMP. Swoje produkty podczas wystawy zaprezentowały firmy branży NDT; INFOCENTRUM i DPIdea

Trzeci dzień konferencji tradycyjnie został przeznaczony na wycieczki techniczne do: gazoportu LNG w Świnoujściu, podziemnego miasta – fortyfikacji armii niemieckiej do 1945, a następnie armii polskiej oraz do Stoczni Remontowej w Świnoujściu.

Ponadto w Oddziale Szczecin zorganizowaliśmy od początku tego roku 4 posiedzenia. W trakcie spotkań omawiane były sprawy bieżące. W ramach posiedzeń zorganizowano również wystąpienia naukowe i nie tylko:

- Daniel Grochała, Emilia Bachtiać-Radka i Sara Dudzińska – Badania cech powierzchni z wykorzystaniem optycznych metod Skaningu z ZUT Szczecin;
- Czesław Dziembaj SIMP Szczecin – Szlak Cysterski słowem i fotografią;
- Piotr Bielawski – Diagnozowanie rurociągów;
- Jerzy Kaszyński – Spacer po Wiecznym Mieście czyli Rzym okiem i aparatem;
- Ludmiła Kopycińska (przewodniczka turystyczna) – Opowieść o Konstantym Maciejewiczu – Legendarnym Kapitanie Kapitanów, opowieść uzupełniana Rodzinnymi opowieściami Wnuk Kapitana

Kolega z Zespołu Elektrowni Dolna Odra (grupa PGE) Maciej Matyjewicz Maciejewicz;

- Dariusz Pabian – Diagnostyka drganiowa w PGE GiEK SA Oddział Zespół Elektrowni Dolna Odra;
- Rafał Syc – XXIII Krajowa Konferencja Spawalnicza;
- Marcin Brajer – Czarnobyl po 30 latach, wrażenia z pobytu;
- Czesław Dziembaj – prezentacja książki „Szczecinian Życiorysy Spełnione”, współautor książki.

W dniu 21.09.2017 odbyło się Posiedzenie Szczecińskiego Oddziału PTBNiDT SIMP, na którym goszczono członków nowo wybranego ZO PTBNiDT SIMP w Poznaniu: Kolegę Jakuba Kowalczyka – Prezesa i Dariusza Ulbricha i Koleżankę Aleksandrę Sytlak wieloletnią Sekretarz Zarządu Towarzystwa. W Posiedzeniu udział wzięli Prezes Zarządu PTBNiDT Kol Tomasz Chady, Prezes ZO SIMP w Szczecinie Kolega Zbigniew Neumann i Prezes Honorowy Oddziału Kolega Jan Jęczkowski.

W Posiedzeniu uczestniczyły 22 osoby. Rozpoczęło się wręczeniem w imieniu Prezesa ZG SIMP Piotra Janickiego, Koledze Zbigniewowi, Dyplomu z okazji 75 rocznicy urodzin. Odśpiewane tradycyjne 100 lat wyraźnie wzruszyło Kolegę Jubilata.

Przedstawiciele Oddziałów rozmawiali o formach współpracy, wzajemnych zamierzeniach organizacyjnych, podkreślając znaczenie kwartalnika BNiD w integrowaniu środowiska, ale również o konieczności podejmowania wszelkich starań dla podnoszenia rangi naukowej tego wydawnictwa w kontekście potrzeb parametrycznej oceny pracowników nauki.



Wręczenie Dyplomu Kol. Zbigniewowi Neumannowi z okazji 75. Rocznicy urodzin.

Informacje

Komisja Statutowo – Regulaminowa działająca przy ZG SIMP po ponad rocznej pracy przekazała Zarządowi Głównemu SIMP projekt nowego Statutu SIMP, z rekomendacją przedłożenia go pod obrady Nadzwyczajnego Walnego Zjazdu Delegatów. Według posiadanych przez redakcję Biuletynu informacji Zjazd ma się odbyć 20 stycznia 2018 w Warszawie. W pracach Komisji Statutowo – Regulaminowej z ramienia ZO SIMP w Szczecinie bierze udział nasz kolega Bogusław Olech

Adam Kondej*, Tomasz Babul, Sylwester Jończyk

Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa

Aparatura i możliwości badań nieniszczących metodą prądów wirowych w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej

Devices and possibilities of non-destructive testing using the eddy current method at Institute of Precision Mechanics

ABSTRACT

This paper describes the basics of the eddy current method, the measuring devices and possibilities of non-destructive testing by this method conducted at the Institute of Precision Mechanics (IMP). The work presents the development of the method at IMP and sample research results carried out using the IMP measuring devices. The conducted research confirms the effectiveness of the eddy current method in assessing the condition of examined material in terms of assessment of surface hardness, detection of material nonconformities and defects, detection of structural changes, differentiation and sorting of materials and thickness measurements of layers and coatings.

Keywords: non-destructive testing, eddy current method, Wirotest

STRESZCZENIE

Artykuł opisuje podstawy metody prądów wirowych, aparaturę pomiarową oraz możliwości badań nieniszczących tą metodą w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej (IMP). W pracy przedstawiono rozwój metody w IMP oraz przykładowe wyniki badań, zrealizowanych z wykorzystaniem urządzeń pomiarowych produkcji IMP. Przeprowadzone prace badawcze potwierdzają skuteczność metody prądów wirowych do oceny stanu badanego materiału pod kątem m.in.: oceny twardości powierzchniowej, wykrywania niezgodności i wad materiałowych, wykrywania zmian strukturalnych, rozróżniania i sortowania materiałów, pomiarów grubości warstw i powłok.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, metoda prądów wirowych, Wirotest

1. Metoda prądów wirowych

Metoda prądów wirowych (ET – Electromagnetic Testing lub Eddy Current Testing) opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Polega ona na indukowaniu prądu w materiale przewodzącym, w wyniku działania na niego zmiennego pola magnetycznego. Zmienne pole magnetyczne występuje wskutek zasilania cewki indukcyjnej prądem zmiennym I . W cewce, jak i wokół niej, indukowane jest zmienne pole magnetyczne H , które wnika w badany materiał indukując w nim prądy wirowe EC. Prądy wirowe EC indukują swoje własne pole magnetyczne H_{EC} , które oddziałuje – osłabia, pole magnetyczne cewki H (rys. 1). Jeżeli materiał badany jest jednorodny to osłabienie jest stałe. Zmiany w materiale badanym powodują zmianę osłabienia. Analiza wartości amplitudy sygnału wyjściowego bądź amplitudy i przesunięcia fazowego pozwala na ocenę stanu badanego materiału [1-4].

Głębokości wnikania prądów wirowych określane są przez standardową głębokość wnikania prądów wirowych (δ). Nie określa ona rzeczywistych wartości głębokości, lecz wyznacza umowną głębokość, przy której amplituda prądów zmniejsza się e -krotnie, czyli około 2,72 razy, w stosunku do amplitudy na powierzchni materiału. Standardowa głębokość wnikania prądów wirowych jest opisana zależnością (1) [2, 3].

Wpływ niezgodności materiałowych oraz zmian

strukturalnych na sygnały przetworników jest ograniczony do tzw. efektywnej głębokości wnikania prądów wirowych. Jest to głębokość około trzech standardowych głębokości wnikania prądów wirowych (3δ) [2, 3].

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot \mu_r}} \quad (1)$$

gdzie:

δ – standardowa głębokość wnikania prądów wirowych [mm],
 f – częstotliwość pracy przetwornika [Hz], γ – przewodność elektryczna właściwa materiału [MS/m], μ_r – przenikalność magnetyczna względna elementu, bezwymiarowa.

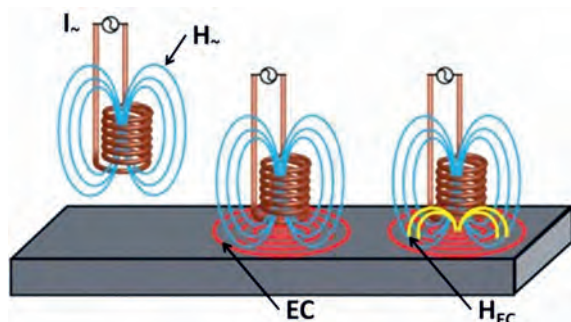
Wybór częstotliwości pracy przetwornika zapewnia możliwość regulowania głębokości wnikania prądów wirowych, a tym samym wybór obszarów, jakie mają być badane. Do badania warstw wierzchnich stosuje się przetworniki o wysokiej częstotliwości pracy, rzędu kilku MHz. Natomiast do wykrywania zmian na pewnej głębokości od powierzchni należy używać przetworników o niższej częstotliwości, rzędu od kilku do kilkuset kHz [2, 3].

Badania metodą prądów wirowych polegają na analizie zmian wskazań urządzenia pomiarowego w odniesieniu do wskazania na powierzchni elementu bez wad i o takiej samej strukturze jak materiał badany. Jest to metoda porównawcza, wymagająca korzystania z wzorców bądź próbek odniesienia.

Główne kierunki wykorzystania metody ET to wykrywanie wad materiałowych - defektoskopia, badania właściwości

*Autor korespondencyjny. E-mail: adam.kondej@imp.edu.pl

materiałów – strukturoskopia oraz określanie wymiarów (głównie pomiary grubości warstw i powłok).



Rys. 1. Podstawy metody prądów wirowych [4]
Fig. 1. Basics of the eddy current method [4]

2. Rozwój badań nieniszczących metodą ET w IMP

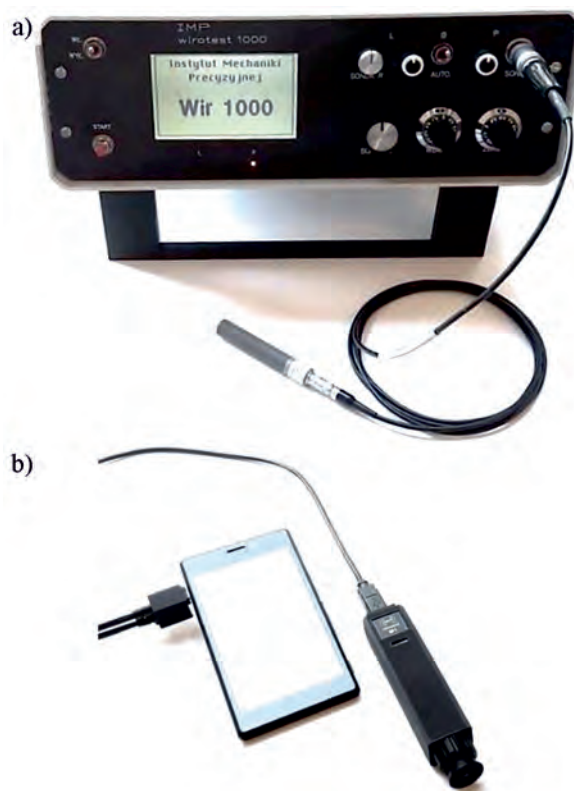
Prace nad zastosowaniem metody prądów wirowych do badań nieniszczących części maszyn i urządzeń są prowadzone w IMP od blisko 50 lat. Główne kierunki badań to wykrywanie wad materiałowych (pęknięcia) oraz strukturalnych (austenit szczątkowy, przypalenia szlifierskie), pomiar naprężeń własnych, ocena twardości powierzchniowej.

Kierunek prac badawczych i rozwojowych był uwarunkowany możliwością zastosowania praktycznego metody na potrzeby przemysłu. W tym celu konstruowano w IMP aparaturę pomiarową – urządzenia oraz sondy. Opracowywanie sond specjalnych dla konkretnych, często skomplikowanych wyrobów, było szczególnie ważne w latach, gdy zakup za dewizy był dla wielu zakładów trudny, a niekiedy niemożliwy. Na przestrzeni lat skonstruowano i wykonano szereg urządzeń do badania części, od dużych stacjonarnych typu Wirotest 01, 02, 03 i 04, poprzez mniejsze Wirotest 201, 202 i 400, do przenośnych typu Wirotest 301 i 302. Urządzenia te były przedmiotem wdrożeń w zakładach krajowych, a także zagranicznych.

W 1996 roku rozpoczęto proces akredytacji laboratoriów badawczych IMP przez PCA. W 2001 roku Laboratorium Badań i Oceny Własności Mechanicznych Materiałów, Części Maszyn i Konstrukcji (Laboratorium LB-4) otrzymało akredytację (nr AB 342) na badania nieniszczące nieciągłości i naprężeń. Laboratorium LB-4 uczestniczyło w badaniach międzylaboratoryjnych, m.in. z Politechniką Warszawską oraz z zakładem Bonatrans (Czechy) w zakresie pomiarów naprężeń metodą prądów wirowych, z Laboratorium Badań Nieniszczących CBMK Instytutu Lotnictwa w zakresie wykrywania nieciągłości.

W ostatnich latach powstał przenośny defektoskop – Wirotest 1000 (rys. 2a), zastępujący wcześniejszy model 302 (rys. 3). W dalszym ciągu są konstruowane sondy pomiarowe, zarówno uniwersalne, jak i specjalne, przeznaczone dla konkretnych zastosowań. Obecnie, istotnym kierunkiem prowadzonych prac jest automatyzacja pomiarów. Opracowano i wykonano przenośne oraz stacjonarne stanowisko do kontroli kół zębatych, a także uniwersalne stanowisko automatyczne do badania elementów o różnym kształcie – AutoWir-S1 [5]. Innym kierunkiem jest

miniaturyzacja urządzeń pomiarowych. W wyniku prac w 2017 roku powstał zminiaturyzowany układ pomiarowy do badań ET – Wirotest M1 (rys. 2b) [4, 6].



Rys. 2. Urządzenia pomiarowe IMP: a) Wirotest 1000, b) Wirotest M1

Fig. 2. IMP measuring devices: a) Wirotest 1000, b) Wirotest M1

3. Współpraca z przemysłem lotniczym

Badania nieniszczące znajdują zastosowanie do kontroli jakości części i elementów odpowiedzialnych, np. stosowanych w silnikach lotniczych. Przemysł lotniczy jest obszarem, w którym większość metod NDT znajduje zastosowanie, również metoda ET. W ostatnich latach IMP nawiązał ścisłą współpracę z zakładami produkcyjnymi z tej branży, czego efektem były wdrożenia aparatury pomiarowej oraz wspólnie realizowane projekty badawcze.

Jednym z przykładów współpracy jest zastosowanie urządzenia typu Wirotest 401 wraz z sondami aktywnymi do badania łopatek turbin. Na potrzeby zakładu wykonano kilka rodzajów sond specjalnych: sondę pazurkową do wykrywania pęknięć w zamkach łopatek wirnika turbiny, sondę palcową kątową do sprawdzania tarczy wirnika sprężarki, sondę palcową do sprawdzania kanałków w tarczy wirnika sprężarki, sondę palcową czołową do sprawdzania czoł tarczy wirnika oraz sondy palcowe grzbietowe do sprawdzania krawędzi natarcia. Układ pomiarowy pracuje od wielu lat w jednym z zakładów WSK.

Zakłady przemysłu lotniczego, stowarzyszone w tzw. „Dolinie Lotniczej”, sygnalizowały potrzebę opracowania metody badań i aparatury do nieniszczącej kontroli hartowanych indukcyjnie lotniczych kół zębatych. W wyniku tego w latach 2008-2013 został zrealizowany projekt PO IG 1.1.2

pt. „Opracowanie techniki kontroli wiroprowadami struktury, naprężeń i wad w lotniczych kołach zębatych zahartowanych indukcyjnie”.

Innym projektem badawczym, zrealizowanym w latach 2012-2014, wspólnie z WSK „PZL-Rzeszów” S.A. oraz z Wydziałem Inżynierii Materiałowej PW był projekt INNOTECH pt. „Zastosowanie i wdrożenie prądów wirowych do badania i wykrywania wad materiałowych na częściach lotniczych krytycznych wirujących wykonanych ze stali niskostopowych”.

Od roku 2015 jest realizowany projekt PBS pt. „Opracowanie nieniszczących metod charakteryzacji warstw nawęglanych w kołach zębatych” wspólnie z Politechniką Rzeszowską oraz Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN.

4. Przykłady badań metodą ET w IMP

4.1 Ocena twardości łusek mosiężnych po obróbce cieplnej

W IMP przeprowadzono nieniszczącą kontrolę jakości metodą ET zbioru 993 sztuk łusek mosiężnych po obróbce cieplnej. Finalne elementy, uznane za poprawnie wykonane, muszą charakteryzować się twardością, zawierającą się w ściśle określonym przedziale – od 164 HV5 do 175 HV5. Do określenia kryterium oceny twardości metodą prądów wirowych wykorzystano wzorce o twardości 164 HV5 i 175 HV5. Sygnały wyjściowe od tych wzorów przyjęto jako graniczne. Elementy, dla których wskazania mieściły się w przedziale wyznaczonym przez sygnały graniczne były uznawane jako dobre. Do badań zastosowano Wirotest 302 z sondą przelotową 10 kHz (rys. 3). Badania zostały przeprowadzone w sposób ręczny [7].

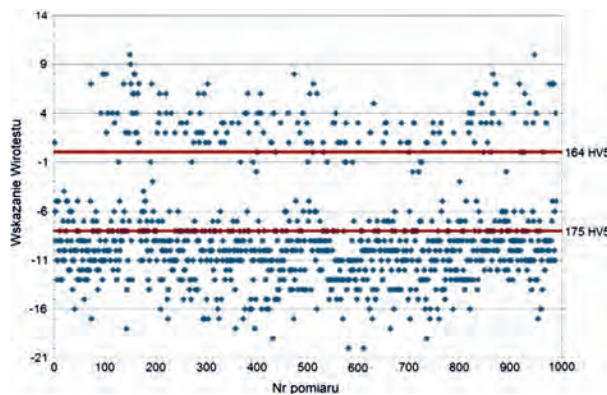


Rys. 3. Badanie łusek mosiężnych – Wirotest 302 z sondą przelotową

Fig. 3. Measurement of a brass shells – Wirotest 302 with an encircling coil

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Do producenta przekazano 607 szt. (61,1%) łusek o twardości >175 HV5, 154 szt. (15,5%) łusek o twardości <164 HV5. Jedynie 232 szt. (23,4%) elementów spełniało kryterium odbioru.

Kontrola twardości została przeprowadzona w warunkach przemysłowych w zakładzie producenta. W ramach kontroli, z wykorzystaniem wzorca twardości 175 HV5, przebadano 25 000 szt. łusek pochodzących z różnych partii produkcyjnych. Prędkość kontroli wynosiła około 350÷400 szt./godz. W wyniku kontroli około 40% elementów zostało uznane za dobre lub granicznie dobre [7].

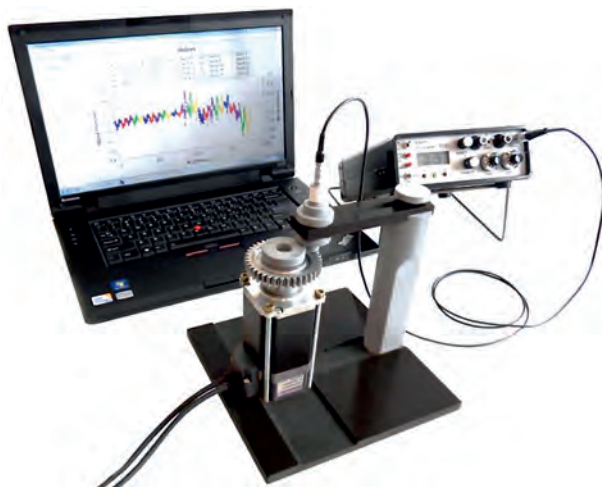


Rys. 4. Wyniki badań łusek mosiężnych [7]

Fig. 4. Results of the brass shells measurement [7]

4.2 Wykrywanie pęknięć w kołach zębatych hartowanych indukcyjnie

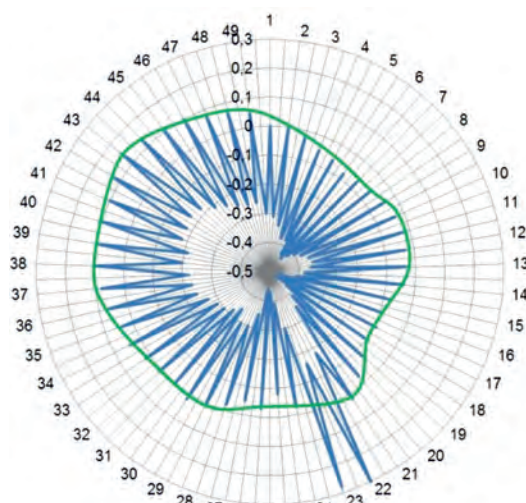
Wykrywanie pęknięć w lotniczych kołach zębatych było jednym z głównych tematów projektu badawczego realizowanego przez IMP w ostatnich latach. Obróbka cieplna, polegająca na hartowaniu indukcyjnym uzębień kół, powodowała powstawanie pęknięć hartowniczych u podstawy zębów. Do wykrywania tego typu wad opracowano metodykę badań nieniszczących metodą ET oraz stanowiska pomiarowe. Jednym z nich jest przenośne stanowisko pomiarowe, współpracujące z defektoskopami typu Wirotest 302 oraz 1000 (rys. 5). Dzięki zastosowaniu zmechanizowanego przemieszczania elementu badanego względem sondy pomiarowej wyeliminowano błędy przypadkowe, wynikające z czynnika ludzkiego, zwiększono powtarzalność oraz skrócono czas pomiarów.



Rys. 5. Badanie kół zębatych na przenośnym stanowisku automatycznym – Wirotest 302 z sondą stykową

Fig. 5. Measurement of gear wheels on a portable automatic stand – Wirotest 302 with a surface probe

Na rysunku 6 zamieszczono wykres radarowy wskazań Wirotestu 302 z badań jednego z wadliwych kół zębatych. Do pomiarów użyto sondę stykową o częstotliwości pracy 250 kHz. Pomiar odbywał się skokowo – koło zębate obracało się o 1/2 zęba co 1 sekundę, w chwili zatrzymania następowała rejestracja wskazań. Wyraźny wzrost sygnału na zębach nr 22 oraz 23 wskazuje na obecność pęknięć hartowniczych.

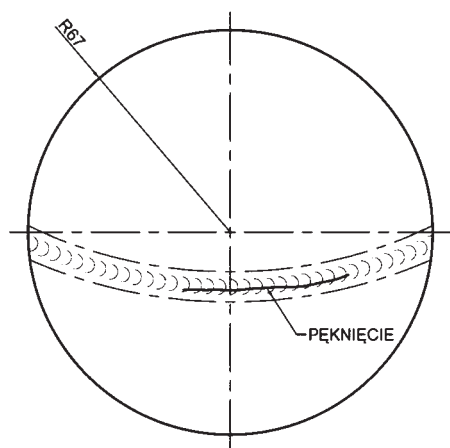


Rys. 6. Wykres radarowy wskazań Wirotestu 302
Fig. 6. The radar graph of the Wirotest 302 indications

4.3 Wykrywanie pęknięć w złączu spawanym ze stali martenzytycznej

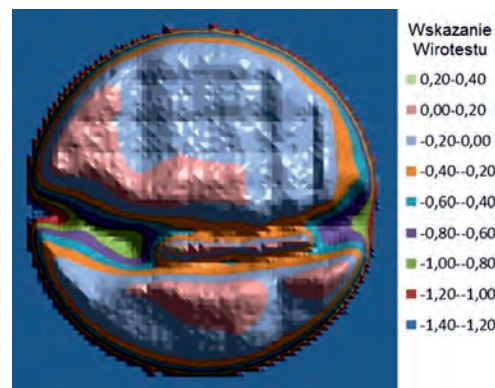
Przedmiotem badań były złącza spawane ze stali nierdzewnej X5CrNiCuNb16-4 (wg EN 1.4542) wykonane metodą TIG. Złącza wycięto z blachy o grubości 3 mm, pracującej jako taśma prasująca do produkcji płyt pilśniowych typu MDF. Była ona poddawana cyklicznym obciążeniom, w wyniku których następowały lokalne pęknięcia. Fragmenty z wykrytymi wadami były wycinane, a ubytki taśmy uzupełniane poprzez wstawianie nowej. Lico spoiny czołowej usuwano mechanicznie, zatem spoina nie powodowała zmian geometrii powierzchni [8].

Geometrię i wymiary złącza wadliwego – z obecnym pęknięciem, przedstawiono na rysunku 6. Do badań zastosowano automatyczne stanowisko pomiarowe AutoWir-S1 [5] oraz Wirotest 302 z sondą stykową 1 MHz.



Rys. 7. Geometria złącza spawanego z obecnym pęknięciem
Fig. 7. Geometry of the welded joint with a crack present

Wyniki skanowania powierzchni złącza przedstawiono w formie wykresu powierzchniowego na rysunku 8. Otrzymana mapa obrazuje kształt badanego elementu, miejsce występowania spoiny i strefy wpływu ciepła, a także ujawnia pęknięcie.

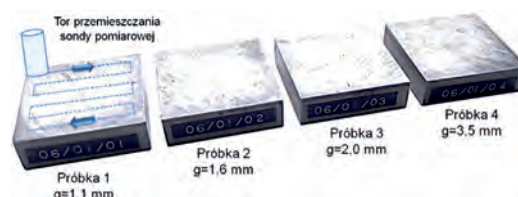


Rys. 8. Wykres powierzchniowy wskazań Wirotestu 302 [8]
Fig. 8. Surface graph of the Wirotest 302 indications [8]

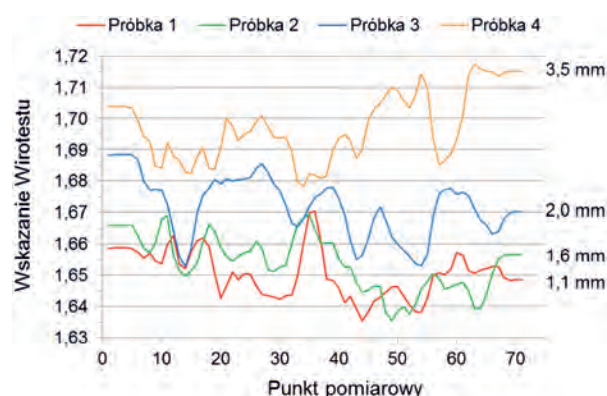
4.4 Ocena grubości warstw nawęglonych

Pomiary grubości warstw nawęglonych przeprowadzono na stalowych próbkach wyciętych z płaszcza komory pieca do spalania śmieci. Próbkę pochodzą z miejsc o różnym stopniu nawęglenia. Badaniom poddano cztery próbki o różnych grubościach warstwy nawęglonej: 1,1, 1,6, 2,0 i 3,5 mm (rys. 9) [6].

W badaniach zastosowano Wirotest M1 z sondą stykową 268 kHz oraz automatyczne stanowisko AutoWir-1. Meandrowe skanowanie powierzchni próbki odbywało się z prędkością 0,06 m/s. Podczas skanowania zebrano 71 punktów pomiarowych [6].



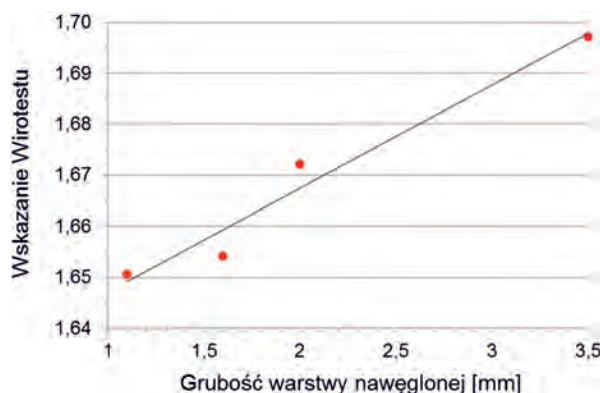
Rys. 9. Próbkę z warstwami nawęglonymi o różnej grubości (g) [6]
Fig. 9. Samples with carburized layers of different thicknesses (g) [6]



Rys. 10. Wyniki pomiarów na próbkach nawęglonych [6]
Fig. 10. Measurement results of carburized samples [6]

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresu liniowego na rysunku 10. Z przebiegu sygnału wynika, że powierzchnia materiału badanego nie jest jednorodna. Pomimo tego, możliwe jest rozróżnienie próbek pod względem grubości warstwy nawęglonej. Po uśrednieniu wyników skanowania powierzchni otrzymano wartości sygnałów,

dla których wyznaczono zależność wskazań Wirotestu M1 od grubości warstwy nawęglonej (rys. 11). Wraz ze wzrostem grubości rośnie wartość wskazania urządzenia pomiarowego.



Rys. 11. Zależność sygnału Wirotestu M1 od grubości warstwy nawęglonej

Fig. 11. The dependence of the Wirtest M1 signal on the thickness of the carburized layer

Charakteryzacja warstwy nawęglonej obejmuje pomiary grubości oraz twardości. Przykład zastosowania metody prądów wirowych do oceny twardości powierzchniowej warstw nawęglonych przedstawiono w pracy [9].

5. Podsumowanie

Instytut Mechaniki Precyzyjnej posiada wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu badań metodą prądów wirowych. Jako jeden z pierwszych w kraju zajmował się w opracowywaniu własnych urządzeń pomiarowych. Niegdyś najmniej znana metoda badań nieniszczących spośród sześciu podstawowych, obecnie jest coraz częściej stosowana w praktyce. Dzięki dynamicznemu rozwojowi elektroniki, stosowaniu specjalistycznych rozwiązań programistycznych, metoda ET znajduje nowe możliwości aplikacyjne. Duża czułość oraz wiarygodność wyników badania stawia ją na istotnej pozycji wśród metod stosowanych przez takie sektory przemysłowe jak lotniczy, jądrowy, kosmiczny, chemiczny czy maszynowy.

Przenośne stanowisko do kontroli kół zębatach oraz automatyczne stanowisko AutoWir-S1 opracowano i wykonano

w ramach projektu badawczego POIG.01.01.02-14-116/09-00 pt. „Opracowanie techniki kontroli wiropłukami struktury, naprężeń i wad w lotniczych kołach zębatych zahartowanych indukcyjnie”.

Opracowanie i wykonanie Wirotestu M1 zrealizowano w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w ramach pracy statutowej w 2017 r. pt. „Opracowanie zminiaturyzowanego układu pomiarowego do badań nieniszczących metodą prądów wirowych”, nr 13.1.01.416.00.

Badania warstw nawęglonych realizowano w ramach projektu badawczego PBS3/B/40/2015 „AirLot” pt. „Opracowanie nieniszczących metod charakteryzacji warstw nawęglanych w kołach zębatych”.

6. Literatura/References

- [1] C. Dybiec, S. Włodarczyk, „Badania nieniszczące metodą prądów wirowych – możliwości zastosowań”, *Ochrona przed korozją*, no. 3, pp. 67-74, 2010.
- [2] A. Lewińska-Romicka, *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [3] A. Lewińska-Romicka, *Badania materiałów metodą prądów wirowych*. Warszawa: Biuro Gamma, 2007.
- [4] A. Kondej, A. Szczepański, „Zminiaturyzowane urządzenie pomiarowe do badań nieniszczących metodą prądów wirowych – Wirotest serii M”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 89, no. 9, pp. 26-30, 2017. DOI 10.26628/ps.v89i9.808
- [5] A. Kondej, M. Baranowski, K. Niedźwiedzki, S. Jończyk, A. Szczepański, „Automatyczne stanowisko do badań nieniszczących metodą prądów wirowych”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 1, pp. 57-62, 2014.
- [6] A. Kondej, „Zminiaturyzowane urządzenie pomiarowe do badań nieniszczących metodą prądów wirowych Wirotest M1 – możliwości zastosowania”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 3, 2017, w druku
- [7] S. Jończyk, T. Samborski, S. Włodarczyk, „Nieniszczące badania metodą prądów wirowych w odniesieniu do pomiarów twardości HV jako komplementarna kontrola jakości wyrobów mosiężnych”, *Inżynieria Powierzchni*, no. 1, pp. 18-23, 2016.
- [8] A. Kondej, M. Baranowski, „Badania złączy spawanych ze stali martenzytycznej metodą prądów wirowych”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 86, no. 6, pp. 12-16, 2014. DOI 10.26628/ps.v86i6.66
- [9] S. Jończyk, A. Kondej, M. Baranowski, S. Włodarczyk, T. Samborski, „Warstwy nawęglane - korelacja oznaczeń metodą prądów wirowych i pomiarów twardości”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 88, no. 10, pp. 16-19, 2016. DOI 10.26628/ps.v88i10.678

- 1) Prof. zw. dr inż. dr h.c. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 2) Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 3) Dr inż. Przemysław Łopato, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 4) Dr Barbara Grochowalska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 5) Mgr inż. Marek Lipnicki, Koli sp. z o.o.
- 6) Dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. IPPT, IPPT PAN
- 7) Dr inż. Michał Kawiak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 8) Dr inż. Grzegorz Psuj, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Michael Sirois¹, Mathieu Bouchard¹, Angélique Raude², Radosław Boba^{3*}

¹Eddyfi, Québec, Canada

²Eddyfi Europe, Saint-Vulbas, France

³Casp System Sp. z o.o., Jaworzno, Polska

Korozja naprężeniowa – kiedy głębokość wady ma znaczenie

Stress corrosion - when the defect depth is important

ABSTRACT

The stress corrosion cracking phenomena has been characterized in terms of detection capabilities by classical NDT methods. An eddy current method using a array probe has been described in the context of detecting flaws caused by stress corrosion. A compensation system for changes of the probe lift-off distance and the dimensioning capability was presented. The characteristics of the sample head are shown and the measurement results are presented on the reference and real elements. The results shown are highly effective in detecting flaws caused by stress corrosion. Finally, the results obtained by the presented method with the ones of magnetic penetrant and ultrasonic methods were compared.

Keywords: stress corrosion, nondestruction inspection, eddy current method, eddy current array probe

STRESZCZENIE

Scharakteryzowano zjawisko korozji naprężeniowej pod kątem możliwości detekcji klasycznymi metodami NDT. Opisano metodę wiroprądową z zastosowaniem sondy macierzowej w kontekście wykrywania niezgodności spowodowanych korozją naprężeniową. Zaprezentowano system kompensacji zmiany odległości cewki od powierzchni oraz możliwości wymiarowania. Przedstawiono charakterystykę przykładowej głowicy oraz przedstawiono wyniki pomiaru na elemencie referencyjnym i rzeczywistym. Przedstawione wyniki wykazują wysoką skuteczność w wykrywaniu niezgodności powstałych w wyniku korozji naprężeniowej. Ostatecznie dokonano porównania wyników uzyskanych metodą prezentowaną oraz metodami magnetyczno-proszkową i ultradźwiękową.

Słowa kluczowe: korozja naprężeniowa, nieniszcząca ocena, metoda wiroprądowa, wiroprądowy przetwornik macierzowy

1. Wstęp

Pękanie związane z korozją naprężeniową (SCC) jest ściśle związane z oddziaływaniem środowiska pracy i w krótkim czasie od rozpoczęcia takiego procesu, może prowadzić do wystąpienia poważnych uszkodzeń. SCC jest wynikiem występowania naprężenia w materiałach przy jednoczesnym narażeniu ich na korozję. Korozja naprężeniowa występuje zazwyczaj na zewnętrznych powierzchniach rurociągów ze stopów podatnych na działanie czynników korozyjnych. SCC powoduje degradację materiału przy poziomie naprężeń niższych od wartości wytrzymałościowych materiału, w warunkach otoczenia, w których niekoniecznie sama korozja może doprowadzić do uszkodzenia. Ponadto, jeśli korozja naprężeniowa nie zostanie zlokalizowana, może dojść na skutek połączenia się pojedynczych wad do powstania długich i głębokich nieciągłości prowadzących do poważnych awarii [1-4].

Skupiska SCC są często określane jako kolonie, ponieważ składają się z pojedynczych małych płytek pęknięć powierzchniowych, zwykle zorientowanych wzdłuż osi przepływu czynnika, prostopadłych do naprężeń obwodowych [2-4]. Rozgałęziona morfologia nieciągłości sprawia, że wykrycie SCC jest bardzo trudne przy użyciu konwencjonalnych metod NDT. Przykładowo standardowa próba ciśnieniowa nie daje możliwości wykrycia podkrytycznych ale propagujących obszarów SCC, a konwencjonalna metoda wpływu strumienia magnetycznego (MFL) jest

nieskuteczna ze względu na małe ubytki materiału związane z korozją naprężeniową [1], [5].

Współcześnie stosowane sondy ultradźwiękowe (UT) lub elektromagnetyczne przetworniki akustyczne (EMAT) w zabudowie in-line są w stanie wykrywać wady związane z SCC, jednak ich zabudowa i właściwe rozmieszczenie są często niemożliwe [6].

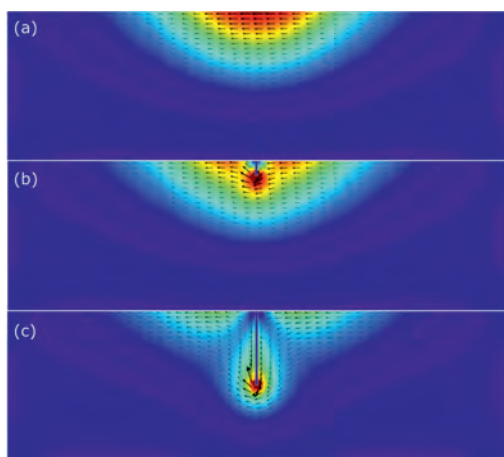
Technika UT działa dobrze tylko wtedy gdy mamy głębokie pęknięcia niewychodzące na powierzchnię. Nie daje również możliwości dokładnego określenia głębokości w przypadku dużego zagęszczenia nieciągłości lub gdy mamy do czynienia z płytkimi nieciągłościami SCC. Dlatego właśnie do dnia dzisiejszego najlepszymi metodami identyfikowania wad typu SCC są badania magnetyczno-proszkowe (MT) oraz badania penetracyjne (PT). Mimo względnie wysokiej rozdzielczości i czułości badań MT i PT, techniki te wymagają dobrego przygotowania powierzchni oraz pozostają mocno zależne od doświadczenia osoby wykonującej badania. Ponadto nie pozwalają na określenie głębokości zalegania nieciągłości oraz jej długości, a co za tym idzie nie dają możliwości właściwej oceny wykrytych wskazań pod względem krytycznych właściwości SCC (SCCDA).

2. Wiroprądowa technika wieloprzetwornikowa w układzie tangencjalnym

Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie wykorzystania sond wielocewkowych w technice wiroprądowej ECA (Eddy Current Array) doprowadziły do rozwoju sond z cewkami w układzie tangencjalnym (TECA- Tangential Eddy Current

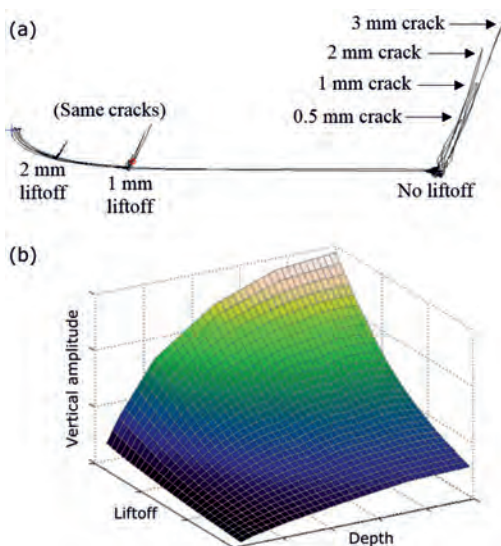
* Autor korespondencyjny. E-mail: rafal.boba@casp.pl

Array) [1]. Sondy TECA zostały zoptymalizowane do oceny wad powierzchniowych w stalach węglowych. Metoda łączy sygnały konwencjonalnych sond wiroprowodowych z możliwościami techniki wieloprzetwornikowej, co oznacza szerszy zakres badania, szybsze badanie, obrazowanie 2D i 3D oraz pełną archiwizację danych cyfrowych.



Rys. 1. Zmiany gęstości prądu zmiennego w a) obszar bez wad; b) pęknięcie o głębokości 1 mm c) pęknięcie o głębokości 5 mm
Fig. 1. Changes of AC current density in the vicinity of crack, a) flawless area, b) crack of 1 mm depth, c) crack of 5 mm depth

Układ cewek TECA pozwala na indukowanie prądów wirowych stycznych do badanej powierzchni, prostopadle do nieciągłości SCC, co umożliwia ich wykrycie. Sygnały z układu cewek TECA są unikalne – pozwalają na wyróżnienie pęknięć, a także określenie ich głębokości, stale obniżają odległość między cewkami a badanym materiałem (tzw. liftoff), a także zmiany własności magnetycznych stali węglowej.



Rys. 2. Wpływ zmiany odległości przetwornika od badanego elementu: a) Przesunięcie fazowe czterech wskazań dla różnych odległości liftoff – 0,5 do 2 mm; b) funkcja 3D obrazująca zależności pomiędzy głębokością pęknięcia, amplitudą sygnału oraz odległością liftoff.

Fig. 2. Influence of liftoff: a) phase shift of four indications for different liftoff – from 0,5 to 2 mm; b) 3D relation between depth, signal amplitude and liftoff.

Dzięki pomiarowi zmian liftoff i przenikalności magnetycznej materiału, sygnał pochodzący od wady może być odpowiednio kompensowany, umożliwiając dokładne jej wymiarowanie. Rysunek 1 ilustruje, w jaki sposób strumień TECA przepływa prostopadle do powierzchni i opływa nieciągłości o różnych głębokościach zalegania. Zmiany kolorystyczne ilustrują zmiany gęstości prądów wirowych w badanym materiale.

W odniesieniu do klasycznych badań wiroprowodowych (ECT) widać, że sygnał TECA na nieciągłości charakteryzuje się dobrą separacją fazową w stosunku do sygnału liftoff, co jest szczególnie użyteczne przy wyodrębnianiu i wymiarowaniu wszystkich sygnałów niezależnie. Krzywa liftoff jest bardzo wypłaszczona dzięki czemu pomiar przesunięcia poziomego pomiędzy sygnałem, a punktem zerowym umożliwia pomiar liftoff. Sygnały nieciągłości również dają płaskie wskazania, wszystkie w tej samej fazie i dużą składową w pionie, co ułatwia korelację głębokości pęknięcia na podstawie amplitudy w pionie. Pozwala to wykrywać pęknięcia SCC oraz wymiarować je w czasie rzeczywistym, co znacznie skraca czas oraz koszty diagnostyki rurociągów ze stali węglowych.

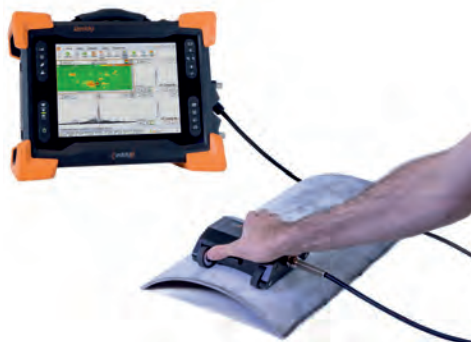
3. TECA Liftoff

3.1 Kompensacja zmiany odległości cewki od powierzchni

Jak pokazano na rysunku 2. liftoff związany z występowaniem powłok lub farb znacznie zmniejsza pionową składową sygnału pochodzącego od wady. Układ cewek TECA umożliwia monitorowanie w czasie rzeczywistym liftoff, co pozwala dynamicznie kompensować amplitudę sygnału pochodzącą od wady.

3.2 Możliwości wymiarowania

Funkcje wymiarowania w technice TECA opierają się na płaszczyźnie 3D, która umożliwia korelację pomiędzy głębokością wad, amplitudą i odległością liftoff (rysunek 2b). Plan obrazowania składa się z kilku krzywych wyznaczonych dla różnych głębokości uzyskanych przy określonych wartościach liftoff. Wybór najlepszej krzywej zależy od zmierzonej wartości liftoff. Wartość ta jest automatycznie wyliczana przez system podczas skanowania, co ułatwia wizualizację i analizę danych.



Rys. 3. Sonda wysokiej rozdzielczości Sharck do wykrywania drobnych wad w obszarach SCC

Fig. 3. High resolution Sharck probe for detection of SCC area

Ponadto, jeśli podczas badania występują zmiany w przenikalności, wówczas kompensacja jest stosowana do sygnałów prądów wirowych tak aby przylegały one do płaszczyzny 3D głębokości. Bez kompensacji takie zmiany właściwości magnetycznych materiału mogłyby negatywnie wpływać na pomiar głębokości podczas analizy danych.

4. Głowica wysokiej rozdzielczości Sharck

Widoczna na rysunku 3 wielocewkowa sonda o dużej rozdzielczości (Sharck HR) opracowana została dla wykrywania oraz wymiarowania wad w obszarach SCC. Konstrukcja posiadająca cztery koła zapewnia wysoką stabilność podczas badania. Dwa koła są ze sobą połączone i sprzężone z enkoderem, umożliwiając lokalizowanie wad oraz pomiar ich długości. Sonda Sharck HR może pracować z prędkością do 600 mm/s.

Obszar aktywny cewek będący w kontakcie z badaną powierzchnią jest wykonany z wytrzymałego polimeru i umożliwia badanie rur o średnicach od 254 do 1220 mm (10-48").

Mechanizm sprężynowy umożliwia dopasowanie powierzchni sondy do kształtu badanej powierzchni zapewniając stały i bliski kontakt z badaną powierzchnią. Głowica posiada łącznie 64 elementy aktywne TECA o wysokiej rozdzielczości, co pozwala na skanowanie pasa o szerokości do 71 mm przy pojedynczym przejeździe. Elementy aktywne cewek są umieszczone w kilku rzędach dla uzyskania lepszej rozdzielczości oraz jednolitej czułości.

Sonda została zoptymalizowana pod kątem wykrywania i oceny płytkich pęknięć o głębokości od 0,25 do 3 mm. Zakres ten został dobrany z uwzględnieniem ograniczeń konwencjonalnych metod NDT (np. UT) oraz z uwzględnieniem obszarów występowania SCC w zakresie 10% grubości ścianek. Umożliwia to właścicielom instalacji opracować wewnętrzne procedury SCCDA z uwzględnieniem maksymalnych dopuszczalnych pęknięć.

Sondy TECA dają możliwość wykrywania wad o min. długości ok. 2 mm oraz pozwalają na pomiar całego obszaru

występowania SCC. Uwzględniając najczęściej występujące na powierzchniach rurociągów powłoki i farby, sonda Sharck HR może kompensować liftoff do 2 mm.

Dla osiągnięcia wysokiej dokładności pomiaru przy użyciu głowicy Sharck HR wykonano serię badań testowych na odcinku rurociągu stalowego X52. Wykonano próbkę, w której wydrążono techniką elektroerozji EDM 23 wady referencyjne o różnym kształcie, długości i głębokości. Wykonane nieciągłości zostały przebadane i wykorzystane do stworzenia płaszczyzny odniesienia głębokości 3D – rysunek 3b.

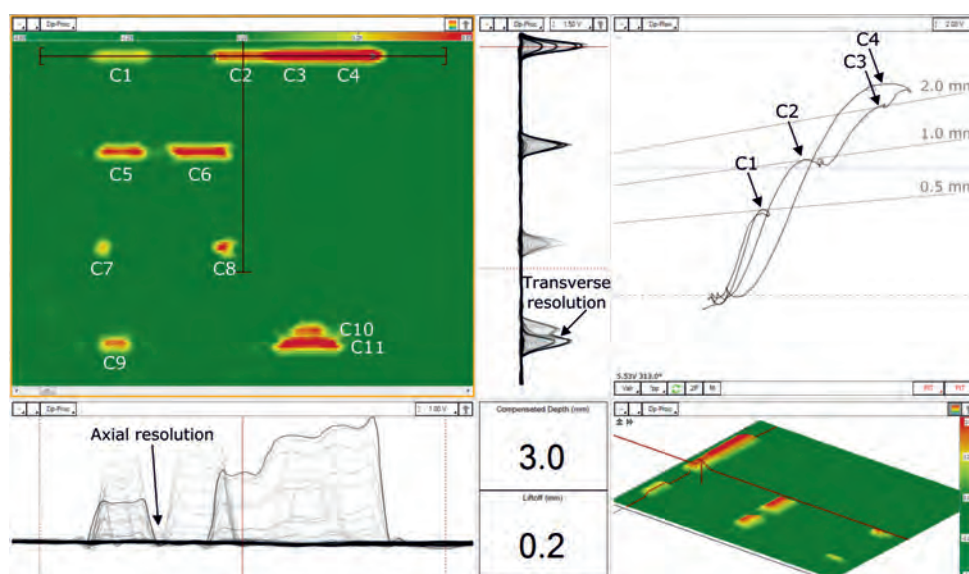
Wykorzystano również narzędzie do kompensacji w celu uwzględnienia różnic w przewodnictwie elektrycznym i przepuszczalności magnetycznej pomiędzy różnymi gatunkami stali węglowej, w których mogą wystąpić skupiska korozji naprężeniowej SCC (stale X42, X56, X60 itp.). Zapewnia to dokładny pomiar głębokości zalegania wad w obszarach SCC dla większości rurociągów wykonanych ze stali węglowej.

5. Pomiar głębokości oraz rozdzielczość sondy Sharck

W celu sprawdzenia skuteczności wykrywania i określania głębokości nieciągłości przy użyciu Sharck HR, druga część rury ze stali X52 została przygotowana pod kątem symulacji skupisk obszarów korozji naprężeniowej SCC.

Obszary SCC charakteryzują się bardzo krótkimi i płytkimi pęknięciami, wady występują zazwyczaj pojedynczo, i mają różną głębokość i są zamknięte. Rysunek 4., ilustruje wyniki uzyskane z pojedynczego skanowania próbki wykonanego w czasie 2 sekund.

Sygnały z wad zlokalizowanych w górnej części obrazu C-scan (oznaczone C1-C4) pokazano w prawym górnym okienku na rysunku 4. Pęknięcie C1 ma głębokość 0,5 mm, jednak jego wykrycie i zwymiarowanie jest już możliwe. Wskazania C2, C3 i C4 mają odpowiednio głębokość 1 mm, 2 mm i 3 mm. Wskazania



Rys. 4. Wyniki skanowania sondą Sharck HR
Fig. 4. Results of inspection using the Sharck HR probe

na próbce były wyfrezowane w sposób ciągły w kształcie schodów. Trzy poziomy głębokości wady są dokładnie widoczne w widoku poziomym C-skanu w dolnej części rysunku 4. Widok boczny jest szczególnie przydatny ponieważ pozwala na szybkie wykrycie najgłębszych pęknięć podczas badań obszarów SCC.

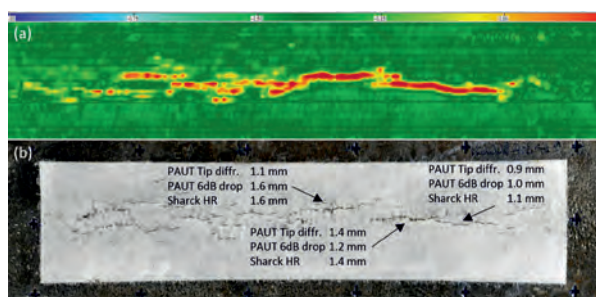
Rozdzielczość osiowa sondy jest jednym z ważniejszych parametrów podczas oceny stref SCC, ponieważ decyduje o rozróżnieniu długich ciągłych pęknięć od krótkich pęknięć w linii. Odległość pomiędzy pęknięciami C5 i C6 została ustalona dla celów walidacji na 3 mm. Wyniki pokazują, że sonda z powodzeniem odróżnia wszystkie pęknięcia, a amplituda sygnału między nimi spada do 0. Wskazuje to na możliwość wykrywania wad odsuniętych od siebie o $1 \div 1,5$ mm.

Dla sprawdzenia rozdzielczości poprzecznej wykonano wady C10 i C11 w odległości 3 mm. Przyjęta odległość wzorcowa pozwala na sprawdzenie zdolności sondy pod kątem wykrywania i pomiaru wad sąsiadujących poprzecznie w skupiskach SCC. Pionowy widok boczny obok C-scan pokazuje, że sonda posiada wysoką rozdzielczość, co pozwala również wykrywać tak usytuowane względem siebie wady.

Pęknięcie C7 zostało wykonane dla wykazania możliwości wykrycia najkrótszego wskazania w obszarze SCC. Pomimo małych rozmiarów wady C7 (długość 3 mm, głębokość 1 mm) jest ona doskonale widoczna na C-scan.

6. Rzeczywiste wyniki badania stref SCC

Głowica Sharck HR została również przetestowana na różnych próbkach rzeczywistych rurociągów zawierających naturalne skupiska występowania korozji naprężeniowej SCC. Przykład takiego badania pokazano na Rysunku 5. Dla porównania uzyskane rozkłady odniesiono do wyników otrzymanych przy użyciu metody MT. Uzyskany C-scan jest odpowiada obrazowi strefy pęknięć uzyskanej podczas badania MT. Wskazania zostały wykryte i zobrazone z wysoką rozdzielczością.



Rys. 5. Badana strefa SCC z wykorzystaniem a) Sharck HR; b) techniki MT i UT

Fig. 5. Examined SCC area using: a) Sharck HR probe, b) using MT and UT technique.

W porównaniu do techniki MT, technologia TECA umożliwia jednocześnie oszacowanie głębokości zalegania pęknięć w czasie rzeczywistym. Zapis wyników badania daje możliwość zarządzania danymi oraz ich późniejszej oceny. Biorąc pod uwagę czas niezbędny do przygotowania badań, kontrola głowicą Sharck jest szybka, a wpływ tzw. czynnika ludzkiego jest zminimalizowany w stosunku do badania

MT - metoda TECA nie wymaga specjalnego przygotowania powierzchni oraz jej czyszczenia.

Do weryfikacji określonych przez TECA głębokości wskazań zastosowano technikę UT. Ze względu na ograniczenia techniki UT przy określaniu głębokości w gęstych skupiskach wad, pomiaru dokonano na trzech odizolowanych wadach. Wykorzystano dwie techniki UT: spadek sześciodecybelowy (6dB) oraz dyfrakcję fali. Jak pokazano na rysunku 5., głębokości zmierzone przez głowicę Sharck są bardzo zbliżone do wyników UT.

7. Wnioski

Sonda Sharck została zaprojektowana i opracowana do szybkiej analizy z wysoką rozdzielczością pęknięć w strefach naprężeń korozyjnych w stali węglowej. Skonstruowana w oparciu o technikę wielocewkowej głowicy ECA, zapewnia wykrywanie i analizę stref SCC, wraz ze zobrazowaniem C-scan wysokiej rozdzielczości oraz pomiarem i kompensacją liftoff w czasie rzeczywistym. Sonda została zaprojektowana specjalnie do wykrywania wad typowych dla SCC, dlatego zakres pomiarowy głębokości wad dotyczy płtych wad w zakresie $0,25 \div 3$ mm w rurociągach ze stali węglowych X52.

System Sharck HR pokazuje duże możliwości rozwoju dokładnych technik pozwalających na analizę degradacji rurociągów, które mogą ulec poważnej awarii w przypadku wystąpienia pęknięcia. Szerokie pokrycie pojedynczego skanu oraz duża szybkość i dokładność wymiarowania, w połączeniu z zaawansowanym i intuicyjnym oprogramowaniem, sprawiają, że proponowana technologia jest poważną alternatywą dla tradycyjnych technik stosowanych do oceny stref występowania wad związanych z pękaniem w strefach występowania korozji naprężeniowej SCC.

8. Literatura/References

- [1] M. Sirois, M. Bouchard, A. Raude, "Stress-Corrosion Cracking: When Depth Sizing Matters", World Pipelines magazine, July, 2017.
- [2] W. Chen, "An Overview of Near-Neutral pH Stress Corrosion Cracking in Pipelines and Mitigation Strategies for Its Initiation and Growth", Corrosion, vol. 72, no. 7, pp. 962-977, 2016. DOI 10.5006/1967
- [3] C. Loto, "Stress corrosion cracking: characteristics, mechanisms and experimental study", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 93, no. 9-12, pp. 3567-3582, 2017. DOI 10.1007/s00170-017-0709-z
- [4] O. Aly, M. Mattar Neto, "Stress Corrosion Cracking", Developments in Corrosion Protection, 2014. DOI 10.5772/57349
- [5] S. Takaya and K. Miya, "Application of magnetic phenomena to analysis of stress corrosion cracking in welded part of stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, vol. 161, no. 1-2, pp. 66-74, 2005. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.017
- [6] L. Murugan, "Phased Array UTUT application on in service Heavy wall Reactors", in 6th Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Kingdom of Bahrain, October 7 - 12, 2012.

Rafał Obłąkowski*
Koli Sp. z o.o., Banino

ACFM® – alternatywa dla metod elektromagnetycznych

ACFM® - the alternative for electromagnetic methods

W październiku 2016 roku, podczas 45-tej Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w Kołobrzegu, firma Koli Sp. z o.o. gościła na swoim stoisku nowego partnera biznesowego, firmę TSC Inspection Systems odpowiedzialną za stworzenie i rozwój metody ACFM®.

Firma TSC została wydzielona z University College London w 1984 roku przez grupę profesorów i naukowców, których celem było opracowanie metody badań elementów podwodnych dającej pewność otrzymania poprawnych wyników i zależnej tylko w niewielkim stopniu od operatora. We współpracy z takimi koncernami jak: BP, BG, Conoco oraz Shell, powstała metoda Pomiaru Pola Prądu Zmiennego – ACFM (Alternating Current Field Measurement).

ACFM zalicza się do grupy metod elektromagnetycznych badań nieniszczących. Jej głównym zadaniem jest wykrywanie i określenie wymiarów (długości i głębokości) pęknięć zmęczeniowych w metalach.

Polega ona na wywołaniu w badanym materiale, dzięki zjawisku indukcji magnetycznej, przepływu prądu zmiennego, który przyjmuje postać prądów wirowych. Obecność pęknięć wychodzących na powierzchnię metalu wpływa na pole elektromagnetyczne, a tym samym na wielkość sygnału zwrotnego. Operator jest informowany o zmianach w sygnale natychmiast, dzięki czemu zwymiarowanie wady jest możliwe zaraz po jej wykryciu.

Podczas badania magnetyczno-proszkowego, w celu wykrycia ewentualnych nieciągłości, niezbędne jest wcześniejsze usunięcie farb lub powłok chroniących stal przed działaniem czynników szkodliwych. W metodzie ACFM, dzięki oddziaływaniu elektromagnetycznemu, kontakt bezpośredni głowicy z badanym materiałem nie jest wymagany, co pozwala zaoszczędzić zarówno czas jak i pieniądze – nie ma potrzeby usuwania i następnie uzupełniania powłok na powierzchni materiału badanego obiektu.

Zastosowane algorytmy oprogramowania umożliwiają aparaturze szybkie i łatwe obliczenie rzeczywistej długości i głębokości wykrytego pęknięcia powierzchniowego. Maksymalna czułość badania zależy przede wszystkim od rodzaju głowicy. Istnieją 3 podstawowe typy głowic: do badania stali ferromagnetycznych, niemagnetycznych oraz głowice o zastosowaniu specjalnym – są to m.in. głowice do badań wysokotemperaturowych, do badań podwodnych,

o wysokiej czułości itd.

Cały asortyment głowic ACFM wzbogacają dodatkowo zaawansowane głowice wielocewkowe typu Array.

Istnieje jeszcze więcej powodów, dla których warto rozważyć wzbogacenie oferty usług o badania ACFM.

Porównanie metody ACFM® z metodami MT i ET

Cechy metody	ACFM®	MT	ET
Mniejsza zależność od kompetencji operatora: -powtarzalność i niezawodność badania -pewność spójności danych	✓	✗	✗
Badanie przez powłoki: -redukcja kosztów czyszczenia powierzchni	✓	✗	✓
Badania w normalnych warunkach oświetlenia: -brak środków zanieczyszczających.	✓	✗	✓
Badanie materiałów niemagnetycznych	✓	✗	✓
Możliwość zdalnego umieszczania głowicy: -wymagana strefa ograniczonego dostępu	✓	✗	✗
Tworzenie dokładnych i weryfikowalnych danych: -umożliwia efektywne zarządzanie systemami bezpieczeństwa i ryzyka -obsługa audytów i kontroli	✓	✗	✗
Określenie długości i głębokości pęknięć bez kalibracji: -pozwała oszacować krytyczność wady	✓	✗	✗
Wysokie prawdopodobieństwo wykrycia wady i niskie ryzyko wystąpienia błędnych wskazań: -uniknięcie kosztu niepotrzebnej naprawy	✓	✗	✗

Do przeprowadzenia badań, oprócz głowicy, niezbędny jest także defektoskop oraz, w przypadku sztandarowego systemu AMIGO™, stacja robocza umożliwiająca sterowanie procesem skanowania i zarządzanie danymi. Obecnie zakończone są prace nad rozwojem technologii ACFM i wprowadzeniem na rynek przenośnego defektoskopu (PACE™), który przyspieszy i ułatwi, i tak już prosty, proces skanowania i analizowania wad. Ponadto umożliwi on

* Autor korespondencyjny. E-mail: kontakt@koli.eu



45-ta Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących w Kołobrzegu – prezentacja technologii ACFM.
Od lewej: Rafał Obłąkowski (Koli sp. z o.o.), Bogdan Ostrowski (Koli sp. z o.o.), Marek Wójcik (Koli sp. z o.o.),
Marek Lipnicki (Prezes Koli sp. z o.o.), Matthew Davison (Sonatest), Michael Smith (TSC Inspection Systems),
Corinna Cuciureanu (TSC Inspection Systems), Krzysztof Mroczek (Koli sp. z o.o.)

wykorzystanie metody z zastosowaniem przemysłowych technik alpinistycznych.

Szkolenie operatorów badań ACFM odbywa się wg standardów ASNT (SNT-TC-1A). Kursy są przeprowadzane na stopień 1, 2 i 3 w siedzibie TSC i Koli. Szkolenia mają za zadanie przygotować operatora, zarówno teoretycznie, jak i praktycznie do przeprowadzenia badań na złączach spawanych.



Kompletny zestaw aparaturowy AMIGO, umożliwiający przeprowadzenie badań ACFM



Przenośny aparat PACE podczas badań ACFM z dostępem alpinistycznym

W celu uzyskania dodatkowych informacji na temat metody ACFM, prosimy o kontakt z oficjalnym przedstawicielem firmy TSC Inspection Systems – firmą Koli sp. z o.o.

Tomasz Chady*, Ryszard Sikora
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Naukowa współpraca Chińsko - Polska w 2017 roku

China - Poland scientific cooperation in 2017 year

W dniach 19-28.06.2017 prof. Ryszard Sikora – przewodniczący PTETiS o/Szczecin i profesor ZUT dr hab. inż. Tomasz Chady – prezes Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej przebywali z wizytą naukową w Chinach. Na zaproszenie strony chińskiej odwiedzili oni Xi-an i Pekin. Podobnie jak i w wielu minionych latach organizatorzy konferencji Far East Forum on Nondestructive Testing & Evaluation (FENDT) zaprosili wymienionych profesorów do udziału w konferencji i wygłoszenia referatów zaproszonych.



Przygotowania do otwarcia konferencji Far East Forum on Nondestructive Testing & Evaluation (FENDT)



Wspólne zdjęcie po ceremonii wręczenia nagród studentom za najlepsze prace o tematyce badań nieniszczących (czwarty od lewej profesor ZUT dr hab. inż. Tomasz Chady)

Prof. Tomasz Chady wygłosił referat na temat wykorzystania sztucznej inteligencji w wiroprowadowej metodzie badań nieniszczących. Został także poproszony o wygłoszenie przemówienia w trakcie otwarcia konferencji i wręczenie nagród pierwszego stopnia studentom za najlepsze prace

o tematyce badań nieniszczących.

Prof. Ryszard Sikora został uhonorowany nagrodą za wygłoszenie najlepszego referatu w trakcie konferencji. Nagrodzony referat nosi tytuł: „Wykorzystanie pochodnych ułamkowych w badaniach nieniszczących”. Należy wspomnieć, iż obaj profesorowie są członkami komitetu naukowego tej największej w Chinach corocznej konferencji o tematyce badań nieniszczących. Po zakończeniu konferencji Far East Forum on Nondestructive Testing & Evaluation (FENDT) profesorowie T. Chady i R. Sikora zostali zaproszeni przez Profesora Chunguang Xu do Pekinu w celu wygłoszenia referatów na temat badań nieniszczących w Beijing Institute of Technology.



Zdjęcie z ceremonii wręczenia nagrody za wygłoszenie najlepszego referatu w trakcie konferencji (drugi od lewej prof. Ryszard Sikora)

W kolejnym dniu wizyty, na zaproszenie Prezydenta China Special Equipment Inspection and Research Institute, Pana Lin Shuqing, wygłosili dwa referaty o badaniach nieniszczących dla pracowników tego Instytutu, a następnie przeprowadzili rozmowy na temat podjęcia współpracy naukowej. Można mieć nadzieję, że po podpisaniu bilateralnej umowy przez premierów Chin, Pana Xi Jinpinga i Polski, Pani Beaty Szydło utworzono szczególnie przyjazną atmosferę dla współpracy naukowej. Naszym obowiązkiem

* Autor korespondencyjny. E-mail: tomasz.chady@zut.edu.pl

jest wypełnienie treścią naukową tej ważnej umowy. Istnieje szerokie pole możliwości współpracy naukowej chińsko-polskiej w dziedzinie badań nieniszczących. Wymienimy kilka: wykorzystanie sztucznej inteligencji w badaniach nieniszczących w tym w predykcji raka, badania terahercowe, testowanie łopatek elektrowni wiatrowych, testowanie rurociągów, testowanie osi pociągów szybkobieżnych, bezpieczeństwo elektrowni jądrowych. We wszystkich wymienionych tematach Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki ZUT w Szczecinie ma długotrwałe doświadczenie zdobyte w trakcie realizacji grantów krajowych, realizacji grantów europejskich i wspólnych badań japońsko-polskich w dziedzinie bezpieczeństwa elektrowni jądrowych oraz brazylijsko – polskich w dziedzinie bezpieczeństwa wydobycia i transportu ropy naftowej.



Dyplom potwierdzający przyznanie wyróżnienia za wygłoszenie najlepszego referatu w trakcie konferencji FENDT

W ZUT został skonstruowany dla Petrobras elektromagnetyczny tester spawów w połączeniach rurociągów. Prof. R. Sikora jest od wielu lat członkiem World Federation of NDE Center w Iowa State University. Koszty uczestnictwa w konferencji i pobytu w Chinach zostały sfinansowane przez stronę Chińską.



Konferencja w China Special Equipment Inspection and Research Institute



Uczestnicy spotkania w Beijing Institute of Technology (drugi od lewej prof. ZUT dr hab. inż. Tomasz Chady, a następnie prof. Chunguang Xu i prof. Ryszard Sikora)

Ponadto, w roku 2017 podpisana została umowa o współpracy naukowej i dydaktycznej pomiędzy Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym i Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA). Osobą odpowiedzialną za bieżącą realizację umowy z ramienia NUAA został dr Haitao Wang, prof. NUAA, a ze strony ZUT dr hab. inż. Tomasz Chady. Umowa stwarza ramowe możliwości współpracy naukowej, a także wymiany studentów i pracowników naukowych.

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

47. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

16-18 PAŹDZIERNIKA 2018, KOŁOBRZEG



Kołobrzeg - historyczne miejsce, polska stolica SPA, komfortowe zakwaterowanie, najlepsze polskie jedzenie i najpiękniejsze plaże



Zaproszenie na 47. Krajową Konferencję Badań Nieniszczących

ZO PTBNiDT O/Szczecin ma przyjemność zaprosić Państwa do udziału w 47. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, organizowanej przez Zarząd Oddziału Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP w Szczecinie.

Konferencja odbędzie się w Kołobrzegu w Hotelu Aquarius Spa w dniach 16 - 18 października 2018 roku.

Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących jest wydarzeniem organizowanym corocznie. W 2018 roku odbędzie się już po raz czterdziesty siódmy.

Tradycyjnie KKBN jest miejscem omówienia ostatnich dokonań w zakresie badań nieniszczących, podejmowania dyskusji i formułowania tematów dalszych prac naukowych, a także szansą na nawiązanie nowych relacji biznesowych.

47. KKBN będzie okazją do wymiany wiedzy i doświadczeń dla wszystkich uczestników, zapoznania się z nowościami technicznymi i technologicznymi na rynku badań nieniszczących i diagnostyki technicznej.

Zapraszamy Państwa do aktywnego udziału w tworzeniu programu 47. Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących.

KKBN

- największa konferencja w obszarze badań nieniszczących w Europie Środkowej
- tradycja, doświadczenie i niezawodność
- forum dyskusji naukowców i praktyków – ponad 350 uczestników z Polski i zagranicy
- wystąpienia znanych ekspertów z dziedziny badań nieniszczących i diagnostyki technicznej
- tłumaczenie symultaniczne wszystkich sesji
- warsztaty praktyczne z zastosowania oprzyrządowania i oprogramowania z obszaru NDT
- wystawa wyposażenia i systemów pomiarowych oraz prezentacja usług z zakresu badań nieniszczących

wkrótce szczegółowe informacje - www.kkbn.pl

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 wypełnionym drukiem „Zgłoszenie publikacji” dostępnym na naszej stronie 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.ptbnidt.pl.

PRENUMERATA

Wydania dostępne w prenumeracie: 1–2/2017 (kwiecień); 3/2017 (wrzesień/październik); 4/2017 (grudzień):

- **prenumerata instytucjonalna:** Kolporter spółka z ograniczoną odpowiedzialnością s.k.; infolinia: 0801 40 40 44;
- **prenumerata indywidualna:** RUCH S.A.; telefon kontaktowy: 22 693 70 00, 801 800 803; e-mail do zamawiania prenumeraty: prenumerata@ruch.com.pl; (numer konta jest generowany dla każdego klienta indywidualnie po złożeniu zamówienia).



teleskop.com.pl



montel.info.pl

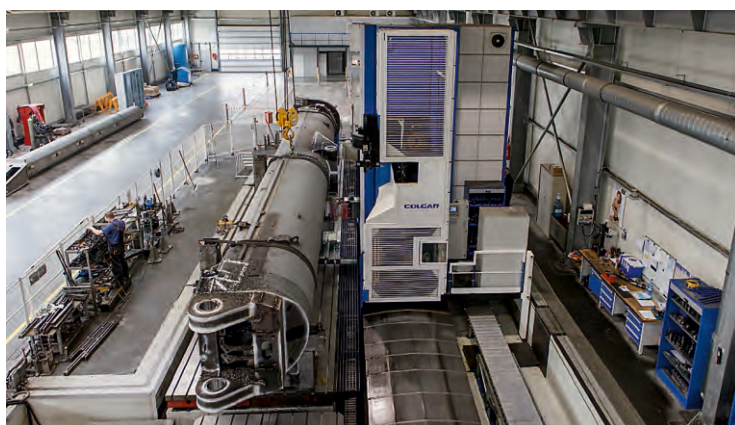


teleyard.com.pl



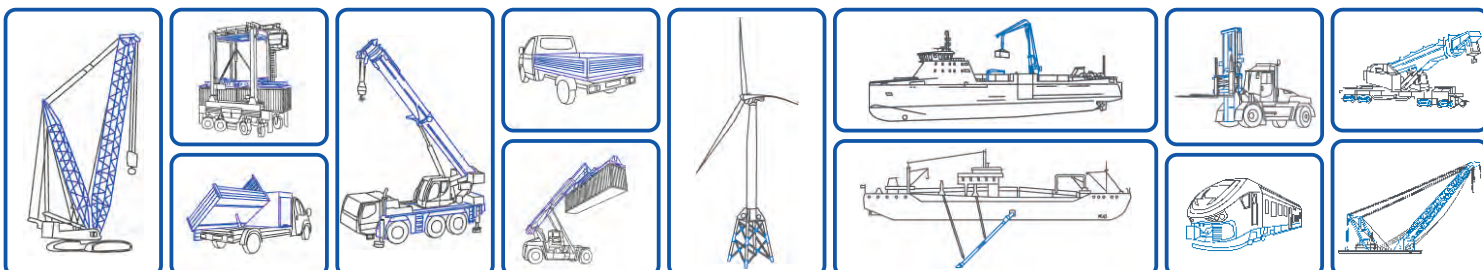
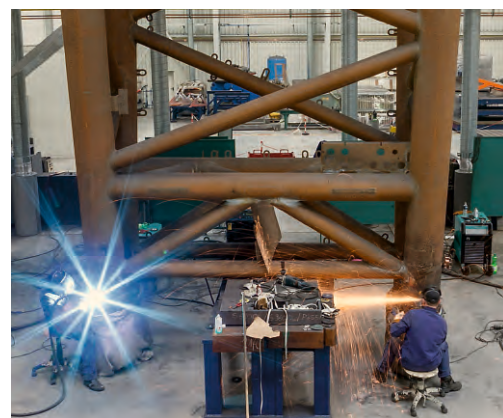
henschel-automotive.com.pl

W skład Holdingu Telemond wchodzi cztery Spółki: Teleskop, Montel, Teleyard i Henschel Engineering Automotive. Jesteśmy specjalistami w zakresie przetwarzania wysokowytrzymałych drobnoziarnistych stali konstrukcyjnych. W naszych zakładach realizujemy usługi między innymi w zakresie realizacji wszystkich powszechnie stosowanych procedur spawalniczych, cięcia blach i rur, obróbki mechanicznej, lakierowania i montażu. Wykonujemy konstrukcje stalowe, zarówno jako pojedyncze elementy jak i złożone moduły dla najważniejszych producentów z branży motoryzacyjnej i maszyn budowlanych. Od wielu lat darzą nas zaufaniem tacy klienci jak np. Liebherr oraz Volkswagen. W zakresie realizacji projektów oferujemy pełen zakres usług. Zajmujemy się zakupem, wykonaniem, a także logistyką, montażem i zapewnieniem jakości.



Spółka Holdingu Firma Teleskop jest największym pracodawcą w Kostrzynie nad Odrą zatrudniając ponad 600 pracowników. W naszych osiemnastu halach produkcyjno-montażowych wytwarzamy od podstaw sprzęt transportowy, konstrukcje spawane ze stali o wysokiej wytrzymałości dla czołowych producentów dźwigów oraz podzespoły dla producentów z sektora kolejowego. Specjalizujemy się również w produkcji wysięgników teleskopowych, chwytaków kontenerowych i podzespołów urządzeń dźwigowych.

Najmłodszą ze spółek córek Holdingu jest Firma Teleyard, która produkuje konstrukcje spawane wykonane ze stali o wysokiej wytrzymałości i odporności na ścieranie, kierując swoją ofertą przede wszystkim w stronę sektora offshore systemów kontenerowych. Teleyard wykonuje także specjalne projekty w zakresie produkcji o dużych wymiarach i ciężarze. Spółka wybudowała w 2015 roku fabrykę w Szczecinie, która specjalizuje się w wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych. Powstają w niej między innymi części dźwigów, chwytaków, specjalistyczne wyposażenie pogłębiarek.



LAMPY UV DLA RÓŻNYCH ZASTOSOWAŃ



■ MR[®] 5000 VARIOLIGHT

- Modułowa budowa
- UVA: 40 W/m²



■ MR[®] 974 QUATTRO-LIGHT

- UVA: 40 W/m²
- Stożek światła Ø 20 cm

■ MR[®] 940 SPRAY-LIGHT

- Zasilanie bateryjne
- UVA: 40 W/m²



DOSTĘPNE RÓWNIEŻ INNE LAMPY