Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



Szkolenia, egzaminy i certyfikacja personelu NDT





NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl





Your Vision, Our Future



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

Olympus Polska Sp. z o. o. | ul. Suwak 3, 02-676 Warszawa | tel.: (22) 366 00 77 industrial@olympus.pl | www.olympus-ims.com







Badania Nieniszczące i Diagnostyka Agenda Wydawnicza SIMP ul. Sabały 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 Żytkowiał REDAKTOR STATYSTYCZNY / EDITOR OF STATISTIC AFFAIRS Sławomir Krajewski **REDAKTOR WYDAWNICZY / PUBLISHING EDITOR**

Adam Saiek

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METODOLOGY Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowsk CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojas 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 MIEDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA

/ INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

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

Prof. Yuji Tsuchida, Oita University, Japan

Prof. Andrzej Tytko, AGH Kraków, Polska

Prof. Lalita Udpa, Michigan State University, USA

Prof. Gábor Vértesy, Hungarian Academy of Sciences, Hungary Dr Grzegorz Wojas, UDT, Polska

- Prof. Sławomir Wronka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Prof. Chunguang Xu, Beijing Institute of Technology, China Prof. Noritaka Yusa, Tohoku University, Japan

Badania Nieniszcz i Diagnost

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 4/2018	ISSN 2451-4462	VOLUMEN 3
SPIS TREŚCI		
Noritaka Yusa, Takuma Tomizawa, Haic Probability of detection analyses of Przemysław Łopato. Michał Herbko	cheng Song, Hidetoshi Hashizume eddy current data for the detection	of corrosion*3
Monitorowanie naprężeń w elementa	ch konstrukcyjnych za pomocą czujn	ika mikropaskowego* 9
Dominik Kukla, Andrzej Zagórski, Piotr Analiza sygnałów prądowirowych od austenitycznych wymienników ciepł	r Wonsewicz d niestandardowych defektów w st a*	alowych rurkach 12
Zbigniew Strumiński, Dariusz Ulbrich, Ultradźwiekowa ocena połaczeń zg	Jakub Kowalczyk, Daria Stępak rzewanych punktowo*	
Wojciech Szymański		
wg PN-EN 13261+A1 2011*	n kolejowych metodą rentgenowsk	ą 23
Adam Kondej, Artur Szczepański Zminiaturyzowane urządzenie do ba wykorzystujace pomiaramplitudowo	adań nieniszczących metodą prądo -czestotliwościowy*	ów wirowych 27
Maciej Roskosz, Krzysztof Fryczowski	, Jerzy Kwaśniewski, Jakub Janisz	
Identyfikacja stopnia deformacji pla zmian parametrów polowego efektu	stycznej stali X2CrNi18-9 na podst ı Barkhausena*	awie 31
Paweł Mazurek, Maciej Roskosz, Jerzy	Kwaśniewski	
Diagnostyka lin nośnych dźwigu oso zmian magnetycznego pola rozpros	obowego na podstawie obserwacji zenia*	34
Igor Lyasota, Łukasz Sarniak, Piotr Ku	stra	
Emisja akustyczna w zastosowaniu poddanych długotrwałej eksploataci	do oceny stanu materiału urządze iw instalaciach przemysłu rafineryj	ń ciśnieniowych
Mateusz Szymków, Krzysztof Schabow	vicz, Tomasz Gorzelańczyk	110g0
Nieniszcząca ocena wpływu wysoki	iej temperatury na destrukcję struk	tury
Marek K. Lipnicki, Krzysztof Mroczek, I	Rafał Obłąkowski	
Badania ultradźwiękowe PA osiowy	ch wrębów wału i stopek łopatek	10
Stophi L-U Wirnikow NP turbin parow Dariusz Ulbrich, Daria Stepak, Jakub K	vychduzej mocy – B+R i Walidacja [~] Kowalczyk, Zbigniew Strumiński	
Ultradźwiękowa ocena przyczepnoś	ści powłoki szpachlówkowej do bla	chy karoseryjnej* 51
Jakub Kowalczyk, Dariusz Ulbrich, Dar Badania ultradźwiekowe połaczeń a	ria Stępak, Zbigniew Strumiński adhezvinych stosowanych w motor	vzacii*
Ryszard Mańczak	·····j···	,,
Zmiany prędkości fali ultradźwiękow	vejw obszarze strefy złącza spawa	nego* 59
Wpływ napięcia zasilania tranzystor	a IGBT na otrzymany sygnał emis	ji akustycznej* 62
Katarzyna Gawdzińska, Piotr Bielawsk	i, Katarzyna Bryll, Ewelina Kostecka	
z kompozytów metalowo-ceramiczn	ve na jakość odlewow lych*	
Grzegorz Psuj, Michał Maciusowicz	·	
szumu Barkhausena na potrzeby ni	eniszczącej oceny elementów stal	owych* 69
Bogdan Zając		
Badania elementów techniki jądrow uszkodzeń pochwy elementu paliwo	ej na podstawie wizualnej oceny owego*	
Piotr Synaszko, Bogdan Zając		
Wykrywanie pęknięć w połączeniac technologii FC Array*	h nitowanych elementów lotniczyc	hz wykorzystaniem 77
Jie Fu, Lenka Dojcanova, Jizeng Ma		
ISEMIR-IR: A worldwide tool to optil	mize occupational radiation protect	lion 80
Bogusław Olech		
Życiorys - Jacek Szelążek		
Życiorys - Leonard Runkiewicz		
47. Krajowa Konferencja Badań Nienis.	zczących	
Sueszczenia pozostałych publikacji Informacie dla Autorów i Czvtelnikó		

* - artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA /PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



Polska





INSTYTUT SPAWALNICTWA Polskie Spawalnicze Centrum Doskonałości



Badania ultradźwiękowe techniką czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej (TOFD - Time of-flight diffraction)

ZALETY TECHNIKI:



Przeszkolenie wstępne TOFD-START

(dla osób nie posiadających wymaganej praktyki w technice TOFD)

Szkolenie przygotowawcze do kursu UT2-TOFD mające na celu zapoznanie uczestników z obsługą sprzętu i praktycznymi aspektami wykonywania badań TOFD.

UT2-TOFD

Badania ultradźwiękowe techniką czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej.

Wymagania:

- ważny certyfikat UT2
- minimum 3 miesiące (500 godz.) praktyki w zakresie techniki TOFD lub ukończony kurs TOFD-START.

NAUKA DLA PRZEMYSŁU

Instytut Spawalnictwa ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice tel.: 32 231 00 11, fax: 32 231 46 52 is@is.gliwice.pl, www.is.gliwice.pl Noritaka Yusa*, Takuma Tomizawa, Haicheng Song, Hidetoshi Hashizume Tohoku University, Japan

Probability of detection analyses of eddy current data for the detection of corrosion

Prawdopodobieństwo detekcji w wykrywaniu korozji metodą prądów wirowych

ABSTRACT

This study evaluated the applicability of probability of detection (POD) analyses to eddy current tests for the detection of corrosions. Forty-three ferromagnetic plates with various corrosions were prepared, and eddy current inspections were performed to gather signals due to the corrosions using an absolute type pancake probe. The probe scanned the surface of the plates two-dimensionally with a constant lift-off to simulate nondestructive inspection of corrosion under insulating coatings. Subsequent POD analyses adopted two models: a conventional one wherein a flaw was characterized using a single parameter, and a multi-parameter model based on the combinational use of numerical simulations and measurements. The analyses demonstrated that the conventional model would overestimate the probability of detecting small corrosions. In contrast, the multi-parameter model characterized POD more reasonably while its confidence interval was comparable to that of the conventional model.

Keywords: electromagnetic nondestructive evaluation; uncertainty; statistical analysis; ferromagnetic plate; artificial corrosion

1. Introduction

Corrosion of steel is one of the most common degradations observed in various structures[1-4], and thus it is also one of the major targets of nondestructive testing and evaluation in general. Commonly, nondestructive inspections to detect corrosions are scheduled and planned on the basis of certain predictions concerning how the structure will be corroded. However, corrosion prediction is difficult since corrosions are chemical phenomena with various influencing factors[5-8]. Therefore, the validity of the schedule and the plan should be evaluated probabilistically, i.e., from the viewpoint of risk. This indicates the need to evaluate the capability of nondestructive testing methods applied to the detection of corrosion not deterministically but probabilistically, too.

One of approaches that would address this issue is the application of the probability of detection (POD) concept that represents the capability of nondestructive testing methods to detect a flaw probabilistically[9-11]. A problem associated with the application of the conventional POD model is that a flaw needs to be characterized by a single parameter although it is actually difficult to characterize corrosion using just a single parameter[12-14]. A simple extension of the conventional POD model to consider multiple flaw parameters leads to a significant

STRESZCZENIE

Dokonano oceny przydatności analiz prawdopodobieństwa wykrywania (POD) do wykrywania korozji na podstawie badań metodą prądów wirowych. Przygotowano czterdzieści trzy płytki ferromagnetyczne z różnym stanem skorodowania. Następnie przeprowadzono inspekcje metodą prądów wirowych i zebrano sygnały uzależnione od korozji za pomocą absolutnych sond typu "pancake coil". Sonda skanowała powierzchnie płyt w dwóch wymiarach na stałej wysokości nad materiałem, tak by zasymulować nieniszczącą inspekcję korozji w elementach pokrytych powłokami izolacyjnymi. W kolejnych etapach analizy POD przyjęto dwa modele: konwencjonalny, w którym wada była charakteryzowana za pomocą pojedynczego parametru, a także model wieloparametrowy oparty na kombinacyjnym zastosowaniu symulacji numerycznych i pomiarów. Analizy wykazały, że model konwencjonalny prowadził do przeszacowania prawdopodobieństwa wykrycia małych korozji. Natomiast model wieloparametrowy charakteryzował POD bardziej racjonalnie, a jego przedział ufności był podobny jak w przypadku modelu konwencjonalnego

Słowa kluczowe: elektromagnetyczne badania nieniszczące; niepewność; analiza statystyczna; płyta ferromagnetyczna; sztuczna korozja

increase in the cost and burden necessary for constructing POD.

Recent studies by the authors have proposed another POD model, the multi-parameter POD model, to consider more than one flaw parameter relatively easily on the basis of a combinational use of numerical simulations and measurements[15,16]. The model does not postulate uniform variance of measured signals or linerality between flaw parameters and signals due to a flaw, which enables modeling of the effect of the flaw parameters on the signals reasonably and naturally. The studies demonstrated the effectiveness of the multi-parameter POD model applied to the POD analysis of artificial slits simulating surfacebreaking cracks. However, its applicability to corrosions, the profile of which is much more complicated than artificial slits, has not been evaluated so far.

On the basis of this background, this study evaluated the applicability of the multi-parameter POD model to characterize the detectability of corrosions using eddy current testing. Forty-three magnetic plate samples with artificial corrosion were prepared; signals due to the corrosions were gathered using an absolute type pancake probe driven at 100 kHz with a lift-off of 1.2 mm to simulate eddy current inspection of corrosions under coating. The results of this study confirmed the importance of characterizing corrosion using more than one parameter to obtain a reliable POD.

^{*}Corresponding author. E-mail: noritaka.yusa@qse.tohoku.ac.jp

2. Materials and methods

2.1 Samples

Cold-rolled steel plates (JIS G 3141, Grade SPCC) were prepared from various lots to artificially introduce corrosions. The plates measured 100 x 50 mm and had a thickness of 1.94-1.95 mm. After vinyl tape was attached to mask most of the plate surfaces to restrict corrosion area, the plates were soaked into iron(III)-chloride-based etchant H-1000A (Sunhayato Corp., Japan) at 50°C to introduce corrosions. Finally 43 samples with corrosions were prepared; each sample contained a single corroded area approximately at its center.

Table 1 lists the 43 samples prepared. The digits in the ID stand for the duration in hours for which the sample was soaked into the etchant; the characters following the digits are to identify samples having the same duration. The small and large diameter mean the diameter of the largest circle that the corroded area could contain and the diameter of the smallest circle that could encircle the corroded area, respectively, which were measured by a vernier caliper. The maximum depth of the corrosion was measured by a MCD232-25P digital micrometer with tapered tips (Niigata seiki Co., Ltd., Japan).

Neither small nor large diameter showed clear correlation with the depth (correlation coefficient, R = 0.36 and 0.26, respectively). This was because the diameters depended mainly on the area that was not masked by the vinyl tape before the sample was soaked into the etchant. In contrast, the small and the large diameters were strongly correlated (R = 0.83).

Figure 1 shows photographs of six of the corrosions, confirming the variety of corrosion profiles in not only size but also in their significantly different morphologies. The depth of each corrosion is not constant. These indicated that the three parameters of small and large diameter and maximu depth were far from sufficient in providing an accurate representation of corrosion profiles. It should be noted that increasing the number of parameters used to characterize a flaw leads to difficulty in analyzing the effect of the parameters on measured signals; however, it would be reasonable to adopt parameters to characterize the macroscopic profile of a flaw that would affect the integrity of structures.



Fig. 1. Photographs of corrosions introduced into six of the samples. The size of the photographs is 5 cm x 5 cm.

Rys. 1. Fotografie korozji wytworzonych w sześciu próbkach. Rozmiar zdjęć wynosi 5 cm x 5 cm.

Tab. 1. List of samples prepared in this study unit: mm. Tab. 1. Lista próbek użytych podczas badania.

ID	Small diameter,	Large diameter,	Maximum	
ID	mm	mm	depth,mm	
3A	5.0	13.3	0.10	
3B	16.9	23.4	0.12	
3C	24.4	32.7	0.09	
3D	11.7	18.1	0.29	
5A	17.2	24.2	0.17	
5B	9.9	5.6	0.24	
5C	5.7	6.4	0.22	
7A	17.3	19.2	0.24	
7B	23.8	35.3	0.28	
7C	6.3	12.0	0.22	
10A	25.5	23.6	0.46	
10B	8.1	8.2	0.62	
16A	19.3	21.9	0.43	
16B	30.2	42.8	0.46	
16C	35.2	51.7	0.35	
16D	22.4	22.6	0.44	
16E	45.1	58.1	0.41	
16F	27.9	47.8	0.89	
18A	23.3	35.2	0.59	
18B	25.4	32.5	0.69	
24A	14.0	20.6	1.11	
24B	19.2	29.8	0.84	
24C	9.4	8.1	0.36	
24E	30.1	42.6	0.92	
24F	25.1	29.0	0.74	
24G	21.4	16.3	0.19	
24H	23.0	19.1	1.01	
27A	32.8	40.4	1.87	
31A	33.8	35.3	0.68	
35A	2.6	2.7	0.04	
35B	3.4	3.3	0.04	
35C	40.6	23.9	1.35	
35D	34.0	20.0	0.86	
40A	26.9	28.7	0.49	
41A	36.8	48.6	0.85	
41B	32.5	53.3	1.59	
41C	25.9	27.1	1.14	
64A	30.0	33.4	1.10	
71A	16.5	16.2	1.95	
71B	19.4	26.4	1.91	
71C	20.0	39.0	0.97	
71D	25.6	21.8	1.80	
71E	13.3	17.3	1.57	

2.2 Eddy current examination

Eddy current examinations were conducted using the aect2000N commercial eddy current instrument (Aswan ECT Co. Ltd., Osaka, Japan), and an absolute type pancake probe with a height, inner diameter and outer diameter of 0.8, 1.2, and 3.2 mm, respectively. The excitation frequency was 100 kHz. The probe was attached to an XYZ-stage controlled by a PC, for two-dimensional scanned of the surface where the corrosion was introduced, with a lift-off of 1.2 mm to simulate eddy current inspection of corrosions under insulating coatings. The pitch of the scanning is 2 and 3 mm in the lateral and longitudinal directions of the sample, respectively.

2.3 POD analysis

This study adopted two POD models: a conventional POD model and a multi-parameter POD model.

The conventional POD model assumes linearity between the 'size' of a flaw, *a*, and the amplitude of signals, \hat{a} , whereas proper transformation, typically log-transform, is applied when it is difficult to confirm the linearity between them. After \hat{a} is represented as a probabilistic function of *a*, the probability that the probabilistic function exceeds a given threshold, a_{th} , provides the probability that a flaw with a size of *a* is detected, $P(a) = P(\hat{a} > a_{th})$. More detailed and specific procedures can be found in the ASM and USDOD Handbooks[10,11]. It should again be emphasized that this model characterizes a flaw using a single parameter.

The multi-parameter POD model assumes that measured signals due to a flaw with profile represented by a vector \vec{a} are represented as:

$$V(\vec{a}) = N(\mu_1, \sigma_1^2) V^{\sin}(\vec{a}) + N(\mu_2, \sigma_2^2)$$

where $V(\vec{a})$ and $V^{\text{sim}}(\vec{a})$ are the maximum amplitude of signals obtained from experiments and by numerical simulation, respectively.

In this study, axisymmetric finite element simulations were performed to obtain $V^{\text{sim}}(\vec{a})$. In the simulations, a corrosion was simply modeled as a cylindrical void situated directly below a probe; the parameters used in the simulations are summarized in Tab. 2. It should be noted that the elements of \vec{a} are flaw parameters that can be explicitly modeled in numerical simulations, and that the simulation does not assume the distribution of noise sources to evaluate noise[17-20]. The effect of uncertainty and noise are represented by two normal distributions, $N(\mu, \sigma^2)$, where μ and σ stand for the mean and standard deviation. The four

parameters, μ_1 , σ_1 , μ_2 , and σ_2 , characterizing the uncertainty and noise are evaluated by likelihood analysis on the basis of $V(\vec{a})$ and $V^{\text{sim}}(\vec{a})$; the probability of detection is given as the probability that $V(\vec{a})$ exceeds a given threshold a_{th} , $P(\vec{a}) =$ $P(V(\vec{a}) > a_{\text{th}})$. More detailed procedures to evaluate the four parameters are described in the earlier publications[15,16]

Tab. 2. Parameters used for the simulations to obtain $V^{\text{sim}}(\vec{a})$.

Tab. 2. Parametry użyte w symulacji w celu otrzymania V ^{sim} (o				
Parameter	Value			
Conductivity of plate, MS/m	6.0			
Relative permeability of plate	100			
Diameter of the void, mm	1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 46			
Depth of the void, mm	0.03, 0.06, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60, 1.70, 1.80, 1.90, 1.93, 1.96			

3. Results and discussion

Figure 2(a) summarizes the amplitude of the signals measured in the experiments, $V(\vec{a})$. The amplitudes were normalized so that the amplitude of the signal due to the sample with the deepest corrosion, 71A, was 1.0. This figure, together with Tab. 1, revealed that 'large' corrosions do not always provide larger signals. Although a finer scanning pitch would have changed the measured signals, the most plausible reason for this observation is that the three parameters do not fully represent the corrosion profile, as discussed above. Figure 2(b) presents the amplitude of simulated signals, $V^{sim}(\vec{a})$, which are obtained by interpolating the results of the numerical simulations. Whereas the two figures would be qualitatively similar to each other, the figures reveal the difficulty in quantitatively evaluating signals due to corrosions. This implies that it would not be reasonable to use numerical simulations just to increase the amount of data for POD analysis.



Fig. 2. Amplitude of the signals: a) measurement; b) simulation. Rys. 2. Amplitudy sygnałów:) pomiar; b) symulacja.

The results of the conventional POD analyses are summarized in Figs. 3-5. All of the parameters and the signal amplitude were log-transformed on the basis of several preliminary tests to evaluate the linearity between a flaw parameter and the signal amplitude. Figures 3 and 4 reveal that PODs as a function of the small or large diameter were not reliable because of their large confidence intervals. The results of the regression analyses showed relatively large standard deviations, indicating that the parameters were not the most dominant ones affecting the signals. In contrast, POD as a function of the maximum depth, which is shown in Fig. 5, showed a much narrower confidence interval that



Fig. 3. Results of regression and POD analyses when the small diameter was used as a parameter to characterize corrosion. Rys. 3. Wyniki regresji i analizy POD dla przypadku, gdy jako parametru charakteryzującego korozję użyto małą średnicę.



Fig. 4. Results of regression and POD analyses when the large diameter was used as a parameter to characterize corrosion. Rys. 4. Wyniki regresji i analizy POD dla przypadku, gdy jako parametru charakteryzującego korozję użyto dużą średnicę.

implied the validity of the POD. It should be noted, however that Figs. 3 and 4 indicate that the diameters should influence the signals as well as POD because the diameters have little correlation with the depth.



Fig. 5. Results of regression and POD analyses when the depth was used as a parameter to characterize corrosion. **Rys. 5.** Wyniki regresji i analizy POD dla przypadku, gdy jako parametru charakteryzującego korozję użyto głębokość.

Confirming this is Fig. 6, which shows the effect of the parameters on signals using the results of the numerical simulations to obtain $V^{\text{sim}}(\vec{a})$. Because the simulations were conducted using the axisymmetric model, a corrosion was modeled as a cylindrical void with a diameter of φ and constant depth, as stated above. As can be seen, when the diameter was smaller than 5 mm, its effect was not negligible. Thus, considering only the depth of a corrosion is not sufficient especially in evaluating the probability of detecting small flaws.



Fig. 6. The effect of the diameter of the void, φ , on the relationship between the depth of the void and the amplitude of the signal due to the void.

Rys. 6. Wpływ średnicy pustki, φ , na zależność między głębokością pustki a amplitudą sygnału wywołanego pustką.

Figure 7 shows the POD as a function of both the small diameter and the depth of corrosion; its confidence interval is presented in Fig. 8. The four contour lines on the base planes of the figures correspond to POD = 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9. The strong correlation between the small and large diameters implied that using the large diameter instead of the small one would lead to a similar result, whereas the confidence intervals shown in Figs. 3 and 4 supported the validity of using the small diameter.

The POD presented in Fig. 7 highlights the difficulty in detecting a deep corrosion if its small diameter is as small as a few millimeters, which is consistent with the findings from Fig. 6. The confidence interval of the POD corresponded to change in a maximum depth of approximately 0.2 mm if the small diameter of corrosion was larger than a few millimeters. This was comparable with that of the conventional POD shown in Fig. 5(b).



Fig. 7. Two-dimensional POD obtained as a function of both small diameter and maximum depth of corrosions. Rys. 7. Dwuwymiarowy rozkład POD uzyskany w funkcji za-

równo małej średnicy, jak i maksymalnej głębokości korozji.



(b) upper confidence bound

Fig. 8. Fig. 8 Confidence interval of the two-dimensional POD shown in Fig. 7.

Rys. 8. Przedział ufności dwuwymiarowego rozkładu POD pokazanego na rys. 7.

4. Conclusion

This study evaluated the applicability of POD analyses to eddy current inspection for corrosion detection. Ferromagnetic plates with artificial corrosions were prepared; eddy current testing using an absolute type pancake probe was conducted to simulate inspection of corrosions under insulating coatings. Two POD models were applied: a conventional one that characterized a flaw using a single parameter, and a multiparameter model based on a combinational use of numerical simulations and measurements. The results of this study confirmed that conventional model would overestimate the POD of small corrosions while the multi-parameter model characterized the POD more reasonably.

5. References/Literatura

- RE. Melchers, "Recent progress in the modeling of corrosion of structural steel immersed in seawaters", Journal of Infrastructure Systems, vol. 12, no. 3, pp. 154-162, 2006.
- [2] HR. Vanaei, A. Eslami, A. Egbewande, "A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 149, pp. 43-54, 2017.
- [3] W. Ferdous, A. Manalo, "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies –Review of current practice", Engineering Failure Analysis, vol. 44, pp. 17-35, 2014.
- [4] SJ. Findlay, ND. Harrison, "Why aircraft fail", Materials Today, vol. 11, 18-25, 2002.
- [5] F. Caleyo, JL. Gonzalez, JM. Hallen, "A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 79, pp. 77-86, 2002.
- [6] Y. Sahraoui et al. "Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 104, pp. 76-82, 2013.
- [7] S. Zhang, W. Zhou, "System reliability of corroding pipelines considering stochastic process-based models for defect growth and internal pressure", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 111-112, pp. 120-130, 2013.
- [8] MR. Dann, L. Huyse, "The effect of inspection sizing uncertainty on the maximum corrosion growth in pipelines", Structural Safety, vol. 70, pp. 71-81, 2018.
- [9] C. Annis, J.C. Aldrin, A. Sabbagh, "NDT Capability What is missing in nondestructive testing capability evaluation?", Materials Evaluation, vol. 73, no. 3, pp. 44-54, 2015.
- [10] AP. Berens, NDE Reliability data analysis, ASM Handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control: ASM International, pp. 689-670, 1989.
- [11] Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment: USDOD, MIL-HDBK-1823A, 2009.
- [12] J. Kim, M. Le, J. Lee, YH. Hwang, "Eddy current testing and evaluation of far-side corrosion around rivet in jet-engine intake of aging supersonic aircraft", Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 33, pp. 471-480, 2014.
- [13] R. Howard, F. Cegla, "On the probability of detecting wall thinning defects with dispersive circumferential guided waves", NDT&E International, vol. 86, pp. 73-82, 2017.
- [14] J. Kim, et al. "Nondestructive evaluation of far-side corrosion around a rivet in a multilayer structure", Research in Nondestructive Evaluation, vol. 29, no. 1, pp. 18-37, 2018.
- [15] N. Yusa, J. Knopp, "Evaluation of Probability of Detection (POD) studies with multiple explanatory variables", Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 53, no. 4, 574-579, 2016.
- [16] N. Yusa, W. Chen, H. Hashizume, "Demonstration of probability of detection taking consideration of both the length and the depth of a flaw explicitly", NDT&E International, vol. 81, pp. 1-8, 2016.
- [17] J.C. Aldrin, et al. "Demonstration of model-assisted probability of detection evaluation methodology for eddy current nondestructive evaluation", AIP Conference Proceedings, vol. 1430, pp. 1733-1740, 2012.
- [18] RM. Meyer, JP. Lareau, SL. Crawford, MT. Anderson, "Review of literature for model assisted probability of detection", PNNL-23714:2014.
- [19] JS. Knopp, R. Grandhi, JC. Aldrin, I. Park, "Statistical analysis of eddy current data from fastener site inspections", Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 32, pp. 44-50, 2013.
- [20] PN. Bilgunde, LJ. Bond, "Model-assisted approach for probability of detection (POD) in high-temperature ultrasonic NDE using low-temperature signals", Nuclear Technology, vol. 202, pp. 161-172, 2018.

NOWE ROZWIĄZANIA W DZIEDZINIE PAUT = NOWA JAKOŚĆ





ADVANCED TECHNOLOGIES

	MANTIS	GEKKO	PANTER
MASZ WIĘCEJ PYTAŃ? ZADZWOŃ! +48 32 720 24 04			
ILOŚĆ KANAŁÓW :	16:64 + 2 TOFD	64:64 + 4 TOFD	32:128 do 2048:2048
ROZDZIELCZOŚĆ :		16 bit (zakres dynamiczny 800%	6)
PRF:	do 20kHz	do 20kHz	do 40 kHz
OBSŁUGA SOND :	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA	LINEAR, MATRIX, DLA, DMA, DAISY, ANNULAR, SECTORIAL
TECHNIKI OBRAZOWANIA :	PE, PAUT, TFM, FMC, TOFD	PE, PAUT, TFM, FMC, TOFD	PE, PAUT, TFM, FMC, PWI, TOFD
TOTAL FOCUSSING METHOD (TFM):	Real-Time TFM	Real -Time TFM, Adaptive TFM	Real-Time TFM
WEJŚCIA ENKODEROWE :	2 lub 3	3	3
DYSK TWARDY :		SSD 128GB do 1TB	
DODATKOWE FUNKCJE :	wbudowany konfigurator d	o parametryzacji sprzętu, narzęd badania i kalibracji	zia do obliczenia parametrów



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

Przemysław Łopato, Michał Herbko* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Monitorowanie naprężeń w elementach konstrukcyjnych za pomocą czujnika mikropaskowego

Strain monitoring in structural elements by microstrip sensor

ABSTRACT

In this work, a numerical analysis of circular microstrip sensors to assess deformation of materials and indirectly strain is presented. In this type of sensors, the reflection coefficient S_{11} is measured to determine strain value. Reflection coefficient represents the ratio of the power of reflected signal to the power of input signal. The coefficient is measured in frequency domain. The shift of resonant frequency caused by deformation of resonator is used to evaluate the strain value. This kind of transducer can be alternative to a strain gauge. In this article, the sensitivity of transducers made on laminates with different permittivity was evaluated.

1. Wstęp

Technika Structural Health Monitoring (SHM) stosowana jest do monitorowania stanu m.in.: samolotów, pojazdów kosmicznych, tam, drapaczy chmur czy mostów. Systemy SHM coraz częściej zastępują lub wspomagają tradycyjne sposoby kontroli stanu konstrukcji, ponieważ zmniejszają koszty utrzymania, dają odpowiedź o stanie obiektu po wystąpieniu gwałtownych anomalii pogodowych, takich jak trzęsienia ziemi, huragany czy intensywne opady śniegu, dostarczają informacji, które mogą być użyteczne przy projektowaniu nowszych struktur, a w przypadku samolotów umożliwiają skrócenie czasu postoju oraz serwisowania [1-2]. Niezwykle ważnym elementem systemów SHM jest sieć czujników. W przypadku systemów do monitorowania stanu konstrukcji mostów około 50% wszystkich czujników stanowią elementy do pomiaru naprężeń [1]. Dotychczas do pomiaru wartości naprężeń wykorzystywane były: tensometry, czujniki światłowodowe, piezoelektryczne oraz magnetyczne [3-6].

Niedawno pojawił się w literaturze pomysł wykorzystania anten mikorpaskowych do pomiaru odkształceń i pośrednio naprężeń [7-14]. Proponowany w pracy czujnik składa się z substratu dielektrycznego, na który z jednej strony została naniesiona płaszczyzna masy, a z drugiej promiennik oraz linia mikropaskowa. Czujnik przyklejany jest do elementu badanego. Odkształcenie powoduje zmianę wymiarów promiennika(rezonatora), co wpływa na zmianę rozkładu gęstości prądu w promienniku. Stopień odkształcenia

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy przedstawiono analizę numeryczną przetworników mikorpaskowych z kołowymi promiennikami do badania odkształceń materiałów i pośrednio naprężeń w nich występujących. W przypadku tego rodzaju czujników odkształcenie wyznaczane jest poprzez pomiar współczynnika odbicia S_{11} , który reprezentuje stosunek mocy sygnału odbitego do mocy sygnału wejściowego. Pomiar dokonywany jest w dziedzinie częstotliwości. Do oceny wartości odkształcenia wykorzystywane jest przesunięcie częstotliwości rezonansowej wywołane zmianą geometrii rezonatora. Zaproponowane w pracy przetworniki mogą być alternatywą dla czujników tensometrycznych. W tym artykule zbadano czułość przetworników wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej.

Słowa kluczowe: czujnik naprężeń, czujnik mikropaskowy, technika mikrofalowa, SHM, badania nieniszczące

oceniany jest poprzez pomiar współczynnika odbicia S₁₁, który reprezentuje stosunek mocy sygnału odbitego do mocy sygnału wejściowego. Pomiar jest wykonywany w dziedzinie częstotliwości za pomocą analizatora. Do oceny wartości odkształcenia wykorzystywane jest przesunięcie częstotliwości rezonansowej wywołane zmianą geometrii rezonatora. Do tej pory najczęściej badane były przetworniki z prostokątnymi promiennikami [7-10]. Jednak rozwój mikropaskowych czujników naprężeń nie zatrzymał się na wykorzystaniu jedynie przetworników z prostokątnymi promiennikami, zbadane zostały również przetworniki z promiennikami o innych kształtach, które charakteryzują się ciekawymi właściwościami kierunkowymi [11-14]. W szczególności należy zwrócić uwagę na pracę [11], w której autorzy wykazali możliwość wykorzystania jednego czujnika do równoczesnego pomiaru kąta oraz wartości naprężenia. Do pomiaru tych parametrów zastosowano zmiany dwóch częstotliwości rezonansowych, przy których występują różne rozkłady gęstości prądu w kołowym promienniku, a tym samym inne czułości przetwornika na odkształcenia działające w różnych kierunkach. Kolejną zaletą jest możliwość pomiaru naprężeń za pomocą przetworników mikropaskowych bezprzewodowo, co zostało pokazane w [14].

W niniejszej pracy zbadano czułość przetworników wykonanych na substratach o rożnej wartości przenikalności elektrycznej, co nie zostało wcześniej przedstawione w literaturze. W tym celu zaprojektowano szereg przetworników mikropaskowych z kołowymi promiennikami i przeprowadzono analizy numeryczne.

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.032

Keywords: strain sensor, microstrip sensor, microwave technique, SHM, nondestructive testing

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: michal.herbko@zut.edu.pl

0

2. Projekt czujnika

W pracy zaprojektowano czujniki na laminacie o grubości h = 0,5 mm na częstotliwość operacyjną f_r = 2,5 GHz. Promień czujnika został obliczony z następującej zależności [15]:

$$r = \frac{1}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_{\Gamma}F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1,7726\right]\right\}^{\frac{1}{2}}}$$
(1)

gdzie:

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_{\rm r} \sqrt{\varepsilon_{\rm r}}} \tag{2}$$

r – promień promiennika, ε_r – względna przenikalność elektryczna laminatu, f_r – częstotliwość rezonansowa, h – grubość laminatu.

Natomiast szerokość linii mikropaskowej została wyznaczona przy pomocy modelu opisanego w [16]. Projekt czujnika został pokazany na rysunku 1, a dokładne wymiary zaprojektowanych czujników zostały przedstawione w tabeli 1. Na podstawie przedstawionych wymiarów zaprojektowanych przetworników, można zauważyć, że wraz ze wzrostem ε_r , maleje długość promienia rezonatora *r*, jak i szerokość ich linii transmisyjnych *w* doprowadzających sygnał do promiennika.



Rys. 1. Zaproponowany czujnik; a) rysunek ogólny czujnika mikropaskowego, b) projekt czujnika.

Fig. 1. Proposed sensor; a) general figure of microstrip sensor, b) sensor design.

Tab.	1.	Wymiary czujników.
Tab.	1.	Sensors dimensions.

ε _r	<i>r</i> [mm]	<i>w</i> [mm]
2,2	23,7	1,541
4,4	16,76	0,956
6,6	13,685	0,751
8,8	11,852	0,588
11	10,601	0,435
13,2	9,677	0,359

3. Analiza numeryczna

Dokonano analizy numerycznej zaproponowanych w pracy czujników. W tym celu wykorzystana została metoda elementów skończonych. Model numeryczny oraz obliczenia zostały wykonane w środowisku Comsol Multiphysics. W opracowanym modelu numerycznym zaprojektowany przetwornik przyklejony jest do blachy konstrukcyjnej S355J2+N, aby odwzorować rzeczywiste warunki, w jakich może być użyty. Z drugiej strony blachy, którą obciążano umieszczono taki sam substrat, z jakiego wykonany został czujnik, aby uniknąć wygięcia blachy, do której przytwierdzony jest badany przetwornik (Rys. 2). Podczas przeprowadzanej analizy numerycznej, najpierw blacha wraz z zaprojektowanym czujnikiem została odkształcona za pomocą modułu mechanicznego (Solid Mechanics). Następnie wykorzystany został moduł do analizy pola elektromagnetycznego wysokich częstotliwości (RF module) w celu wyznaczenia częstotliwości rezonansowych przetwornika przy zadanym naprężeniu. Podczas obliczeń wykorzystywane były następujące równania:

$$= \nabla \cdot S + \mathbf{F}_{\mathbf{V}} \tag{3}$$

$$\nabla \times \mu_{\rm r}^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon_{\rm r} - \frac{j\sigma_{\rm e}}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \tag{4}$$

gdzie: S – naprężenie, \mathbf{F}_{v} – siła na jednostkę objętości, μ_{r} – względna przenikalność magnetyczna, E – pole elektryczne, $k_{_{0}}$ – kątowa liczba falowa, $\varepsilon_{_{r}}$ – względna przenikalność elektryczna, $\sigma_{_{e}}$ –konduktywność elektryczna, ω – pulsacja.

W przeprowadzonej analizie numerycznej mierzono częstotliwość rezonansową dla naprężenia równego 0 oraz 350 MPa, ponieważ dotychczas w literaturze została wyznaczona ściśle liniowa zależność zmian częstotliwości Δf_r od stopnia odkształcenia monitorowanego elementu.

$$\Delta f_{\rm r} = f_{\rm rxMPa} - f_{\rm r0MPa} \tag{5}$$

gdzie: f_{rxMPa} – częstotliwość rezonansowa przy naprężeniu x MPa, f_{roMPa} – częstotliwość rezonansowa przy naprężeniu 0 MPa.



Rys. 2. Model numeryczny. **Fig. 2.** Numerical model.

W tym artykule zdecydowano się przeanalizować zmiany Δf_r dla dwóch pierwszych częstotliwości rezonansowych występujących dla promiennika kołowego. Na rysunku 3 został przedstawiony obliczony współczynnik odbicia S_{11} dla przetwornika zaprojektowanego na laminacie o względnej

przenikalności elektrycznej ε_r = 4,4. Natomiast w tabeli 2. pokazano zmiany częstotliwości rezonansowych dla czujników zaprojektowanych z wykorzystaniem różnych laminatów. Otrzymane wyniki z eksperymentu numerycznego pokazują nieznaczną zmianę czułości przetworników wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej.



Rys. 3. Obliczony współczynnik odbicia S_{11} dla ε_r = 4.4. **Fig. 3.** Calculated reflection coefficient S_{11} for ε_r = 4.4.

Tab. 2.	Przesunięcie częstotliwości rezonansowych.
Tab. 2.	Shift of resonant frequencies.

\mathcal{E}_{r}	Δf_{r1} [MHz]	Δf_{r_2} [MHz]
2,2	-3,85	-2,14
4,4	-3,79	-2,09
6,6	-3,76	-2,38
8,8	-3,73	-2,29
11	-3,73	-2,28
13,2	-3,64	-2,28

4. Podsumowanie

Wyniki z wykonanej analizy numerycznej wykazują zbliżone czułości przetworników z kołowymi promiennikami wykonanych na laminatach o różnej przenikalności elektrycznej. Dla pierwszej częstotliwości rezonansowej Δf_{r_1} zmienia się maksymalnie o 5,8%, natomiast w przypadku drugiej częstotliwości rezonansowej zmiana Δf_{r2} wynosi co najwyżej 10%. Należy jednak zwrócić uwagę na znaczne różnice w wielkości przetworników wykonanych na różnych laminatach. Im większa jest względna przenikalność elektryczna substratu, na którym został wykonany przetwornik, tym mniejsze są jego wymiary. Długość promienia promiennika czujnika wykonanego na laminacie o względnej przenikalności elektrycznej ε_r = 2,2 wynosi 23,7 mm, natomiast dla $\varepsilon_r = 13,2$ promień promiennika wynosi 9,677 mm. Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej pozwalają stwierdzić, że możliwa i celowa jest miniaturyzacja przetworników mikropaskowych do pomiaru naprężeń.

5. Literatura

- G,Capellari, E,Chatzi,S,Mariani, "Cost-Benefit Optimization of Structural Health Monitoring Sensor Networks," Sensor, 18(7),2174, 2018,
- [2] Y,Q, Ni, K,Y, Wong, "Integrating Bridge Structural Health Monitoring and Condition-Based Maintenance Management," 4th International Workshop on Civil Structural Health Monitoring, 2012 Nov 6-8, Berlin, Germany,
- [3] J, Manojlović, P, Janković, "Bridge measuring circuits in the strain gauge sensor configuration" Mechanical Engineering, 2013, 11(1), pp, 75-84,
- [4] D, Betz, Thursby G,J,, Culshaw B,, Staszewski W,J,, "Advanced of a fibres Bragg grating strain gauge rosette," Journal of Lightwave Technology, 24(2), pp, 1019-1026,
- [5] J, Sirohi, I, Chopra, "Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors," Journal of Inteligent Material Systems and Structures, 2000, 11(4), pp,246-257,
- [6] G, Psuj, T,Chady, M,Enokizono, T,Todaka, "Stress evaluation in nonoriented electrical steel samples by observation of vector magnetic flux under static and rotating field conditions," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 44(3,4), pp, 339-347,
- [7] U, Tata, H, Huang, R,L, Carter, Chiao J,C., "Exploiting a patch antenna for strain measurements," Measurement Science and Technology, vol, 20 pp, 1-7, 2009,
- [8] A, Benchirouf, R, Zichner, C, Muller, O, Kanoun, "Electromagnetic Simulation of Flexible Strain Sensor based Microstrip Patch Antenna," International Journal of Microwave and Optical Technology, vol 6-I, pp,397-401, 2015,
- [9] J W, Wang, H, Ge, T, Liu T,, Liu M,, "Study of Patch Antennas for Strain Measurement," Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVIII), 40:313-321, 2015,
 [10] P, Lopato, M, Herbko, "Microwave Structural Health
- [10] P, Lopato, M, Herbko, "Microwave Structural Health Monitoring Sensor for Deformation Measurement of Bended Steel Structures: Influence of Curvature Effect," Radioengineering, 26(4), pp, 1060-1066, 2017,
- [11] P. Lopato, M. Herbko, "A Circular Microstrip Antenna Sensor for Direction Sensitive Strain Evaluation," Sensors, 18(1), 310, 2018,
- [12] A,Daliri, A,Galehdar, W,S,T,Rowe, K,Ghorbani, S,John, "Utilising microstrip patch antenna strain sensors for structural health monitoring," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 23(2), 2012,
- [13] A,Daliri, A,Galehdar, S,John, W, S,T, Rowe, K, Ghorbani, "Slotted circular microstrip patch antenna application in strain based strucutural health monitoring," AIAC14 Fourteenth Australian International Aerospace Congress, Melbourne, Australia, 28 February-3 March 2011,
- [14] A,Daliri, A,Galehdar, W,S,T,Rowe, S,John, C,H,Wang, K,Ghorbani, "Quality factor effect on the wireless range of microstrip patch antenna strain sensors," Sensor, 14(1), pp, 595-605, 2014,
- [15] C,A, Balanis, "Antenna theory, third edition," John Wiley & Sons, Hoboken, 2005,
- [16] J.A.Dobrowolski "Technika Wielkich Częstotliwości,"Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2011.

Dominik Kukla^{1*}, Andrzej Zagórski², Piotr Wonsewicz² ¹Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa ²Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska

Analiza sygnałów prądowirowych od niestandardowych defektów w stalowych rurkach austenitycznych wymienników ciepła

Analysis of eddy current signals from nonstandard defects in steel austenitic tubes of heat exchangers

ABSTRACT

The impedance characteristics from non-standard defects in the austenitic tube material were analyzed. These indications were obtained during the scanning of steel pipe 316 with an internal probe using the MultiScan 5800 apparatus. The classic ECT vortex current method was used to examine both the pipe with designed defects developed on the basis of analysis of the most common failures in industrial heat exchanger tube inserts and reference tubes with defects standard. The non-standard defects created were aimed at simulating the combinations of cracks, pits or other defects occurring as a result of aggressive chemical and mechanical factors encountered in industrial diagnostics. The tests consisted in scanning the entire length of the pipe with constant velocity, using a transient probe recording electrical impedance changes in relative mode and absolute mode. On the basis of the results obtained, it was possible to describe the dimensions and location of standard defects, verifying the conformity of the actual parameters of particular defects to the virtual design. Interpretation of results for non-standard defects was based on a comparison with the results obtained for standard reference samples. The obtained values for complex non-standard defects enabled their characterization by determining their volume and position in relation to the measuring probe. In most cases, it was not possible to interpret the geometry of the defect, which can be done using other non-destructive testing techniques.

Keywords: Eddy currents, diagnostic tests, heat exchangers, austenitic pipes

STRESZCZENIE

Analizie poddano charakterystykę impedancyjną od niestandardowych defektów w materiale rury austenitycznej. Wskazania te otrzymano podczas skanowania rury ze stali 316 sondą wewnętrzną z wykorzystaniem aparatu MultiScan 5800. Zastosowano klasyczną metodę prądów wirowych ECT badając zarówno rurę z zaprojektowanymi defektami opracowanymi na podstawie analizy najczęściej spotykanych uszkodzeń we wkładach rurowych przemysłowych wymienników ciepła, jak i rury referencyjne, z defektami standardowymi. Wytworzone niestandardowe wady miały na celu symulować spotykane w diagnostyce przemysłowej kombinacje pęknięć, wżerów lub innych ubytków powstałych w wyniku działania agresywnych czynników chemicznych i mechanicznych. Badania polegały na skanowaniu całej długości rury ze stałą prędkości, przy użyciu sondy przelotowej rejestrującej zmiany impedancji elektrycznej w trybie względnym i trybie absolutnym. Na podstawie otrzymanych wyników możliwe było opisanie wymiarów i położenia wad standardowych, weryfikując zgodność rzeczywistych parametrów poszczególnych wad względem projektu wirtualnego. Interpretacja wyników dla wad niestandardowych była oparta na porównaniu ich z wynikami uzyskanymi dla standardowych próbek referencyjnych. Otrzymane wartości dla złożonych wad niestandardowych umożliwiły ich scharakteryzowanie poprzez określenie ich objętości oraz położenia względem sondy pomiarowej. W większości przypadków nie była możliwa interpretacja geometrii wady, czego można dokonać stosując inne techniki badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: Prądy wirowe; badania diagnostyczne; wymienniki ciepła; rury austenityczne

1. Wstęp

Wymienniki ciepła stanowią element wielu instalacji przemysłowych, a warunki ich eksploatacji powodują tworzenie się osadu, a także sprzyjają powstawaniu defektów. Jedną z przyczyn degradacji rur (głównie ferrytycznych) jest korozja, której w przypadku pracy wymienników sprzyjają takie czynniki jak: wysoka temperatura, agresywne substancje chemiczne (np. kwasy), naprężenia w wymienniku (np. wynikające z błędów konstrukcyjnych), skraplanie i gromadzenie się wody na dnie wymiennika (brak zaworów odprowadzających) czy obecność szczelin lub wad materiałowych. Inna przyczyna powstawania defektów wynika z erozji, w efekcie której dochodzi do pocienienia grubości ścian rurek, a w konsekwencji do perforacji. Obszarami szczególnie narażonymi na erozję są różnego rodzaju zwężenia oraz zgięcia (np. kolanka). Erozji sprzyja zły dobór materiałów, wysokie ciśnienia i wibracje. Rury wymienników narażone są ponadto na oddziaływanie składowych naprężeń, zarówno cieplnych, jak i tych zmęczeniowych wynikających z wibracji. Naprężenia te powinny być kompensowane, jednak w przypadku lokalnego spiętrzenia naprężenia może dojść do inicjacji pęknięcia. Na rys. 1. pokazano typowe defekty występujące w rurach wymienników ciepła [1].

Do produkcji rur wymienników ciepła stosuje się: stale austenityczne, ferrytyczne, ferrytyczno-austenityczne (duplex) oraz stopy niklu, miedzi, tytanu.

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.033

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: dkukla@ippt.pan.pl

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS



Rys. 1. Typowe defekty rur wymienników. **Fig. 1.** Typical defects of exchanger tubes.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy wymienników wskazana jest diagnostyka stanu rur. W tym celu stosowane są nieniszczące techniki badawcze, które pozwalają na identyfikację i lokalizację wad mających charakter nieciągłości, nie wpływając na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Ze względu na ograniczony dostęp do powierzchni rur w wymienniku ciepła (rys. 2) ocena ich stanu możliwa jest z reguły tylko od strony dna sitowego.



Rys. 2. Rurowy wymiennik ciepła. **Fig. 2.** Tubular heat exchanger.

Dlatego też, spośród nieniszczących technik badawczych, największe zastosowanie w diagnostyce rur mają prądy wirowe oraz metody ultradźwiękowe. Metody te umożliwiają ocenę niemal całej objętości materiału rury poprzez wprowadzenie do niej głowicy lub sondy badawczej. Takie rozwiązanie jest najczęściej wykorzystywane w technikach badawczych opartych na metodzie prądów wirowych.

Przy odpowiedniej eksploatacji oraz regularnej diagnostyce wymienniki ciepła zazwyczaj charakteryzują się długoletnią pracą z małą ilością, bądź brakiem zabiegów konserwacyjnych. Jest to skutek statyczności konstrukcji, nie występują części ruchome. Jednakże, występują cztery typy uszkodzeń, na jakie narażone są wymienniki energii cieplnej i którym można zapobiec: mechaniczne, korozja elektrochemiczna, kombinacja korozji oraz mechanicznych uszkodzeń, a także wynikające z powstawania osadów [2]. Przyczyny uszkodzeń mechanicznych mogą wynikać m. in. z:

- erozji metalu;
- wodnej i/lub parowej fali uderzeniowej;
- dynamicznych obciążeń mechanicznych i cieplnych (drgania);
- przechłodzenia lub przegrzania;

Na rys. 3. Pokazano przykładowe defekty powstające we wkładach rurowych wymienników.



Rys. 3. Uszkodzenia wymienników ciepła: (a) erozja metalu w łuku rurki; (b) erozja metalu na wlocie rury; (c) uszkodzenie od strony pary; (d) pęknięcie wibracyjne; (e) zmęczenie cieplne w łuku rurki; (f) zapadnięta ściana rurki w wyniku przechłodzenia.

Fig. 3. Damage to heat exchangers: (a) metal erosion in the bend of the tube; (b) metal erosion at the end of the pipe; (c) damage from the steam side; (d) vibration crack; (e) thermal fatigue in the bend of the tube; (f) the collapsed tube wall as a result of cooling.

Powyższe warunki eksploatacyjne powodują najczęściej lokalne pocienienia grubości ścianki, zarówno po wewnętrznej, jak i zewnętrznej stronie. Pocienienia te pokazane na rys. 4 prowadzą do powstawania perforacji w materiale rury, co prowadzić może do awarii. Stąd konieczność wykonania okresowych badań diagnostycznych i wczesnej ich identyfikacji.



Rys. 4. Pocienienia zewnętrzne i wewnętrzne ścianki rur [3]. **Fig. 4.** External and internal defects in pipe wall thickness [3].

Większość technik dedykowanych do badania rurek wykorzystuje metody elektromagnetyczne. Wpływ na dobór techniki badawczej ma rodzaj materiału rur i jego właściwości magnetyczne, a także charakter potencjalnie wykrywanych defektów. Do najpopularniejszych technik zaliczane są:

- Eddy Current Testing, ECT klasyczna metoda prądów wirowych, do rurek z materiałów nieferromagnetycznych (np. austenitycznych);
- Remote Field Testing, RFT badanie w polu dalekim, pozwalające na inspekcje rurek z materiałów

ferromagnetycznych, w przypadku których duża wartość przenikalności magnetycznej ogranicza wnikanie prądów wirowych;

- Near Field Testing, NFT badanie w polu bliskim, dedykowane do identyfikacji defektów wewnętrznych w rurkach z pokryciem grzebieniowym wykonanym z aluminium;
- Magnetic Flux Leakage Testing, MFLT pomiar wycieku strumienia magnetycznego.

Badanie rurek powyższymi technikami jest zazwyczaj przeprowadzanie przez skanowanie wnętrza rurki sondą pomiarową, pozwala to zidentyfikować nieciągłości zlokalizowane na wewnętrznych i zewnętrznych ściankach rur. Defekty te są z reguły wynikiem działania czynników korozyjnych i erozyjnych, perforacji, wżerów i pęknięć zmęczeniowych oraz korozji międzykrystalicznej i naprężeniowej, wytarć, zagnieceń oraz objawiają się w postaci lokalnego pocienienia grubości ścianki. Stosunek kwadratu średnicy sondy do kwadratu średnicy rurki nie powinien być mniejszy niż 0,7. Jak większość metod nieniszczących, badanie metodą prądów wirowych wymaga kalibracji sygnału na wzorcu lub próbce referencyjnej. Niniejsza praca skupia się na charakterystyce i analizie wskazań sygnału prądowirowego uzyskanych dla zaprojektowanego wzorca referencyjnego w postaci rurki z wytworzonymi niestandardowymi, złożonymi wadami oraz na standardowym wzorcu stosowanym komercyjnie w badaniach technika ECT. Badania prowadzono na próbkach o zbliżonej geometrii i właściwościach. Ostatnim krokiem była analiza uzyskanych wyników, która ma posłużyć w ułatwieniu interpretacji wskazań w praktyce diagnostycznej w przemyśle.

2. Metodyka badań

Wzorce zaprojektowane i wykonane dla opisanych testów wytworzono z dwóch gatunków stali austenitycznych. Dwa wzorce ze standardowymi wadami wykonane zostały ze stali 304, natomiast wzorzec z niestandardowymi wadami ze stali 316L. Składy chemiczne obu gatunków stali przedstawione są w tabeli 1 i tabeli 2.

Na wybór materiału na wzorce do badania prądami wirowymi miały wpływ popularność stalowych wkładów rurowych wymienników ciepła oraz dostępność materiału.

Geometrię defektów na komercyjnej rurce wzorcowej przedstawiono na Rys. 5. Są tu defekty w postaci lokalnych podtoczeń na głębokości 20, 40 i 60% nominalnej grubości ścianki rury, 10%-owe podtoczenie wewnętrzne, a także otwory płaskodenne i otwór przelotowy. W celu eliminacji sygnału od przegród (ang. support), na rurkę wzorcową nałożono pierścień symulujący takową przegrodę.

Po wykonaniu kalibracji na ww. wzorcu przeprowadzono badania na rurce z wadami niestandardowymi, opracowanymi przez zespół autorski. Rurka ta posiadająca kombinacje nieciągłości i ubytków, została opracowana na podstawie analizy najczęściej spotykanych zniszczeń we wkładach rurowych wymienników ciepła. Miało to na celu symulację wad rzeczywistych, dzięki czemu można było podjąć próbę analizy wskazań od tych defektów oraz próbę identyfikacji poszczególnych nieciągłości. Tab. 1. Zmierzony spektrometrem RTG skład chemiczny stali 304(X5CrNiMo18-10, 1.4301).

Tab. 1. Measured by X-ray spectrometer, chemical composition of 304 steel (X5CrNiMo18-10, 1.4301).

Pierwiastek	Udział % wag.		
Cr	17,5-19,5		
Ni	8,0-10,5		
Мо	2,0-2,5		
С	<0,07		
Si	<1,0		
Mn	<2,0		
Р	<0,045		
S	<0,015		
Ν	<0,11		

Tab. 2. Zmierzony spektrometrem RTG skład chemiczny stali 316L (X2CrNiMo17-12-2, 1.4404)

Tab. 2. Measured by X-ray spectrometer chemical composition of 316L steel (X2CrNiMo17-12-2, 1.4404).

Pierwiastek	Udział % wag.
Cr	16,5-18,5
Ni	10,0-13,0
Мо	2-2,5
С	<0,03
Si	<1,0
Mn	<2,0
Р	<0,045
S	<0,015
N	<0,11



Rys. 5. Standardowy wzorzec w metodzie ECT [4]. **Fig. 5.** Standard pipe pattern in the ECT method.

Wady niestandardowe na opracowanym projkecie obejmowały m.in.

- rowek o długości 12 mm i głębokości 20% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm (3 x 4 mm) i głębokościach 20%,40% i 60% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 40% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 40% grubości ścianki zakończony otworem przelotowym o średnicy 3,2 mm;
- otwór przelotowy o średnicy 2 mm;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 60% grubości ścianki;
- rowek o długości 12 mm i głębokości 60% grubości ścianki i zewnętrznym pierścieniem.

Geometrię zaprojektowanych wad niestandardowych pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Rysunek wykonawczy rurki z defektami niestandardowymi. **Fig. 6.** Technical drawing of a tube with non-standard defects.



Rys. 7. Zależność zmiany impedancji w funkcji czasu. Kolejność defektów liczona od góry. Z lewej strony tryb różnicowy, z prawej absolutny.

Fig. 7. The dependence of the impedance change in time function. Order of defects, from above. On the left, differential mode, absolute on the right.

Badania przeprowadzono za pomocą aparatu prądów wirowych Multi Scan MS5800 firmy Olympus wraz z zestawem przelotowych sond badawczych, o średnicach właściwych do badania opisanych wcześniej próbek referencyjnych, tzn: - sondy wewnętrzne (przelotowe) o średnicach 14,8 mm (TEA-148-050-N15) i 19 mm (TEA-190-050-N15) firmy Olympus oraz komputera mobilnego do zastosowań przemysłowych: Getac X500G R02V010104 wyposażonego w program MultiView 6.1R0. Oprogramowanie to umożliwia graficzne przedstawienie zmian impedancji elektrycznej cewki w funkcji czasu w trybie różnicowym i trybie absolutnym, co przedstawiono na Rys. 7. Ponadto, po zaznaczeniu odcinka wykresu czasowego, obejmującego sygnał od jednego defektu, uzyskuje się charakterystyczną geometrię sygnału wraz z wartościami amplitudy (Vpp) oraz kąta fazowego (°pp), które można zaobserwować na Rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowa trajektoria zmian napięcia i kąta fazowego dla sondy różnicowej.

Fig. 8. An exemplary trajectory of voltage changes and phase angle for a differential probe.

Dla każdej rurki wykonano 5 pomiarów, aby uzyskać reprezentatywne uśrednione wartości amplitudy oraz kąta fazowego. Otrzymano wyniki dla 2 kanałów pomiarowych D90 i D180, odpowiadających odpowiednio częstotliwości prądu wzbudzającego 24 i 50 kHz. Pozwoliło to na uzyskanie pełniejszych charakterystyk wad, wykorzystując zależność głębokości wnikania prądów wirowych w materiał, od częstotliwości pomiaru. Dla kanału D90 i częstotliwości ok. 24kHz, głębokość wnikania prądów wirowych w materiał stali austenitycznej wynosi ok 4 mm, zaś dla kanału D180 odpowiednio ok. 50kHz i 1,75-2mm. Biorąc pod uwagę średnicę rurek (2,1-3,4mm) kanał D90 umożliwiał detekcję na całej grubości ścianki, a kanał D180 jedynie do około połowy głębokości.

3. Wyniki

Ilościowe wyniki pomiarów prądowirowych dla jednej z próbek o standardowych ubytkach kalibracyjnych (1A) przedstawiono na wykresach na rys. 9. i 10. Dla obu Próbek 1A i 1B otrzymano odpowiednie wartości amplitudy i kąta fazowego dla dwóch kanałów D90 i D180 dla każdej z jedenastu wad. Rys. 9 pokazuje wartości amplitudy, natomiast rys. 10 kąt fazowy dla poszczególnych defektów.

Najniższe wartości amplitudy dla częstotliwości D90 (24 kHz) odpowiadają wadom nr 5-9, na które składają się otwory o podobnych wymiarach i geometrii. Dla reszty wad (nr 1-4, nr 10, nr 11) zanotowano zdecydowanie wyższe, nawet 10-krotnie, wartości amplitudy. Są to wady o bardziej skomplikowanej geometrii i większej objętości. Dla kanału D180 (50kHz) zanotowano wzrost wartości amplitudy, ze względu na większą czułość pomiaru do połowy grubości ścianki, z wyjątkiem wady nr 4, dla której zanotowano spadek. Wada nr 4 symuluje przegrodę i znajduje się w oddaleniu od

sondy o całą grubość ścianki rurki, przez co zmiana pola magnetycznego jest słabiej wykrywalna w kanale D180.



Rys. 9. Wartości amplitudy dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w Próbce 1A.

Fig. 9. Amplitude values for the designed defects on channels D90 and D180 in specimen 1A.

Dla większości wad, wartości kąta fazowego, dla kanału D90, mieszczą się w przedziale 330-360°pp, co przedstawiono na Rysunku 10. Dla Wad nr 4, nr 9-11, wartości kąta fazowego znacząco odbiegają od reszty wskazań. Są to odpowiednio przegroda, dwa otwory przelotowe oraz wewnętrzny rowek obwodowy. Na podstawie tych wskazań można traktować Wady nr 9-11 jako nieciągłości znajdujące się na pełnej głębokości ścianki (przelotowe). Dla kanału D180 podobne wartości kąta fazowego zarejestrowane zostały również dla Wad nr 1-3 i nr 5-8, a także dla Wady nr 10, przedział 45-100°pp. Dla Wad nr 4, nr 9-11 zanotowano wartości zawarte w przedziale 335-365°pp. Wartości te, korzystając z okresowości pomiarów kąta fazowego, można traktować jako wartości bliskie zeru bądź ujemne. Po zastosowaniu takiego zabiegu punkty dla Wad nr 4, nr 9-11 na wykresie będą tworzyć, z resztą wskazań, trend wskazujący lokalizację wady względem sondy pomiarowej. Lokalizację można rozumieć przez odległość "środka" nieciągłości względem cewki sondy.



Rys. 10. Wartosci kąta fazowego dla wad na kanałach D90 i D180 w Próbce 1A.

Fig. 10. Phase angle values for defects on channels D90 and D180 in specimen 1A.

Kolejne badania dotyczyły próbki rurowej o defektach o niestandardowej geometrii (rys. 6.), na rys. 11 pokazano zmierzone wartości amplitudy sygnałów oraz na rys. 12 wartości kąta fazowego, w podobnej formule jak w przypadku próbki 1.

Wartości amplitudy, w zależności od cech nieciągłości Próbki 2, dla kanału D90 zawierają się w zakresie 0,48-2,691Vpp, osiągając minimum dla Wady nr 2 oraz maksimum dla Wady 9a. Natomiast dla kanału D180 zakres amplitudy wynosi 0,54-1,978 Vpp, osiągając minimum i maksimum dla tych samych wad. Dla większości wad wyższe wartości amplitudy otrzymano dla kanału D180, ze względu na wyższą czułość pomiaru. Jedynie dla wad nr 8a, nr 9f i nr 9a wyższą wartość amplitudy zanotowano dla kanału D90. Jest to skutek zwiększenia obszaru wzbudzenia prądów wirowych w materiale przegrody. Najniższe wartości zanotowano dla Wady nr 2, co świadczy o jej najmniejszej objętości pośród wad w Rurce 2. Niewiele wyższe wartości otrzymano dla Wady nr 1. Dla próbki nr 5 zaobserwowano nieproporcjonalną różnicę wartości między kanałami względem innych próbek, które wynikają z różnej czułości pomiaru dla obu kanałów pomiarowych. Kanał D90 lokalizuje mniej czule wszystkie wady, dlatego wartość amplitudy w tym przypadku względem wad o podobnej objętości (zlokalizowanych tylko na powierzchni zewnętrznej) jest zbliżona, zaś dla kanału D180 dominujący wpływ na otrzymany wynik amplitudy miała część wady będąca otworem przelotowym. Reszta wskazań jest proporcjonalna do szacunkowej objętości wad. Uzyskany szereg wartości amplitudy zależy od objętości poszczególnych wad. Duża objętość otworów przelotowych pokrywa się z zakresem penetracji prądów wirowych dla kanału D180.



Rys. 11. Porównanie amplitudy dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w Próbce 2.

Fig. 11. Comparison of the amplitude for the designed defects on channels D90 and D180 in specimen 2.



Rys. 12. Wartości kąta fazowego dla zaprojektowanych wad na kanałach D90 i D180 w próbce 2.

Fig. 12. Phase angle values for the designed faults on channels D90 and D180 in specimen 2.

Dla obu kanałów, D90 i D180, przedstawione na Rysunku 12 wartości kąta fazowego dla poszczególnych wad niestandardowych próbki 2, tworzą na wykresie podobne trendy, ale w innych zakresach wartości. Dla kanału D90 kąt fazowy zawiera się w przedziale 309-364°pp, z wyjątkiem Wad nr 8a, nr 9f, nr 9a które charakteryzują się wartościami kąta fazowego oscylującymi wokół 228°pp. W przypadku kanału D180, zakres wartości kąta fazowego ukształtował się następująco: 13-90°pp dla Wad nr 1-8f. Kąt fazowy dla Wad nr 8a-9a osiągnął wartości odpowiednio około 338°pp, 326°pp i 325°pp.

Wady o podobnej geometrii, znajdujące się na podobnej głębokości osiągnęły zbliżoną wartość kąta fazowego. Dla kanału D90 dotyczy to par Wad nr 1 i nr 2 oraz nr 3 i nr 7. Przy interpretacji położenia wady względem sondy pomiarowej, kluczowym aspektem jest umiejscowienie "środka" wady. Wady nr 4 i nr 5 powinny mieć zbliżone wartości kąta fazowego, przy czym Wada nr 5 niższą. Ponad to, Wada nr 6 powinna uzyskać wynik niższy od Wady nr 5. Są podobne geometrycznie, jednakże na Wadę nr 6 składa się jedynie otwór przelotowy bez dodatkowej szczeliny, dlatego "środek" nieciągłości nie zostaje oddalony od sondy. Odnotowany wynik dla tej wady potwierdza brak jego pokrycia z przewidywanymi rezultatami ze względu na zbyt niską wartość kąta fazowego dla Wady nr 5, w stosunku do wyników zanotowanych dla wszystkich nieciągłości. Może to być spowodowane obecnością "wióra", na wewnętrznej powierzchni rurki, powstałego przy nawiercaniu od zewnątrz otworu przelotowego, co mogło doprowadzić do uzyskania wyniku charakterystycznego dla wady położonej najbliżej sondy pomiarowej. Wady nr 7,8f i nr 8a mają jednakową geometrię, jednakże różnią się materiałem, z którego wykonana jest przegroda oraz jej brakiem lub obecnością. Wskazania kąta fazowego dla Wady nr 8f są najwyższe z pośród wszystkich wad, ponieważ defektoskop interpretuje obecność innego materiału o innych właściwościach (stal węglowa) jako nieciągłość. Interpretacja ferromagnetycznej przegrody, w tym przypadku, jako wady powoduje znaczne oddalenie środka ciężkości wady od sondy. Wartość kąta fazowego dla Wady nr 8a jest znacznie niższa. Może mieć na to wpływ obecności przegrody z tego samego materiału co rurka, przez co względna głębokość (zewnętrzną średnicę pierścienia uznaje się za zewnętrzną powierzchnię ścianki rurki) wady diametralnie się przybliża do cewki sondy. Dla otworu przelotowego (Wady nr 9f i 9a) zanotowano podobne wartości kąta fazowego, bez względu na materiał przegrody.

Dla kanału D180, ze względu na większą czułość pomiaru, zaobserwowano wyższe różnice kątów fazowych pomiędzy poszczególnymi wadami niż dla kanału D90. Wada nr 5, także dla tego kanału, osiągnęła zaniżone wartości. Pozostałe wyniki pomiarów kąta fazowego zachowały zbliżony trend na wykresie, jak dla kanału D90. Jedynie na wynik zanotowany dla Wady nr 8f, negatywny wpływ na pomiar miał zasięg penetracji prądów wirowych, ponieważ całkowita objętość wady interpretowanej przez defektoskop (szczelina + przegroda) wykraczała swoją objętością poza ten zasięg. Kontynuując linię interpretacji wskazań dla kanału D180, zastosowaną dla Próbek 1A i 1B, wyniki dla Wad nr 8a, nr 9f i nr 9a można zredukować do wartości ujemnych (okresowość pomiarów kąta). W Tabeli 3 pokazano graficzne przebiegi amplitudy sygnałów w czasie oraz zmiany w trybie fazoczułym.

Dla Wady nr 1, zmiany impedancji w funkcji czasu przyjęły sekwencję taką, jak zaobserwowano dla wad powierzchniowych zewnętrznych Próbek 1A i 1B, jednakże powtórzoną 3-krotnie. Może to świadczyć o zdecydowanie **Tab. 3.** Graficzne wyniki pomiarów prądowirowych wad standardowych dla Próbki 2.

Tab. 3. Graphical results of eddy currents with defects for the specimen 2.

specime	en 2.	
Numer wady	Zmiana impedancji w funkcji czasu; Tryb różnicowy	Zmiany napięcia
1	~	\sim
2	ļ	ap
3		\rightarrow
4	1	+
5		t
6	-1-	+
7		+
8f		$\bigcirc \checkmark \bigcirc$
8a		
9f	<u>&</u>	(+++++++++++++++++++++++++++++++++++++
9a		

większej długości wady. Kształt pętli zmian napięcia oraz kąt przesunięcia fazowego, dla Wady nr 1, są zbliżone do kształtów uzyskanych dla Wad Próbek 1A i 1B znajdujących się na powierzchni zewnętrznej ścianki rurki. Zmiana impedancji w funkcji czasu dla Wady nr 2 jest zbliżona do zmian charakterystycznych dla wad powierzchniowych o małych

gabarytach w Próbkach 1A i 1B.

W przypadku Wady nr 3 można zaobserwować sekwencję kierunków wychyleń, taką jak dla standardowych wad powierzchniowych oraz jak dla Wady nr 4, przebiegu zmiany impedancji w funkcji czasu. Jednakże, przebieg ten ma różne wielkości wychylenia, mogące świadczyć o złożonej charakterystyce defektu i zmiennej głębokości ubytku. Także kształt pętli zmian napięcia dla Wady nr 3 ma jednocześnie cechy kształtu pętli charakterystycznej dla Wady nr 2 (szczelina o nieznacznej długości) oraz Wady nr 4 (szczelina o tej samej długości). Można interpretować taki kształt jako nieciągłość o znacznej długości, w skład której wchodzą krótkie segmenty.

Wada nr 4 charakteryzuje się identyczną geometrią pętli zmiany napięcia oraz tym samym kątem przesunięcia fazowego, co Wada nr 1. Jedyną różnicą jest wielkość wychyleń przebiegu zmian impedancji w funkcji czasu. Są one większe, potwierdzając większą głębokość wady.

Dla Wady nr 5 zarejestrowano złożony przebieg zmiany impedancji w funkcji czasu. Im te zmiany są dłuższe w czasie, tym dłuższa jest wada, zaś kierunki wychylenia (pierwszy "w prawo") są charakterystyczne dla otworu. Na podstawie analizy kształtu pętli zmiany napięcia można wywnioskować złożoną geometrię nieciągłości. Wąskie ramię pętli zmiany napięcia jest charakterystyczne dla wad powierzchniowych, natomiast wypukły fragment jest typowy dla otworów przelotowych.

Potwierdzeniem tej tezy jest geometria pętli zmiany napięcia na płaszczyźnie zespolonej dla Wady nr 6, która również zmiany impedancji ma zbliżone do wcześniej diagnozowanych otworów. Kąt przesunięcia fazowego, ok. 50° świadczy o przelotowości otworu i o względnie dużej głębokości drugiej części wady znajdującej się na powierzchni zewnętrznej rurki.

Wada nr 7 charakteryzuje się identyczną geometrią zmian napięcia oraz zbliżonym kątem przesunięcia fazowego, co Wada nr 1 i nr 4. Jedyna różnicą, względem Wad nr 1 i nr 4, jest wielkość wychyleń zmian impedancji w funkcji czasu. Są one większe, potwierdzając głębokość wady równej 60% grubości ścianki (Wada nr 1 ma głębokość 20%, a Wada nr 4 głębokość 40%).

Dla Wady nr 8f zanotowano zbliżony przebieg zmiany impedancji w funkcji czasu do sekwencji wskazań dla Wady nr 7. Jest to potwierdzeniem geometrii wady znajdującej się pod przegrodą. W przypadku kształtu pętli zmiany napięcia na płaszczyźnie zespolonej można zaobserwować znaczne różnice w porównaniu z Wadą nr 7. Na pętlę składają się dwa bardzo wypukłe ramiona, co jest skutkiem obecności przegrody wykonanej z innego materiału niż rurka. Przegroda ze stali węglowej zaburza uzyskany wynik.

Wada nr 8a charakteryzuje się przebiegiem zmiany impedancji w funkcji czasu typowym dla otworów przelotowych, co jest sprzeczne z zaprojektowaną geometrią. Kształt pętli zmiany napięcia dla tej wady jest podobny do kształtu pętli dla Wady nr 3 w Próbkach 1A i 1B. Dzięki temu jest możliwość zlokalizowania pod przegrodą, z tego samego materiału co rurka, szczeliny na powierzchni zewnętrznej rurki.

Dla Wady nr 9f zanotowano skomplikowany przebieg

sekwencji wychyleń krzywej zmiany impedancji w funkcji czasu. Natomiast, porównując kształty pętli zmiany napięcia, można zaobserwować podobieństwo względem Wady nr 6 (również otwór przelotowy), jednakże zniekształcony w zbliżony sposób jak w przypadku Wady nr 8f.

Wada nr 9a charakteryzuje się zbliżonym przebiegiem krzywej zmian impedancji w funkcji czasu, co Wada nr 8a. Na tej podstawie, nie można rozróżnić obu wad, które w rzeczywistości maja odmienne geometrie i odmienne położenie względem sondy pomiarowej. Także trajektoria zmian napięcia jest zaburzona poprzez obecność przegrody i diametralnie różni się od trajektorii zarejestrowanej dla Wady nr 6.

4. Podsumowanie

Posługując się otrzymanymi wartościami amplitudy i kąta fazowego oraz przebiegiem zmian impedancji w funkcji czasu dla poszczególnych nieciągłości zarejestrowanych w dwóch trybach (absolutnym i różnicowym), jest możliwy opis wymiarów oraz położenia wady. Dodatkowo, w przypadkach wad o rozwiniętej powierzchni możliwa jest ocena ich geometrii.

Bazując na przeprowadzonych pomiarach prądowirowych, możliwe było skorelowanie otrzymanych wartości z geometrią i położeniem wad standardowych względem sondy pomiarowej oraz ich objętości. Zanotowane wartości amplitudy rosły wraz ze wzrostem objętości wady. Pomiary kąta fazowego były wprost proporcjonalne do odległości nieciągłości od sondy pomiarowej.

Zaprojektowane wady niestandardowe, o zbliżonej geometrii bądź lokalizacji względem sondy do wad standardowych, charakteryzowały się podobnymi wynikami ilościowymi oraz jakościowymi. Analiza tych sygnałów nie byłaby możliwa bez uprzednich wniosków płynących z badań wad standardowych.

Opierając się na otrzymanych wynikach, możliwe jest sparametryzowanie niemal dowolnej wady w materiale rur austenitycznych w zakresie ilościowej oceny jej amplitudy i kąta fazowego. Na tej podstawie możliwa jest ocena zagrożenia awarią, w przypadku dalszej eksploatacji takiej rury. Należy jednak pamiętać o ryzyku w interpretacji wyników związanych z wpływem wielu czynników na uzyskane wartości sygnału. Mogą to być lokalne zmiany składu chemicznego, koncentracja naprężenia czy zmiany strukturalne wynikające, np. z lokalnego przegrzania materiału rury. Aby móc przeprowadzić pełną diagnostykę, należy posłużyć się komplementarnymi technikami badań nieniszczących, pozwalającymi uzyskać potwierdzenie informacji o defektach w strukturze materiału badanego elementu.

5. Literatura/References

- [1] http://www.vikinginspection.co.uk/services/heat-exchangers
- [2] Schwartz. M, Four Types of Heat Exchanger Failures, Plant Engineering 12 (1982)
- [3] Zbroińska-Sczechura E. Dobosiewicz J. Uszkodzenia i diagnostyka wymieników ciepła w elektrociepłowniach, www. elektroenergetyka.pl, 12.2014.
- [4] www.olympusndt.com





Channel Partner



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

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

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



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 Zbigniew Strumiński¹, Dariusz Ulbrich²*, Jakub Kowalczyk², Daria Stępak² ¹Volkswagen, Września ²Politechnika Poznańska

Ultradźwiękowa ocena połączeń zgrzewanych punktowo

Ultrasonic inspection of spot welded joints

ABSTRACT

STRESZCZENIE

dra zgrzeiny.

Spot welded connections are widely used in the construction of modern car bodies. On average, there are about 6,000 spot welded connections on one car body. High-quality connections ensure durability and rigidity of the entire body structure both during its operation and extreme situations such as the car accident on the road. Therefore, it is important to control the quality of spot welded connections, especially with the use of the ultrasonic method. The article contains the results of ultrasonic tests for welded connections made at different welding currents. Ultrasound transducer with a water delay line and frequency of 20 MHz were used. The number of echoes from the connection area and the RWS parameter were determined. In addition, the connections were verified by destructive tests, which was the execution of a shear test on a strength machine and measurement of the diameter of the weld core.

Keywords: vehicle; vehicle body; spot welds; ultrasound

1. Wstęp

Połączenia zgrzewane punktowo (oprócz połączeń klejowych, lutospawanych i spawanych laserowo) są powszechnie wykorzystywane do łączenia elementów współcześnie produkowanych karoserii pojazdów samochodowych [1]. Uzyskanie połączeń wysokiej jakości determinuje zachowanie określonych parametrów procesu zgrzewania [2-3]. Istotne jest więc kontrolowanie jakości tych połączeń, szczególnie z wykorzystaniem metod nieniszczących oraz w niewielkim stopniu technik niszczących, dzięki czemu zachowana będzie sztywność i trwałość karoserii podczas eksploatacji.

Badania połączeń zgrzewanych prowadzone są różnymi metodami, a w śród metod nieniszczących dominuje metoda ultradźwiękowa [4-8]. Badania są prowadzone przy wykorzystaniu różnych głowic (np. wysokiej częstotliwości, mozaikowych), a wszystkie sprowadzają się do oszacowania średnicy jądra zgrzeiny, która determinuje jakość i trwałość połączenia zgrzewanego rezystancyjnie, punktowo.

Główny celem wykonanych badań było określenie wartości parametrów procesu zgrzewania, dla których na podstawie badań ultradźwiękowych i mechanicznych uzyskano minimalne wymagania jakościowe dla zgrzein punktowych blach stalowych ocynkowanych galwanicznie.

2. Przebieg badań

Próbki wykonano z wykorzystaniem blach stalowych 0,8 x 1,2 mm ocynkowanych galwanicznie dwustronnie, obecnie

^{więki} stosowanych w budowie karoserii pojazdów oraz zgrzewarki manualnej firmy ARO, która była wyposażona w elektrody o średnicy 16mm, czoło 4,5mm. Proces zgrzewania charak-

Połączenia zgrzewane punktowo znajdują szerokie zastosowanie w budo-

wie karoserii nowoczesnych pojazdów samochodowych. Średnio na jednej

karoserii pojazdu osobowego znajduje się około 6000 połączeń zgrzewa-

nych punktowo. Wysokiej jakości połączenia zapewniają trwałość i sztyw-

ność całej konstrukcji nadwozia zarówno podczas jego eksploatacji, jak

i sytuacji ekstremalnych, jakim jest wypadek samochodu na drodze. Dla-

tego istotne jest kontrolowanie jakości połączeń zgrzewanych punktowo,

szczególnie z zastosowaniem metody ultradźwiękowej. W artykule zawarto

wyniki badań ultradźwiękowych dla połączeń zgrzewanych wykonanych

przy różnym prądzie zgrzewania. Wykorzystano głowice ultradźwiękowe

o częstotliwości 20 MHz z wodną linią opóźniającą. Wyznaczono ilość ech

powrotnych z obszaru połączenia oraz parametr RWS. Ponadto połącze-

nia poddano weryfikacji badaniami niszczącymi, jakim było wykonanie próby ścinania na maszynie wytrzymałościowej oraz pomiar średnicy ją-

Słowa kluczowe: pojazd; karoseria pojazdu; zgrzeiny punktowe; ultradź-

teryzował się następującymi parametrami:docisk 2,5 [kN];

- natężenie prądu 7,7, 7,5, 5,7, 5,5 [kA];
- czas zgrzewania 0,28 [s];
- ilość impulsów zgrzewania 2;
- czas przed zgrzewaniem (docisk) 0,8 [s];
- czas po zgrzewaniu (chłodzenie) 0,14 [s];
- kąt zapłonu 90 [°].

W zastosowanym podczas badań cyklu zgrzewania można wyróżnić trzy podstawowe etapy, a mianowicie: docisk łączonych blach, wykonanie zgrzeiny dwoma impulsami oraz chłodzenie, które następowało przy jednoczesnym docisku elektrod do łączonych blach. Widok próbki, na której przygotowano połączenia zgrzewane przedstawiono na rys. 1. Próbki były wykonane przy 4 różnych prądach zgrzewania, co miało spowodować wytworzenie połączeń o zróżnicowanej jakości.

Przygotowane próbki poddano badaniom ultradźwiękowym w Laboratorium Badań Nieniszczących Instytutu Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, z wykorzystaniem defektoskopu USLT 2000 oraz głowicy z opóźnieniem wodnym. Każdą próbkę poddano badaniom ultradźwiękowym siedem razy, co zostało ustalone na podstawie współczynnika zmienności po wykonaniu 30 pomiarów na jednej zgrzeinie. Podczas pomiarów zapisywano ilość ech powrotnych, ilość między ech oraz parametr RWS, czyli

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.034

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: dariusz.ulbrich@put.poznan.pl

grubość blach po wykonaniu połączenia. Przykładowy widok ekranu defektoskopu podczas realizacji badań zasadniczych przedstawiono na rys. 2 (połączenie dobrej jakości) oraz rys. 3 (połączenie o zbyt małej średnicy jądra zgrzeiny).



Rys. 1. Próbki z wykonanymi połączeniami zgrzewanymi punktowo.

Fig. 1. Samples with spot welded connections.



Rys. 2. Widok ekranu defektoskopu zgrzeiny wysokiej jakości. **Fig. 2.** High quality view of screen of spot weld.



Rys. 3. Widok ekranu defektoskopu zgrzeiny o zbyt małej średnicy jądra.

Fig. 3. View of the ultrasonic flaw detector screen from to small nugget.

Wyniki pomiarów ultradźwiękowych zostały zweryfikowane na podstawie badań mechanicznych – próby ścinania, zrealizowanych na maszynie wytrzymałościowej. Próbki zamocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej firmy TesT (rys. 4) i poddano próbie ścinania. Podczas przeprowadzania tej próby przyjęto następujące nastawy stanowiska do badań wytrzymałościowych:

- jednostka siły [kN];
- jednostka drogi [mm];
- jednostka czasu [s];
- szerokość próbki 40 [mm];
- prędkość testu 25,0 [mm/min];
- max. czas trwania próby 120 [s].



Rys. 4. Próbka zamocowana w szczękach maszyny wytrzymałościowej.

Fig. 4. The sample mounted in the jaws of the testing machine.

Po rozerwaniu próbek każdą zgrzeinę poddano pomiarze średnicy jadra zgrzeiny (rys. 5) w dwóch prostopadłych kierunkach, a jako wynik ostateczny przyjęto wartość średnią.



Rys. 5. Pomiar średnicy jądra zgrzeiny. **Fig. 5.** Measurement of the weld core diameter.

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics

Prąd	Prąd Pomiar Ultradźwiękowy		Próba ścinania			
zgrzewania [kA]	Echa powrotne	Miedzy echa	RWS	Siła [kN]	Średnica [mm]	Uwagi
5,50	5,00	1,00	1,80	2,84	Brak	Połączenie niskiej jakości
5,7	4	0	1,78	3,43	2,4	Połączenie niskiej jakości - zbyt mała średnica jądra zgrzeiny
7,5	6	0	1,68	4,98	7,1	Połączenie wysokiej jakości
7,7	6	0	1,67	4,99	6,7	Połączenie wysokiej jakości

Tab. 1. Średnie wartości parametrów uzyskanych podczas badań ultradźwiekowych i mechanicznych połączeń zgrzewanych punktowo. **Tab. 1.** Average values of parameters obtained during ultrasonic and mechanical tests of spot welded connections.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań połączeń zgrzewanych przedstawiono w Tab. 1. Dla każdego połączenia wykonano po 5 próbek, a każdą z nich ultradźwiękową techniką echa przebadano po 7 razy.

Rozpatrując otrzymane wyniki badań, których średnie wartości zostały zamieszczone w tabeli powyżej, należy nadmienić, iż minimalna średnica zgrzeiny dla kombinacji blach 0,8 i 1,2 mm wynosi 3,6 mm, a minimalna siła ścinająca powinna być większa od 2,3 kN. Na podstawie otrzymanych wyników, można stwierdzić, iż wraz ze zrostem parametru RWS, maleje średnica jądra zgrzeiny zmierzona po próbie ścinania przygotowanego połączenia. W większości badanych próbek wartość tego parametru powyżej 1,80 może sugerować o niskiej jakości wykonanego połączenia, a mianowicie niewystarczającej średnicy powstałego jądra zgrzeiny. Dla natężenia prądu zgrzewania o wartości 5,5 i 5,7 kA otrzymane rezultaty świadczą o wadliwie wykonanym połączeniu zgrzewanym. Pierwszym objawem sugerującym słabą jakość połączenia są między echa uzyskane podczas pomiarów ultradźwiękowych. Dodatkowo w przypadku natężenia prądu 5,7 kA uzyskane średnice jądra zgrzeiny mieszczą się w granicach od 2,0 do 3,0 mm, co jest wymiarem mniejszym od wymaganego dla takiego połączenia. Ponadto, dla natężenia prądu 5,5 kA nie można było określić minimalnej średnicy jądra zgrzeiny, ponieważ wystąpiło zjawisko "mocnego przyklejenia", czyli przetopienia i połączenia warstw cynku. Jest to zjawisko niepożądane (brak połączenia zasadniczego materiału, połączenie tylko w obszarze warstwy ochronnej) i w przyszłości w miejscach tych połączeń mogłyby powstać ogniska korozji. Biorąc pod uwagę tylko siłę ścinającą, należy stwierdzić, że dla wszystkich przebadanych próbek była ona wyższa od minimalnej, wymaganej normami wewnętrznymi.

4. Podsumowanie

Na podstawie zrealizowanych badań można sformułować następujące stwierdzenia:

 wraz ze wzrostem wartości parametru RWS – grubości połączenia w miejscu wykonania jądra zgrzeiny – maleje wartość średnicy jądra, a w przypadku RWS wyższego od 1,8 wszystkie uzyskane połączenia nie spełniają wewnętrznych wymogów związanych z jakością;

- siła ścinająca, która został wyznaczona na podstawie próby ścinania wykonanej na maszynie wytrzymałościowej nie daje jednoznacznej informacji o jakości połączenia zgrzewanego;
- wraz ze wzrostem prądu zgrzewania, rośnie również wartość siły ścinającej potrzebnej do destrukcji połączenia;
- metoda ultradźwiękowa pozwala na nieniszczącą kontrolę połączeń zgrzewanych blach o grubości 0,8 i 1,2 mm ocynkowanych dwustronnie galwanicznie, użytych podczas badań, a odpowiednie wartości parametrów takich jak RWS, echa powrotne i między echa mogą służyć jako wskaźniki jakości zgrzeiny punktowej.

W kolejnym kroku należy przeprowadzić badania dla innych kombinacji blach karoseryjnych, a także można zastosować nowoczesne defektoskopy, które pozwalają na widok 3D badanego połączenia zgrzewanego.

5. Literatura/References

- J. Słania, Ł. Kuk "Proces łączenia materiałów do budowy pojazdów i nadwozi w przemyśle samochodowym", Przegląd Spawalnictwa, no. 3, 2014.
- [2] A. Klimpel "Spawanie zgrzewanie i cięcie metali" WNT, Warszawa 1999.
- [3] H. Papkala "Zgrzewanie oporowe metali" Wydawnictwo KaBe, Krosno 2003.
- [4] M. Vural, A. Akkus "The Ultrasonic Testing of the Spot Welded Different Steel Sheets" Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 18, September - October 2006.
- [5] R. Maev, A. Chertov, W. Regalado, A. Karloff, P. Lichaa, T. Phan "Real Time Ultrasonic System for Resistance Spot Weld Inspection. Integration in Assembly Line" 4th International Candu In-service inspection and NDT in Canada. 18 – 21 June 2012, Toronto, Canada.
- [6] M.F.M. Yusof, M.A. Kamaruzaman, M. Zubair, M. Ishak "Detection of defects on weld bead through the wavelet analysis of the acquired arc sound signal" Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 10, Issue 2, pp. 2031-2042, September 2016.
- [7] A Šifa, A S Baskoro, S Sugeng, B Badruzzaman, T Endramawan "Identification of the Thickness of Nugget on Worksheet Spot Welding Using Non Destructive Test (NDT) – Effect of Pressure" IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 306, 2018.
- [8] D. Zhao, Y. Wang, Z. Lin, S. Sheng "An effective quality assessment method for small scale resistance spot welding based on process parameters" NDT & E International, vol. 30, no. 55, pp. 36-41, 2013.

Wojciech Szymański* Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie

Pomiar naprężeń własnych w osiach kolejowych metodą rentgenowską wg PN-EN 13261+A1 2011

Measurement of residual stresses in railway axes using the X-ray method according to PN-EN 13261 + A1 2011

ABSTRACT

The aim of the work was to discuss important aspects of stress measurements in railway axes, according to PN-EN 13261 + A1: 2011 based on experience acquired during stress measurements in railway axes in the accredited Laboratory of Metal Science and Chemical Analysis (AB 394). The requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standard 3.6 regarding residual stresses and the X-ray method for their measurement are presented. The results of measurements of stresses in railway axes of various types made by four different manufacturers and the dependence of the magnitude of stresses are summarized from turning parameters and tool wear. It has been found that while stress measurement at a depth of 2 mm can be performed for one axis in a series, stress measurement on the surface should be performed randomly for a certain number of axes in a series.

Keywords: residual stresses; stress measurement; railway axes

1. Wstęp

Norma PN-EN 13261+A1:2011 pt.:" Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Osie - Wymagania dotyczące wyrobu" [1] określająca warunki odbioru osi kolejowych w punkcie 3.6 – "Naprężenia szczątkowe" odnosi się do stanu naprężeń i sposobu ich pomiaru w osiach kolejowych.

Postanowienia ogólne (3.6.1) mówią, że różne etapy produkcji nie powinny powodować powstawania naprężeń szczątkowych, które mogą powodować odkształcenia osi lub łatwość powstawania pęknięć zmęczeniowych w czasie eksploatacji. Z tych względów ustalono dopuszczalne wartości (3.6.2) naprężeń w osi w następujący sposób:

Największe naprężenia własne na powierzchni osi nie powinny przekraczać naprężenia rozciągającego o wartości +100 N/mm2.

Na głębokości 2 mm pod powierzchnią naprężenia własne nie powinny się różnić więcej niż 40 N/mm².

Obecnie zamiast określenia naprężenia szczątkowe częściej stosuje się dla tego typu naprężeń pojęcie naprężenia własne, natomiast jako jednostkę naprężenia najczęściej stosuje się megapascale (1 MPa = 1 N/mm²).

Norma podaje (3.6.3), że próbką do badań jest oś zestawu kołowego w stanie dostawy a usytuowanie punktów pomiarowych przedstawia rys.1

STRESZCZENIE

Celem pracy było omówienie istotnych aspektów pomiarów naprężeń w osiach kolejowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 13261+A1:2011 na podstawie doświadczeń nabytych podczas prowadzenia pomiarów naprężeń w osiach kolejowych w akredytowanym Laboratorium Metaloznawstwa i Analiz Chemicznych (AB 394). Przedstawiono wymogi normy PN-EN 13261+A1:2011 pkt 3.6 dotyczące naprężeń szczątkowych (własnych) i opisano rentgenowską metodę ich pomiaru. Zestawiono wyniki pomiarów naprężeń w osiach kolejowych różnych typów wytworzonych przez czterech producentów oraz zależność wielkości naprężeń od parametrów toczenia i zużycia narzędzia. Stwierdzono, że o ile pomiar naprężeń na głębokości 2 mm może być wykonywany dla jednej osi z serii, to pomiar naprężeń na powierzchni powinien być wykonywany wyrywkowo dla pewnej ilości osi w serii.

Słowa kluczowe: naprężenia własne; pomiar naprężeń; osie kolejowe



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych. **Fig. 1.** Locations of measurement points.

Za wartości naprężeń na powierzchni odpowiada przede wszystkim proces toczenia osi, natomiast za wartości naprężeń na głębokości 2 mm odpowiadają procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego.

Jako dopuszczalne metody pomiarowe podano (3.6.4) zarówno metodę tensometryczną, jak i rentgenowską, pozostawiając wybór metody do uzgodnienia pomiędzy klientem i producentem.

Porównując te dwie metody, to przy założeniu dysponowania odpowiednią aparaturą, zdecydowanie prostszą w zastosowaniu wydaje się metoda rentgenowska. Oprócz tego, że jest metodą szybszą, jest to metoda nieniszcząca. Oczywiście w sytuacji, gdy należy określić naprężenia na głębokości 2 mm, konieczne jest usuniecie odpowiedniej warstwy materiału, co oznacza zniszczenie badanego obiektu.

Metody rentgenowskie opierają się na pomiarze zmian odległości międzypłaszczyznowych. Pod wpływem obciążeń powodujących odkształcenie w materiale dochodzi

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.035

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: wszymanski@imn.skawina.pl

do przesunięć elementów struktury krystalicznej. Zmiany położenia płaszczyzn dhkl mogą być miernikiem naprężeń, co stanowi fundament metod rentgenowskich.[2,3, 4]

Z szeregu metod rentgenowskich obecnie najczęściej stosowaną jest metoda sin² ψ . Jest ona realizowana za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego. Istotą tej metody jest określenie zmian odległości międzypłaszczyznowych w sieci krystalicznej materiału pod wpływem sił w nim występujących.

Dawniej za podstawową wadę tej metody uważano konieczność wycinania małych próbek, które mieściły by się w goniometrach tradycyjnych, co w oczywisty sposób wpływało na zmianę stanu naprężeń w materiale. Obecnie, dzięki stosowaniu specjalnych dyfraktometrów możliwe jest mierzenie naprężeń w praktycznie dowolnie dużych przedmiotach, co pozwala na uchwycenie stanu naprężeń nie zrelaksowanych przez wycięcie próbki oraz czyni to badanie w pełni nieniszczącym

Metoda rentgenowska pozwala na pomiar naprężenia w warstwie o grubości około 10-20 µm, czyli około pięciokrotnie płytszej niż metody tensometryczne. Jednak nie wymaga stosowania wzorców, a jedynie znajomości stałych materiałowych, takich jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Ponadto pomiar naprężeń dokonywany jest w określonym kierunku, co pozwala na wyznaczanie tensora naprężeń.

Metody rentgenowskie pomiaru naprężeń są znane od wielu lat, jednak nie są zbyt często stosowane, zwłaszcza w przemyśle, gdyż z dużą nieufnością podchodzi się do otrzymanych nimi wyników, których interpretacja jest trudna.

Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie od lat prowadzi badania naprężeń metodą rentgenowską. Są to zarówno prace o charakterze badawczym [5-13], jak i prace aplikacyjne pozwalające np. na zweryfikowanie stosowanej technologii lub kontrolę wyrobu [14-17]. Ostatnio coraz większym zainteresowaniem cieszą się pomiary naprężeń wykonywane w celu dostarczenia danych do tworzenia modeli matematycznych procesów technologicznych [18].

Celem niniejszej pracy było omówienie istotnych aspektów pomiarów naprężeń w osiach kolejowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 13261+A1:2011 na podstawie doświadczeń nabytych podczas prowadzenia pomiarów naprężeń w osiach kolejowych w akredytowanym Laboratorium Metaloznawstwa i Analiz Chemicznych (AB 394).

2. Aparatura

Pomiary naprężeń metodą rentgenowską osi kolejowych wg EN 13261:2009+A1:2010 przeprowadzono dyfraktometrem rentgenowskim produkcji firmy PROTO Manufacturing Ltd. – Jest to przenośny dyfraktometry rentgenowski, w pełni skomputeryzowany, służący jedynie do pomiaru naprężeń własnych i zawartości austenitu szczątkowego. Został on zintegrowany z manipulatorem przejezdnym (rys.2). Pomiar i wykorzystana metoda obliczeniowa, wykonywane wg własnej procedury badawczej laboratorium (PB-N wyd. III z dnia 08.12.2016), były zgodne ze standardami: SAE J84a i ASTM E915. Wszystkie parametry aparaturowe i materiałowe związane z pomiarem przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Parametry materiałowe i aparaturowe zastosowane w pomiarach naprężeń.

Tab. 1. Material and apparatus parameters used in stress measurements.

Parametr	Wielkość			
Napięcie	20 kV			
Prąd lampy	4 mA			
Zastosowana lampa rtg.	Cr			
Długość promieniowania $\lambda_{_{\mathrm{Cr}}}$	2.103 [Å]			
Płaszczyzny odbicia	Fe 211			
Mierzony zakres kątowy 2θ	145° - 165°			
Wielkość padającej wiązki rtg na próbce	5 x 1 mm			
Badany materiał	Stal ferrytyczna			
Kąt Bragga materiału bez naprężeń 20 ₀	156,41°			
Rentgenowskie stałe	(1/2)S2 = 5.92 E-6 [1/MPa]			
materiałowe	S1 = 1.28 E-6 [1/MPa]			
Głębokość wnikania promieniowania rtg.	≈10 µm			



Rys. 2. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD w trakcie pomiaru naprężeń w osi kolejowej. **Fig. 2.** The X-ray diffractometer PROTO iXRD during stress measurement on the railway axis.

3. Badania

Pomiary naprężeń wykonywano w osiach kolejowych różnych typów (201E, EA1N, 4ANc, 102E/EP08, EN 57, 3B), dostarczonych do badań przez czterech różnych producentów. W tablicy 2 przedstawiono wyniki zgodności badanych osi z wymaganiami normy.

Drugą oś badaną na zlecenie producenta A przedstawiono jako nr 5 aby podkreślić, że pomiędzy badaniami osi upłynęło kilka lat.

Jako przykłady pomiarów podano szczegółowe wyniki dla osi 1 producenta A i osi 1 producenta B, które przedstawiono w tablicach 3 i 4.

Dodatkowo jeden z producentów osi, w celu doboru optymalnych, spełniających wymogi normy co do stanu naprężeń na powierzchni osi, parametrów toczenia, przeprowadził eksperyment polegający na wskazaniu siedmiu przekrojów

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics

								Prod	ucent							
04		A	ł]	В			(2			D		
Us								Prze	ekrój							
	1	2	3	3T	1	2	3	3T	1	2	3	3T	1	2	3	3T
1	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+
2					+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
3					+	+	+	-	+	+	+	+				
4									+	+	+	+				
5	+	+	-	-					+	+	-	+				
6									+	+	+	+				
7									+	+	+	-				
8									+	+	+	-				
			(.	+) - Przeł	crój zgodi	ny; (-) – I	Przekrój r	niezgodny	7; 3T – Pr	zekrój 3	na głebok	xości 2 mr	n			

Tab. 2. Zgodność badanych	osi z wymaganiami normy PN-EN 13261+A1:2011.	
Tab. 2. Compatibility of the	tested axes with the requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standar	d.

Tab. 3. Wyniki pomiarów naprężeń w MPa dla osi, która spełnia warunki normy PN-EN 13261+A1:2011 (producent A oś 1).

Tab. 3. Results of the measurements of stress in MPa of the axis, which complies with PN EN 13261 + A1: 2011 (producer A axis 1).

Przekro	je badan	e na powi	Przekrój 3 na gł. 2 mm				
Punkt/		Przekrój		Dunlet	Kierunek		
kier.	1	2	3	Puliki	х	у	
1/x	-274	-280	-212	1	-24	3	
1/y	-239	-250	-178	2	9	4	
2/x	-317	-125	-34	3	-3	16	
2/y	-230	-108	-45	4	-8	16	
				5	-8	2	
				6	-17	9	

Tab. 4. Wyniki pomiarów naprężeń w MPa dla osi, która nie spełnia warunków normy PN-EN 13261+A1:2011 (producent B oś 1). **Tab. 4.** Results of the measurements of stress in MPa of the axis that does not meet the requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standard (producer B axis 1).

Przekro	je badan	e na powi	Przekrój 3 na gł. 2 mm				
Punkt/		Przekrój		Dumlet	Kierunek		
kier.	1	2	3	PUNKI	х	у	
1/x	62	-41	360	1	-15	29	
1/y	210	238	336	2	-49	-9	
2/x	85	7	491	3	-1	48	
2/y	229	181	494	4	7	55	
				5	-8	2	
				6	-17	9	

osi do pomiarów naprężeń. W każdym ze wskazanych obszarów powierzchnia osi toczona była z różnymi parametrami takimi jak: prędkość skrawania, posuw przy toczeniu i głębokość skrawania. Wyniki przedstawiono w tablicy 5. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że optymalnymi parametrami toczenia osi są kombinacje parametrów toczenia oznaczone jako 6 i 7, dopuszczalną może być kombinacja 5, natomiast pozostałe nie dają wymaganych rezultatów jak chodzi o stan naprężeń na powierzchni osi.

Aby ocenić wpływ zużycia narzędzia (noża tokarki), na wartości uzyskanych naprężeń na powierzchni osi, jeden z producentów przeprowadził eksperyment polegający na toczeniu powierzchni osi nie do momentu, kiedy zmianę narzędzia nakazywała instrukcja, ale do momentu, kiedy uzna to za właściwe operator tokarki. Zmianę uzyskiwanych w ten sposób naprężeń na powierzchni osi przedstawia tablica 6. Uzyskane wyniki wskazują, że nawet zmiana narzędzia skrawającego według instrukcji toczenia następowała zbyt późno. Bezpieczne byłoby zmienianie narzędzia mniej więcej po 3/5 czasu podanego w instrukcji.

Tab. 5. Zależność wielkości naprężeń w MPa od parametrów toczenia.

Tab. 5. Dependence	of the m	agnitude	of stresses	in M	Pa on	the
rolling parameters.						

Sposób toczenia	1	2	3	4	5	6	7
Pkt. 1 kier. x	337	488	231	313	-149	-268	-647
Pkt. 1 kier. Y	594	478	92	486	72	-94	-675
Pkt. 2 kier. X	359	388	245	383	-158	-269	-257
Pkt. 2 kier. y	604	402	112	458	56	-103	-275

Tab. 6. Zależność wielkości naprężeń w MPa na powierzchni osi od czasu pracy narzędzia.

Tab. 6. Dependence of the magnitude of stress in MPa on the surface of the axis from the time the tool wear.

Etapy toczenia	1	2	3	4	5	Zmiana narzędzia wg instrukcji	Zmiana narzędzia wg operatora
Kier. x	-542	-499	-300	-110	-10	98	245
Kier. y	-421	-321	-123	56	115	154	364

4. Podsumowanie

Analizując wyniki badanych osi można zaobserwować, że procesy mające wpływ na odkształcanie osi w trakcie eksploatacji, takie jak odlewanie, kucie i wyżarzanie normalizujące, są stosunkowo stabilne i producenci, nie mający w danym okresie (cyklu produkcyjnym) kłopotów ze spełnieniem warunków normy, nie mają ich dla wszystkich osi podobnych typów. Osie 7 i 8 producenta C były osiami typu EN57 charakteryzującymi się dodatkowym podpiaściem na środku osi. Natomiast, gdy osie danego producenta pochodzące z jednego cyklu produkcyjnego nie spełniają warunków normy, to dotyczy to wszystkich osi z tego cyklu. Prawdopodobnie powtarzalność takiego rezultatu związana jest ze znikomym wpływem tzw. czynnika ludzkiego na procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego. Ich właściwe wykonanie ocenia się mierząc naprężenia na głębokości 2 mm, a ich różnice nie mogą przekraczać wg PN-EN 13261+A1:2011 40 MPa.

Inaczej wygląda sytuacja z procesem toczenia osi, który odpowiada za powstawanie naprężeń na ich powierzchni. Naprężenia te są jednym z czynników odpowiadających za powstawanie pęknięć zmęczeniowych w czasie eksploatacji. Norma nakazuje, żeby ich wartości nie przekraczały 100 MPa. Proces toczenia zdecydowanie jest mniej odporny na wpływy czynnika ludzkiego (pośpiech operatora). Dlatego znacznie częściej pojawia się w tym zakresie przekroczenie warunków normy i jednocześnie jest ono znacznie łatwiejsze do wyeliminowania. Jak widać na przykładzie wyników prób toczenia osi (tab. 5), przeprowadzonych przez jednego z producentów, stosunkowo łatwo można tak dobrać parametry procesu, aby uzyskać na powierzchni osi naprężenia zgodne z wymaganiami normy.

5. Wnioski

- Pomiar naprężeń na głębokości 2 mm może być wykonywany dla jednej osi z serii. Procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego osi wydają się wystarczająco stabilnymi w cyklu produkcji osi
- 2) Pomiar naprężeń na powierzchni jako pomiar w pełni nieniszczący powinien być wykonywany wyrywkowo dla pewnej ilości osi w serii. Istnieje ryzyko niewłaściwej obróbki powierzchniowej osi, przy której znaczny udział ma "czynnik ludzki"

6. Literatura/References

- [1] Norma PN-EN 13261+A1:2011, "Kolejnictwo Zestawy kołowe i wózki - Osie - Wymagania dotyczące wyrobu"
- [2] E.Kula, V.Weiss, "Residual Stress and Stress Relaxation", 1982 Plenum Press New York.
- [3] I.C. Noyan, J.B. Cohen, "Residual Stress Measurment by Diffraction and Interpretation", Springer-Verlag New York 1987
- [4] A. Pszonka, J. Ziaja, " Rentgenograficzne metody pomiaru naprężeń", Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1971.

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

SPIS REKLAM

REKLAMY NA OKŁADCE

2
3
4

REKLAMY W NUMERZE

1	Instytut Spawalnictwa	2
2	CASP	8
3	EVEREST POLSKA	19
4	ITA	30
	TESTING	43
	KOLI	54
	CASP	85

- [5] M. Lech-Grega, A. Kłyszewski, "Aparat Strainflex PSF-2M do pomiaru naprężeń własnych i austenitu szczątkowego", Hutnik lipiec 1991
- [6], Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń własnych w badaniach nieniszczących.", XVI Sesja naukowa okrętowców cz. II str.137, Szczecin-Dziwnówek 1994.
- [7] M. Lech-Grega., W. Szymański, "X-Ray Residual Stress Measurement in 7020 Alloy Welded Jionts", 2003 TMS 132nd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA
- [8] M. Lech-Grega, K. Mazurkiewicz, W. Szymański, "Zmęczenie materiału a stan naprężeń własnych w obszarze okołospoinowym złącz spawanych ze stopu AlZnMg". Krajowa Konferencja Dobór i eksploatacja materiałów inżynierskich Jurata 22-25.09.1997
- [9] M. Lech-Grega, J. Kusnerż, W. Szymański, "Naprężenia własne w złączach spawanych ze stopu AlZnMg", VII Ogólnopolska Konferencja pt. Metale Nieżelazne w Przemyśle Okrętowym; Szczecin Międzyzdroje, 12-14 września 1996, Mat. Konf. s.115-122
- [10] L. Fajkiel., M. Lech-Grega, W. Szymański, "Naprężenia własne w warstwie wierzchniej formy ciśnieniowej pod wpływem oddziaływań ciekłego stopu aluminiowego", Konf. Naukowa Nowe Materiały – Nowe Technologie Materiałowe w Przemyśle Okrętowym i Maszynowym Szczecin-Świnoujście wrzesień 1998
- [11] A. Jurcius, A.V. Valiulis, O. Cernasejus, K.J. Kurzydłowski, A. Jaskiewicz, M. Lech-Grega, "Influence of wibratory stress relief on residual stresses in weldment and mechanical properties of structural steel joint"; Vibromechanika, Journal of Vibroenergineering, March 2010, vol. 12, pp.133-141
- [12] W. Szymański, M. Lech-Grega. "Validation Of The X-Ray Stress Measurement Method" Advances In Materials Science (ISSN: 1730-2439), Vol.42, No.4, 2014)
- [13] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, "Ocena stanu naprężeń szczątkowych w warstwie nawęglanej kół zębatych", Sprawozdanie IMN nr 7066/II/2013
- [14] W. Szymański, "Opracowanie metody oceny skuteczności obróbki wielkogabarytowych odlewów z żeliwa EN-GJS-500-7", Sprawozdanie IMN nr 7255/14
- [15] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, "Ocena zmian stanu naprężeń w taśmie ze stali nierdzewnej w trakcie procesu prostowania", Sprawozdanie IMN nr 7254/14
- [16] W. Szymański, "Ocena wpływu obróbki skrawaniem i obróbki cieplnej na stan naprężeń w walcach ze staliwa L 200HNM", Sprawozdanie IMN nr. 7441/15
- [17] A.Milenin, R.Kuziak, M.Lech-Grega, A.Chochorowski, S.Witek, M.Pietrzyk; Numerical modeling and experimental identification of residual stresses in hot-rolled strips; Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016) 125 – 134

Zminiaturyzowane urządzenie do badań nieniszczących metodą prądów wirowych wykorzystujące pomiar amplitudowo-częstotliwościowy

Miniaturized device for eddy current nondestructive testing using the amplitudefrequency measurement

ABSTRACT

The paper presents a device working on the basis of a generator with a freely oscillating resonant circuit. The device records changes in voltage amplitude and frequency of the eddy current signal. Simultaneous registration of two parameters with different sensitivity for selected factors allows for a more accurate analysis of the condition of the tested material. The device can works in manual measurement mode or in automatic mode. It is characterized by small size and weight. It can be used in defectoscopy, structure and thickness measurements.

Keywords: eddy current; amplitude-frequency measurement; Wirotest M2

1. Wstęp

Podstawowym zjawiskiem wykorzystywanym w badaniach nieniszczących metodą prądów wirowych (ET -Electromagnetic Testing lub ECT - Eddy Current Testing) jest indukcja elektromagnetyczna, która polega na generowaniu prądu w materiale przewodzącym, w wyniku działania na niego zmiennego pola magnetycznego (Rys. 1). Zmienne pole magnetyczne występuje wskutek zasilania cewki prądem zmiennym z generatora [1-3].



Rys. 1. Idea indukowania prądów wirowych: prąd zmienny I_zasilający cewkę, zmienne pole magnetyczne cewki H_, zmienne prądy wirowe EC, zmienne pole magnetyczne H_{EC} generowane przez prądy wirowe [4].

Fig. 1. The idea of inducing eddy currents: alternating current I supplying the coil, alternating magnetic field of the coil H_, alternating eddy currents EC, alternating magnetic field H_{EC} generated by eddy currents [4].

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono urządzenie pracujące w oparciu o generator ze swobodnie oscylującym obwodem rezonansowym. Urządzenie rejestruje zmiany amplitudy napięcia oraz częstotliwości sygnału prądowirowego. Jednoczesna rejestracja dwóch parametrów o różnej czułości na wybrane czynniki pozwala na dokładniejszą analizę stanu badanego materiału. Urządzenie może pracować w trybie ręcznego pomiaru lub w trybie automatycznym. Charakteryzuje się małym rozmiarem i wagą. Może być wykorzystywane w defektoskopii, strukturoskopii oraz pomiarach grubości.

Słowa kluczowe: prądy wirowe; pomiar amplitudowo-częstotliwościowy; Wirotest M2

Aparatura pomiarowa do badań ET jest budowana w oparciu o generatory o ustalonej częstotliwości lub generatory ze swobodnie oscylującym obwodem rezonansowym (ze zmienną częstotliwością).

Większość obecnie stosowanych defektoskopów prądowirowych pracuje w oparciu o generator o ustalonej częstotliwości, gdzie analizowane są składowe (część rzeczywista i urojona) napięcia lub impedancji albo amplituda i kąt przesunięcia fazowego sygnału. Prostsze urządzenia pomiarowe wykorzystują pomiar jednoparametrowy, wówczas analizowana jest amplituda sygnału [1].

Zminiaturyzowane urządzenie wykorzystujące pomiar amplitudowo-częstotliwościowy Wirotest M2

W Instytucie Mechaniki Precyzyjnej (IMP) opracowano i wykonano zminiaturyzowane urządzenie kontrolno-pomiarowe do badań nieniszczących metodą prądów wirowych wykorzystujące pomiar amplitudowo-częstotliwościowy – Wirotest M2. Zastosowana technika pomiaru rozszerza możliwości urządzeń pomiarowych IMP, pracujących w oparciu o generator ze swobodnie oscylującym obwodem rezonansowym, o pomiar dwuparametrowy.

Zbliżenie sondy pomiarowej do powierzchni materiału badanego powoduje zmianę wartości amplitudy napięcia i częstotliwości sygnału prądowirowego. Pomiar amplitudowo-częstotliwościowy wymaga w pierwszej kolejności ustalenia wartości amplitudy napięcia i częstotliwości

27

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.036

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

w miejscu wolnym od wad i niezgodności. Te wartości przyjmuje się jako wartości odniesienia, z którymi porównuje się wskazania otrzymane podczas dalszych badań. Zmiana wartości któregoś z parametrów sygnalizuje obecność wady lub niezgodności.



Rys. 2. Wirotest M2 z głowicą pomiarową – pomiar w trybie ręcznym.

Fig. 2. The Wirotest M2 with measurement head – measurement in manual mode.



Rys. 3. Wirotest M2 oraz głowice pomiarowe z sondami stykowymi.

Fig. 3. The Wirotest M2 and measurement heads with surface probes.

Wirotest M2 jest zminiaturyzowanym urządzeniem kontrolno-pomiarowym, przeznaczonym do pracy w trybie ręcznym (np. jako przenośny defektoskop) oraz automatycznym (np. jako jeden z czujników na automatycznym stanowisku pomiarowym). Charakteryzuje się małym rozmiarem (wymiary zewnętrzne razem z głowicą pomiarową z Rys. 2: 23,4 x 26,4 x 143,0 mm) oraz masą (44 g razem z głowicą). Po podłączeniu głowicy pomiarowej (Rys. 3) urządzenie pracuje z zadaną częstotliwością oraz czułością. Zmiana tych parametrów wymaga zmiany głowicy, która jest opracowywana i wykonywana pod ściśle określony cel badania ET. Wirotest M2 pracuje z sondami stykowymi oraz przelotowymi o częstotliwości pracy od kilku kHz do kilku MHz. Źródłem zasilania Wirotestu M2 oraz jednostką zbierającą, przetwarzającą i archiwizującą dane pomiarowe jest urządzenie zewnętrzne (PC, smartphone lub tablet). Funkcje związane z obrazowaniem i analizą rejestrowanego sygnału realizowane są przez dedykowaną aplikację. Głównym obrazowaniem wskazań urządzenia jest przebieg amplitudy i częstotliwości w czasie (Rys. 4). Obrazowaniami pomocniczymi są odseparowane przebiegi tych parametrów w czasie lub względem punktu pomiarowego (Rys. 6). Wybrane dane techniczne urządzenia zamieszczono w Tab. 1.

Tab.	1.	Wir	otestu	M2 -	daı	ne i p	arar	netry j	oracy	
Tab.	1.	The	Wirot	est M	[2 -	data	and	work	parame	eters

	1
Komunikacja	port USB typu B
Szybkość transmisji	57600 bit/s
Częstotliwość próbkowania	5÷4500 pomiarów/s
Napięcie zasilania	5V
Wymiary zewnętrzne bez głowicy	23,4 x 26,4 x 106,4 mm
Waga bez głowicy	33,6 g
Urządzenia współpracujące	PC, smartphone, tablet

3. Pomiar amplitudowo-częstotliwościowy w badaniach ET

Dzięki jednoczesnej rejestracji dwóch parametrów o różnej czułości na wybrane czynniki analiza amplitudowo-częstotliwościowa pozwala na dokładniejszą ocenę stanu badanego materiału, w porównaniu do analizy jednoparametrowej (amplitudowej).

Na przykład w badaniach ET głowicą pomiarową o częstotliwości pracy 278 kHz (w powietrzu) analiza amplitudowo-częstotliwościowa pozwala na wykrycie czterech nacięć na stalowym wzorcu (Rys. 4). Jednakże to składowa częstotliwościowa pozwala na ocenę ich wielkości (głębokości).

Analiza amplitudowo-częstotliwościowa pozwala na rozróżnianie materiałów ferromagnetycznych i nieferromagnetycznych. Jednakże do rozróżniania materiałów nieferromagnetycznych między sobą bardziej użyteczna jest analiza składowej amplitudowej (Rys. 5).

Zwiększenie odległości sondy pomiarowej od powierzchni materiału badanego (efekt lift off) powoduje wzrost amplitudy napięcia (Rys. 6a) oraz spadek częstotliwości sygnału (Rys. 6b).

4. Podsumowanie

Pomiar amplitudowo-częstotliwościowy może być wykorzystywany w trzech obszarach badań ET: w defektoskopii, strukturoskopii oraz pomiarach grubości/odległości.

Zminiaturyzowane urządzenie - Wirotest M2, rozszerza możliwości dotychczas stosowanej aparatury pomiarowej IMP, pracującej w oparciu o generator ze swobodnie oscylującym obwodem rezonansowym, o pomiar dwuparametrowy. Pozwala to na dokładniejszą ocenę stanu badanego materiału oraz zmniejsza ryzyko niewykrycia wady lub niezgodności. Przedstawiona technika pomiaru otwiera nowe kierunki aplikacyjne dla urządzeń produkcji IMP w obszarze badań nieniszczących.



Rys. 4. Sygnał amplitudowo-częstotliwościowy dla nacięcia (szerokość x głębokość): a) 0,5 x 1 mm, b) 0,5 x 4 mm, c) 0,5 x 7,5 mm, d) 0,5 x 10 mm.

Fig. 4. The amplitude-frequency signal for the notch (width x depth): a) $0,5 \ge 1 \text{ mm}$, b) $0,5 \ge 4 \text{ mm}$, c) $0,5 \ge 7,5 \text{ mm}$, d) $0,5 \ge 10 \text{ mm}$.

Badania oraz wykonanie układu pomiarowego zrealizowano w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w ramach pracy statutowej w 2018 r. pt. "Zminiaturyzowany układ pomiarowy do badań nieniszczących metodą prądów wirowych", nr 13.1.01.429.00.



Rys. 5. Sygnał amplitudowo-częstotliwościowy dla mosiądzu CuZn40Pb2 (diamagnetyk) oraz aluminium AW-5754 (paramagnetyk).

Fig. 5. The amplitude-frequency signal for the CuZn40Pb2 brass (diamagnetic material) and AW-5754 aluminum (paramagnetic material).



Rys. 6. Przebieg amplitudy napięcia (a) oraz częstotliwości sygnału (b) podczas zbliżania sondy pomiarowej do powierzchni mosiądzu CuZn40Pb2.

Fig. 6. The course of voltage amplitude (a) and signal frequency (b) during approaching the measuring probe to the CuZn40Pb2 brass surface.

5. Literatura/References

- A. Lewińska-Romicka, "Badania materiałów. Metoda prądów wirowych" Biuro Gamma, Warszawa, 2007.
- [2] A. Lewińska-Romicka, "Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii" Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [3] Norma Europejska PN-EN ISO 15549, "Non-destructive testing Eddy current testing General principles", 2011.
- [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.



ZAAWANSOWANE SYSTEMY POMIAROWE I NARZĘDZIOWE



PRZEDSTAWICIELSTWO WIODĄCYCH PRODUCENTÓW Z BRANŻY POMIAROWEJ I NARZĘDZIOWEJ



ITA spółka z ograniczoną odpowiedzialnością Sp. k. ul. Poznańska 104, Skórzewo, 60–185 Poznań Tel: +48 61 222 58 00, Fax: +48 61 222 58 01 e-mail: info@ita-polska.com.pl www.ita-polska.com.pl

Maciej Roskosz^{1*}, Krzysztof Fryczowski², Jerzy Kwaśniewski¹, Jakub Janisz¹ ¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie ²Politechnika Śląska, Gliwice

Identyfikacja stopnia deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 na podstawie zmian parametrów polowego efektu Barkhausena

Identification of the plastic deformation degree of X2CrNi18-9 steel based on changes of the Barkhausen noise parameters

ABSTRACT

In austenitic chromium - nickel steels under the influence of cold working, a change of dislocation structure occurs, as a result of which metastable austenite undergoes partial transformation into martensite ε and ferromagnetic martensite α '. For samples made of austenitic X2CrNi18-9 steel a significant influence of the degree of plastic deformation on the parameters of the Barkhausen noise was found. Quantitative correlations between the degree of plastic deformation of the X2CrNi18-9 steel and modules of extremes values of envelope were developed. These correlations can be used as calibration curves in reverse problems of non-destructive testing.

Keywords: X2CrNi18-9 steel; Barkhausen effect; cold working; inverse problems of non-destructive testing

1. Wprowadzenie i cel badań

W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania zmierzające do opracowania metod określania wpływu odkształcenia na zimno [1 - 3], zmęczenia mechanicznego [4, 5] oraz pełzania [6] na stan i własności elektromagnetyczne stali austenitycznych. Jako sygnały diagnostyczne wykorzystuje się wielkości opisujące pętlę histerezy magnetycznej, prądy wirowe, parametry opisujące efekt Barkhausena oraz zmiany anizotropii własności elektromagnetycznych. Zmiany tych parametrów wynikają ze związków pomiędzy stanem mikrostruktury, wielkością ziaren i gęstością dyslokacji a własnościami elektromagnetycznymi tworzyw.

W wysokostopowych stalach chromowo-niklowych typu 18-8, zależnie od stężenia Cr i Ni oraz innych dodatków stopowych, w temperaturze pokojowej występuje struktura austenityczna, może też pojawiać się pewna zawartość ferromagnetycznego ferrytu δ .

Stale austenityczne są materiałami szeroko stosowanymi, a występująca w nich odkształceniowa przemiana martenzytyczna może mieć zarówno pozytywne następstwa, powodując umocnienie materiału, jak i niepożądane, powodując spadek odporności na korozję oraz pojawienie się fazy ferromagnetycznej [7-13].

Austenityczne stale chromowo-niklowe pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno ulegają znacznemu

STRESZCZENIE

W austenitycznych stalach chromowo–niklowych pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno następuje zmiana struktury dyslokacyjnej, w wyniku czego metastabilny austenit przechodzi częściową przemianę w martenzyt ε oraz ferromagnetyczny martenzyt α'. Dla próbek ze stali austenitycznej X2CrNi18-9 stwierdzono znaczący wpływ stopnia deformacji plastycznej na parametry polowego efektu Barkhausena. Uzyskane korelacje ilościowe pomiędzy stopniem deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 a modułem wartości maksymalnych obwiedni U_{ENV} wykazują możliwość wykorzystania ich przy rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: Stal X2CrNi18-9; efekt Barkhausena; odkształcenie plastyczne; zagadnienie odwrotne badań nieniszczących

umocnieniu, zależnie od składu chemicznego, wielkości gniotu i temperatury odkształcenia. Pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno następuje zmiana struktury dyslokacyjnej, w wyniku czego metastabilny austenit przechodzi częściową przemianę w martenzyt ε oraz ferromagnetyczny martenzyt a' o strukturze regularnej przestrzennie centrowanej [11-13]. Mechanizmy tych przemian opisano w [13-15].

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była analiza możliwości ilościowej oceny stopnia deformacji plastycznej próbek płytowych ze stali X2CrNi18-9 na podstawie wielkości ilościowo opisujących polowy efekt Barkhausena.

2. Szczegóły badań

Badano próbki płytowe ze stali austenitycznej X2CrNi18-9 (EN 10088-1, grupa materiałowa 1.4307). Skład chemiczny stali pokazano w tab. 1. Geometrię badanych próbek przedstawiono na rys. 1. Uzyskane w trakcie badań relacje pomiędzy odkształceniem względnym ε , a naprężeniem inżynierskimi σ zaprezentowano na rys. 2.

Skład fazowy badanej stali określono, posługując się kryteriami Schaefflera i stwierdzono, że stal X2CrNi18-9 posiada strukturę austenityczną z udziałem ferrytu i martenzytu (przy szybkim chłodzeniu dla spoin).

Badane próbki były obciążane za pomocą maszyny wytrzymałościowej Galdabini Sun 10P. Po osiągnięciu zadanych obciążeń próbki były odciążane i badane poza maszyną. Jako

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

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.037

miarę odkształcenia plastycznego ɛ przyjęto odkształcenie plastyczne próbki badanej na odcinku pomiędzy 60-tym a 140-tym punktem pomiarowym, pierwotnie o długości 80 mm (rys. 1).

Tab. 1. Chemical composition of X2CrNi18-9 steel.	
Pierwiastek	% masowy
C max	0,02
Si max	0,45
Mn max	1,43
P max	0,031
S	0,008
N max	-
Cr	18
Мо	0,3
Nb	0,017
Ni	7,94
Ti	0,01





Rys. 1. Próbka do badań, A=40 mm, B=20 mm, R=10 mm. Fig. 1. Experimental sample, A=40 mm, B=20 mm, R=10 mm.



Rys. 2. Relacje pomiędzy odkształceniem trwałym ɛ a rozciągającym naprężeniem inżynierskim σ dla badanej stali X2CrNi18-9. Fig. 2. Relationship between plastic strain ε_{p} and engineering tensile stress σ for X2CrNi18-9.

Pomiary szumu Barkhausena prowadzono w każdej próbce w trzech punktach pomiarowych (patrz rys. 1) w stanie po odciążeniu. W każdym punkcie dokonywano dwóch pomiarów, dla dwóch kierunków magnesowania:

- kierunek X prostopadły do osi obciążenia
- kierunek Y współosiowy z obciążeniem.

Próbki były magnesowane prądem, którego sygnał charakteryzował się kształtem symetrycznego trójkąta o częstotliwości ok. 2 Hz i amplitudzie 200 mA a częstotliwość próbkowania szumu sygnału wynosiła 800 kHz.

W prezentowanych wynikach skupiono się na wynikach uzyskanych dla punktu środkowego.

3. Wyniki badań i ich analiza

Przykładowe fragmenty obwiedni polowego efektu Barkhausena zmierzonego na powierzchni badanych próbek dla stanu początkowego i dla znacznych odkształceń plastycznych pokazano na rys. 3a i 3b.



Rys. 3. Fragmenty obwiedni szumu Barkhausena w stanie początkowym i w stanie znacznego odkształcenia plastycznego uzyskane dla stali X2CrNi18-9.

Fig. 3. Barkhausen noise envelopes in the initial state and in state of significant plastic deformation - X2CrNi18-9 steel: a) half of the cycle in which the magnetizing current rises; b) half of the cycle in which the magnetizing current decreases.

Widoczna jest bardzo wyraźna różnica w przebiegu fragmentów obwiedni odpowiadających stanowi początkowemu i stanowi znacznego odkształcenia plastycznego (rys. 3a i 3b), co świadczy o znaczących zmianach struktury stali X2CrNi18-9 na skutek odkształcenia plastycznego na zimno. Kolejne analizy przeprowadzono dla wielkości ilościowo opisujących polowy efekt Barkhausena [16]. Skupiono się na analizie takich wielkości, jak:

- energia szumu Barkhausena;
- punkty charakterystyczne obwiedni (ekstremum napięcia U_{FNV} oraz prąd magnesowania odpowiadający ekstremum napięcia).



magnesowania rośnie

magnesowania maleje

Rys. 4. Zależność odkształceń plastycznych od wartości ekstremów modułów obwiedni dla stali X2CrNi18-9.

Fig. 4. Relationship between plastic deformation and modules of extremes values of envelope for X2CrNi18-9 steel: a) half of the cycle in which the magnetizing current rises; b) half of the cycle in which the magnetizing current decreases.

Najbardziej jednoznaczne korelacje diagnostyczne (szczególnie w zakresie małych odkształceń plastycznych) otrzymano dla ekstremum napięcia obwiedni U_{ENV}, rozpatrując oddzielnie połowę cyklu, w której prąd magnesowania rośnie oraz połowę cyklu, w której maleje. Otrzymane zależności pokazano odpowiednio na rysunkach: 4a – połowa cyklu magnesowania, w której prąd wzrasta, 4b – połowa cyklu magnesowania, w której prąd maleje.

Przedstawione na rysunkach 4a i 4b zależności opisano funkcjami, które można wykorzystać jako krzywe kalibracyjne w zagadnieniach odwrotnych badań nieniszczących, dotyczących w tym przypadku wyznaczenia stopnia deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 na podstawie wartości ekstremum modułu obwiedni U_{ENV} :

• połowa cyklu, w której prąd magnesowania rośnie: dla $_{\rm \tiny UENV} < 0.4$

 $\epsilon \cong -10,44 + 277,06 \times U_{_{\rm ENV}} - 687,81 \times U_{_{\rm ENV}}{}^2 + 579,19 \times U_{_{\rm ENV}}{}^3$

dla U_{ENV} \geq 0,4

 $\epsilon \cong 19,99+18,9 \times U_{_{\rm ENV}}$

• połowa cyklu, w której prąd magnesowania maleje: dla $\rm U_{_{FNV}} < 0,4$

 $\varepsilon \cong -10,34 + 273,22 \times U_{ENV} - 668,55 \times U_{ENV}^{2} + 541,84 \times U_{ENV}^{3}$

dla U_{ENV} \geq 0,4

 $\epsilon \cong 18,39 + 20,37 \times U_{_{\rm ENV}}$

4. Podsumowanie

Istotne znaczenie w diagnostyce i zmianach sygnału pomiarowego badanych stali austenitycznych ma obecność i zmiany ilościowe tworzącej się fazy ferromagnetycznej podczas odkształcenia plastycznego. W stali X2CrNi18-9 faza ferromagnetyczna – ferryt δ w niewielkiej ilości występuje już w stanie nieodkształconym, a następnie w miarę wzrostu odkształcenia i po przekroczeniu pewnego odkształcenia krytycznego występuje wyraźny przyrost sumarycznego udziału faz ferromagnetycznych na skutek występowania przemiany martenzytycznej i tworzenia martenzytu α .

Przedstawiono wyniki pomiarów polowego efektu Barkhausena na powierzchni próbek ze stali austenitycznej X2CrNi18-9 o różnych stopniach trwałej deformacji wskutek osiowego rozciągania. Stwierdzono znaczący wpływ stopnia deformacji plastycznej na parametry polowego efektu Barkhausena. Opracowano ilościowe korelacje pomiędzy stopniem deformacji plastycznej stali X2CrNi18-9 a wartościami ekstremum modułu obwiedni U_{ENV} Korelacje te można wykorzystać jako krzywe kalibracyjne w zagadnieniach odwrotnych badań nieniszczących.

5. Literatura/References

- P. Novotny, P. Macha, P. Sajdl, "Diagnostics of austenitic steels by coercivity mapping", NDT&E International, vol. 41, pp.530-533, 2008.
- [2] D. O'Sullivan, M. Cotterell, I. Meszaros, "The characterisation of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques", NDT&E International, vol. 37, pp. 265–269, 2004.
- [3] I. Meszaros, J. Prohaszka, "Magnetic investigation of the effect of a-martensite on the properties of austenitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, vol. 161, pp. 162–168, 2005.
- [4] Z. H. Żurek, S. Sieradzki, J. Adamek, "Ocena stanu technicznego kołpaków generatorów na podstawie pomiarów magnetycznych niestabilności austenitu dla stali G18H18", Przegląd Spawalnictwa, vol. 13, pp. 8-12, 2011.
- [5] A. Vincent i inni, "Magnetic Barkhausen noise from straininduced martensite during low cycle fatigue of 304L austenitic stainless steel", Acta Materialia, vol. 53, pp. 4579–4591, 2005.
- [6] Augustyniak, B., Chmielewski, M., Sablik, M.J., Augustyniak, M., Walker, S. "A new eddy current method for nondestructive testing of creep damage in austenitic boiler tubing", Nondestructive Testing and Evaluation 24 (1-2) 2009, pp. 121-141
- [7] M. Roskosz, S. Griner, P. Sosnowski, "Analiza możliwości oceny stopnia deformacji plastycznej stali austenitycznych przy użyciu metody magnetycznej pamięci metalu", Przegląd Spawalnictwa, vol.12, pp.130-135, 2013.
- [8] J. Echigoya, T. Ueda, X. Li, "Martensitic transformation due to plastic deformation and magnetic properties in SUS 304 stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, vol. 108, pp. 213-216, 2001.
- [9] W. Babiński, S. Griner, "Badania drutów ze stali austenitycznych chromowo niklowych przeznaczonych na sita tkane", Prace Instytutu Efektywności Wykorzystania Materiałów, vol. 1/2, pp. 25-30, 1980.
- [10] E. Nagy, V. Mertinger, F. Tranta, J. Sólyom, "Deformation induced martensitic transformation in stainless steels", Materials Science and Engineering A, pp. 308-313, 2004.
- [11] Hong Chul Shin, Tae Kwon Ha, Young Won Chang, "Kinetics of deformation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel", Scripta Materialia, pp. 823-829, 2001.
- [12] M. Milad, N. Zreiba, F. Elhalouanin, "The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, vol. 203, pp. 80-85, 2008.
- [13] B. Cina, "Effect of Cold Working on the g-a Transformation In Some Fe-Ni-Cr Alloys", Journal of the Iron and Steel Institute vol. 406, 1977.
- [14] G. Blanc, R. Tricot, "Transformations martensitiques dens les aciers inoxydables austenitiques Fe-Cr-Ni", Mem. Sci. Rev. Metall, vol. 527, pp. 7-8, 1973.
- [15] J. Adamczyk, K. Szkaradek, "Materiały metalowe dla energetyki jądrowej", Wyd. Pol. Śl. Gliwice, pp. 236, 1992.
- [16] K. Fryczowski, M. Roskosz, "Metody ilościowej analizy Szumu Barkhausena", Przegląd Spawalnictwa, vol. 88, pp. 133-138, 2016.

Paweł Mazurek*, Maciej Roskosz, Jerzy Kwaśniewski AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Diagnostyka lin nośnych dźwigu osobowego na podstawie obserwacji zmian magnetycznego pola rozproszenia

Diagnostics of traction ropes of a passenger lift based on observation of the magnetic leakage field

ABSTRACT

Steel wire ropes are important load-bearing elements of lifting equipment. Their technical condition has a decisive impact on continuous trouble-free operation, and above all on the safety of people using these devices. A very important issue is the methods of testing and assessing the safety status of working steel wire ropes. The article presents new possibilities of using in the diagnostics of lifting ropes of passenger lifts, magnetometric sensors built on the basis of amorphous materials, without the use of an external magnetic field. The general physical basis of the method using the phenomenon of magnetic flux dispersion in areas of material with different magnetic permeability was explained.

Keywords: non-destructive testing; passive magnetic diagnostics; passenger lift; traction rope

1. Wprowadzenie

Stały rozwój metod i środków diagnostyki technicznej jest niezbędny dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji maszyn, urządzeń i obiektów technicznych. Poznawanie charakteru procesów zużycia i szybkości przyrostu uszkodzeń danego elementu systemu pozwala prognozować czas oraz możliwości dalszej bezpiecznej eksploatacji danego urządzenia i jego elementów, a także przewidywać przybliżony termin ich wymiany [1,2,3].

Jednym z najistotniejszych elementów każdego dźwigu, poza elementami bezpieczeństwa, jest lina nośna [4]. Czynnikiem decydującym o dalszej eksploatacji lub wymianie lin nośnych w urządzeniach transportu linowego jest przede wszystkim liczba pękniętych drutów, którą określa się na podstawie oględzin wizualnych. Największą wadą takiego postępowania jest możliwość oceny jedynie warstwy zewnętrznej liny – bez informacji o stanie drutów wewnątrz liny. O konieczności wymiany świadczy także zmniejszenie średnicy liny (wywołane np. zniszczeniem rdzenia), zmniejszenie sprężystości liny, korozja czy rozluźnienie splotek i drutów bądź też deformacje liny – trwałe spłaszczenia lub zgrubienia [5].

2. Stan wiedzy o kontroli lin nośnych dźwigów

W przypadku lin nośnych dźwigów osobowych kryteria odkładnia zgodne ze standardami lin stalowych dla dźwigów

STRESZCZENIE

Liny stalowe są istotnymi elementami nośnymi urządzeń dźwigowych. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ na ciągłą bezawaryjną pracę, a przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi korzystających z tych urządzeń. Bardzo ważnym zagadnieniem są metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa pracujących lin stalowych. W artykule przedstawiono nowe możliwości wykorzystania w diagnostyce lin nośnych dźwigów osobowych, czujników magnetometrycznych zbudowanych na bazie materiałów amorficznych, bez zastosowania zewnętrznego pola magnetycznego. Wyjaśnione zostały ogólne podstawy fizyczne metody wykorzystującej zjawisko rozproszenia strumienia magnetycznego na obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące; pasywna diagnostyka magnetyczna; dźwig osobowy; lina nośna

opisane są w normach [5,6,7] (tab. 1). Kryteria te bazują jedynie na obserwacji zewnętrznych splotek. Przeprowadzane kontrole wizualne często są nieobiektywne i nie odzwierciedlają rzeczywistej kondycji liny. Problem kontroli wizualnej pojawia się także w przypadku lin w otulinie z tworzywa sztucznego, m.in.: PCV, poliamidu (PA-6), polietylenu – w takim przypadku liny podlegają wymianie po określonej przez producenta liczbie jazd dźwigu.

Opracowana do tej pory koncepcja pomiarów lin nośnych z wykorzystaniem głowicy magnetycznej [9] okazuje się kłopotliwa w starciu z gwałtownie rosnącą liczbą urządzeń podlegających kontroli [3]. Metoda ta, w branży diagnostycznej opisywana jako aktywna, wymaga dodatkowego namagnesowania badanego obiektu, co wiąże się z koniecznością zamocowania w szybie dźwigowym odpowiedniej aparatury (rys. 1). W wielu przypadkach okazuje się to bardzo trudne bądź wręcz niemożliwe.

3. Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia do oceny stanu technicznego liny

Remanencja metalu pojawia się w linie już na etapie wytwarzania drutów, a jej wartość zmienia się w trakcie ich rozciągania i przeginania. Wartość tej remanencji zmienia się wskutek wykonywanej przez linę pracy, tj. jej przeginania, rozciągania bądź skręcania [10,11]. Również występujące w linie uszkodzenia mają wpływ na wartość indukowanego pola magnetycznego. Pod wpływem cyklicznie zmiennych

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: pmazurek@agh.edu.pl

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.038
Tab. 1. Kryteria odkładnia zgodne ze standardami lin stalowych dla dźwigów EN 12385 - 5 i ISO 4344, rozszerzone w oparciu o DIN 15020 [8].

14	in the value ropes diseared effective according to ETV 12505 - 5 and 150 4544, extended based on DTV 15020 [0].											
		Do wymiany lu czonym czas	ıb ponownego ba ie zalecanym prze	dania w wyzna- ez inspektora	Do natychmiastowej wymiany							
L.p	. Kryteria	Lina konstrukcji 6x19	Lina konstrukcji 8x19	Lina konstrukcji 9x19	Lina konstrukcji 6x19	Lina konstrukcji 8x19	Lina konstrukcji 9x19					
1.	Średnia liczba pękniętych drutów na zewnętrznych splotkach	Ponad 12 na długości pomiarowej	Ponad 15 na długości pomiarowej	Ponad 17 na długości pomiarowej	Ponad 24 na długości pomiarowej	Ponad 30 na długości pomiarowej	Ponad 34 na długości pomiarowej					
2.	Liczba drutów pęknię- tych w jednej lub dwóch splotkach	Ponad 6 na długości pomiarowej	Ponad 8 na długości pomiarowej	Ponad 9 na długości pomiarowej	Ponad 8 na długości pomiarowej	Ponad 10 na długości pomiarowej	Ponad 11 na długości pomiarowej					
3.	Liczba sąsiadujących pękniętych drutów w jednej splotce	5	5	6	Ponad 5	Ponad 5	Ponad 6					
4.	Przerwa w drutach	1 na długości pomiarowej	1 na długości pomiarowej	1 na długości pomiarowej	Ponad 1 na długości pomiarowej	Ponad 1 na długości pomiarowej	Ponad 1 na długości pomiarowej					





Rys. 1. Model 3D głowicy magnetycznej do badania lin dźwigowych [3].

Fig. 1. 3D model of magnetic head for examination of lift ropes [3].

obciążeń roboczych, wskutek działania efektów magnetomechanicznych, zarówno w drutach, jak i w całej linie następują zmiany właściwości elektromagnetycznych [12].

Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia do pomiarów ciągłości lin nośnych dźwigów umożliwiają dwa czynniki: istnienie naturalnego pola magnetycznego Ziemi oraz fakt, że materiały, z których są wykonane elementy krytyczne obiektów technicznych to w dużej mierze materiały ferromagnetyczne. Przykładem metody reprezentującej dziedzinę pasywnej diagnostyki magnetycznej jest metoda Magnetycznej Pamięci Metalu (MPM) [13,14,15].

Podstawą działania metody MPM jest wykorzystanie magnetyzmu ziemskiego. Metoda MPM bazuje na trzech zjawiskach fizycznych:

- odwrotny efekt magnetostrykcyjny (efekt Villariego), czyli zmiana magnesowania materiału pod wpływem naprężenia mechanicznego;
- odwrotny efekt magnetoplastyczny, czyli zmiana namagnesowania materiału występująca w strefach odkształceń plastycznych i wywołana deformacją materiału;
- efekt przecieku strumienia wektora natężenia pola magnetycznego spowodowany przez mechaniczne i strukturalne niejednorodności materiału [16].

Istotą metody MPM jest pomiar i interpretacja lokalnego zaburzenia pola magnetycznego spowodowanego występowaniem miejsc koncentracji naprężenia w materiałe, miejscowym odkształceniem plastycznym materiału lub obecnością nieciągłości materiałowych, zarówno mechanicznych (pęknięcia, rozwarstwienia), jak i strukturalnych (wtrącenia innego materiału). Mierzoną wartością jest wartość wybranej składowej natężenia pola magnetycznego zmierzona w pobliżu diagnozowanego obiektu [17].

4. Pomiar indukcji magnetycznej liny nośnej dźwigu osobowego

4.1 Szczegóły badań

Badania zostały przeprowadzone na jednej z lin nośnych (rys. 2) dźwigu osobowego zainstalowanego w budynku B4 Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego schemat olinowania pokazano na rys. 3. Układ napędowy kabiny składa się z 5 lin o średnicy ø 6,5mm i konstrukcji 8x19W + IWRC (lina 8-splotkowa, po 19 drutów w każdej splotce, konstrukcji Warrington, z rdzeniem w postaci niezależnej liny stalowej)[18]. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem czujnika magnetometrycznego SpinMeter-3D oraz oprogramowania Micro Magnetics (rys. 4, 5). Czujnik pomiarowy umieszczono na najwyższej kondygnacji dźwigu osobowego. Został on przymocowany do konstrukcji stalowej aluminiowym uchwytem tak, by przemieszczające się kabina oraz przeciwwaga nie zaburzały pomiaru (rys. 6). Czujnik skalibrowano, przyjmując warunki magnetyczne panujące w miejscu zamocowania czujnika (lina jednostronnie lub dwustronnie przeginana) jako warunki odniesienia.

4.2 Wyniki pomiarów i ich analiza

Dla pierwszej serii pomiarów czujnik skalibrowano na fragmencie liny jednostronnie przeginanej. W miarę opuszczania kabiny ruchem jednostajnym prostoliniowym z prędkością ok. 0,15m/s, rejestrowano wartości indukcji magnetycznej przemieszczającej się liny. Wyniki uzyskane z pomiaru w trzech prostopadłych osiach przedstawiono na rys. 7.



Rys. 2. Obiekt pomiarowy – liny nośne dźwigu osobowego. **Fig. 2.** Measuring object – traction ropes of passenger lift.



Rys. 3. Schemat olinowania dźwigu osobowego – układ pośredni 2:1. **Fig. 3.** The rigging diagram of a passenger lift – suspension 2:1.

Na wykresie (rys. 7) zauważalne są dwie zmiany – krótko po rozpoczęciu pomiaru oraz w jego trakcie. Po analizie otrzymanych wyników, postawiono hipotezę, iż pierwsza



Rys. 4. Czujnik pomiarowy SpinMeter-3D [19]. Fig. 4. SpinMeter-3D Probe [19].



Rys. 5. Układ osi pomiarowych [19]. Fig. 5. The system of measuring axes [19].



Rys. 6. Badana lina nośna – pierwsza z lewej. **Fig. 6.** Inspected traction rope – first from the left side.



Rys. 7. Wartość indukcji magnetycznej wzdłuż liny w zależności od przemieszczenia kabiny z zaznaczonymi strefami przegięć. **Fig.** 7. The value of magnetic induction along the rope depending on the displacement of the car with marking of bending zones.

zmiana wynika z odmiennego charakteru pracy liny – tzn. punktem wyjściowym pomiarów jest miejsce, w którym lina może być przeginana tylko jednokierunkowo, natomiast po przewinięciu przez wciągarkę jest to już przeginanie dwukierunkowe (rys. 8). Druga zmiana – lokalna anomalia magnetyczna – najprawdopodobniej wynika z istniejącego uszkodzenia liny. Z powodu ciągłej eksploatacji dźwigu osobowego w chwili przeprowadzenia pomiarów nie było możliwości sprawdzenia czy uszkodzenie rzeczywiście występuje – oględziny wizualne tego nie wskazywały.



Rys. 8. Skrajne położenia kabiny dźwigu – strefy przegięć. **Fig. 8.** Extreme position of the car –the bending zones.



Rys. 9. Weryfikacja prawdopodobnego uszkodzenia liny. **Fig. 9.** Verification of the probable traction rope damage.



Rys. 10. Pomiar liny na odcinku bez uszkodzenia.

Fig. 10. Measurement of the rope on the section without damage.

W drugiej serii pomiarów jako punkt odniesienia (punkt kalibracji czujnika) wybrany został fragment liny ze strefy dwukierunkowego przegięcia. Celem pomiarów było sprawdzenie, czy wykryta anomalia magnetyczna pojawi się dla innych warunków odniesienia. Pomiar polegał na dwukrotnym przejeżdżaniu liny z wykrytą anomalią magnetyczną wokół czujnika (rys. 9). Dla porównania zmierzony został także inny odcinek, na którym nie wykryto anomalii (rys. 10). Jak widać obszar występowania anomalii wyraźnie wyróżnia się na tle pozostałej długości liny.

5. Podsumowanie

Pasywna metoda magnetyczna, polegająca na wykrywaniu wpływu zmian remanencji magnetycznej badanego obiektu na jego pole rozproszenia, umożliwia wskazanie miejsc czy obszarów niebezpiecznych, pęknięć czy innych defektów lin stalowych. Analiza wyników badań polega na analizie składowych normalnej i stycznej rozproszonego pola magnetycznego wzdłuż drogi pomiarowej. Metoda może być przydatna do analizy jakości nowych części ferromagnetycznych, jak również eksploatowanych, z różną historią i stanem wytężenia.

6. Literatura

- J. Hankus, "Nowa metoda badań diagnostycznych lin stalowych z wykorzystaniem magnetycznej pamięci metalu." Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko/Główny Instytut Górnictwa 2: 107-131, 2006
- [2] J. Hankus, "Zintegrowane metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa lin stalowych." Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko/ Główny Instytut Górnictwa 43-58, 2002
- [3] J. Kwaśniewski, S. Molski, T. Krakowski, H. Ruta, "Diagnostyka lin w powłokach z tworzyw sztucznych używanych w urządzeniach dźwigowych" The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS, 2012
- [4] J. Kwaśniewski, "Dźwigi osobowe i towarowe. Budowa i eksploatacja", AGH, Kraków, 2004
- [5] PN-EN 12385-5:2004/AC Liny Stalowe. Bezpieczeństwo. Część 5: Liny splotkowe dla dźwigów
- [6] ISO 4344 Steel wire ropes for lifts -Minimum requirements
- [7] DIN 15020 Lifting Appliances; Principles Relating to Rope Drives; Calculation and Construction
- [8] PFEIFER-DRAKO Elevators Products Brochure katalog lin
- [9] J. Kwaśniewski, "Badania magnetyczne lin stalowych. Certyfikacja personelu w metodzie MTR", Wydawnictwo AGH, Kraków, 2010
- [10] M. Giglio, A. Manes, "Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads", Engineering failure analysis 12.4: 549-568, 2005
- [11] T. Haniszewski, D. Gąska, J. Margielewicz, "Identyfikacja właściwości mechanicznych liny stalowej z rdzeniem włókiennym", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Series: Transport, vol. 85, 2014
- [12] M. Roskosz, Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014
- [13] J. Kwaśniewski, M. Roskosz, J. Juraszek, K. Schabowicz, P. Mazurek, "Analiza możliwości identyfikacji stanu wytężenia lin stalowych na podstawie pomiarów właściwości magnetycznych", Przegląd Spawalnictwa-Welding Technology Review, 89(11), 2017
- [14] J. Kwaśniewski, M. Roskosz, M. Witoś, S. Molski, "Applications of Magnetometric Sensors Based on Amorphous Materials in Diagnostics of Wire Ropes", Archives of Mining Sciences, 63(1), 221-227, 2018
- [15] Z. Łapiński, "Wykrywanie wad materiałowych Metodą Pamięci Magnetycznej Metalu", Problemy Techniki Uzbrojenia ,37, 2008
- [16] J. Dybała, K. Nadulicz, "Zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu w diagnostyce obiektów technicznych", Biuletyn Naukowy Problemy Techniki Uzbrojenia, z. 133, nr 1/2015, s. 63-80.
- [17] M. Roskosz, "Kryteria oceny w metodzie magnetycznej pamięci metalu." Przegląd Spawalnictwa-Welding Technology Review, 84.13, 2012
- [18] Dokumentacja techniczna dźwigu osobowego zainstalowanego w AGH, w budynku B4. Krakdźwig Sp. z o.o.
- [19] SpinMeter-3D USB 3 Axis Magnetometer instrukcja obsługi

Igor Lyasota¹, Łukasz Sarniak²*, Piotr Kustra³ ¹Politechnika Krakowska ²Politechnika Warszawska ³Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Emisja akustyczna w zastosowaniu do oceny stanu materiału urządzeń ciśnieniowych poddanych długotrwałej eksploatacji w instalacjach przemysłu rafineryjnego

The material condition evaluation of pressure vessels after long term operation in the refinery industry with using acoustic emission method

ABSTRACT

The paper presents results obtained from the complex destructive tests with acoustic emission recording on real pressure vessel after long-term operation in the refinery industry. The vessel has been operated in the refinery industry for 45 years. A lot of corrosion damages were present on the inner surface of the vessel shell as a result of long-term operation. The material's microstructure of some shell plates was coarse-grained, which arose from improper heat treatment during plates manufacturing. The investigations, presented in this paper, were realized within the project of LIDER VII Program financed by the National Centre for Research and Development of Poland.

Keywords: acoustic emission; pressure equipment, material degradation,

STRESZCZENIE

W ramach artykułu zostały wykonane kompleksowe badania stanowiskowe rzeczywistego zbiornika ciśnieniowego polegające na próbie hydraulicznej z rejestracją sygnałów emisji akustycznej. Badane urządzenie było eksploatowane od ponad 40 lat jako część instalacji destylacji ropy naftowej. Materiał płaszcza zbiornika zawierał liczne uszkodzenia korozyjne, które zostały zidentyfikowane oraz odwzorowane za pomocą szczegółowych badań metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem techniki Phased Array. Dodatkowo materiał niektórych blach płaszcza charakteryzował się gruboziarnistą ferrytyczno-perlityczną mikrostrukturą, wynikającą z nieprawidłowej obróbki cieplnej na etapie wytwarzania urządzenia. W celu określenia pola naprężeń w płaszczu zbiornika wykonano szczegółowy model numeryczny uwzględniający ww. uszkodzenia. Wyniki wykonanych badań stanowią bazę do opracowania złożonej metodyki oceny stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych przemysłu rafineryjnego - głównego celu projektu badawczego Programu LIDER VII sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna; urządzenia ciśnieniowe, degradacja materiału, stal węglowa

1. Wstęp

carbon steel

Urządzenia ciśnieniowe, eksploatowane w instalacjach przemysłu rafineryjnego, pracują głównie w warunkach wyjątkowo ekstremalnych, polegających na jednoczesnym oddziaływaniu agresywnych mediów roboczych oraz zmiennych ciśnień. Większość urządzeń z lat 60-70-tych zawiera w materiale płaszczy ukryte wady technologiczne, powstałe przykładowo na skutek odstępstw od technologii wytwarzania. Długotrwała eksploatacja takich obiektów oraz ukryte wady technologiczne powodują występowanie uszkodzeń materiału konstrukcyjnego i połączeń spawanych w postaci nieciągłości, ubytków powierzchniowych oraz zmian strukturalnych w objętości materiału. Rozwój wymienionych wyżej ukrytych defektów, w warunkach obciążeń roboczych, może doprowadzić do ich niestabilnego stanu, a w konsekwencji awarii obiektu lub nawet całej instalacji.

W związku z powyższym, w celu podniesienia bezpieczeństwa oraz niezawodności urządzeń ciśnieniowych, eksploatowanych przez wiele lat w przemyśle petrochemicznym i rafineryjnym, jest coraz większe zapotrzebowanie na nowe metodyki diagnostyczne, pozwalające na dokładną ocenę stanu technicznego ww. urządzeń ze szczególnym uwzględnieniem degradacji materiału.

Badania zrealizowane w ramach niniejszego artykułu miały na celu opracowanie podstaw nowej metodyki diagnostycznej ukierunkowanej na ocenę stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych po ich długotrwałej eksploatacji. Stwierdzono, iż jedynie kompleksowe zastosowanie metod i technik badawczych, w celu oceny stanu technicznego urządzenia, umożliwia pełną i dokładną analizę zmian zachodzących w materiale. W tym kontekście zaproponowano metodykę diagnostyczną bazującą głównie na kompleksowych badaniach metodą emisji akustycznej (AE) oraz badaniach materiałowych z wykorzystaniem technik przenośnych, jak również analizach numerycznych MES rozkładu

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.039

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.sarniak@pw.edu.pl

pola naprężeń, które wskażą "wrażliwe" strefy koncentracji naprężeń. Interpretacja wyników tych badań i analiz, a także znalezienie wzajemnych korelacji pozwoli na skuteczne rozwiązywanie aktualnych problemów diagnostyki instalacji petrochemicznych i rafineryjnych związanych z oceną ich stanu technicznego i określeniem warunków dalszej eksploatacji, w szczególności tych urządzeń, w których na skutek długotrwałej pracy występują niekrytyczne uszkodzenia.

Pierwsze próby stosowania metody AE do badań przemysłowych urządzeń ciśnieniowych podjęto w latach 70-tych ubiegłego wieku [1-4], podczas których pokazano skuteczność danej metody badawczej. W miarę rozwoju aparatury pomiarowej oraz metod obróbki sygnału, rosły możliwości stosowania AE do rozwiązywania problemów przemysłowych, jak również diagnostyki urządzeń ciśnieniowych, tak w Polce, jak i zagranicą [5-7]. Aktualnie opracowano szereg norm i procedur [8-10] określających zasady badania tego typu konstrukcji metodą AE. Są one skoncentrowane głównie na charakteryzowaniu aktywności oraz lokalizowaniu źródeł AE, jednak nie opisują procesów zachodzących w materiale, które wywołują emisję fal sprężystych.

W Stanach Zjednoczonych opracowano technologię MONPAC [11], która za pomocą parametrów Severity oraz Historic Index pozwala na ocenę stanu urządzeń przemysłowych. Kryteria te są oparte na licznej bazie analizowanych przypadków i są powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej.

W literaturze znane są nieliczne próby [12-14] stosowania do oceny degradacji materiału obiektów przemysłowych jednocześnie kilku technik badań nieniszczących, takich jak: badania metodą AE w połączeniu z szczegółową analizą stanu materiału poprzez realizację badań z wykorzystaniem technik przenośnych (przykładowo badań metalograficznych z użyciem przenośnej mikroskopii świetlnej (PMS).)

Wszystkie badania, wyniki których przedstawiono w niniejszej publikacji, zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego zatytułowanego "Nowy kompleksowy sposób oceny stanu technicznego urządzeń ciśnieniowych instalacji eksploatowanych w przemyśle chemicznym i petrochemicznym, wykorzystujący analizy sygnałów emisji akustycznej, pola naprężeń konstrukcji i stanu degradacji materiału" sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu LIDER VII.

2. Obiekt badawczy

Jako obiekt do badań wykorzystano zbiornik ciśnieniowy o konstrukcji walcowej (pojemność 2,6 m3, grubość ścianki 8 mm), który został wyłączony z eksploatacji po ponad 40 letnim okresie pracy na instalacji destylacji ropy naftowej jednego z zakładów rafineryjnych. Materiał płaszcza to stal węglowa gatunku St 41K, która charakteryzuje się granicą plastyczności wynoszącą ok. 400 MPa oraz wytrzymałością na rozciąganie na poziomie ok. 500 MPa. Zbiornik służył do odseparowywania wody oraz drobnych zanieczyszczeń od surowej ropy naftowej. Zgodnie z dokumentacją techniczną ciśnienie robocze zbiornika wynosiło 0,25 MPa, a ciśnienie projektowe – 0,5 MPa.

Badania wizualne wykazały, że materiał płaszcza zbiornika

zawiera liczne uszkodzenia w postaci wżerów korozyjnych o różnej głębokości. Krytyczne uszkodzenia, zlokalizowane w górnej część płaszcza, na skutek zaawansowanej degradacji korozyjnej, spowodowały powstanie wżerów o średnicach ok. 2 ÷ 5 mm. Szczegółowe pomiary grubości ścianki płaszcza metodą ultradźwiękową (UT) wykazały średnią grubość ok. 5,5 mm, co jest wartością o ok. 31% mniejszą od grubości nominalnej, podanej w dokumentacji technicznej. Warto zaznaczyć, że w niektórych strefach płaszcza, a mianowicie w górnej jego części i w strefie króćca wylotowego, grubość blach wahała się w zakresie 2 ÷ 3 mm. Wymienione wyżej strefy płaszcza zostały poddane szczegółowym badaniom UT z wykorzystaniem techniki Phased Array. Wykryte uszkodzenia zidentyfikowano oraz oznaczono, a niektóre z nich wraz z mapami rozkładu grubości ścianki blach przedstawiono na rysunku 1. Szczegółowa analiza dokumentacji technicznej oraz wyników badań UT wykazała, że istotne pocienienie ścianki płaszcza oraz dennic (nawet do 2,5 mm) ma miejsce powyżej wewnętrznej grodzi technologicznej oraz w strefie króćca wylotowego.



Rys. 1. Widok uszkodzeń korozyjnych (a, b) oraz mapy rozkładu grubości blachy (c, d) dla dennicy (a, c) oraz blachy płaszcza zbiornika w strefie króćca wylotowego (b, d).

Fig. 1. The views (a, b) and wall thickness maps (c, d) of areas with corrosion damages located on cylinder head (a, c) and cylinder part of vessel (b, d).

Materiał płaszcza, zawierający krytyczne uszkodzenia korozyjne, został wycięty, a w jego miejsce doczołowo wspawano odpowiednio wyprofilowany arkusz blachy o grubości

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS



Rys. 2. Mikrostruktury materiału blach zbiornika oznaczonych: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) i VI (f): a, b, c, $-400\times$; d, e, $f-200\times$. **Fig. 2.** Microstructures of the shell's plates designated: I (a), II (b), III (c), IV (d), V (e) and VI (f): a, b, c – magnification 400×; d, e, f – magnification 200×.

3 mm, wykonany z materiału o składzie chemicznym zbliżonym do materiału blach płaszcza. Wszystkie spoiny zostały obrobione termicznie w celu wyeliminowania spawalniczych naprężeń resztkowych.

2.1 Badania materiałowe

W celu oceny stanu materiału elementów konstrukcji zbiornika przeprowadzono szereg badań materiałowych z wykorzystaniem technik przenośnych. Obserwacje mikroskopowe zgładów metalograficznych wykonanych na każdej blasze płaszcza z wykorzystaniem PMS (6 zgładów oznaczonych I ÷ VII), wykazały ferrytyczno-perlityczną strukturę bez wyraźnych cech struktury wtórnej (rys. 2). Zgodnie z dokumentacją techniczną, wszystkie blachy użyte w konstrukcji zbiornika zostały poddane obróbce cieplnej w postaci wyżarzania normalizacyjnego. Natomiast badania metalograficzne wykazały, że materiały dennic oraz jednej z blach płaszcza (oznaczonej IV zgodnie z rys. 6) charakteryzują się mikrostrukturą o wyraźnych cechach przegrzania: gruboziarnistość oraz ukierunkowany kształt kolonii perlitu. Materiał jednej z dennic cechuje się strukturą Widmanstattena. Te zmiany morfologii mikrostruktury powstały na skutek jej przegrzania w zakresie temperatur Ar3 i Ar1s i nie mogły być spowodowane eksploatacją urządzenia. Na tej podstawie można wnioskować, iż zmiany w strukturze materiału prawdopodobnie pochodzą z okresu produkcji i są skutkiem braku odpowiedniej obróbki cieplnej (normalizacji) po walcowaniu na gorąco. Stal o takiej strukturze ma tendencję do kruchego pękania, obniżoną udarność i obniżone własności mechaniczne przy rozciąganiu.

2.2 Analiza MES pola naprężeń

W celu określenia pola naprężeń, występującego w elementach konstrukcji badanego zbiornika pod wpływem ciśnienia wewnętrznego, opracowano trójwymiarowy model obliczeniowy uwzgledniający pocienienia ścianek blach płaszcza oraz dennic. Warunki brzegowe dotyczące konstrukcji oraz parametrów pracy urządzenia przyjęto zgodnie z dokumentacją techniczną. Lokalne pocienienia ścianek płaszcza i dennic, zlokalizowane w górnej części urządzenia, a także uszkodzenie w strefie króćca wylotowego zamodelowano według danych otrzymanych podczas badań UT. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ABAQUS. Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PLGrid. Przykładowe wyniki obliczeń MES przedstawiono na rys. 3.

W wyniku przeprowadzonych analiz MES stwierdzono, iż największa koncentracja naprężeń zredukowanych powstaje w strefie uszkodzenia korozyjnego w miejscach łączenia dennic z częścią walcową zbiornika. Do lokalnego uplastycznienia materiału dochodzi po przekroczeniu ciśnienia ok. 0,9 MPa.



Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych wg. Hubera-Misesa w płaszczu zbiornika, powstałych na skutek oddziaływania ciśnienia wewnętrznego na poziomie 0,9 MPa.

Fig. 3. Huber-Mises stress distribution in the shell under 0,9 MPa pressure.

3. Próby ciśnieniowe z rejestracją AE

W celu opracowania podstaw metodyki diagnostycznej, skierowanej na detekcję i ocenę rozwoju procesów destrukcyjnych z uwzględnieniem stanu mikrostruktury materiału urządzeń ciśnieniowych, zrealizowano na zbiorniku szereg badań z rejestracją sygnałów AE. Początkowo, po napełnieniu zbiornika wodą, przeprowadzono testy propagacji fal AE generowanych sztucznymi źródłem AE, m.in. źródłem Hsu-Nielsen zgodnie z normą PN-EN 13554:2011 [15]. Testy te miały na celu określenie prędkości propagacji fal AE, optymalizację rozmieszczenia czujników AE, jak również sprawdzenie dokładności lokalizacji źródeł. Następnie wykonano próby hydrauliczne z rejestracją sygnałów AE, podczas których stopniowo podnoszono ciśnienie z wytrzymaniem ok. 10 min na poszczególnych etapach obciążenia. Do rejestracji sygnałów AE wykorzystano czujniki o częstotliwości rezonansowej 150 kHz z przedwzmacniaczami (wzmocnienie 34 dB) oraz system pomiarowy AMSY-6 firmy Vallen.

Na rysunku 4 pokazano rozkład w czasie maksymalnych amplitud sygnałów AE oraz parametru Historic Index (HI), jak również strefowy wykres zależności parametrów Severity - Historic Index (kryteria MONPAC [11]). Pierwsze sygnały generowane przez krytyczne źródła AE (strefa E na wykresie Severity– Historic Index zgonie z klasyfikacją MONPAC) zostały zarejestrowane po przekroczeniu ciśnienia 0,5 MPa. W tym momencie odnotowano gwałtowny wzrost parametru HI. Ze zwiększeniem obciążenia wzrastała ilość zarejestrowanych sygnałów AE, aż do momentu, kiedy po przekroczeniu ciśnienia ok. 0,9 MPa zlokalizowano dużą ilość krytycznych źródeł AE, a system pomiarowy zaczął rejestrować emisję ciągłą. Po przekroczeniu danej wartości ciśnienia doszło do plastycznego odkształcenia dużych objętości materiału, zwłaszcza w strefach połączenia dennic z częścią walcową zbiornika na co wskazują również wyniki analiz MES (rys. 3).



Rys. 4. Rozkład w czasie maksymalnych amplitud (a), parametru Historic Index (b) oraz wykres Severity – Historic Index (c) sygnałów AE, zlokalizowanych w trakcie prób obciążeniowych.

Fig. 4. Signals' amplitude (a) and Historic Index parameter (b) distributions as well as zonal intensity plot Severity – Historic Index (c).

Do rozszczelnienia zbiornika doszło w strefie uszkodzenia zlokalizowanego w pobliżu króćca wylotowego. Do momentu przekroczenia ciśnienia ok. 0,8 MPa na płaszczu zbiornika zostały zlokalizowane dwa krytyczne źródła AE oznaczone Z1 i Z2 (patrz rys. 5). Źródło Z1 zlokalizowano w miejscu połączenia króćca wylotowego z blachą płaszcza zbiornika, natomiast źródło Z2 pochodzi ze strefy podłużnego złącza spawanego, łączącego blachę płaszcza ze wspawaną łatą. Większość sygnałów AE, generowanych przez źródło Z1, zgodnie z kryteriami MONPAC, sklasyfikowano do grupy E – krytyczne uszkodzenie wymagające natychmiastowego zatrzymania eksploatacji urządzenia oraz przeprowadzenia szczegółowych badań innymi metodami NDT.

Po zakończeniu prób ciśnieniowych z rejestracją AE przeprowadzono rewizję wewnętrzną zbiornika oraz wycięto fragmenty blach płaszcza, w których zlokalizowano źródła AE oznaczone Z1 i Z2. Na rysunku 6 a pokazano wycinek pobrany w strefie króćca wylotowego, który został przecięty wzdłuż osi zbiornika dokładnie w miejscu zlokalizowania źródła Z1. Obserwacje makroskopowe oraz mikroskopowe zgładu, wykonanego techniką przenośną, wykazały pęknięcie o długości ok. 0,8 mm. Wykryte uszkodzenie propagowało w strefie wpływu ciepła złącza spawanego, łączącego rurę króćca wylotowego z blachą płaszcza. Z morfologii pęknięcia, pokazanej na rysunku 6 b, wynika, że propagowało ono w trzech etapach, zaczynając od obciążenia 0,5 MPa.



Rys. 5. Lokalizacja sygnałów AE (pokazana na płaszczu w rozwinięciu) zarejestrowanych w trakcie stopniowego obciążenia zbiornika ciśnieniem w zakresie 0,1 ÷ 0,8 MPa (1 ÷ 11 – czujniki AE, I ÷ VI – oznaczenie blach płaszcza zbiornika).

Fig. 5. The location of AE signals generated under pressure 0,1 \div 0,8 MPa (1 \div 11 – sensors, I \div VI – number of shell's plates).



Rys. 6. Widok wycinka płaszcza zbiornika (a) oraz mikrofotografia pęknięcia zlokalizowanego metodą AE (b).

Fig. 6. View of the tank's shell section (a) and the microphotograph of the crack (b) which was located by the AE method.

4. Wnioski

Urządzenia ciśnieniowe z lat 60-70-tych, eksploatowane w przemyśle petrochemicznym i rafineryjnym, często zawierają w materiale płaszczy ukryte wady technologiczne oraz zmiany mikrostruktury, powstałe na skutek odstępstw od technologii wytwarzania. Potwierdziły ten fakt również badania materiałowe przeprowadzone na zbiorniku ciśnieniowym, będącym obiektem prac objętych niniejszym artykułem. Materiały niektórych blach płaszcza urządzenia charakteryzowały się gruboziarnistą mikrostrukturą o wyraźnych cechach przegrzania. Stal o takiej strukturze ma tendencję do kruchego pękania, obniżoną udarność i własności mechaniczne przy rozciąganiu.

Ważnym aspektem w praktykach diagnostycznych obiektów przemysłowych, poddanych długotrwałej eksploatacji, jest uzupełnienie badań NDT o dane analiz numerycznych MES w celu określenia pola naprężeń i odkształceń powstających w elementach konstrukcji na skutek oddziaływania obciążeń roboczych. Obliczenia MES, wykonane w ramach niniejszych prac wykazały, że zmiany geometrii konstrukcji urządzenia, wejścia i wyjścia instalacji, a także lokalne uszkodzenia korozyjne materiału powodują pojawienie się w płaszczu urządzenia ciśnieniowego znacznych koncentracji naprężeń. W strefach tych często dochodzi do uplastycznienia oraz rozwoju uszkodzeń już pod wpływem obciążeń roboczych.

Próby hydrauliczne z rejestracją AE zbiornika ciśnieniowego, zawierającego liczne uszkodzenia korozyjne, powstałe na skutek ponad 40-letniej eksploatacji w instalacji destylacji ropy naftowej, umożliwiły weryfikację skuteczności oraz czułości metody AE, jak również pozwoliły na rozwój znanych technik badania tego typu konstrukcji z wykorzystaniem metody AE. W wyniku przeprowadzonych prób wykryto oraz zlokalizowano proces zarodkowania oraz rozwoju krytycznego źródła AE. W wyniku późniejszych badań niszczących ujawniono w strefie zlokalizowanego źródła AE pęknięcie o długości ok. 0,8 mm.

Przedstawione wyniki badań pozwoliły na opracowanie oraz weryfikację podstaw nowej metodyki badań nieniszczących obiektów po wieloletniej eksploatacji opartej na połączeniu stosowanych w rzeczywistym stanie eksploatacji symulacji numerycznych pola naprężeń konstrukcji urządzenia, oceny stanu materiału oraz szczegółowej analizy parametrów sygnałów emisji akustycznej, generowanych w wyniku rozwoju procesów degradacyjnych. Optymalne połączenie tych analiz oraz znalezienie wzajemnych korelacji pozwoli na skuteczne rozwiązywanie aktualnych problemów diagnostyki instalacji chemicznych związanych z oceną ich stanu technicznego i określeniem warunków dalszej eksploatacji, w szczególności tych urządzeń, gdzie na skutek długotrwałej pracy występują niekrytyczne uszkodzenia.

5. Literatura

- Kelly M. P., Harris D. O., Pollock A. A. "Detection and location of flaw growth in metallic and composite structures" Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, Special Technical Publication 571, American Society for Testing and Materials, 1975.
- [2] Harris D. O. Dunegan H. L. Acoustic Emission 5 Application of Acoustic Emission to Industrial Problems, NDT, June 1974.
- [3] Dunegan H. L. "Acoustic Emission Testing of 12-nickel managing steel pressure vessels" Second International Conference on Pressure Vessel Technology, Part 11, Materials Fabrication and Inspection, American Society of Mechanical Engineers.
- [4] Fowler T. J. "Experience with acoustic emission monitoring of chemical process industry vessels" Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDT, 1986.
- [5] Rauscher F. Defekt "Detection by Acoustic Emission Examination of Metallic Pressure Vessels" Jornal of Acoustic Emission, vol. 22, 2004.
- [6] Anastasopoulos A. A., Kourousis D. A., Cole P. T. "Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels" The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008) – Tehran, Iran – October 2008.
- [7] Nowak M., Baran I., Wierzchowski M., Kisielewski S. wykorzystanie emisji akustycznej przy ocenie uszkodzeń urządzeń ciśnieniowych ujawnianych innymi metodami NDT, 35 KKBN Szczyrk 2006.
- [8] PN-EN 14584:2013-07 "Badania nieniszczące Emisja akustyczna – Sprawdzanie metalowych urządzeń ciśnieniowych podczas próby odbiorczej – Planarna lokalizacja źródeł AE".
- [9] Article 12 ASME:2010 "Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing".
- [10] ASTM E1139 / E1139M 12 "Standard practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries".
- [11] Fowler T. J., Blessing J. A., Conlisk P. J., Swanson T.L. "The MONPAC System" Journal of Acoustic Emission, vol. 8, pp 1-7, 1989.
- [12] Płowiec J., Szlagowska J., Lusa T., Paradowski K., Wojas G., Zagórski A., Spychalski W. L., Kurzydłowski K. J. "Wykorzystanie badań nieniszczących do wykrywania rozwarstwień powstających w instalacjach rafineryjno-petrochemicznych" Corrosion Today, Sobieszewo, 2008.
- [13] Paradowski K., Lusa T., Manaj W., Płowiec J., Spychalski W. L., Zagórski A., Ciesielski M., Kurzydłowski K. J. "Badania nieniszczące w ocenie degradacji stali 13CrMo4-5 pracującej w warunkach agresywnego środowiska wodorowego" XIII Seminarium Szkoleniowe nt. Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2007.
- [14] Nowak M., Lyasota I., Gawlik j., Hebda M. "Wykorzystanie metody emisji akustycznej w badaniach węzła stalowego mostu kolejowego, Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w transporcie szynowym", no. 3, pp 357–363, 2015.
- [15] PN-EN 13554:2011 Badania nieniszczące Emisja akustyczna – Zasady ogólne.



BIURO TECHNICZNO - HANDLOWE TESTIN Spółka z o.o. **PRZEDSTAWICIELSTWO FIRM:** Krautkramer EIFERT a GE company K+D SERVO-ROBOT Flux-Technic **Elektro**Physik Distant **NewSonic** wilnos AMPLECTOR JW/FROEHLICH KULZER 🛞 winter Drocea

Oferujemy:

ww.tuv.o

91050595

TÜVRheinland®

FR

ISO 9001

urządzenia i środki do badań nieniszczących metodami:

ultradźwiekowa radiograficzną magnetyczno-proszkową

- prądów wirowych
 - penetracyjną
- wizualną

oraz aparaturę do pomiarów: twardości, grubości powłok i szczelności. W kompleksowy sposób wyposażamy laboratoria w sprzęt i materiały eksploatacyjne do badań metalograficznych. Biuro nasze prowadzi poradnictwo, sprzedaż oraz autoryzowany serwis w zakresie produktów w/w firm.

Firma nagrodzona za działalność w dziedzinie badań nieniszczących

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









Mateusz Szymków*, Krzysztof Schabowicz, Tomasz Gorzelańczyk Politechnika Wrocławska

Nieniszcząca ocena wpływu wysokiej temperatury na destrukcję struktury płyty włóknisto-cementowej

Non-destructive assessment of the effect of high temperature on the destruction of the structure of the fiber-cement board

ABSTRACT

The paper presents the influence of high temperature to the destruction of the structure of fiber-cement board. It was shown on the results obtained for the boards that were in a tunnel furnace during the failure. Fiber cement boards were tested on the plate in a tunnel furnace during a failure and plate dried in normal conditions. During the research a non-destructive method of acoustic emission in combination with artificial neural networks were used. Results allowed to observe visible changes in the structure of the tested panels under the influence of high temperature.

Keywords: fiber cement boards; high temperature; acoustic emission; nondestructive methods; artificial neural networks

1. Wstęp

Technologia produkcji płyt włóknisto-cementowych została opracowana przez czeskiego wynalazcę Hatscheka. Pierwsze wyprodukowane płyty otrzymały nazwę "Eternit" [1]. Włókno-cement od tamtego czasu był wielokrotnie modyfikowany, a jego skład istotnie zmieniany. W latach 90 usunięto z jego składu azbest, zastępując go włóknami celulozowymi [2-4]. Dziś w jego składzie można znaleźć włókna pochodzące z recyklingu, co wpisuje się w zasady zrównoważonego rozwoju i czyni go produktem innowacyjnym stosowanym w budownictwie głównie jako: okładzina zewnętrzna elewacyjna w systemie elewacji wentylowanych, a także okładziny wewnętrzne [5, 6]. Jak wiele wyrobów budowlanych tak i płyty włóknisto-cementowe narażone są na powstawanie wad i uszkodzeń na etapie produkcji. Proces produkcji płyt włóknisto-cementowych składa się z wielu etapów, opisanych dokładnie w pracy [6]. W końcowej fazie produkcji następuje suszenie płyt w piecu tunelowym i polega to na przemieszczeniu płyt na rolkach transportowych w czasie około 10 minut w temperaturze od 160°C do 180°C. Sytuacja komplikuje się, kiedy piec tunelowy ulega awarii, np. z powodu uszkodzenia sterowania pieca i napędu urządzenia transportującego płyty. Z taką sytuacją spotkali się autorzy pracy. Awaria pieca spowodowała, że płyty włóknisto-cementowe pozostały w jego wnętrzu przez okres dłuższy niż przewidywała to technologia suszenia. Temperatura w piecu

STRESZCZENIE

W pracy pokazano, jaki wpływ ma wysoka temperatura na destrukcję struktury płyty włóknisto-cementowej. Przedstawiono to na podstawie badań uzyskanych dla płyt, które przebywały w piecu tunelowym podczas jego awarii. Badane były płyty włóknisto-cementowe przebywające w piecu tunelowym podczas awarii oraz płyta wysuszona w prawidłowych warunkach. Do badań zastosowano nieniszczącą metodę emisji akustycznej w połączeniu ze sztucznymi sieciami neuronowymi. Rezultaty badań pozwoliły zaobserwować widoczne zmiany zachodzące w strukturze badanych płyt pod wpływem działania wysokiej temperatury.

Słowa kluczowe: płyty włóknisto-cementowe; wysoka temperatura; emisja akustyczna; metody nieniszczące; sztuczne sieci neuronowe

była wysoka i mogła osiągnąć ponad 200°C, wpływając destrukcyjnie na strukturę płyt włóknisto-cementowych, co postanowiono sprawdzić przy wykorzystaniu nieniszczących metod badawczych.

2. Opis badań

Badaniom poddano płytę, która przebywała w piecu tunelowym podczas awarii (oznaczona jako "płyta U") i dla porównania płytę referencyjną tego samego typu, z tej samej serii produkcyjnej, która została wysuszona w prawidłowych warunkach (oznaczona jako "płyta D"). Z każdej płyty wycięto do badań po 5 próbek o wymiarach 20 mm × 100 mm. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem nieniszczącej metody emisji akustycznej podczas trójpunktowego zginania. Dla badanych płyt określano także wartości wytrzymałości na zginanie MOR według zależności podanej w normie [4]. W trakcie badania rejestrowanymi deskryptorami EA w funkcji czasu były tempo zdarzeń N_{zd} i suma zdarzeń ΣN_{zd} oraz charakterystyki widm akustycznych zarejestrowanych zdarzeń EA. Następnie w celu wykazania zmian zachodzących w strukturze płyt pod wpływem wysokiej temperatury, posłużono się sztucznymi sieciami neuronowymi jednokierunkowymi, wielowarstwowymi ze wsteczną propagacją błędu.

3. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 1 przedstawiono rezultaty otrzymane podczas trójpunktowego zginania i rejestracji sygnałów z wykorzystaniem metody emisji akustycznej dla badanych płyt.

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: mat.szymkow@gmail.com

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.040

Tab. 1. Zestawienie uśrednionej wartości wytrzymałości na zginanie MOR oraz przykładowej sumy zdarzeń ΣN_{zd} .

Tab. 1. Comparison of the average value of bending strength of the MOR and an exemplary sum of events ΣN_{rd} .

Oznaczenie płyty	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]	Suma zdarzeń $\Sigma N_{ m zd}$ [-]
U	20,24	512
D	21,49	701

Na podstawie analizy wyników zestawionych w tabeli 1, należy zauważyć, że różnica w wartościach wytrzymałości na zginanie MOR pomiędzy płytami wynosi tylko 5%, i można przyjąć, że zawiera się w granicach błędu pomiarów. Otrzymana niewielka zmiana wytrzymałości na zginanie MOR nie pozwala więc wnioskować, że podczas awarii pieca nastąpiły destrukcyjne zmiany w strukturze płyty U. Przeprowadzono zatem dodatkową analizę zarejestrowanych zdarzeń EA z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Ostatecznym etapem analizy sygnałów EA było rozpoznanie zarejestrowanych zdarzeń i przypisanie ich do sygnałów towarzyszących pękaniu włókien oraz matrycy cementowej. Na rysunku 1 przedstawiono zapis tempa zdarzeń N_{rd} i naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu odpowiednio dla płyty U oraz płyty D wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych.



Rys. 1. Zależność tempa zdarzeń Nzd i naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych: a) dla płyty U, b) dla płyty D. **Fig. 1.** Correlation of the rate of events Nzd and bending stresses σ_m in the time function with the identification of the standard spectral characteristics: a) for the board U, b) for the board D.

W tabeli 2 przedstawiono przykładowe rezultaty rozpoznanych zdarzeń dla płyty U i D po procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej. Na podstawie analizy rysunku 1 oraz rezultatów zawartych w tabeli 2 widać, że dla płyty U podczas próby trójpunktowego zginania zarejestrowano znacznie mniejszą liczbę zdarzeń towarzyszących pękaniu włókien o około 30%, w porównaniu z płytą D. Biorąc powyższe pod uwagę, można z pewnością stwierdzić, że wskutek awarii pieca tunelowego i tym samym działania wysokiej temperatury, struktura płyty włóknisto-cementowej uległa widocznej destrukcji, tj. część włókien została "wypalona".

Tab. 2. Zestawienie rezultatów rozpoznanych zdarzeń dla płyty U i D po procesie uczenia sieci neuronowej.

Tab. 2. List of the results of the id	dentified event	s for the U) and
D board after the process of teaching	ng the artificial	neural net	work.
	-		

Sumo zdorzoń	Oznaczenie płyty				
Sulla zdarzen	U	D			
Wszystkie zarejestrowane ΣN_{zd}	511	698			
Rozpoznane $\Sigma N_{zd,r}$	489	663			
Przypisane do pękania włókien $\Sigma N_{zd,wl}$	416	642			
Przypisanych do pękania matrycy $\Sigma N_{zd,m}$	87	39			

4. Podsumowanie

W pracy zamieszczono rezultaty badań wpływu niekontrolowanej wysokiej temperatury na destrukcję struktury płyty włóknisto-cementowej w wyniku awarii pieca tunelowego. Badaniom poddano dwie płyty włóknisto-cementowe. Jedną stanowiła płyta przebywająca w piecu tunelowym podczas awarii, a drugą stanowiła płyta wysuszona w prawidłowych warunkach. W badaniach użyto nieniszczącej metody emisji akustycznej ze współudziałem sztucznych sieci neuronowych. Rezultaty, które uzyskano, pozwoliły zaobserwować widoczne zmiany zachodzące w strukturze badanych płyt pod wpływem działania wysokiej temperatury. Pozwoliło to sformułować wniosek istotny z punktu widzenia praktyki budowlanej, że ocenianie płyt włóknisto-cementowych tylko na podstawie wytrzymałości na zginanie MOR jest niewystarczające i może doprowadzić do sytuacji, w której uszkodzone w czasie produkcji płyty włóknisto-cementowe zostaną wykorzystane do wykonania elewacji budynków.

5. Literatura

- [1] Informacje ze strony internetowej: http://www.equitone.com
- [2] Informacje ze strony internetowej: http://www.cembrit.com
- [3] Informacje ze strony internetowej https://de.wikipedia.org/ wiki/Ludwig_Hatschek
- [4] PN-EN 12467+A1:2016-08. Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [5] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków "Elewacje wentylowane" Architektura Murator, nr 6, dod. "Warsztat Architekta" nr 3, 36-53, 2017.
- [6] Z. Ranachowski, K. Schabowicz, "The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards" Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.

Marek K. Lipnicki*, Krzysztof Mroczek, Rafał Obłąkowski Koli Sp. z o.o., Banino k/Gdańska

Badania ultradźwiękowe PA osiowych wrębów wału i stopek łopatek stopni L-0 wirników NP turbin parowych dużej mocy – B+R i walidacja

PAUT Inspection of axial steeple grooves and blade roots at LP steam turbine high power rotors – R&D and validation

ABSTRACT

Based on long-standing own experiences authors present main assumptions and achievements in ultrasonic Phased Array technique R&D program for low pressure (LP) turbine rotor steeple grooves and blade roots inspection. Less or more complex systems applying this technique are available on the market but only few of them offer required detection level of defects essential for safe exploitation. Advanced ultrasonic PA flaw detector could not assure successful diagnostic without dedicated accessories (probes and wedges, scanner, encoder, reference blocks, software for beam steering and results analyzing) and comprehensive approach (knowledge of object geometry, defects nature and location). Authors present discontinuities revealed within blade roots in situ (closed rotor) and validation with methods ACFM, MT and next metallography applied by Koli Sp. z o.o. engineers in close cooperation with GE Power Sp. z o.o. and PGE GiEK Bełchatów.

Keywords: firtree axial steeple grooves of turbine rotor shaft; blade roots; ultrasonic Phased Array technique; inspection in situ at closed rotor

1. Wstęp

Gałęzią przemysłu, która w znacznym stopniu przyczyniła się do rozwoju ultradźwiękowej techniki Phased Array była energetyka (jądrowa i konwencjonalna, przemysłowa) [5, 7]. Stąd płynęło zainteresowanie badaniami remontowymi i między-remontowymi najbardziej newralgicznych węzłów wirników turbin energetycznych, to jest połączenia "wrąb wału – stopka łopatki" bez demontażu badanych elementów. Dotyczy to zwłaszcza łopatek i wrębów ostatnich stopni wirników niskoprężnych z tzw. osiowym mocowaniem choinkowym-łukowym [1, 2]. Mocowania te stosowane są we flocie ALSTOM (GE), w turbinach 200MW, 360MW i 850MW, a także w innych maszynach oraz we flocie innych producentów.

Kształt stopek łopatek jest dopasowany do wrębów naciętych osiowo w wale. Podczas montażu stopki łopatek są "wsuwane w choinkowe" wręby, które posiadają odpowiednio kształt łukowy dla ostatnich stopni L-0 i kształt prostyskośny dla stopni przedostatnich L-1 (rys. 1a). Ten sposób mocowania umożliwia przenoszenie większych obciążeń niż

STRESZCZENIE

Bazując na wieloletnich własnych doświadczeniach, autorzy przedstawiają w artykule główne założenia i osiągnięcia programu B+R w zakresie badań wrębów wału i stopek łopat ostatnich stopni wirników niskoprężnych (NP) z zastosowaniem techniki ultradźwiękowej Phased Array. Stosowane w Polsce aplikacje tej techniki są praktycznie nieskuteczne, ponieważ nie zapewniają odpowiedniej wykrywalności uszkodzeń istotnych dla bezpiecznej eksploatacji. Zaawansowany defektoskop PA bez dedykowanego wyposażenia i kompleksowego podejścia nie zapewnia skutecznej diagnostyki osiowych wrębów i stopek łopatek wirników NP turbin energetycznych. Autorzy przedstawiają nieciągłości wykryte w zamkniętej turbinie oraz sposób weryfikacji stosowanej procedury badań. Walidacja była przeprowadzona przez zespół specjalistów z Koli Sp. z o.o. we współpracy z GE Power Sp. z o.o. i PGE GiEK Bełchatów.

Słowa kluczowe: choinkowe wręby łukowe wału wirnika turbiny; stopki lopatek; technika ultradźwiękowa Phased Array; badania w zamkniętej turbinie

w innych rozwiązaniach [1, 2]. Znaczne wytężenie ostatnich stopni oraz specyficzne warunki pracy w ich obszarze powodują, że są one narażone na powstawanie uszkodzeń eksploatacyjnych. Do najgroźniejszych należą pęknięcia. Inicjacja tych wad zachodzi w okolicy zaczepów stopek łopatek i wrębów wału. Znaczne straty ekonomiczne w przypadku ich awarii wymuszają określenie zakresu oraz resursu kontroli dla bezpiecznej eksploatacji (producent turbiny), opracowanie wiarygodnych narzędzi i procedur diagnostycznych (firma NDT) oraz chęć współpracy w zakresie stosowania tych procedur (użytkownik – elektrownia). Tylko taki model współpracy oraz wysoka kultura techniczna partnerów pozwala wykryć "na czas" krytyczne uszkodzenia.

Zgodnie z zaleceniami producenta [3] kompleksowe badania diagnostyczne (przegląd "C") łopatek i wrębów stopni L-0 i L-1 powinny być wykonane nie później niż po 50 tys. ekwiwalentnych godzin pracy (50 kEOH) od pierwszego uruchomienia lub ostatnich kompleksowych badań. Podczas tych badań łopatki stopni L-0 i L-1 są demontowane w celu dostępu do powierzchni wrębów i stopek. W połowie tego resursu (po 25 keOH) producent zaleca kontrolę stopni L-0 w stanie załopatkowanym (przegląd typu B).

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

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.041



Rys. 1. Osiowe wręby choinkowe ostatnich stopni wirnika NP: a) wręby proste (L-1) – po lewej, wręby łukowe (L-0) – po prawej; b) numeracja zaczepów wrębów.

Fig. 1. Axial fir-tree steeple grooves – two last stages of LP turbine rotor: a) straight grooves (L-1) – left, curved grooves (L-0) – right; b) numbering of groove roots.

Badania techniką PAUT są bardzo przydatne podczas inspekcji stopni L-0 w stanie zmontowanym, zwłaszcza realizowanych wewnątrz układu przepływowego (przegląd typu B).

Podczas badań wewnątrz turbiny nie ma dostępu do stopnia L-1, a do L-0 jest utrudniony oraz ograniczony. W tych warunkach możliwe są bezpośrednie badania VT i MT od strony wylotu na piórach łopatek, czołowych powierzchniach wrębów i stopek L-0. Po stronie wlotowej możliwe są pośrednie badania VT (kamera lub endoskop). Kontrolę wrębów i stopek łopatek bez demontażu, przy dobrej wiarygodności i pewności wyniku, umożliwia tylko technika PA pod warunkiem, że zachowane są zasady [7, 8, 9, 10, 11]. Dotyczy to badań wewnątrz układu przepływowego turbiny oraz także badań ostatnich stopni na "odkrytym" wirniku.

2. Historia prób i badań

Diagnostyczne badania wrębów i stopek łopat wylotów ND37 i ND41 wirników NP energetycznych turbin parowych realizowane są w Polsce od 2006 roku przez Koli Sp. z o.o.. Te początkowe badania były realizowane głównie na wrębach wału dla Alstom Power podczas przeglądów gwarancyjnych i/lub remontowych na rozłopatkowanych stopniach L-0 i L-1 wymontowanych wirników NP ustawianych na kozłach z rolkami [4, 6, 7, 8, 9].

W latach 2007÷2011 podjęto próby badań wrębów choinkowych bez demontażu łopatek [7, 8]. Od roku 2012 prace badawcze były realizowane w ramach umowy o współpracy pomiędzy Koli Sp. z o.o. i Alstom Power Sp. z o.o.. Miały one na celu między innymi opracowanie metodyki i zaawansowanego systemu badań stopni L-0 wirników NP bez demontażu (tzn. badań wizualnych - VT, powierzchniowych badań magnetyczno-proszkowych - MT oraz objętościowych badań ultradźwiękowych głowicami fazowymi PA obszarów niedostępnych dla innych badań). W roku 2016/2017 projekt spółki Koli został zakwalifikowany w konkursie na dofinansowanie prac badawczo-rozwojowych z funduszy UE w Agencji Rozwoju Pomorza.



Rys. 2. Warunki pracy podczas badań w zamkniętej turbinie: a) okno w stożku osłaniającym wał wirnika, łopatki stopnia L-0, podesty robocze po obu stronach wału; b) operator z komputerem sterującym jednostką centralną PAUT i procesem skanowania wewnątrz układu przepływowego części NP.

Fig. 2. Work conditions during Inspection in closed turbine: a) cut-out window in the rotor shaft protecting cone, L-0 stage blades, work platforms on both sides of the shaft; b) operator inside LP turbine flow system with a laptop controlling PAUT instrument and scanning process.

Badanie wrębów choinkowych wewnątrz układu przepływowego części NP.

Pierwszy etap prac był skoncentrowany na badaniach wrębów (rys. 1, 2 i 3).

W latach 2007÷2012 po cyklu opracowań i prób w symulowanych warunkach w laboratorium Koli powstały dwa różne, w pełni zmechanizowane prototypy dedykowanych skanerów, które zostały opatentowane [12]. Prototypy opracowane zostały z systemem dociskania, precyzyjnego prowadzenia i napędu dedykowanej głowicy mozaikowej PA oraz podawania ośrodka sprzęgającego pod głowicę. Próby i badania wykonano na fragmencie wrębu zaprojektowanym w Koli jako próbka odniesienia z imitacjami pęknięć w celu oceny możliwości systemu.

Następnie w latach 2010-2018 skanery te podlegały próbom, modernizacjom i adaptacji do różnych wylotów i ich wersji [9, 10, 11]. W roku 2017/2019 nasz projekt B+R miał korzystać z dofinansowania z UE (Regionalny Fundusz Rozwoju) w celu dopracowania patentów.

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics



Rys. 3. Skaner PAUT do wrębów podczas badań stopnia L-0 – widok skanera w miejscu badania (montowany od strony wylotu pary).

Fig. 3. PAUT rotor groove scanner during L-0 stage inspection (mounted on the steam exhaust side).

Efekty kolejnych modernizacji są weryfikowane podczas badań wirników NP. Dotychczasowe próby laboratoryjne i badania w warunkach rzeczywistych potwierdziły, że opracowany system badania ostatnich stopni dedykowanym skanerem PAUT (rys. 3) jest skuteczny.

3. Badania choinkowych stopek łopatek stopnia L-0

Drugi etap prac wykorzystywał doświadczenia zdobyte podczas badań wrębów wału i obejmował badania stopek łopat stopni L-0 (ND37 i 41) zamontowanych we wrębach. Weryfikacja wcześniejszych ustaleń i prób przeprowadzona została na próbce odniesienia wykonanej z łopatki wycofanej z eksploatacji (L-0, ND41).

Celem prób i badań było opracowanie metodyki badań stopek łopat stopni L-0, które pozostają załopatkowane we wrębach wału wirnika NP. Próby i badania tego etapu zmierzały do:

- analizy węzła wrąb-stopka i wyznaczenia miejsc krytycznych;
- wykonania próbki odniesienia ze stopki łopatki L-0 wycofanej z eksploatacji;
- doboru odpowiednich głowic PA i optymalnych obszarów skanowania wraz z parametrami ustawień dla poszczególnych obszarów (tzw. setupów zestawu aparatur-głowica);
- opracowania i zasymulowania efektywnego systemu skanowania oraz sprawdzenia zdolności wykrywania wskazań liniowych zlokalizowanych w określonych miejscach krytycznych zaczepów z ustaleniem wymaganej czułości badania;
- weryfikacji i ewentualnej modyfikacji przyjętej metodyki postępowania;
- opracowania założeń dla projektu prototypu zmechanizowanego skanera umożliwiającego badanie w rzeczywistych warunkach wewnątrz układu przepływowego części NP.

W wyniku analizy warunków pracy łopatki, kierunków obciążeń, stanów naprężeń, drgań pióra i kształtu mocowania "stopka – wrąb" wytypowano miejsca, w których wykonano nacięcia symulujące wąskoszczelinowe wady eksploatacyjne (pęknięcia zmęczeniowe) imitujące rzeczywiste pęknięcia na zaczepach stopki. Posiadają one szerokość szczeliny ~0,2 mm, głębokości 0 \div 1,0 mm i 0 \div 1,5 mm oraz długości od około 7 mm do 10 mm.

Próbka odniesienia pozwoliła zweryfikować założenia teoretyczne oraz potwierdzić lub rozszerzyć możliwości i ograniczenia wyznaczone podczas pierwszych symulacji i prób badań wewnątrz układu przepływowego turbiny. Ponadto pozwoliła sprawdzić możliwości detekcji wad o różnej lokalizacji, orientacji i rozmiarze przy jednoczesnym wyborze optymalnych położeń głowic PA oraz odpowiednich, zróżnicowanych nastaw systemu.

Podczas badań stopek łopatek liczba obszarów skanowania z 2 dla każdego wrębu wzrosła do 5÷6 dla każdej łopatki, a ponadto trzeba zastosować różne głowice PA i ustawienia aparatury.

Badania realizowano zestawem aparatury (rys. 4 i 5), który spełnia wymagania europejskich oraz innych międzynarodowych standardów [13, 14, 15, 16, 17].



Rys. 4. Główne składniki zestawu aparatury PAUT w systemie badawczym stopek łopat.

Fig. 4. Main parts of steeple blade root PAUT inspection system.



Rys. 5. Badanie stopek łopatek stopnia L-0 techniką PAUT w stanie zamontowanym.

Fig. 5. Steeple blade root PAUT inspection of the L-0 stage (without blades dismantling).

Wyniki uzyskiwane wcześniej podczas prób badań techniką PAUT stopek łopatek w stanie zamontowanym we wrębach - w warunkach rzeczywistych (rys. 2 i 5) musiały być weryfikowane innymi metodami NDT (np. metodą magnetyczno-proszkową – rys.6, 2012r. i/lub metodą ACFM – rys.7, 2018r.) po wymontowaniu łopatek wskazanych po badaniu PAUT.

W 2018 roku stwierdzone zostały pęknięcia zaczepów 3 stopek łopatek w zamkniętej turbinie. Po wymontowaniu łopatek podjęto próby weryfikacji tych pęknięć.

W związku z tym, że łopatki wirnika wykazują właściwości ferromagnetyczne, w celu weryfikacji wyników, otrzymanych po badaniu Phased Array, zdecydowano się na zastosowanie metody magnetyczno-proszkowej.



Rys. 6. Weryfikacja wyniku PAUT stopki łopatki badanej w stanie zamontowanym: a) wskazanie wykryte techniką PA na zainstalowanej łopatce L-0 w 2012r; b) weryfikacja lokalizacji i wymiarów wskazania metodą MT po demontażu.

Fig. 6. PAUT inspection results verification for steeple blade root: a) indication detected using PAUT on the mounted L-0 blade in 2012; b) indication localization and size verification using MPI (after blade dismantling).



Rys. 7. Weryfikacja wyniku PAUT stopki łopatki badanej w stanie zamontowanym: a) wskazanie wykryte PAUT (ok. 80mm/5mm) - 3 łopatki jednego wirnika; b) potwierdzenie wymiarów metodą ACFM - 85mm/5,3mm; c) wygląd pęknięcia po przecięciu stopki łopatki we wskazanym miejscu.

Fig. 7. Verification of the PAUT mounted steeple blade's root inspection results: a) indication detected using PAUT (about 80mm/5mm) – 3 blades from the same rotor; b) confirmation of the results using ACFM method – 85mm/5,3mm; c) crack indication using MPI method on the cut-in-half steeple blade root.

W badaniu wykorzystano certyfikowaną, fluorescencyjną zawiesinę magnetyczną oraz dwa rodzaje magnesowania – przy pomocy ręcznego elektromagnesu jarzmowego oraz prądowego defektoskopu magnetycznego zasilającego specjalną cewkę dedykowaną do badań stopek łopatek. Wbrew oczekiwaniom i maksymalnym nastawom aparatury nie stwierdzono wyraźnych wskazań na powierzchni stopki łopaty, które potwierdzałyby wyniki z defektoskopu PAUT.

Jako drugą metodę weryfikacji wybrano mało rozpowszechnioną na rynku metodę ACFM[®].

Metoda ta jest dedykowana do wykrywania pęknięć zmęczeniowych, wychodzących na powierzchnię i polega na wprowadzaniu do materiału, za pomocą cewki indukcyjnej, pola magnetycznego i rejestracji, przez 2 cewki odbiorcze, zmian w zwrotnym polu magnetycznym. ACFM umożliwia uzyskanie informacji zarówno o długości wskazania, jak i jego głębokości.

Metoda ta potwierdziła wskazania, otrzymane za pomocą techniki Phased Array, na wszystkich trzech łopatach, z dokładnością do części milimetra. Przykładowe wyniki badania ACFM dla najdłuższego wskazania znalezionego na stopce łopaty, przedstawia rys. 7 b).

Wobec takich rezultatów, zdecydowano się dodatkowo przeciąć stopkę łopaty w połowie najdłuższego zarejestrowanego wskazania. Dla tak otrzymanego przekroju przeprowadzono badanie wizualne i następnie ponowne badania magnetyczno-proszkowe. Tym razem metoda MT okazała się skuteczna i potwierdziła wcześniejsze wyniki otrzymane ultradźwiękową techniką Phased Array i metodą ACFM. Rys. 7 c) przedstawia zdjęcie przekroju wraz ze wskazaniem widocznym podczas badań VT (lupa) i badań MT (UV-A).

4. Podsumowanie i wnioski

Doświadczenia badań wrębów wału z lat 2006-2018 i stopek łopatek z lat 2011-2018 na wylotach ND37 i ND41 oraz ND31 pozwalają twierdzić, że badania UT-PA wg opracowanego systemu są skuteczne w warunkach rzeczywistych, w tym również podczas kontroli realizowanych wewnątrz układu przepływowego [9, 10, 11].

Podczas przeprowadzonych prób sprawdzono, ustalono i/ lub potwierdzono:

- dobór odpowiednich głowic PA i optymalnych obszarów skanowania wraz z parametrami ustawień (tzw. setupów "aparat – głowica") dla poszczególnych obszarów skanowania;
- zdolność wykrywania wskazań liniowych zlokalizowanych w wyznaczonych miejscach krytycznych z odpowiednich obszarów skanowania oraz czułość zestawu na pęknięcia;
- przyjętą metodykę postępowania w trakcie prowadzenia badań;
- objętość materiału wrębu i stopki łopatki stopni L-0 niedostępną dla badań PA (rys. 8);
- założenia dla projektu prototypu zmechanizowanego skanera do badań stopek łopatek.

Proces badania spełnia wymagania ogólne i szczegółowe podstawowych norm dotyczących badań, w tym badań ultradźwiękowych [13, 14, 15, 16, 17], wymagania prawne dyrektyw europejskich, jak również najlepszych praktyk GLP (ang. Good Laboratory Practice).

Metodyka badania wrębów i stopek łopat stopni L-0 (metody badań, aparatura, obszary badane, sposób skanowania, kolejność operacji, zdolność wykrywania wskazań eksploatacyjnych, ograniczenia) dla różnych wylotów ND jest taka sama. Różnice wynikają z różnych geometrii danego wylotu (potrzebne są dokładne dane wymiarowo-kształtowe lub próbki referencyjne).

Badania wrębów wymagają dostępu do powierzchni wału stanowiącej wierzchołek wrębu. Konstrukcja mocowania łopat stopni L-0 zapewnia taki dostęp, natomiast dla L-1, gdzie platforma łopatek zasłania wierzchołek wrębu, badania są niemożliwe.



Rys. 8. Wrąb stopnia L-0 – ograniczenia geometryczne dla badania

PA i długości skanowane. Fig. 8. Groove of the L-0 stage – geometrical limits for PA inspection and scanning lengths.

Badanie ultradźwiękowe techniką Phased Array z dedykowaną głowicą PA przy opracowanym systemie skanowania i przyjętej metodyce badania pozwala wykrywać wskazania liniowe o charakterze pęknięć w obszarach możliwych do skanowania i w warunkach panujących w turbinie zamkniętej kadłubem:

- a) dla wrębów wału stopni L-0 o głębokości od ~1,5 mm i długości od ~5 mm w objętości materiału wokół wierzchołków zaczepów (głównie zaczep 4 i 5 – rys. 1b).
- b) dla stopek łopatek stopni L-0 o głębokości od ~1,5 mm i długości od ~7 mm.



Rys. 9. Osiowe wręby choinkowe – skośne (L-1): niemożliwe badanie PAUT na wrębach załopatkowanych z uwagi na brak dostępu do wierzchołka wału.

Fig. 9. Axial fir-tree grooves – straight (L-1): impossible PAUT inspection without blades dismantling – no access to the top of the groove.

W przypadku stopek łopatek stopni L-0 mamy do czynienia ze znacznie większym stopniem skomplikowania dostępu i bardziej złożoną geometrią "powierzchnia skanowania – objętość badana". Proces badania zaczepów stopek łopat okazał się znacznie bardziej skomplikowany niż badanie wrębów. Konieczny jest podział badanych objętości stopki łopatki na określone ściśle sektory różnych "skanowań" i "setupów" dla uzyskania zadowalającej powtarzalności badania oraz pewności jego wyniku.

Trzeba pamiętać, że bardzo złożony kształt badanego obiektu (wrębu wału oraz stopki łopatki ze stopni L-0) stwarza objętości materiału, które są niedostępne dla badania objętościowego lub są dostępne w ograniczonym zakresie – niepewny wynik badania (rys. 8).

Podkreślić należy, że załopatkowane stopnie L-1 charakteryzują się konstrukcją uniemożliwiającą badanie niezależnie od rodzaju wylotu - brak dostępu do wierzchołka wału między wrębami (rys. 9), który jest zasłonięty przez platformy łopatek.

5. Literatura/References

- R. Łączkowski: Drgania elementów turbin cieplnych, WNT, Warszawa 1974
- [2] R. Łączkowski: Drgania łopatek z czołowym jodełkowym zamocowaniem. Energetyka, Nr 12, 1983, pp 463-467
- [3] GMD1 055234 Recommendations for steam turbine inspections
- [4] Koli Sp. z o.o. opracowania własne, prace badawcze i sprawozdania z badań ultradźwiękowych techniką Phased Array z lat 2006÷2018
- [5] M. Lipnicki: "Badania ultradźwiękowe z wykorzystaniem techniki elektronicznego sterowania wiązki fal", XI Seminarium
 Nieniszczące badania materiałów, IPPT PAN, Zakopane, 8-11.03.2005
- [6] M. Lipnicki: "Efficient MPI application to increase safety", Swedish National NDT Conference, Sodertalje, 22-24.04.2007
- [7] M. Lipnicki: "Zaawansowane badania ultradźwiękowe geneza, zalety, ograniczenia i kierunki rozwoju techniki Phased Array (badania wirników turbin energetycznych)", VI Międzynarodowa Konferencja, Łagów-Berlin, 09-12.06.2010
- [8] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, M. Wójcik: "Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek", Seminarium Badań Nieniszczących, IPPT PAN, Zakopane, 03.2011
- [9] M. Lipnicki: "High-Tech NDT diagnostic ultrasonic PA on steam turbine LP rotors", DEKRA, Stockholm, 11.2015
- [10] A. Seniuk, M. Miścicki, M. Lipnicki, K. Mroczek: "Badania osiowych wrębów i stopek łopatek wirników turbin energetycznych", PIRE 2015, Ustroń, 18-20.11.2015
- [11] M. Lipnicki, K. Mroczek: "Badania UT-PA osiowych wrębów wału i stopek łopatek wirników NP turbin energetycznych", DMiUT, Gdańsk, 29-30.06.2017
- [12] Koli Sp. z o.o.: Patent P.391040 "Elastyczna szyna prowadząca wózek, zwłaszcza wózek skanera", 22.04.2010
- [13] EN ISO 9712: Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących. Zasady ogólne.
- [14] EN 583: Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe -- Część 1: Zasady ogólne, Część 2: Nastawianie czułości i zakresu obserwacji, Część 4: Badania nieciągłości prostopadłych do powierzchni.
- [15] ASTM E2491-13: Standard Guide for Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems
- [16] EN ISO 18563-1: Non-destructive testing -- Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment -- Part 1: Instruments
- [17] EN 16392-2: Badania nieniszczące -- Charakteryzacja i weryfikacja ultradźwiękowych wieloelementowych systemów -- Część
 2: Głowice

Dariusz Ulbrich¹*, Daria Stępak¹, Jakub Kowalczyk¹, Zbigniew Strumiński² ¹Politechnika Poznańska ²Volkswagen Września

Ultradźwiękowa ocena przyczepności powłoki szpachlówkowej do blachy karoseryjnej

Ultrasonic inspection of adhesion of car putty coating to steel substrate

ABSTRACT

Adhesive coatings, such as, varnish or car putty coatings are widely used in the construction of modern motor vehicles. Therefore it is important to control their quality at the manufacturing stage, which affects the durability of the connection during its exploitation. The paper presents the results of the tests of adhesion of the car putty coating to steel substrate using the ultrasonic method. As a measure of adhesion a reflection coefficient |r| was used calculated on the base of longitudinal wave propagation in the area of the adhesive joint. The tests were performed for car body sheet car putty coating connection in which the surface preparation of the steel sample was varied. The lowest value of reflection coefficient was obtained for surface grinded manually with 120 abrasive paper, which is recommended by the car putty manufacturer. The highest value of coefficient $|\mathbf{r}|$ was calculated for abrasive paper marked P1000. The results of the measurements shown that it is possible to estimate the adhesion of the adhesive coating to the steel substrate based on ultrasonic measurements and the smaller the value of the module $|\mathbf{r}|$ the greater the mechanical adhesion of the coating to the substrate.

Keywords: ultrasound; coating; adhesion; reflection coefficient

STRESZCZENIE

Powłoki adhezyjne, takie jak np. powłoki lakiernicze czy szpachlówkowe znajdują szerokie zastosowanie w budowie nowoczesnych pojazdów, szczególnie samochodowych. Dlatego istotne jest kontrolowanie ich jakości na etapie nakładania, która wpływa na trwałość połączenia w trakcie jego eksploatacji. W artykule przedstawiono wyniki badań przyczepności powłoki szpachlówkowej do podłoża stalowego z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej. Jako miara przyczepności użyty został moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| fali podłużnej propagującej w obszarze połączenia adhezyjnego. Badania wykonano dla połączenia blacha karoseryjna - powłoka szpachlówkowa, w którym zróżnicowano przygotowanie powierzchni próbki stalowej. Najniższą wartość modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia uzyskano dla powierzchni szlifowanej ręcznie papierem ściernym o gradacji 120, która jest zalecana przez producenta szpachlówki, a najwyższą dla papieru ściernego o oznaczeniu P1000. Wyniki wykonanych pomiarów pokazują, że możliwe jest szacowanie przyczepności powłoki adhezyjnej do podłoża stalowego na podstawie pomiarów ultradźwiękowych, a im mniejsza jest wartość modułu |r|, tym większa jest przyczepność mechaniczna powłoki do podłożą.

Słowa kluczowe: ultradźwięki; powłoka; adhezja; moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia

1. Wstęp

Powłoki adhezyjne są szeroko wykorzystywane w budowie pojazdów samochodowych, szczególnie na etapie ich wytwarzania (powłoki lakiernicze), jak i podczas wykonywania napraw blacharsko – lakierniczych karoserii pojazdów (powłoki szpachlówkowo-lakiernicze).

Badania właściwości powłok adhezyjnych mogą być prowadzone metodami niszczącymi i nieniszczącymi. Badania nieniszczące nie uszkadzają ani powłoki ani powierzchni, na której powłoka się znajduje. Badania niszczące prowadzą do trwałego uszkodzenia, które może dotyczyć: powłoki, powłoki i podłoża lub samego podłoża.

Jedna z właściwości powłoki adhezyjnej jest jej przyczepności do podłoża stalowego. Pod pojęciem przyczepności znajduje się zjawisko adhezji. Adhezja określana jest jako jedno z bazowych zjawisk fizycznych i polega na przyciąganiu się cząsteczek dwóch ciał, których warstwy wierzchnie zostały ze sobą połączone [1]. Innymi słowy, jeśli dwa ciała zostaną ze sobą złączone to występują między nimi siły przyciągania. Przyczepność, szczelność oraz grubość autorzy pracy [2] określają jako trzy podstawowe cechy wpływające na jakość oraz poziom spełniania funkcji powłoki adhezyjnej. Najczęściej stosowaną metodą niszczącą do oceny przyczepności powłok lakierniczych jest metoda rysy. Ze względu jednak na charakter, metody niszczące nie znajdują szerokiego zastosowania w ocenie przyczepności.

Drugą grupę metod oceny przyczepności stanowią metody nieniszczące. Szczególne zastosowanie znalazły takie metody jak radiograficzna, termograficzna i ultradźwiękowa [3-4]. Metoda ultradźwiękowa może bazować na wyznaczeniu nieniszczącej miary przyczepności, jaką jest moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| fali podłużnej, która odbija się od granicy połączenia adhezyjnego [5-9].

Biorąc pod uwagę opublikowane badania w dostępnej literaturze naukowo – technicznej oraz własne doświadczenia autorów niniejszego artykułu, określono cel główny, którym jest oszacowanie rozkładu przyczepności powłoki o adhezyjnym charakterze połączenia z podłożem na podstawie wyznaczonych wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| fali podłużnej propagującej w obszarze połączenia.

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: dariusz.ulbrich@put.poznan.pl

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.042

2. Metoda badawcza

Badania przyczepności powłoki szpachlówkowej do blachy karoseryjnej zostały wykonane według schematu przedstawionego na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat realizacji badań przyczepności powłoki szpachlówkowej do blachy karoseryjnej.

Fig. 1. Scheme of implementation of adhesion tests of the car putty coating to the car body sheet.

Badania wykonano na próbkach stalowych, na których przygotowano trzy obszary. Każdy obszar został oszlifowany ręcznie papierem ściernym (wykorzystano papier o oznaczeniu P120, P400 i P1000). Dzięki takiemu zabiegowi uzyskano różne schropowacenie powierzchni podłoża, co powinno się przełożyć na zróżnicowanie przyczepności powłoki do blachy karoseryjnej. W każdym z obszarów naniesiono 9 miejsc pomiarowych, tak aby uzyskać informacje na temat rozkładu przyczepności w całym obszarze. Na podstawie badań wstępnych oraz wyznaczonego współczynnika zmienności ustalono, że w jednym miejscu pomiarowym należy wykonać 10 pomiarów ultradźwiękowych. Na próbkę wykonaną z blachy karoseryjnej naniesiono warstwę powłoki szpachlówkowej o grubości ok. 5 mm, która została przygotowana i nałożona zgodnie z zaleceniami producenta tego materiału, wykorzystywanego powszechnie w naprawach nadwozi pojazdów samochodowych. Grubość szpachlówki nie wpływa w istotny sposób na wyniki pomiarów ultradźwiękowych, ponieważ ultradźwiękowa fala podłużna wysokiej częstotliwości (20MHz) nie przebije się przez warstwę szpachlówki, lecz odbije się od granicy połączenia powłoka - podłoże, a część energii fali, która wniknie do materiału powłoki zostanie w nim wytłumiona. Przygotowaną próbkę przedstawia Rys. 2.

W badaniach wykorzystano metodę ultradźwiękową, która bazuje na propagacji fali podłużnej o częstotliwości 20 MHz w obszarze połączenia adhezyjnego. Wiązka fali generowana była z głowicy piórowej, która posiada opóźnienie wykonane z tworzywa.

Badania ultradźwiękowe wykonano zarówno przed, jak i po nałożeniu powłoki, a na podstawie zmiany wysokości pierwszego impulsu z dna blachy, w dalszej kolejności, wyznaczono moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| fali podłużnej propagującej w obszarze połączenia adhezyjnego powłoki z podłożem.



Rys. 2. Próbka stalowa z nałożoną powłoką szpachlówkową. **Fig. 2.** Steel sample with car putty coating applied.

Moduł ciśnieniowego współczynnika obicia został wyznaczony na podstawie zależności:

$$|r| = 10^{\frac{-\Delta W}{20}} \tag{1}$$

$$\Delta W = 20 \cdot \log \frac{H_1}{h_1} \tag{2}$$

gdzie: $|\mathbf{r}| - \text{moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia;}$ $\Delta W - \text{spadek wysokości impulsów granicznych w dB;}$ $H_1 - \text{wysokość pierwszego (najwyższego) impulsu podczas pomiaru w pierwszym etapie; <math>h_1 - \text{wysokość pierwszego}$ impulsu (najwyższego) podczas pomiaru w drugim etapie.

Moduł ten przyjmuje wartości z przedziału od 0 do 1. Wartość 0 oznacza najlepszą przyczepności powłoki do podłożą, w warunkach warsztatowych nieosiągalną do wykonania. Wartość 1 jest równa z całkowitym brakiem przyczepności powłoki do podłoża. Z powyższego wynika, iż im mniejsza wartość modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia |r|, tym wartość przyczepności mechanicznej jest wyższa.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki zrealizowanych badań zostały przedstawione graficznie na Rys. 3-6.



Rys. 3. Wyniki rozkładu wartości modułu $|\mathbf{r}|$ dla powierzchni przygotowanej papierem ściernym o oznaczeniu P120. **Fig. 3.** Results of the reflection coefficient $|\mathbf{r}|$ for the surface prepared with abrasive paper P120.

Na podstawie wykonanych badań i wyznaczonych wartości modułu |r| należy stwierdzić, że najlepszą przyczepność, bazując na pomiarach ultradźwiękowych, zapewnia przygotowanie powierzchni papierem ściernym oznaczonym P120. Powierzchnie przygotowane papierem P400 i P1000, na które nałożono szpachlówkę wykazują zbliżoną przyczepność. Porównując wyniki modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia, należy pamiętać, że im niższa jego wartość, tym przyczepność powłoki do podłoża jest lepsza i zapewnia większą trwałość połączenia adhezyjnego. W poszczególnych obszarach pomiarowych wartości modułu kształtują się na podobnym poziomie, co pozwala przypuszczać, że przyczepność mechaniczna powłoki do podłoża jest bardzo podobna.



Rys. 4. Wyniki rozkładu wartości modułu $|\mathbf{r}|$ dla powierzchni przygotowanej papierem ściernym o oznaczeniu P400. **Fig. 4.** Results of the reflection coefficient $|\mathbf{r}|$ for the surface prepared with abrasive paper P400.



Rys. 5. Wyniki rozkładu wartości modułu |r| dla powierzchni przygotowanej papierem ściernym o oznaczeniu P1000. **Fig. 5.** Results of the reflection coefficient |r| for the surface prepared with abrasive paper P1000.



Rys. 6. Średnie wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| dla obszarów o różnym przygotowaniu powierzchni podłoża.

Fig. 6. The average values of the reflection coefficient $|\mathbf{r}|$ for areas with different surface preparation.

Zróżnicowane przygotowanie powierzchni potwierdza, że jest ono istotne z punktu widzenia trwałości połączenia, szczególnie takiego, które jest wykonywane w warsztatach naprawiających karoserie pojazdów samochodowych.

4. Wnioski

Na podstawie analizy literatury, a przede wszystkim wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- średnie wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| ultradźwiękowej fali podłużnej propagującej w obszarze połączenia adhezyjnego są odwrotnie proporcjonalne do wielkości ziarna papieru ściernego, którym przygotowana została powierzchnia podłoża;
- najniższe wartości modułu |r| uzyskano dla powierzchni podłoża przygotowanej zgodnie z zaleceniami producenta szpachlówki samochodowej;
- wartości modułu ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| ultradźwiękowej fali podłużnej w poszczególnych obszarach pomiarowych (P120, P400 i P1000) są zbliżone, co świadczy o jednakowym przygotowaniu powierzchni całego obszaru i niewielkich różnicach w rozkładzie przyczepności powłoki do podłoża stalowego.

W kolejnych krokach należy wykonać badania wiążące nieniszczącą miarę przyczepności, jaką jest moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia |r| i przyczepnością mechaniczną wyrażoną w MPa. Pozwoli to na opracowanie metody diagnozowania przyczepności i szacowania jej wartości bez ingerencji niszczącej w badane połączenie adhezyjne.

Badania zostały wykonane w ramach działalności statutowej WMRiT Politechniki Poznańskiej, projekt DSMK/3530.

5. Literatura/References

- M. Żenkiewicz, "Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych" Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [2] T. Biestek, S. Sękowski "Metody badań powłok metalowych" Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
- [3] R.D. Adams, B.W. Drinkwater "Nondestructive testing of adhesively-bonded joints" NDT&E International, vol. 30, no. 2, pp. 93-98, 1997.
- [4] R.D. Adams "Adhesive bonding Science, technology and application" Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [5] J. Chen, X. Bai, K. Yang, B.F. Ju "The computations of reflection coefficient of multilayered structure based on the reformulation of Thomson-Haskel method" Ultrasonics, vol. 52, pp. 1019-1023, 2012.
- [6] B. Drinkwater, P. Cawley "Measurement of the frequency dependence of the ultrasonic reflection coefficient from thin layers and partially contacting interfaces" Ultrasonics, no. 35, pp. 479-488, 1997.
- [7] M. Jósko "Metodologiczne aspekty oceny przyczepności powłok regeneracyjnych metodą ultradźwiękową" Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2002.
- [8] A. Pilarski "Ultrasonic evaluation of the adhesive degree in layered joints" Materials Evaluation, vol. 43, no. 6, pp. 765-770, 1985.
- [9] M.E. Ibrahim "Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review" Composites: Part A, vol. 64, pp. 36-48, 2014.









Obsługiwane techniki badań

- Badania konwencjonalne UT
- Phased Array
- TOFD
- FMC TFM

Typowe zastosowania

- Badania złączy spawanych
- Mapowanie korozji
- Badania odlewów i odkuwek
- Badania kompozytów

Najnowocześniejszy defektoskop, zaprojektowany, aby sprostać dzisiejszym i przyszłym potrzebom, przy zachowaniu najlepszych cech linii VEO. Kluczowymi elementami, na których skupiono się w procesie tworzenia VEO+, były użytkownik i wydajność oraz zobrazowanie. Pozwoliło to na stworzenie 4 konfiguracji Phased Array: 16:64, 16:128, 32:64 i 32:128, czyniąc VEO+ wszechstronnym do badania niemal każdego obiektu i materiału!

Od teraz VEO+ obsługuje najnowocześniejszą technikę badania i obrazowania FMC-TFM (Full Matrix Capture – Total Focusing Method), podnosząc rozdzielczość badania i jakość obrazu na nieosiągalny dotychczas poziom!

Opcja oprogramowania FMC-TFM

- Funkcja Multiscan (FMC + Phased Array)
- Wysoka rozdzielczość 0.1 mm²
- Duże zobrazowania TFM (1024 px²)
- Pełny zapis badania (FMC)
- Proste narzędzia do wymiarowania
- Raport w pdf, eksport plików do formatu CSV

Wyłączny dystrybutor w Polsce: Koli Sp. z o.o. ul. Lotnicza 119, 80-297 Banino tel. 58 684 86 61, 58 684 86 62 e-mail: <u>kontakt@koli.eu</u> www: <u>http://www.koli.eu</u>





Phased Array (z lewej) vs. TFM (z prawej)

Jakub Kowalczyk¹*, Dariusz Ulbrich¹, Daria Stępak¹, Zbigniew Strumiński² ¹Politechnika Poznańska ²Volkswagen Września

Badania ultradźwiękowe połączeń adhezyjnych stosowanych w motoryzacji

Ultrasonic testing of adhesive joints used in the automotive industry

ABSTRACT

The publication presents the application, advantages and disadvantages of adhesive joints used in the construction of motor vehicles. Particular attention was focused on the study of connections with double-sided tapes, which are used in the construction of buses and rail vehicles (e.g. in door construction). The results of tests of 3M tape used for joining steel and aluminum sheets with thicknesses below 2 mm are presented. Various ultrasound measures were used to assess the connections. The research was carried out using the Krautkramer USM35XS ultrasonic flaw detector and a 20MHz ultrasonic transducer with the water delay line. The work confirmed that the ultrasound method allows the assessment of the quality of the adhesive joint tape - steel and aluminum sheet and can be used in real production conditions.

Keywords: ultrasonic testing; adhesive joints; acrylic tape

1. Wstęp

Trendy w produkcji pojazdów samochodowych obejmują nie tylko redukcję kosztów produkcji, ale również obniżenie masy pojazdu samochodowego, co wpływa na zmniejszenie zawartości substancji szkodliwych w spalinach. Jedną z metod obniżania kosztów związanych z produkcją pojazdów samochodowych jest zastępowanie cieplnych metod łączenia elementów karoserii (spawanie, zgrzewanie) klejeniem. Kleje to substancje chemiczne zdolne do trwałego łączenia materiałów jedno - i różnoimiennych, uszczelniające połączenie i dające równomierny rozkład naprężeń w całym jego obszarze. Łączenie odbywa się w wyniku oddziaływania sił adhezji właściwej, adhezji mechanicznej i sił spójności kleju kohezji. Klejenie nie wymaga szczególnie zaawansowanych procesów obróbki mechanicznej, która jest najczęściej ograniczona do piaskowana lub śrutowania powierzchni przeznaczonych do łączenia [1].

Główne zalety połączeń klejowych to uszczelnienie konstrukcji, równomierny rozkład naprężeń, obniżenie kosztów produkcji, brak strefy wpływu ciepła oraz ochrona łączonych elementów przed korozją bimetaliczną. Główne ograniczenia, jakie wiążą się z wykorzystaniem połączeń klejowych to stosunkowo niska wytrzymałość mechaniczna w porównaniu do połączeń spawanych, niska odporność W publikacji przedstawiono zastosowanie, wady i zalety połączeń adhezyjnych, stosowanych w budowie pojazdów samochodowych. Szczególną uwagę skoncentrowano na badaniu połączeń wykorzystujących taśmy dwustronne, które są stosowane w budowie autobusów oraz pojazdów szynowych (np. w konstrukcji drzwi). Przedstawiono wyniki badań pilotażowych taśmy 3M wykorzystanej do łączenia blach stalowych i aluminiowych o grubościach poniżej 2 mm. Wykorzystano różne miary ultradźwiękowe umożliwiające ocenę połączeń oraz wyniki uzyskane podczas badań dla różnych miar. Badania prowadzono z wykorzystaniem klasycznego defektoskopu ultradźwiękowego Krautkramer USM35XS oraz głowicy ultradźwiękowej o częstotliwości 20MHz w wodną linią opóźniającą. Przeprowadzone prace potwierdziły, że metoda ultradźwiękowa umożliwia nieniszczącą lokalizację połącznia adhezyjnego taśma – blacha stalowa oraz aluminiowa i może być wykorzystywana w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe; połączenia adhezyjne; taśma akrylowa

na pracę połączeń w wysokich temperaturach oraz brak pełnej wytrzymałości połączenia zaraz po zakończeniu jego wykonywania. Producenci klejów próbują przyspieszyć ich wiązanie, coraz częściej spotyka się kleje hybrydowe, które umożliwiają uzyskanie relatywnie wysokiej wytrzymałości połącznia przy stosunkowo krótkim czasie wiązania. Praktyka przemysłowa pokazuje jednak, że w pewnych zastosowaniach zamiast wykorzystania klejów można wykorzystać taśmy dwustronnie pokryte klejem, np. 3M VHB TAPE RP45 Grey która była poddana badaniom własnym.

Taśmy takie są wykorzystywane na przykład do łączenia ścian bocznych z ramą autobusu, poszycia dachu autobusu z ramą, klejenia drzwi w szynowych pojazdach transportu masowego. Na wytrzymałość ukształtowanego połączenia adhezyjnego wpływa nie tylko prawidłowe przygotowanie powierzchni, ale również odpowiedni docisk połącznia. Ze względu na konieczność stosunkowo dużego oraz równomiernego docisku w warunkach produkcyjnych, taśmy są wykorzystywane do łączenia dużych i płaskich powierzchni.

Głównym celem prowadzonych badań jest sprawdzenie możliwości wykorzystania ultradźwiękowej metody echa do oceny jakości połączenia adhezyjnego blacha stalowa – taśma dwustronna oraz blacha aluminiowa – taśma dwustronna, rozumianej jako lokalizację tych obszarów, w których taśma została przyklejona.

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.043

STRESZCZENIE

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: jakub.kowalczyk@put.poznan.pl

2. Badania ultradźwiękowe

Ponieważ połączenie adhezyjne wykorzystujące taśmy dwustronnie klejące różni się od typowego połącznia klejowego, w ramach prowadzonych prac postanowiono sprawdzić, czy ultradźwiękowa metoda echa umożliwi badanie połączenia blacha stalowa z taśmą oraz blachą aluminiową. W badaniach wykorzystano blachę stalową, na którą naklejono fragmenty taśmy. Użyto taśmy firmy 3M VHB TAPE RP45 Grey. Aby sprawdzić, czy ultradźwiękowa technika echa umożliwi ocenę jakości połącznia utworzonego przez taśmę 3M VHB TAPE RP45 Grey z blachą stalową, naklejono taśmę na stalową blachę, a następnie przykładano głowicę ultradźwiękową od strony blachy i rejestrowano układy impulsów ultradźwiękowych uzyskiwane na ekranie defektoskopu. Taśma została dociśnięta ręcznie rolką, powierzchnia blachy została oczyszczona i odtłuszczona. W badaniach wykorzystano defektoskop Krautkramer USM35XS wraz głowicą ultradźwiękową G20MNX (rys. 1). Częstotliwość przetwornika wynosi 20MHz, a jego średnica 3,6 mm, długość fali w blasze stalowej 0,29mm, pole bliskie

Tab. 1. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze stalowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 1. The results of measurements made on a steel sheet in a place where tape was not applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	84	65	54	48	33	30	8
2.	82	66	55	46	39	30	9
3.	85	65	54	48	34	30	8
4.	84	67	53	49	39	31	8
5.	85	68	55	49	39	32	9
6.	81	64	53	47	38	29	8
7.	83	66	55	49	37	32	8
8.	88	66	57	49	44	32	8
9.	83	66	54	48	39	31	9
10.	80	63	52	45	37	30	8
11.	88	72	60	51	42	33	9
12.	82	62	52	46	37	29	8
13.	89	70	59	52	40	33	9
14.	84	65	52	48	38	31	8
15.	88	70	58	50	40	32	8
16.	87	66	56	49	39	32	9
17.	81	63	53	45	38	30	8
18.	90	67	59	50	41	33	9
19.	88	67	55	49	39	31	9
20.	83	66	55	45	39	31	8
21.	87	68	57	49	41	33	9
22.	83	65	53	46	38	30	8
23.	84	66	54	48	38	31	9
24.	80	61	52	46	35	29	8
25.	84	64	54	47	38	30	9
26.	89	68	57	49	39	32	8
27.	84	64	55	48	37	31	8
28.	88	72	60	51	42	33	9
29.	83	65	54	48	39	31	9
30.	88	69	58	48	41	32	9
H	84,8	66,2	55,2	48,1	38,7	31,1	8,5
Błąd	4,8	4,4	4,0	3,0	3,8	2,1	0,8



Rys. 1. Głowica ultradźwiękowa wykorzystywana w badaniach: a) widok głowicy, b) podstawowe wymiary głowicy.

Fig. 1. Ultrasonic transducer used in research: a) view of the transducer, b) basic dimensions of the transducer.

Tab. 2. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze stalowej w miejscu, w którym nałożono taśmę [4].

Tab. 2. The results of measurements made on a steel sheet in a place where tape was applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	78	54	42	34	25	19	5
2.	78	55	41	35	26	18	5
3.	79	56	44	34	26	16	5
4.	78	54	39	34	24	18	5
5.	74	53	41	33	24	19	5
6.	76	54	40	34	25	19	5
7.	74	54	41	32	25	19	5
8.	78	55	42	34	26	19	5
9.	76	53	41	33	24	19	5
10.	75	53	41	33	25	19	5
11.	74	53	41	32	24	19	5
12.	78	56	42	34	25	19	5
13.	76	54	39	33	24	18	5
14.	72	53	42	32	25	19	5
15.	76	54	41	33	24	19	5
16.	72	53	41	32	25	19	5
17.	74	53	42	32	24	18	5
18.	76	53	41	34	25	20	6
19.	70	51	39	33	24	19	5
20.	76	55	42	33	26	20	6
21.	74	52	39	32	23	17	5
22.	79	53	43	34	24	20	6
23.	79	55	43	35	25	20	6
24.	77	54	41	34	26	19	5
25.	75	53	40	33	24	19	5
26.	74	54	42	34	25	18	5
27.	76	54	40	34	26	19	5
28.	78	54	41	34	25	19	5
29.	73	51	38	32	23	17	5
30.	72	52	38	31	22	17	5
H	75,6	53,6	40,9	33,2	24,6	18,7	5,1
Błąd	4,0	2,0	2,4	1,7	1,7	1,6	0,6

10,4 mm, a szerokość wiązki, dla współczynnika spadku k = 0,87 w odległości 15 mm od przetwornika ultradźwiękowego 2,2 mm.



Rys. 2. Przykładowy układ impulsów uzyskiwany w czasie badań na ekranie defektoskopu.

Fig. 2. An example of a pulse system obtained during tests on the ultrasonic flaw detector screen.

Tab. 3. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze aluminiowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 3. The results of measurements made on an aluminum sheet in a place where tape was not applied [4].

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	76	60	42	24	20	15	5
2.	84	64	46	33	23	16	5
3.	81	64	46	35	23	18	5
4.	81	60	43	31	21	16	5
5.	80	62	44	32	22	18	5
6.	79	62	43	31	21	17	5
7.	85	64	47	35	23	18	5
8.	80	63	44	33	23	18	5
9.	85	63	47	36	23	19	5
10.	84	66	47	35	24	20	6
11.	81	66	48	34	24	19	5
12.	81	60	44	32	21	16	5
13.	82	62	47	34	23	18	5
14.	81	64	45	32	23	19	5
15.	83	65	45	34	23	18	5
16.	79	63	47	32	23	18	5
17.	82	65	48	34	23	18	5
18.	79	62	45	33	23	29	6
19.	80	62	45	31	22	18	5
20.	81	62	46	33	24	20	6
21.	80	64	45	32	23	17	5
22.	80	61	43	31	21	27	5
23.	85	64	46	32	22	17	5
24.	75	58	43	32	22	18	5
25.	71	56	42	31	22	18	5
26.	78	61	45	32	22	18	5
27.	81	62	44	30	20	17	5
28.	80	62	44	32	22	17	5
29.	81	63	44	32	23	17	5
30.	80	64	45	34	24	20	6
H	80,5	62,5	45,0	32,4	22,4	18,5	5,1
Błąd	4,9	3,7	2,8	3,6	1,8	4,8	0,6

W czasie pomiarów rejestrowano wysokość pierwszych sześciu impulsów uzyskanych na ekranie defektoskopu oraz liczbę impulsów, których wysokość była większa od 20 procent wysokości ekranu. Przykładowy układ impulsów uzyskiwany w czasie badań na ekranie defektoskopu przedstawiono na rys. 2. Zdecydowano się na wybór tych właśnie wartości ponieważ umożliwiają one wyznaczenie szeregu ultradźwiękowych miar jakości połączeń adhezyjnych.

Wyniki badań zostały przedstawione w Tab. 1 – 4. Procentową wysokość impulsu oznaczono H_x , gdzie x oznacza nr impulsu, natomiast liczbę impulsów, których wysokość była większa od 20 procent wysokości ekranu oznaczono jako n.

W ramach badań rozpoznawczych wykonano 30 pomiarów w tych samych obszarach i przy stałych nastawach defektoskopu, co pozwoliło na wyznaczenie błędów pomiarowych. Do oszacowania błędu średniej przyjęto 90% półprzedział ufności dla wyników uzyskanych podczas serii pomiarów, zgodnie z wyrażeniem opisanym równaniem (1) [4]:

Tab. 4. Wyniki pomiarów wykonanych na blasze aluminiowej w miejscu, w którym nie nałożono taśmy [4].

Tab. 4. The results o	of measurements mad	ie on an alur	ninum sheet
in a place where tape	e was applied [4].		

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	n
1.	63	40	23	12	8	5	3
2.	60	38	21	12	8	5	3
3.	58	35	21	12	7	5	3
4.	63	39	22	13	8	5	3
5.	59	37	21	12	7	5	3
6.	61	38	20	12	8	6	3
7.	62	38	22	13	7	6	3
8.	59	37	20	12	7	5	3
9.	61	35	19	11	7	5	3
10.	59	35	21	12	8	5	3
11.	61	38	22	13	8	5	3
12.	55	35	21	13	8	5	3
13.	58	34	19	11	7	6	3
14.	64	41	23	13	7	5	3
15.	58	35	20	12	7	5	3
16.	61	40	23	13	8	6	3
17.	60	36	20	11	6	5	3
18.	55	35	20	12	7	6	3
19.	62	39	22	13	8	6	3
20.	57	36	19	12	8	5	3
21.	62	37	22	12	8	5	3
22.	65	42	23	12	8	5	3
23.	65	40	23	14	9	6	3
24.	62	38	20	12	7	5	3
25.	68	42	23	13	8	5	3
26.	60	37	20	12	7	5	3
27.	63	40	22	13	8	6	3
28.	61	36	21	12	7	6	3
29.	61	40	21	13	8	5	3
30.	57	36	19	12	8	5	3
H	60,7	37,6	21,1	12,3	7,6	5,3	3,0
Błąd	4,9	3,8	2,3	1,2	1,0	0,8	0,0

	Stal		Stal + taśma		Alum	inium	Aluminium + taśma	
Nr impulsu	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]	Wysokość [%]	Błąd [%]
H1	84,8	4,8	75,6	4	80,5	4,9	60,7	4,9
H2	66,2	4,4	53,6	2	62,5	3,7	37,6	3,8
H3	55,2	4	40,9	2,4	45	2,8	21,1	2,3
H4	48,1	3	33,2	1,7	32,4	3,6	12,3	1,2
H5	38,7	3,8	24,6	1,7	22,4	1,8	7,6	1
H6	31,1	2,1	18,7	1,6	18,5	4,8	5,3	0,8
n (liczba impulsów)	8,5 [-]	0,8 [-]	5,1[-]	0,6 [-]	5,1 [-]	0,6 [-]	3 [-]	0 [-]

Tab. 5. Zbiorcze wyniki badań ultradźwiękowych. Tab. 5. Collective results of ultrasonic tests.

$$\frac{1}{2} \cdot L_{0.95} = t_{0.95} \cdot \sigma$$
 (1)

gdzie: $\frac{1}{2} \cdot L_{0.95}$ - 95% półprzedział ufności; t_{0.95} - współczynnik t Studenta dla 30 pomiarów, na poziomie istotności 0,10; σ - odchylenie standardowe dla pomiarów.

Zbiorcze wyniki badań przedstawiano w tab. 5.

Analizie poddane wysokości pierwszych sześciu impulsów ultradźwiękowych, ponieważ umożliwiają one wykorzystanie szeregu ultradźwiękowych miar jakości połączeń adhezyjnych (np. moduł ciśnieniowego współczynnika odbicia, decybelowego spadku amplitudy między wybranymi impulsami).



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wysokości pierwszego impulsu uzyskanego na ekranie defektoskopu w badanych obszarach. **Fig. 3.** Graphical representation of the height of the first pulse obtained on the defectoscope screen in the studied areas.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że obrazy uzyskane na ekranie defektoskopu w czasie badań w obszarach, w których nałożono taśmę oraz w których taśmy nie nałożono różnią się od siebie istotnie. Graficznego przedstawienia wyników dokonano dla pierwszego impulsu z obszaru badanego – Rys. 3.

3. Podsumowanie

Przeprowadzone prace potwierdziły, że metoda ultradźwiękowa umożliwia nieniszczącą lokalizację połącznia adhezyjnego taśma – blacha stalowa oraz aluminiowa i może być wykorzystywana w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Uzyskano szereg zróżnicowanych sygnałów, na podstawie których zidentyfikowano obszary z taśmą i bez taśmy. Wyższą podatnością defektoskopową cechują się połączenia taśma – blacha aluminiowa, gdzie po wykonaniu połączenia obserwuje się wyraźne spadki wysokości impulsów uzyskiwanych na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego. Dalsze badania obejmą stworzenie mapy jakości połączenia adhezyjnego wraz z oszacowaniem wytrzymałości mechanicznej połączenia.

The article was financed from the funds of the project no. 05/51/DS-PB/3520

4. Literatura

- J. Kowalczyk "Ocena połączeń klejonych metodą ultradźwiękową", Rozprawa doktorska, Biblioteka Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2008.
- [2] Broszura 3M[™] VHB[™] Tapes, 3M Industrial Adhesives and Tapes, 3M, 2016.
- [3] W. Oktaba "Metody statystyki matematycznej w doświadczalnictwie", Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1972.
- [4] Wyniki pomiarów uzyskane w czasie realizacji pracy dyplomowej magisterskiej, M. Korżel (praca w realizacji), Poznań, 2018r.



Ryszard Mańczak* Politechnika Poznańska

Zmiany prędkości fali ultradźwiękowej w obszarze strefy złącza spawanego

The changes of velocity of the ultrasonic wave in the area of the welded joint

ABSTRACT

The article deals with the issues of ultrasonic evaluation of the quality of the welded joint. In the classic approach, the ultrasonic inspection of these connections boils down to the detection of discontinuities in the welded joint and the assessment of their position and size. In addition to maintaining the integrity of the joint structure, it is also important to check the geometric parameters of the weld, including measurable parameters after the metallographic smudge. The author of the article has taken action to use the ultrasonic method to evaluate the geometric parameters of the weld, which have been measured in a destructive way to date. The planned concept of weld assessment requires - in the first step - to determine changes in the velocity of the longitudinal ultrasonic wave in the individual zones of the welded joint. As part of the work carried out, measurements were made of the velocity of the longitudinal ultrasonic wave at the 12 butt joint points of the welded plates. At selected points15 measurements were taken. Obtained results of the measurements were compared with each other by means of statistical tests, which showed the occurrence of significant differences in the values of the speed of the wave in various areas of the joint, amounting to approx. 30 m/s. Such differentiation of the wave velocity in individual zones of the joint allows for taking further research steps, based on the results of research presented in this article.

Keywords: welded joint; ultrasonic wave velocity in welded joint

1. Wstęp

W procesie produkcji pojazdów udział technologii spawania jest znaczący, zwłaszcza podczas łączenia elementów nośnych pojazdu. Szkielet samochodu powstaje z przyspawania do ramy nośnej tłoczonych, blaszanych kształtowników, jak też jej wzmocnień poprzecznych [1, 2].

Ramy nośne wykonuje się ze stali niestopowych o małej zawartości węgla lub niskostopowych. Podłużnice tłoczy się z blach o grubości 2,5 ÷ 4 mm w przypadku samochodów osobowych oraz 6 ÷ 8 mm w przypadku samochodów ciężarowych.

O wytrzymałości powstałych spoiny świadczą m.in. wymiary geometryczne złącza, z których część jest możliwa do ustalenia dopiero po wykonaniu zgładu metalograficznego złącza (rys. 1).

W ramach niniejszej pracy podjęto działania, które stanowią jeden z pierwszych etapów opracowania koncepcji oceny wymiarów geometrycznych złącza w sposób nieniszczący z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej. Jednym z kluczowych elementów jest oszacowanie wartości prędkości fali ultradźwiękowej w poszczególnych strefach złącza spawanego.

STRESZCZENIE

W artykule podjęto problematykę ultradźwiękowej oceny jakości złącza spawanego. W ujęciu klasycznym kontrola ultradźwiękowa tych połączeń sprowadza się do wykrywania nieciągłości w połączeniu spawanym oraz ocenie ich położenia i rozmiarów. Oprócz zachowania ciągłości struktury złącza, istotne jest także zweryfikowanie parametrów geometrycznych spoiny, również tych, które są mierzalne po wykonaniu zgładu metalograficznego. Autor artykułu podjął działania w celu wykorzystania metody ultradźwiękowej do oceny parametrów geometrycznych spoiny, które dotychczas mierzone są w sposób nieniszczący. Planowana koncepcja oceny spoiny wymaga - w pierwszym kroku - wyznaczenia zmian wartości prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w poszczególnych strefach złącza spawanego. W ramach przeprowadzonych prac wykonano pomiary prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w 12-stu punktach doczołowego złącza spawanego blach. W wybranych punktach przeprowadzono po 15-ście pomiarów. Uzyskane rezultaty pomiarów porównano ze sobą za pomocą testów statystycznych, które wykazały występowanie istotnych różnic w wartościach prędkości fali w różnych obszarach złącza, wynoszące do ok. 30 m/s. Takie zróżnicowanie prędkości fali w poszczególnych strefach złącza pozwala na podjęcie dalszych kroków badawczych, bazujących na wynikach badań prezentowanych w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: połączenie spawane; prędkość fali ultradźwiękowej w spoinie



Rys. 1. Zgład metalograficzny złącza spawanego [1]. **Fig. 1.** Metallography of a welded joint [1].

2. Układ pomiarowy i obiekt badań

Układ pomiarowy składał się z defektoskopu ultradźwiękowego USM 35XS wraz z głowicą piórową GE.125 A13H005A2 o nominalnej częstotliwości 20 MHz. Badanym obiektem była próbka wycięta ze złącza doczołowego typu blach o zukosowanych krawędziach typu X. Badania prędkości propagacji fali przeprowadzono w spoinie oraz w materiale rodzimym spoiny, w 12-stu punktach wskazanych na 2.

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.044

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: ryszard.manczak@put.poznan.pl

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics



Rys. 2. Próbka badawcza z zaznaczonymi punktami pomiarowymi. **Fig. 2.** Research object with measurement points.

Badana próbka została oszlifowana i wytrawiona nitalem (3% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym), dzięki czemu uwidoczniła się linia wtopienia, strefa wpływu ciepła oraz wszystkie trzy ściegi spawalnicze. Przed przystąpieniem do pomiarów należało zmierzyć mechanicznie grubość próbki w każdym punkcie pomiarowym.

3. Metodyka badań

Na przygotowaną powierzchnię próbki naniesiono ośrodek sprzęgający, którym był olej silnikowy. Pomiar prędkości odbywał się przez przyłożenie głowicy piórowej prostopadle do powierzchni próbki, każdorazowo wprowadzając wartość grubości w danym punkcie do defektoskopu w celu jego kalibracji. Po jej dokonaniu możliwy był odczyt wartości prędkości i dobiegu, co zobrazowano na rys. 3. W każdym punkcie pomiary powtórzono 15-ście razy.

4. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono wartości prędkości fali zmierzonych defektoskopem po jednej stronie spoiny (punkty A–L). W dolnej części tabeli umieszczono obliczone wartości średniej arytmetycznej (X) oraz odchylenia standardowego (S). Wartości średnie prędkości fali w poszczególnych punktach zobrazowano dodatkowo na rys. 4–6.



Rys. 3. Pomiar prędkości propagacji fali w punkcie F. **Fig. 3.** The measurement of ultrasonic wave velocity in point F.

Po wyznaczeniu wartości średnich dla pomiarów w każdym punkcie sprawdzono, czy te wartości można wzajemnie do siebie statystycznie przyrównać.

W tym celu skorzystano z testu parametrycznego na porównanie dwóch wartości oczekiwanych (X) ze znanym odchyleniem standardowym (S), normalnym rozkładem populacji oraz znaną liczebnością prób (n). Statystykę każdej z par punktów pomiarowych obliczono przy pomocy zależności podanej w pracy [3]:

$$U = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$
(1)

Z tablic rozkładu normalnego odczytano wartość kwantylu rozkładu na podstawie znajomości poziomu ufności (p = 0.95). Wyniki statystyk odniesiono do rozkładu prawdopodobieństwa na krzywej Gaussa, a uzyskane rezultaty zawarto w tabeli 2, w której wartość 1 oznacza, że wyniki są statystycznie ze sobą porównywalne, wartość 0 oznacza sytuację przeciwną.

Tab. 1. Wyniki pomiaru prędkości fali podłużnej C [m/s] w punktach A–L. **Tab. 1.** The results of the longitudinal wave velocity C [m/s] measurement at points A–L.

Lp.	A	B	C	D	E	F	G	Н	I	J	K	L
1	5900	5905	5892	5907	5907	5892	5892	5893	5890	5889	5917	5924
2	5903	5901	5911	5907	5910	5885	5888	5889	5890	5882	5943	5928
3	5907	5909	5907	5904	5907	5892	5885	5889	5890	5893	5947	5924
4	5907	5905	5907	5907	5910	5881	5878	5882	5887	5908	5943	5920
5	5907	5909	5911	5907	5907	5888	5917	5885	5887	5900	5917	5924
6	5903	5909	5907	5904	5907	5888	5888	5878	5890	5893	5917	5924
7	5907	5909	5904	5907	5899	5888	5885	5878	5890	5886	5943	5924
8	5907	5898	5907	5907	5903	5885	5892	5882	5887	5889	5943	5928
9	5907	5901	5904	5904	5907	5892	5888	5889	5890	5886	5921	5924
10	5907	5905	5904	5907	5903	5888	5870	5889	5890	5889	5917	5924
11	5907	5905	5907	5907	5903	5888	5885	5889	5887	5893	5921	5928
12	5903	5905	5904	5896	5896	5888	5888	5889	5890	5886	5917	5924
13	5907	5905	5907	5907	5907	5888	5892	5889	5887	5908	5921	5928
14	5907	5905	5907	5904	5907	5892	5896	5893	5890	5893	5943	5917
15	5907	5909	5907	5904	5907	5888	5892	5889	5890	5886	5917	5924
X	5905,7	5905,3	5905,7	5905,3	5905,3	5888,2	5889,1	5886,9	5889	5892,1	5928,5	5924,3
S	2,28	3,37	4,38	2,94	3,87	3,05	10,01	4,78	1,46	7,80	12,97	3,02



Rys. 4. Wartości średniej prędkości fali ultradźwiękowej w punktach A–L.

Fig. 4. Results of average wave velocity at points A-L.

Tab. 2. Rezultaty obliczeń statystycznych dla wyników pomiarów punktach A–L.

Tab. 2. Results of statistical calculations for results of measurements at points A–L.

Lp.	Α	В	С	D	E	F	G	Н	Ι	J	K	L
Α	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
В	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
С	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Е	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Н	-	-	-	-	-	1	1		-	-	-	-
Ι	-	-	-	-	-	1	1	0	-	-	-	-
J	-	-	-	-	-	0	1	0	1	-	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-

Różnice w wartościach średnich zmierzonych prędkości stały się jeszcze bardziej zauważalne za sprawą przeprowadzonego drugiego testu parametrycznego, tym razem porównującego średnie wartości prędkości z każdego z trzech obszarów próbki (materiał rodzimy pierwszej blachy – łącznie 75 pomiarów, drugiej – łącznie 75 pomiarów oraz materiał spoiny – łącznie 30 pomiarów). Zastosowano tę samą metodę liczenia co w poprzednim przypadku, również porównując wartość wyliczonych statystyk do kwantylu rozkładu normalnego odpowiedniego dla tego poziomu ufności. W tablicy 3 zawarto informację o możliwości statystycznego przyrównania do siebie tych wartości średnich. W tabeli 3 wartość 1 oznacza, że wynik są statystycznie ze sobą porównywalne, wartość 0 oznacza sytuację przeciwną.

Tab. 3. Rezultaty obliczeń statystycznych dla wartości średnich prędkości w trzech obszarach.

Tab. 3. Results of statistical calculations for average velocity in three area.

Obszar	Średnia prędkość X [m/s]	Odchylenie standardowe S [m/s]	ABCDE	FGHIJ	KL
ABCDE	5905,48	3,36	-	-	-
EFGHIJ	5889,04	6,31	0	-	-
KL	5926,4	9,49	0	0	-

5. Analiza wyników i podsumowanie

Na próbce całego połączenia spawanego zaznaczono dwanaście punktów pomiarowych. Punkty A, B, C, D i E znajdowały się na jednej z zespawanych ze sobą blach, w strefie materiału rodzimego złącza. Po drugiej stronie, symetrycznie do poprzednich punktów względem osi spoiny zaznaczono punkty F, G, H, I oraz J. Znajdowały się one również w strefie materiału rodzimego, ale już na drugiej z dwóch połączonych blach. Punkty K i L leżały w obrębie samej spoiny. W każdym z punktów pomiarowych wykonano ustalone wcześniej piętnaście pomiarów prędkości, wyliczono z nich wartość średnią i odchylenie standardowe. Wyniki po stronie A, B, C, D oraz E charakteryzowały się wyższymi wartościami średnich i mniejszymi odchyleniami standardowymi od średnich i odchyleń w punktach F, G, H, I oraz J. Obie strefy materiału rodzimego cechowały się mniejszą prędkością propagacji fali ultradźwiękowej od strefy spoiny. Wykonane testy parametryczne na porównanie dwóch wartości oczekiwanych pozwoliły określić, czy średnie wartości prędkości punktów pomiarowych jednej strefy można do siebie wzajemnie statystycznie przyrównać. Przy danym poziomie ufności (p = 0,95) można odrzucić hipotezy, jakoby średnie par F-J, H-I oraz H-J można do siebie przyrównać. Istotniejszymi testami parametrycznym były jednak kolejne, w których testowano hipotezę przyrównującą do siebie średnie wartości ze średnich w materiale rodzimym do średniej ze średnich w spoinie.

W obszarze zawierającym punkty A, B, C, D i E średnia prędkość wyniosła 5905,48 m/s przy odchyleniu standardowym równym 3,359 m/s. Dla obszaru zawierającego punkty F, G, H, I oraz J średnia prędkość to 5889,04 m/s, a odchylenie – 6,317 m/s. Obszar z punktami K i L w spoinie charakteryzował się prędkością średnią równą 5926,4 m/s i odchyleniem 9,489 m/s. Przy danym (tym samym) poziomie ufności można było odrzucić hipotezę przyrównującą średnie wartości dla wszystkich testowanych par. Innymi słowy – prędkości w tych trzech strefach znacząco się różniły, co wskazywałoby na poprawność koncepcji nieniszczącego badania głębokości strefy wtopienia z użyciem zmiennych prędkości propagacji fali w różnych strefach złącza.

6. Literatura/References

- iepim.pr.radom.pl/dokumenty/BSiTR/Logistyka/Inst 8.pdf, 03.2017.
- [2] e-autonaprawa.pl/artykuly/104/blacharskie-naprawy-nadwozi-cz-i-kwalifikacja-pojazdu-do-naprawy-blacharskiej.html, 09.2017.
- [3] D. Bobrowski , K. Maćkowiak-Łybacka K. " Wybrane metody wnioskowania statystycznego" Poznań, WPP, 2006.

Andrzej Dreas, Radosław Gordon* Akademia Morska w Szczecinie

Wpływ napięcia zasilania tranzystora IGBT na otrzymany sygnał emisji akustycznej

The influence of the voltage of the IGBT power supply on the acoustic emission signal received

ABSTRACT	STRESZCZENIE
This paper shows series of measurements and a search for method of si- gnal processing. Sensor signal was obtained with oscilloscope in order to further process it digitally. The change of power supply voltage was also measured to estimated its influence on sensor signal.	W niniejszym artykule przedstawiono serię pomiarów i poszukiwanie me- tody wykrywania uszkodzeń za pomocą przetwarzania sygnałów emisji akustycznej. Sygnał z czujnika obserwowano i przetwarzano za pomocą oscyloskopu i poddano obróbce cyfrowej. Celem była obserwacja wyjścio- wego sygnału przy zmianie napięcia zasilania, aby oszacować jego wpływ na sygnał z czujnika.

Keywords: semiconductor, IGBT Transistor, Acoustic Emission

1. Wstęp

Współczesna technika coraz mocniej opiera się na elektronice i jej odmianach, często uszkodzenia elementów półprzewodnikowych są ciężkie do diagnostyki. Zdarza się, że koszt zdiagnozowania urządzenia jest droższy niż wymiana całego modułu. Często też nie mamy technicznej możliwości lub dostępu do miejsc, w których możemy zmierzyć dane parametry.

Uszkodzenie danego elementu jest związane ze znacznymi kosztami związanymi z przestojem i skomplikowanym serwisem. Szybka diagnostyka lub nawet przewidywanie prawdopodobieństwa awarii danego układu zredukowałaby znacznie koszty ogólnej eksploatacji danego urządzenia.

Badania prowadzone na Akademii Morskiej w Szczecinie zmierzają do tego, aby skutecznie diagnozować układy elektroniczne w trakcie pracy za pomocą emisji akustycznej. Umieszczenie w odpowiednim miejscu czujnika AE i poddaniu otrzymanego sygnału obróbce da odpowiedź, czy dany element jest sprawny lub nie.

Obecnie powszechnie stosuje się emisję akustyczną jako technikę pomiarową w konstrukcjach i budownictwie [1], defektoskopii materiałów [2], obróbki materiałów [3], diagnostyce transformatorów energetycznych [4], uszkodzeń wywołanych wyładowaniami niezupełnymi w izolatorach [5] i innych.

Założeniem badań było stwierdzenie obecności emisji akustycznej występującej podczas przełączania półprzewodnika oraz rejestracja tego zjawiska. Wystąpienie emisji akustycznej badanej metodą stosowaną w Laboratorium Zielonej Energetyki zostało opisane we wcześniejszych publikacjach Zakładu.

Obecna publikacja otwiera wachlarz wstępnych pomiarów i poszukiwania metody obróbki sygnału. Zastosowany sensor emisji akustycznej firmy Phisical Acoustics WS- Słowa kluczowe: półprzewodniki, tranzystory IGBT, Emisja Akustyczna

alfa z wbudowanym szerokopasmowym wzmacniaczem pozwolił na obserwację zmian wartości napięcia otrzymanego na wyjściu sensora w stosunku do zmian wartości amplitudy sygnału wejściowego. Sensor został podłączony do oscyloskopu, aby zobaczyć wynik w jak najszerszym paśmie i bez zbędnej obróbki. Ponieważ sygnał otrzymany z sensora nie był adekwatny do spodziewanej odpowiedzi prądowej na skok jednostkowy napięcia, zespół badawczy zajął się poszukiwaniem istoty i genezy powstałego sygnału. Do tego celu zostały przeprowadzone badania wpływu napięcia zasilania, a co za tym idzie napięcia na wyjściu układu w funkcji wartości szczytowych krzywej otrzymanej w sensorze. Celem tego badania było sprawdzenie, czy te zmiany wpłyną na parametry otrzymanego impulsu wyjściowego. W artykule przedstawiono pomiar jednego tranzystora oraz wybrane, reprezentatywne tabele z pomiarami, które w większości potwierdzają tezę zawartą we wnioskach.

2. Założenia i stanowisko pomiarowe

Do pomiarów zbudowano stanowisko pomiarowe wyposażone w niezbędny sprzęt. W skład którego wchodzi: generator napięcia prostokątnego, zasilacz prądu stałego z regulowanym napięciem, amperomierz cęgowy. Do rejestracji i obróbki danych użyto czterokanałowego, cyfrowego oscyloskopu. Zastosowanie oscyloskopu, jako najprostszego urządzenia rejestrującego, spowodowało pewne ograniczenia, jednak dało możliwość odczytu sygnału bezpośrednio z sensora i możliwość wyboru dalszej obróbki matematycznej za pomocą oprogramowania matematycznego, np. Matlab oraz otwartą drogę do opracowania własnej koncepcji gotowego urządzenia diagnostycznego.

W testach zdecydowano się na tranzystor IGBT ze względu na dużą powierzchnię złącza, możliwość przełączania w szerokim zakresie prądów i napięć, a co za tym idzie mocy oraz modułową budowę (minimum dwa tranzystory i jednym

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: r.gordon@am.szczecin.pl

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.045

chipie), co sprawiało, że układ taki z dużym prawdopodobieństwem będzie emitował fale akustyczne.

Do wyzwalania zmian stanu wybranego tranzystora zbudowano układ elektroniczny (rys 1). Starano się zachować maksymalną prostotę, a przez to odporność na zakłócenia elektryczne oraz akustyczne. Tranzystor wyzwalany był napięciem prostokątnym o wartościach 0 i 10V podanego na bramkę z wyjścia transoptora, który oddzielał galwanicznie generator od układu wyzwalającego z generatora fali prostokątnej. Zastosowanie transoptora poza ochroną generatora, niwelowało wpływ oddziaływań sygnału wyjściowego na sygnał z generatora oraz rozdzielało masy tranzystora i generatora.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego (opracowanie własne). **Fig. 1.** The measuring system used in the experiment (own study).

Do badania użyto sensor z wbudowanym wzmacniaczem. Wbudowany wzmacniacz wprowadza pewne ograniczenia, np. pojemności własne, jednak bez szerokopasmowego układu wzmacniającego sygnał emisji akustycznej jest trudny do zmierzenia ze względu na niski jego poziom i ograniczenia oscyloskopu. Na rysunku 2 (Rys.2) jest przykładowy obraz otrzymanego sygnału.

Badaniu poddano typowy i szeroko stosowany tranzystor IGBT o oznaczeniu IRG4PC40S wyprodukowany przez firmę International Rectifier [6].



Rys. 2. Sygnał otrzymany na oscyloskopie (opracowanie własne). **Fig. 2.** The waveforms received on the oscilloscope (own study).

3. Pomiary

Celem pomiarów było sprawdzenie, czy wyniki pomiarów pokrywają się ze wzorami na pojemności pasożytnicze w tranzystorach (1) i (2) [7] oraz z zarejestrowanym sygnałem na wyjściu tranzystora, a także, co wpływa na zmiany sygnału emisji akustycznej, z głównym naciskiem na wykrycie zmian napięcia przy przełączaniu i definitywne powiązanie napięcia przełączanego z zarejestrowanym sygnałem na sensorze emisji akustycznej.

$$C_{GC} = \begin{cases} C_{OXD} & V_{CE} < V_{GE} - V_{GE(th)} \\ \frac{C_{OXD} C_{GDJ}}{C_{OXD} + C_{GDJ}} & V_{CE} \ge V_{GE} - V_{GE(th)} \\ C_{GC} = \frac{A_{GD} \varepsilon_{Si}}{\sqrt{2} \varepsilon_{Si} (V_{CE} - V_{GE(th)}) / q / N_B} \end{cases}$$
(1)

gdzie: $C_{_{\rm OXD}}$ i pojemności nasycenia bramka – bramka dren; $C_{_{\rm GDJ}}$ zależne od napięcia $V_{_{\rm CE}}$ (kolektor emiter) gdzie $A_{_{\rm GD}}$ jest powierzchnią styku; $\epsilon_{_{\rm Si}}$ jest stałą dielektryczną krzemu i napięcia progowego bramka emiter $V_{_{\rm GE(th)}}$; $N_{_{\rm B}}$ obszar koncentracji nośników większościowych; $C_{_{\rm GC}}$ – pojemność kolektor-emiter, składająca się pojemności na styku tlenku krzemu bramka – dren.

Na bramkę tranzystora (G) podano napięcie prostokątne, zmienne o różnej częstotliwości, ze współczynnikiem wypełnienia 50%, wygenerowane przez generator JC5603P i przekształcone przez transoptor do wartości 10 V w stanie wysokim i 0 V w stanie niskim. Do pomiarów zastosowano oscyloskop GDS2074A, 70 MHz 2 Gs/s. Sensor AE (emisji akustycznej) WSAlfa firmy Phisical Acoustics ze wbudowanym wzmacniaczem [8].

Sensor został zamontowany bezpośrednio na tranzystorze, na jego plastikowej części obudowy. Styk był poprawiony za pomocą specjalnego smaru dostarczonego przez producenta oraz dociśnięty plastikową klemą dla lepszego przewodzenia fali akustycznej.

Sygnał z oscyloskopu został zapisany i poddany obróbce. Na jego podstawie obliczono długość trwania impulsu oraz zmiany amplitud dla poszczególnych pomiarów (co jest wykazane w tabelach 1-3). W pomiarze najistotniejszy był moment przełączenia i osiągnięcia maksymalnej lub minimalnej wartości zarejestrowanego impulsu.

Dokonano serii pomiarów, a przykładowe zostały zawarte w trzech tabelach i podzielone ze względu na częstotliwość przełączania generatora. W tabelach mamy dane dla częstotliwości 3Hz (Tab. 1.), 10Hz (Tab. 2.) oraz 20Hz (Tab. 3.).

Tab. 1. Tabela wartości bezwzględnych maksymalnych i minimalnych napięć zmierzonych na zarejestrowanym sygnale z częstotliwością przełączania 3Hz.

Tab. 1. Table of absolute values of maximum and minimum voltages measured on the registered signal with a switching frequency of 3Hz.

Lp.	Napięcie zasilania [V]	Wartość napięcia szczytowa zarejestrowanej fali [mV]	Wartość napięcia dolnej części zarejestrowanej fali [mV]	
1	30	24	15,1	
2	25	12,3	10,7	
3	20	14,6	8,16	
4	15	7,8	5,4	
5	10	4,6	3,5	
6	5	0,9	0,1	

Tab. 2. Tabela wartości bezwzględnych maksymalnych i minimalnych napięć zmierzonych na zarejestrowanym sygnale z częstotliwością przełączania 10Hz.

Tab. 2. Table of absolute values of maximum and minimum voltages measured on the registered signal with a switching frequency of 10Hz.

Lp.	Napięcie zasilania [V]	Wartość napięcia szczytowa zarejestrowanej fali [mV]	Wartość napięcia dolnej części zarejestrowanej fali [mV]
1	30	27,7	13,5
2	25	13,2	11,1
3	20	14,5	8,7
4	15	8,9	6,1
5	10	4,9	3,0
6	5	0,8	0,2

Tab. 3. Tabela wartości bezwzględnych maksymalnych i minimalnych napięć zmierzonych na zarejestrowanym sygnale z częstotliwością przełączania 20Hz.

Tab. 3. Table of absolute values of maximum and minimum voltages measured on the registered signal with a switching frequency of 20Hz.

Lp.	Napięcie zasilania [V]	Wartość napięcia szczytowa zarejestrowanej fali [mV]	Wartość napięcia dolnej części zarejestrowanej fali [mV]
1	30	23,3	13,2
2	25	13,5	10,9
3	20	14,3	8,5
4	15	8,3	6,0
5	10	5,0	3,4
6	5	0,9	0,1

4. Wnioski

Sygnały otrzymane na oscyloskopie (Rys.2) wskazują wyraźnie powiązanie emisji akustycznej i przełączania tranzystora. Czas narastania impulsu na wyjściu tranzystora oraz na otrzymanym obrazie z sensora różni się ze sobą, jednakże te różnice są we wszystkich przypadkach podobne, dlatego nieuwzględnione w tabeli, czas narastania wraz z czasem opadania wynosi około 20ms. Czas opadania impulsu na czujniku EA jest zależny od jego wewnętrznej budowy. Czujnik rejestruje zmianę sygnału i powoli rozładowuje się przez jego pojemności wewnętrzne. Jeżeli sygnał szybko zmieniłby się na polaryzację przeciwną, przeładowanie nastąpiłoby szybko. Przy braku fali odbitej pojemności rozładowują się powoli. Czas narastania impulsu jest zależny od wygenerowanej fali akustycznej.

Pomiar otrzymanych amplitud sugeruje wyraźną zależność napięcia przełączanego, czyli praktycznie napięcia zasilania, na otrzymany wynik na oscyloskopie.

Zależność wartość napięcia zasilania od otrzymanych wartości amplitudy sygnału z sensora EA została wykazana bezsprzecznie. Zatem sygnał na czujniku jest odebranym sygnałem emisji akustycznej wygenerowanej przez złącza tranzystora, co było głównym zadaniem.

5. Literatura/References

- [1] Z. Ranachowski, Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych, Drogi i mosty R. 2 2012 (105).
- [2] L. Hasse, L. Spiralski, J. Šikula, Pomiar i obróbka sygnałów emisji akustycznej w diagnostyce obiektów, XIV Seminarium Zastosowanie komputerów w nauce i technice 2004 (100).
- [3] P. Lajmert, B Kruszyński, Identyfikacja wczesnych symptomów niepożądanych stanów procesu w szlifowaniu kłowym wałków, Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 4, 2010 (102).
- [4] F. Witos, A. Olszewska, System do analizy sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wyładowania niezupełne w izolacji transformatorów elektroenergetycznych, Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), R. 88 NR 11b/2012, pp 154-157, 2012 (103).
- [5] Z. Ranachowski, "Emisja akustyczna i jej zastosowanie w technice", Nowa Elektrotechnika, no. 9 (73) pp 2-5, 2010.
- [6] IRG4PC40S, IGBT transistor, International Rectifier, data sheet .
- [7] S. Zhou, L. Zhou, P. Sun, "Monitoring Potential Defects in an IGBT Module Based on Dynamic Changes of the Gate Current", Ieee Transactions On Power Electronics, vol. 28, no. 3, MARCH 2013 (009).
- [8] AE- Sensor Overview, WSAlfa, Phisical Acoustics data sheet.

Badania Nieniszczące i Diagnostyka Nondestructive Testing and Diagnostics

LISTA RECENZENTÓW W ROKU 2017

1) dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. nadzw. AGH w Krakowie

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

64

Katarzyna Gawdzińska, Piotr Bielawski, Katarzyna Bryll*, Ewelina Kostecka Akademia Morska w Szczecinie

Czynniki materiałowe oddziaływujące na jakość odlewów z kompozytów metalowo-ceramicznych

Material factors affecting quality of castings made of metal-ceramic composites

ABSTRACT

Shaping quality of a composite casting can be based on its output products analysis and with the use of destructive and non-destructive tests. The usage of substrates that are improper and of poor quality may contribute to occurrence of irregularities throughout entire technological process and during product exploitation. The work identifies material factors influencing the quality of these materials along with an indication of their effects using selected research methods.

Keywords: composite casting; quality of materials; destructive and nondestructive tests

1. Wstęp

Dobrą jakość wyrobu może potwierdzić przede wszystkim odbiorca. Producent zaś jest zobowiązany stworzyć dobry wyrób, tzn. taki, który zaspokaja potrzeby użytkownika. Wyrób ten należy poddać kontroli. Kontrola jakości, według definicji [1], jest to sprawdzenie zgodności wykonania wyrobu z przewidzianymi dla niego wymaganiami. Dokumenty związane z zakupami niezbędnych materiałów dla odlewni do wytwarzania odlewów (zarówno surowców głównych, tj. surówki, żelazostopów, faza zbrojąca, jak i pomocniczych, np. dodatków stopowych, modyfikatorów, topników, zapraw, piasków formierskich, spoiw, utwardzaczy) powinny określać rodzaj, typ, klasę, odmianę produktu oraz jednoznaczny opis identyfikacji wraz z określeniem odpowiednich wymagań transportu, składowania, przechowywania w celu zapewnienia ich przydatności. Wskazane jest, aby wszystkie surowce były oznakowane i posiadały stosowne etykiety, certyfikaty. Materiały te muszą spełniać określone wymagania, które są szeroko opisane i znormalizowane [2-4]. Ważne jest, aby były one zakupione u stałych, sprawdzonych, solidnych dostawców. Niedopełnienie tych zaleceń może skutkować różnymi wadami, np. niejednakowymi wielkościami fazy zbrojącej lub zanieczyszczeniami struktury odlewu, których przykład (w odniesieniu do odlewów kompozytowych) pokazano na rysunku 1. Wykrywanie tych wad odbywać może się z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej lub elektronowej skaningowej, defektoskopii radiologicznej lub ultradźwiękowej, a także tomografii komputerowej.

STRESZCZENIE

Zagadnienie kształtowania jakości wyrobu, jakim jest odlew kompozytowy może odbywać się w oparciu o analizę jego produktów wyjściowych, a także z wykorzystaniem badań niszczących i nieniszczących. Zastosowanie niewłaściwych, słabej jakości substratów przyczynić się może do powstawania nieprawidłowości w całym etapie procesu technologicznego, a także podczas eksploatacji wyrobu. W pracy określono czynniki materiałowe wpływające na jakość tych materiałów wraz ze wskazaniem ich skutków z wykorzystaniem wybranych metod badawczych.

Słowa kluczowe: odlewy kompozytowe; jakość materiałów; metody niszczące i nieniszczące



Rys. 1. Kompozyty metalowe: a) mikrostruktura kompozytu AlSi9/ SiC, różnorodne wymiary i kształt cząstek zbrojenia (SEM); b) ciało obce w zbrojeniu; zanieczyszczenie sferyczne (skład chemiczny Al, Si, Sr, Fe) w kompozycie: włókno glinokrzemianowe – osnowa AlSi11 (SEM).

Fig. 1. Metal composites: a) microstructure of AlSi9/SiC composite, various sizes and shapes of reinforcement particles (SEM); b) foreign body in reinforcement; spherical pollution (chemical composition of Al, Si, Sr, Fe) in the composite: aluminosilicate fiber - AlSi11 matrix (SEM).

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: k.bryll@am.szczecin.pl

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.046

Czynniki materiałowe oddziałujące na jakość odlewów

Materiał na odlewy (rys. 2) powinien być przygotowany zgodnie z instrukcjami lub normami obowiązującymi dla danej grupy materiałów [5-6].







Rys. 3. Wyraźnie widoczne nieciągłości (porowatość) – kolor biały: a) w strukturze obszaru badanego materiału; b) rozkład przestrzenny porowatości w makroobszarze odlewu na podstawie badań tomograficznych, kompozyt: zbrojenie – włókno węglowe, osnowa – AlSi11.

Fig. 3. Clearly visible discontinuities (porosity) - white color: a) in the structure of the area material tested; b) Spatial distribution of porosity in the macro-area of the casting based on tomographic tests, composite: reinforcement - carbon fiber, matrix - AlSi11.

Właściwości stopów związane z ich stanem ciekłym, tj. lejność, skurcz odlewniczy, skłonność do pochłaniania gazów (powodująca pojawianie się porowatości- rys.3), powstawanie wtrąceń niemetalicznych, w istotny sposób mogą przyczynić się do zapewnienia jakości gotowego wyrobu [1]. Wykrywanie tych wad odbywać może się z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej lub elektronowej skaningowej, defektoskopii radiologicznej (rys. 4) lub ultradźwiękowej, a także emisji akustycznej, porozymetrii rtęciowej, tomografii komputerowej.



Rys. 4. Rzadzizny; kompozyt: zbrojenie – włókno glinokrzemianowe, osnowa: AlSi11; a – struktura kompozytu (badania makroskopowe), b – ten sam kompozyt – obraz cyfrowy z radiogramu (defektoskopia radiologiczna).

Fig. 4. Microshrinkage; composite: reinforcement - aluminosilicate fiber, matrix: AlSi11; a - structure of the composite (macroscopic examination), b - the same composite - digital image from the radiograph (radiographic defectoscopy).



Rys. 5. Zależność prędkości rozchodzenia się fali (a) i współczynnika tłumienia (b) od gęstości materiału kompozytowego. **Fig. 5.** The dependence of the wave propagation velocity (a) and the attenuation coefficient (b) on the density of the composite material.

W przypadku odlewów kompozytowych materiały te stanowią osnowę wyrobu i podlegają zasadom obowiązującym dla klasycznych stopów odlewniczych. Ważne jest jednak, przedstawiono na rysunku 7. aby w przypadku kompozytów mogło dojść do dobrego, wzajemnego połączenia między metalem (lub stopem) jako osnową i zbrojeniem, bowiem warunkuje to powstanie kompozytu. Do oceny jednorodności struktury może być przydatna defektoskopia ultradźwiekowa. Ciągłość struktury materiału kompozytowego obrazuje rys. 5.

Osnowa zatem musi mieć odpowiednie cechy istotne dla pracy kompozytu: gęstość, wytrzymałość, plastyczność, przewodność cieplną i elektryczną, temperaturę pracy, odporność korozyjną i właściwości magnetyczne. Spełnia ona następujące zadania [1-2, 7]:

- 1) spaja zbrojenie,
- 2) umożliwia przenoszenie naprężeń na zbrojenie,
- 3) decyduje o właściwościach chemicznych i cieplnych kompozytu,
- 4) nadaje żądany kształt wyrobom.

Jako osnowę metalową stosuje się najczęściej stopy (w tablicy 1 przedstawiono wybrane właściwości tych materiałów): aluminium, magnezu, tytanu, ołowiu, cynku, srebra, niklu i miedzi. Stopy te można podzielić na cztery grupy [7-8]:

- 1) stopy metali lekkich (Al, Mg) dzięki niskiej gęstości właściwej, niskiej temperaturze topnienia i stosunkowo łatwej technologii przeznaczone są do wytwarzania kompozytów stosowanych w lotnictwie i przemyśle samochodowym.
- 2) stopy srebra i miedzi są osnową kompozytów wykazujących dobre właściwości cieplne i elektryczne;
- 3) stopy niklu stanowią osnowę kompozytów żarowytrzymałych wytwarzanych najczęściej w procesach kierunkowej krystalizacji (łopatki turbin);
- 4) stopy ołowiu i cynku to osnowy kompozytów o dobrych właściwościach ślizgowych.

Duży wpływ na jakość odlewów (tak w przypadku odlewów z materiałów klasycznych, jak i odlewów kompozytowych) mają zanieczyszczenia ciekłego metalu lub stopu (osnowy w przypadku odlewów kompozytowych). Zanieczyszczenia te można podzielić w sposób pokazany na rysunku 6.

Zanieczyszczeniami są wszystkie pierwiastki i związki znajdujące się w ciekłym metalu wbrew zamierzeniom technologicznym [6, 9-10]. Przedostają się one do metalu różnymi drogami. Źródła zanieczyszczeń ciekłego metalu



Rys. 6. Podział zanieczyszczeń ciekłego metalu ze względu na ich rodzaj i postać występowania [6].

Fig. 6. Distribution of liquid metal impurities due to their type and form [6].



Rys. 7. Źródła zanieczyszczeń ciekłego metalu [6]. Fig. 7. Sources of liquid metal pollution [6].

Jeżeli nie zostaną usunięte zanieczyszczenia w procesie metalurgicznym, a także w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących pomiędzy metalem a otaczającym go ośrodkiem, może się zmieniać początkowy skład chemiczny metalu lub stopu (osnowy) oraz ilość zanieczyszczeń. Ma to również wpływ na przebieg krzepnięcia i właściwości skrzepłego metalu. Właściwa jakość wsadu jest pierwszym z czynników zapewniających odpowiednie parametry metalu (lub stopu), a w kompozytach: osnowy.

W przypadku odlewów kompozytowych należy omówić jeszcze materiał zbrojący. Zbrojenie musi mieć następujące właściwości: odpowiednią gęstość, wytrzymałość, sztywność,

140. 1. 111	ab. 1. Thysical and incentation properties of inetials and some anoys used for the matrix of composite materials [0].							
Materiał	Ciężar właściwy g/cm³	Temp. topnienia °C	Moduł sprężystości GPa	Współczynnik Poissona	Wytrzymałość na rozciąganie MPa	Twardość HB	Rozszerzalność cieplna α 10 ⁻⁶ /K	Przewodność cieplna λ W/(m*K)
Al	2,70	660	75	0,35	70-190	15-20	26,2	201
AlSi11	2,6	577	7	0,35	10	55	20,1	174
AlCu4Ti	2,71	650	7	0,35	330	90	25,4	125
Mg	1,74	649	-	0,40	250	35	26,0	134
Ti	4,40	1670	100	0,33	550	260	8,6	19,3
Ag	10,5	960	0	-	125	25	1,7	423
Pb	11,3	327	15,9	0,50	12	3	2,5	34,9
Zn	7,1	419	-	0,35	12 – 16	33 - 35	13,0/63,0	129
Ni	8,9	1452	-	0,3	440	90	13,0	92

Tab. 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne metali oraz niektórych stopów stosowanych na osnowy materiałów kompozytowych [8]. allows used for the matrix of comr Tab 1 Physical and m chanical pr portion of motals and some

Materiał	Gęstość kg/m³	Temperatura topnienia K	Ciepło właściwe kJ/(kgK)	Współczynnik przewodności cieplnej W/(mK)	Mikrotwardość HV	Współczynnik rozszerzalności cieplnej α 10 ⁻⁶ /Κ
MgO	350	3073	2,09	34,2	9–11	15,6
Al ₂ O ₃	3970	2327	1,09	30,2	10-12	5,4
TiO ₂	4240	2113	0,4	6,3	7-19	10
SiO ₂	2320	2011	0,75	1,7	7,5–12	7,5
ZrO ₂	5560	2900	0,46	1,6	16	7-10
SiC(β)	3200	-	1,0	45-450	21-37	3
TiC	4900	3140	0,42	36	1-32	7,4-9,3
C (grafit)	2250	-	1,63	11,6–175	-	-
BN(a)	2270	3023	0,92	14,3	0	0,2
Si ₃ N ₄	310	1900	4	7	33	2,75

Tab. 2. Właściwości niektórych materiałów stosowanych na zbrojenie [7]. Tab. 2. Properties of some materials used on reinforcement [7].

rozszerzalność cieplną, zdolność tworzenia właściwego połączenia z osnową, odporność na destrukcyjne działanie metalu osnowy, stabilność właściwości wytrzymałościowych i brak przemian fazowych w temperaturze pracy. Właściwości niektórych materiałów stosowanych na zbrojenie przy wytwarzaniu odlewów kompozytowych przedstawiono w tabeli 2. Zbrojenie oddziałuje zazwyczaj tylko fizycznie na osnowę i ma następujące zadania:

- poprawia określone właściwości mechaniczne i (lub) użytkowe wyrobu,
- 2) niekiedy zmniejsza koszt wsadu surowcowego (dotyczy to napełniaczy proszkowych).

Najczęściej stosowane materiały na zbrojenie, to: bor, węgiel (grafit), ceramika (SiC, Al2O3), B4C, Si3N4, AlN, TiC, TiB2 i stal.

Tab. 3. Metody badawcze służące do opisu struktury odlewów z metalowych materiałów kompozytowych.

Tab. 3. Research methods used to describe the structure of castings of metal materials composite.

Metody nieniszczące	Metody niszczące		
	Mikroskopia świetlna		
	Mikroskopia konfokalna		
Defektoskopia radiologiczna	Mikroskopia elektronowa skaningowa		
	Mikroskopia sił atomowych		
Defektoskopia ultradźwiękowa	Mikroanaliza rentgenowska		
Tomografia komputerowa	Porozymetria rtęciowa		
Emisja akustyczna	Dyfrakcja rentgenowska		

3. Podsumowanie

Ocena jakości gotowych odlewów z materiałów klasycznych i odlewów z kompozytów metalowo-ceramicznych może być przeprowadzona przy wykorzystaniu różnorodnych metod niszczących i nieniszczących. W tabeli 3 wskazano podstawowe metody badawcze stosowane do opisu struktury odlewów z metalowych materiałów kompozytowych. Szczegółowy opis tych metod został przedstawiony w pracach autorów [3,7,11] W niniejszym artykule zaprezentowano tylko częściowy opis tych metod ze względu na ograniczenia edytorskie. W dalszych pracach autorzy skoncentrują się nad kompleksową diagnostyką omawianych tworzyw, co będzie przedstawione w kolejnych artykułach.

4. Literatura/References

- Sobczak J.: Teoretyczne i praktyczne podstawy procesu prasowania w stanie ciekłym (squeeze casting) metali nieżelaznych. Prace Instytutu Odlewnictwa nr 41, Kraków 1993.
- [2] Konopka Z.: Metalowe kompozyty odlewane. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011.
- [3] Gawdzińska K.: Materiałowo-technologiczne uwarunkowania jakości odlewów z metalowych materiałów kompozytowych. Archives of Foundry Engineering, Komisja
- [4] Odlewnictwa PAN, Katowice–Gliwice 2012.
- [5] Sobczak J., Sobczak N., Asthana R., Wojciechowski A., Pietrzak K., Rudnik D.: Atlas of cast metal-matrix composites structures. Motor Transport Institute – Warsaw & Foundry Research Institute – Cracow, 2007.
- [6] Sobczak J., Sobczak N., Wojciechowski A., Pietrzak K., Rudnik D.: Atlas struktur kompozytów metalowych. Wydawnictwo Instytutu Transportu Samochodowego, Warszawa 2004.
- [7] Gawdzińska K., Chybowski L., Przetakiewicz W.: Study of Thermal Properties of Cast MetalCeramic Composite Foams. Archives of Foundry Engineering 17, 4, 2017, 44–50.
- [8] Łybacki W., Modrzyński A., Szweycer M.: Technologia topienia metali. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1986.
- [9] Łybacki W., Zawadzka K.: Wspomaganie diagnostyki wad odlewów narzędziami zarządzania jakością. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji 28 (1), 2008, 89–101.
- [10] Szweycer M.: Metalurgia. Skrypt nr 1735. Politechnika Poznańska, Poznań 1993.
- [11] Gawdzińska K., Grabian J., Pędzich J., Przetakiewicz W.: Description of selected structural elements of composite foams using statistical methods. Archive of Foundry Engineering 11, Special Issue 2, 2011, 53–58.

Grzegorz Psuj, Michał Maciusowicz* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Wykorzystanie zależnej od czasu widmowej reprezentacji sygnału szumu Barkhausena na potrzeby nieniszczącej oceny elementów stalowych

The use of time-dependent spectral representation of Barkhausen noise signal for the needs of non-destructive evaluation of steel elements

ABSTRACT

The scope of applications of the magnetic Barkhausen noise observation (BN) method for non-destructive testing of the state or properties of magnetic materials is constantly increasing. Due to the stochastic nature of the Barkhausen effect, it is necessary to use advanced methods of analysis in order to quantify the observed relationships. Many factors can affect the various properties of BN signals expressed in the domain of time and frequency. Therefore, observation of changes in the dynamics of this phenomenon requires the analysis of both representations during the process of extraction of features. For this reason, it is preferable to use methods for transforming signals into time-frequency (*tf*) representations. In this article, a Short-Time Fourier Transform (STFT) was used to combine information provided in time and frequency. The analysis of *tf* representations of BN signals obtained for steel samples representing various degrees of damage was performed and the results were presented.

Keywords: Magnetic Barkhausen Noise; spectral analysis; STFT; nondestructive testing

1. Wstęp

Wiele budowli powstających obecnie jest zbudowanych ze stali ferromagnetycznych. Jak wiadomo istnieje ścisłe powiązanie pomiędzy właściwościami mechanicznymi, a magnetycznymi tych materiałów [1]. Fakt ten pozwala na nieniszczące badanie stali przy użyciu metod magnetycznych. Jedną z nich jest metoda wykorzystująca zjawisko magnetycznego szumu Barkhausena (ang. Magnetic Barkhsuen Noise, MBN) [2,3]. Zjawisko to zaobserwować można w wyniku oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego na badany element stalowy. Najczęściej jako przetwornik stosowana jest cewka nawinięta na rdzeń ferromagnetyczny, w którym wytwarzany jest strumień magnetyczny [4]. Cewka ta jest przykładana do materiału i obwód magnetyczny staje się quasi-zamknięty, co powoduje namagnesowanie się próbki. Wraz ze zmianą kierunku płynięcia zmiennego prądu w obwodzie cewki wzbudzającej następuje zmiana kierunku magnesowania. W wyniku tego dochodzi

STRESZCZENIE

Zakres zastosowań metody obserwacji magnetycznego szumu Barkhausena (BN) do nieniszczącego badania stanu lub właściwości materiałów magnetycznych stale rośnie. Z uwagi na stochastyczną naturę efektu Barkhausena niezbędne staje się użycie zaawansowanych metod analizy w celu ilościowej oceny obserwowanych zależności. Wiele czynników może wpływać na różne właściwości sygnałów BN wyrażanych w dziedzinie czasu i częstotliwości. Dlatego też obserwacja zmian dynamiki tego zjawiska wymaga analizy obu reprezentacji podczas procesu ekstrakcji cech. Z tego powodu korzystne staje się stosowanie metod transformacji czasowo-częstotliwościowych (*tf*) sygnałów. W tym artykule, w celu połączenia informacji dostarczonych w czasie i częstotliwości, zastosowano krótkoczasową transformatę Fouriera (STFT). Przeprowadzono analizę uzyskanych reprezentacji *tf* sygnałów BN otrzymanych dla próbek stalowych o różnym stopniu zniszczenia i przedstawiono wyniki.

Słowa kluczowe: zjawisko szumu Barkhausena;, analiza spektralna; krótkoczasowa transformacja Fouriera; badania nieniszczące

do przemiany układu domen magnetycznych znajdujących się w testowanym materiale. W przypadku wystąpienia niejednorodności struktury krystalicznej ferromagnetyka swobodny przebieg tej modyfikacji jest blokowany, a cały proces zachodzi skokowo. W konsekwencji nieciągłe przemiany struktury domenowej powodują lokalne zaburzenia indukcji magnetycznej, które można następnie obserwować przy użyciu czujników pomiarowych. Takim elementem jest cewka zbierająca szum pochodzący z materiału. Ze względu na wpływ wielu czynników na intensywność powstawania przeszkód ograniczających proces przemiany domenowej, efekt Barkhausena znajduje zastosowanie do badania zarówno makro-, jak i mikrostruktury materiałów, w tym do badania stanu naprężeń, określania faz materiału czy poziomu utwardzenia. Zjawisko Barkhausena ma stochastyczny charakter. Dlatego też, w celu parametryzacji sygnałów pomiarowych, wymagane jest zastosowanie metod ich przetwarzania i analizy. Najczęściej operacje te odbywają się w dziedzinie czasu. W wyniku tych działań uzyskuje się wiele parametrów charakterystycznych i statystycznych dla

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.047

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: michal.maciusowicz@zut.edu.pl

sygnałów, takich jak wartość skuteczna RMS, energia czy liczba impulsów [5,6]. Charakterystyka częstotliwościowa mierzonych sygnałów jest również wykorzystywana, szczególnie przy ocenie zmian właściwości w warstwie przypowierzchniowej materiału. Niemniej jednak te metody analizy nie dostarczają pełnej informacji pochodzącej z testowanego materiału. Aktywność szumu MBN zmienia się w trakcie okresu jego występowania. Co więcej, dynamika tego zjawiska zależy od wielu czynników. W efekcie, pojawia się potrzeba analizy reprezentacji sygnałów w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. W celu uzyskania większej ilości informacji zastosowanie znaleźć mogą zaawansowane metody cyfrowego przetwarzania sygnału. W tym celu stosuje się analizę zmian widma sygnału w kolejnych odcinkach czasu. Analiza ta obejmuje różne metody transformacji pozwalające na definicję reprezentacji typu czas-skala ts (reprezentacja wielorozdzielcza) [7] lub czas-częstotliwość tf (reprezetnacja wielowidmowa) [8]. Przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera można uzyskać reprezentacje sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej [8]. Wykorzystanie reprezentacji czasowo-częstotliwościowej znajduje wiele zastosowań np.: do analizy tonalnej dźwięków audio [9] lub do analizy sygnałów pochodzących z badania elektromiograficznego [10]. Transformacja stosowana jest również do analizy i rozpoznawania mowy [11]. W niniejszym artykule zaprezentowano podejście ilościowego opisu reprezentacji czasowo-częstotliwościowej do analizy sygnału szumu Barkhausena na potrzeby oszacowania stanu naprężeń w stalowych próbkach.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego. Fig. 1. Diagram of the measurement system.

2. Eksperyment

Eksperyment wykonano na próbkach ze stali konstrukcyjnej St3S, które poddano statycznemu rozciąganiu. Granica plastyczności tej stali mieści się w przedziale 185-235 MPa, a granica wytrzymałości na zerwanie w przedziale 340-520 MPa. Informacja o zachodzących zjawiskach w materiale była zbierana przy pomocy przetwornika umieszczonego tuż nad badanym elementem. Przetwornik pomiarowy składał się z: cewki magnesującej badane materiały i cewki pomiarowej. Próbki były rozciągane przy użyciu maszyny hydraulicznej, dzięki czemu uzyskano wartości naprężeń w zakresie od 0 MPa (stan przed oddziaływaniem siły) do 350 MPa. Pomiary wykonywano w trakcie oddziaływania zadanej siły. Schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Wykonano pomiar dwóch próbek SW1 i SW2. W przypadku próbki SW1 uzyskano maksymalną wartość naprężenia równą 200 MPa, a w przypadku drugiej próbki 350 MPa.

3. Analiza reprezentacji czasowoczęstotliwościowej sygnałów MBN

Analiza sygnału przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera (z ang. Short-Time Fourier Transform – STFT) pozwala na jednoczesną analizę sygnału w czasie i częstotliwości. Obliczenia realizowane są poprzez dzielenie sygnału na partie składające się z N–liczby próbek (okna sygnału), a następnie poprzez wykonywanie na tym zestawie próbek szybkiej transformacji Fouriera FFT. Po złączeniu otrzymanych reprezentacji i poddaniu ich operacji tworzącej spektrogram otrzymuje się zmianę widma sygnału w czasie $S_{\rm BN}(t,f)$.

Na rys. 2 zaprezentowano przykładowe spektrogramy BN_{TF S} = $|S_{BN}(t,f)|$ 2 szumu Barkhausena uzyskane w trakcie badań próbek przy różnym poziomie zadanych naprężeń.



Rys. 2. Spektrogramy sygnału szumu Barkhausena dla próbki SW2 przy naprężeniach: a) 0 MPa b) 160 MPa, c) 350 MPa; wszystkie wartości znormalizowano.

Fig. 2. Spectrograms of Barkhausen Noise signal obtained for SW2 sample at stress: a) 0 MPa, b) 160 MPa c) 350 MPa; all results were normalized.

Jak można zauważyć, widmo sygnału w czasie zmienia się wraz ze zmianą naprężenia. Przed procesem obciążania badanej próbki gęstość widmowa osiąga stosunkowo niskie wartości, a jej rozkład jest raczej jednorodny w większości płaszczyzny tf. Następnie rośnie aktywność w zakresie niskich częstotliwości (do 10 kHz) i blisko początku okresu występowania sygnału MBN (rys. 2.b). Natomiast dla poziomu naprężeń zbliżonego do stanu granicznego można zaobserwować przesunięcie największej aktywności na osi czasu w kierunku przedziału czasowego odnoszącego się do wystąpienia maksimum pola magnesowania (rys. 2.c). W celu liczbowego wyrażenia informacji zawartej w spektrogramie należy przeprowadzić analizę i ekstrakcję cech uzyskanych rozkładów [8]. W wyniku analizy otrzymano zestawienie 36 cech. Przebieg wybranych parametrów w funkcji naprężenia został przedstawiony na rys. 3. Parametr BN_{TF S KURT} reprezentuje standardowy parametr statystyczny - kurtozę
$$BN_{TFSKURT} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left(BN_{TFS_{i,j}} - BN_{TFSMEAN} \right)^{+}}{N \cdot M \cdot BN_{TFSD}^{4}}$$
(1)

gdzie: BN_{TF S MEAN} to wartość średnia, a BN_{TF S SD} to standardowe odchylenie rozkładu spektrogramu BN_{TF S'}

Parametr ten opisuje rozkład punktów w spektrogramie względem ich wartości średniej. Kolejnym zaprezentowanym parametrem jest pole powierzchni (BN_{TF E AREA}) obwiedni spektrogramu BN_{TEF}, określonej na podstawie wartości górnej granicy zakresu występowania szumu w danym odcinku czasu [8]. Parametr BN_{TF E AREA} związany jest ze zmianą szerokości pasma częstotliwościowego sygnału w czasie. Wraz ze zmianą naprężenia zmienia się wyraźnie wartość pola powierzchni obwiedni. Wartość tego parametru świadczy o poziomie koncentracji spektrogramu. Natomiast parametr $\mathrm{BN}_{_{\mathrm{TF\,IMIN}}}$ odnosi się do wartości minimalnej części urojonej transformaty $\mathfrak{I}(S_{BN(t,f)})$. Parametry te względem siebie mają różne trendy, ale w przypadku obu próbek są one zachowane, co świadczy o powtarzalności otrzymanych obserwacji. Dla porównania jakości informacji niesionej przez reprezentację czasowo-częstotliwościową otrzymane rozkłady parametrów porównano z rozkładem wartości skutecznej szumu MBN (BN_{RMS}).



Rys. 3. Parametry obliczone w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej i w dziedzinie czasu.

Fig. 3. Parameters in time-frequency representation and in time domain.

4. Wyniki i dyskusja

Parametry reprezentacji czasowo-częstotliwościowej charakteryzują się monotoniczną zmianą (z wyłączeniem wyników uzyskanych dla próbki nieobciążonej). W przypadku przebiegu BN_{RMS} zauważyć można wzrost parametru w zakresie do ok. 200 MPa, po czym następuje jego spadek, by od 300 MPa ponownie niewiele wzrosnąć. Otrzymane charakterystyki reprezentacji *tf* stwarzają zatem większą szansę na poprawną identyfikację stanu badanego materiału. Nie mniej jednak niezbędne jest przeprowadzenie szerszego eksperymentu obejmującego większą liczbę badanych elementów i szerszą bazę uzyskanych parametrów.

5. Literatura/References

- D. Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", CRC, Press, 2015
- [2] K. Miesowicz, W J. Staszewski, T. Korbiel, "Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection", International Journal of Fatigue, vol. 83, 2016, pp. 109-116
- [3] L. Piotrowski, B. Augustyniak, M. Chmielewski, Z. Kowalewski, "Multiparameter analysis of the Barkhausen noise signal and its application for the assessment of plastic deformation level in 13HMF grade steel", Measurement Science and Technology, vol. 21, 2010, 115702, 7pp, DOI:10.1088/0957-0233/21/11/115702
- [4] P. Lopato, G. Psuj, M. Herbko, M. Maciusowicz, "Evaluation of stress in steel structures using electromagnetic methods based on utilization of microstrip antenna sensor and monitoring of AC magnetization process", Inf. Cntrl Meas. Econ. Environ, vol. 6, No. 4, 2016, pp. 32-36, DOI: 10.5604/01.3001.0009.5186
- [5] X. Kleber, A. Vincent, "On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel". NDT & E International, vol. 37, no. 4, pp. 439-445, Sept. 2004, DOI: 10.1016/j.ndteint.2003.11.008
- [6] S. Ding, G. Tian, G. Dobmann, P. Wang, "Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for VOLUME XX, 2017 9 applied stress determination", J. Magn. Magn. Mat., vol. 421, pp. 225-229, Jan. 2017, DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.08.030
- [7] C. Kownacki, "Wavelet Analysis of Barkhausen Noise in Reconstructing Distributions of Residual Stress", Solid State Phenomena, vol. 144, pp. 112-117, Sept. 2008, 10.4028/www. scientific.net/SSP.144.112
- [8] G. Psuj, M. Maciusowicz, "Analysis of time-frequency representation of Magnetic Barkhausen Noise for the need of damage evaluation of steel elements" IEEE Xplore, 2018.
- [9] T. J. Wilczyński, L. Gelman, P. Kleczkowski, "Spectral Features of the clarinet sound revealed by the set of STFT-Based parameters". 18th World Converence on Nondestructive Testing, 16-20 Apr 2012, Durban, South Africa. Available on 15th Aug. 2018: https://www.ndt.net/article/wcndt2012/ papers/479_wcndt final00479.pdf
- [10] A. Tsai, J. Luh, T. Lin, "A novel STFT-ranking feature of multichannel EMG for motion pattern recognition", Expert System with Applications, vol. 42, no.7, pp. 3327-3341, May 2015, DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.044
- [11] K. Paliwal, Leigh D. Alsteris, "On the usefulness of STFT phase spectrum in human listening test". Speech Communication, vol. 45, no. 2, pp. 153-170, Feb. 2005, DOI: 10.1016/j. specom.2004.08.001

Bogdan Zając*

Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock - Świerk

Badania elementów techniki Jądrowej na podstawie wizualnej oceny uszkodzeń pochwy elementu paliwowego

Research on elements of Nuclear technology based on a visual assessment of vaginal damage to a fuel element

ABSTRACT

Due to the threat to the health and life of people working in nuclear facilities, high demands are placed on the quality and reliability of the construction, construction and operation of the elements of nuclear technology. Many of these elements undergo periodic and ad hoc testing of many non-destructive testing methods. Most often the latest techniques are used for research, often in very complex systems. However, the visual method is still widely used. Devices with image recording and ordinary optical systems are used. In Poland, where we do not yet have an energy reactor and only a research reactor, modern techniques for visual evaluation of elements of nuclear technology are also used.

Keywords: nuclear power, visual testing

1. Wstęp

Ze względu na zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi pracujących w obiektach jądrowych postawione są wysokie wymagania co do jakości i niezawodności budowy, konstrukcji i przebiegu eksploatacji elementów techniki jądrowej. Wiele tych elementów poddanych jest okresowym i doraźnym badaniom wieloma metodami badań nieniszczących. Do badań zastosowane są najczęściej najnowsze techniki, często w bardzo skomplikowanych układach. Nadal jednak metoda wizualna jest szeroko stosowana. W referacie przedstawię kilka przykładów badania elementów konstrukcji, urządzeń i elementów elektrowni jądrowych w tym:

- 1) przegląd stalowej okładziny betonowej osłony reaktora GINNA,
- 2) przegląd prętów paliwowych mocowanych w reaktorze
- 3) ocena wizualna powierzchni koszulki elementu paliwowego.

2. Przegląd stalowej okładziny betonowej osłony reaktora GINNA

Przepisy dotyczące zabezpieczeń komercyjnych elektrowni jądrowych wymagają od elektrowni , aby okresowo sprawdzały całą powierzchnię obudowy bezpieczeństwa reaktora.

Elektrownia jądrowa Rochester Gas & Electric GINNA, zlokalizowana w Ontario, w stanie Nowy Jork nad jeziorem

STRESZCZENIE

Ze względu na zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi pracujących w obiektach jądrowych postawione są wysokie wymagania co do jakości i niezawodności budowy, konstrukcji i przebiegu eksploatacji elementów techniki jądrowej. Wiele tych elementów poddanych jest okresowym i doraźnym badaniom wieloma metodami badań nieniszczących. Do badań zastosowane są najczęściej najnowsze techniki, często w bardzo skomplikowanych układach. Nadal jednak metoda wizualna jest szeroko stosowana. Zastosowane są urządzenia z rejestracją obrazu i zwykłe układy optyczne. W warunkach Polski, gdzie nie posiadamy jeszcze reaktora energetycznego, a jedynie reaktor badawczy, również stosowane są nowoczesne techniki wizualnej oceny elementów techniki jądrowej.

Słowa kluczowe: energetyka jądrowa; badania wizualne

Ontario składa się z ciśnieniowego reaktora wodnego (PWR) i dwóch wytwornic pary. Betonowa konstrukcja zabezpieczająca ma ponad 30 lat (Rys. 1).



Rys. 1. Kopuła bezpieczeństwa reaktora elektrowni jądrowej GINNA.

Fig. 1. Safety dome of the reactor of the GINNA Nuclear Power Plant.

Kopuła o promieniu wewnątrz 55' (~17 m). na powierzchni około 12 000 stóp kw. (ok. 1115 m²) od wewnątrz pokryta była blachą stalową, którą należało sprawdzić.

Ponieważ badania te wymagają określenia ogólnego stanu mechanicznego i strukturalnego elementów, zgodnie z ASME Sekcja XI Podrozdział 1 ustalono dla tego typu

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.048

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: b.zajac.pl@gmail.com

badań, poziom czułości VT-3. Oznacza to, że badania wymagają wykrycia artefaktów o wymiarze 0.105' (ok. 2,7 mm). W przypadku stwierdzenia podejrzanych wskazań, należy wykonywać dodatkowe ekspozycje, stosując większe zbliżenia. Dla dodatkowych badań przyjęto poziom czułości VT-1 wg ASME Sekcja XI Podrozdział 1 [2]. Wymaga się wówczas wykrycia artefaktów o wymiarze 0.044' (ok. 1,1 mm).

Do oceny stanu technicznego zdecydowano się wykorzystać fotoaparat wyposażony w obiektyw o zmiennej ogniskowej 600 mm. Fotoaparat ustawiono w środku półkolistej kopuły, wykorzystując do tego celu suwnicę. (Rys 2). Na statywie fotoaparatu zamocowano dwa reflektory halogenowe o mocy 750 W, pozwalają one na doświetlenie obserwowanej powierzchni. Na statywie zamocowano również 2 wskaźniki laserowe (czerwone) ułatwiające kalibrację przestrzenną na powierzchni kopuły. Na każdym ze zdjęć ukazany został obszar o powierzchni (3 x 4') 12 stóp kwadratowych (912 x 1219 mm).



Rys. 2. Usytuowanie kamery do badań kopuły. **Fig. 2.** The location of the camera for the dome's inspection.

Badania można było przeprowadzić tylko w ściśle określonym terminie (przegląd okresowy - co 10 lat) i przez ograniczony czas (40 godzin).

Aby spełnić wymagania czasowe napisano specjalne oprogramowanie sterujące pozycją aparatu na statywie. Oprogramowanie pozwalało na krokowe obracanie fotoaparatu w taki sposób, aby wykonać panoramę całego obwodu kopuły (360°), za każdym obrotem podnosząc obiektyw o ustalony kąt, aż do 90°. Dodatkowo uwzględniono 10% zachodzenia obrazów na siebie. Zdjęcia rejestrowane były na zewnętrznym dysku twardym i wyświetlane na zewnętrznym monitorze.

Kontroler obserwując otrzymane zdjęcia na monitorze, zatwierdza wynik. W przypadku problemów z interpretacją, kontroler zaznacza zdjęcie do powtórzenia z większym powiększeniem (poziom VT-1).

W sumie wykonano 1 253 zdjęć w ciągu 11 godzin. Znacznie skróciło to i ułatwiło ocenę stanu kopuły przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów. System podlega nadal ciągłej modernizacji.

Po bardzo udanej inspekcji stalowej obudowy kopuły Elektrowni Jądrowej GINNA, wykonano trójwymiarowy model kopuły. System skanowania powierzchni kopuły przedstawiono na Rys. 3. Ponadto, zdecydowano się użyć tego samego systemu obrazowania i protokołu przechwytywania danych dla zewnętrznej powierzchni budynku obudowy bezpieczeństwa dla innych elektrowni tego typu.



Rys. 3. System skanowania powierzchni kopuły [1]. **Fig. 3.** Dome surface scanning system [1].

3. Przegląd prętów paliwowych mocowanych w reaktorze

W elektrowni Jądrowej Palo Verde w pobliżu Phoenix w Arizonie [3] w czasie wymiany prętów paliwowych (Rys.4) stwierdzono, że jednego zespołu paliwowego nie można zdemontować ze względu na jego zablokowanie w dolnej kratownicy płyty ustalającej pozycję prętów. Deformacja ta powstała w na skutek niedokładnie przeprowadzonego poprzedniego montażu zespołu prętów paliwowych.



Rys. 4. Zestaw prętów paliwowych w suchym basenie transportowym [3]. **Fig. 4.** Set of fuel rods in a dry transport pool [3].

Naprawę zdeformowanej kratownicy przeprowadzono pod wodą, za pomocą specjalistycznego robota wyposażonego w manipulatory, pod nadzorem specjalnie do tego celu skonstruowanego zespołu kamer.

Trudne i czasochłonne prace związane z naprawą panelu okazały się również bardzo drogie. Spowodowały one również przedłużenie czasu przestoju reaktora, zagrożenie dla załogi obsługującej manipulatory (narażenie na pochłonięcie zwiększonej dawki promieniowania) oraz uszkodzenie (pogorszenie jakości obrazu) części kamer obserwujących przebieg prac [4].

Organ Nadzoru Jądrowego nakazał sprawdzenie, czy w pozostałych podzespołach nie doszło do podobnych uszkodzeń oraz zarekomendował wizualny nadzór nad ich ponownym montażem w reaktorze.

Firma Everest VIT, Inc. dostarczyła wodoszczelne kamery CCD o wysokiej rozdzielczości z obiektywem zmiennoogniskowym o regulowanym pochyleniem i obrotem (panoramą) (Rys. 5). Firma dostarczyła również robota ROVVER 4.0, z kolorowym przetwornikiem obrazu CCD, sterowany elektrycznie cienkim kablem z kevlaru (Rys. 6).

Rys. 5. Kamera Ca -Zoom. Fig. 5. Camera Ca-Zoom.



Rys. 6. Robot ROVVER 4.0. **Fig. 6.** Robot ROVVER 4.0.

Zespół prętów paliwowych został wyciągnięty ze zbiornika na wysokość około 2m (Rys. 7).

Dwie kamery Ca-Zoom na przeciwległych rogach zestawu paliwowego dokonywały przegląd krytycznego rejonu. Jednocześnie robot ROVVER poruszał się poniżej zestawu dokonując przegląd od spodu.

Przegląd dokonany z wykorzystaniem kamer z zoomem, pozwolił na szczegółowe badanie krytycznych obszarów z dużej odległości z wyjątkowo dobrą jakości obrazu .

Przegląd przeprowadzany za pomocą kamer i robota skrócił czas badań do 30 minut, był bezpieczny dla obsługi i znacznie ograniczał wielkość dawki pochłoniętej przez aparaturę.

Realizując zalecenia Organu Nadzoru Jądrowego, skonstruowano System Zdalnego Monitoringu Zestawu Paliwowego składający się z 14 kamer. 7 kamer znajdowało się w powietrzu i 7 znajdowało się w wodzie. Kamery w powietrzu zapewniały dokładną lokalizację zestawu prętów paliwowych nad zbiornikiem reaktora oraz umożliwiały dobrą widoczność operatorowi suwnicy. Kamery pod wodą umożliwiały obserwację zestawu prętów paliwowych ze wszystkich stron, ze szczególnym uwzględnieniem zobrazowania prętów naprowadzających. Wszystkie kamery podłączone zostały do monitorów znajdujących się w sterowni reaktora.



Rys. 7. Zestaw prętów paliwowych wyciągnięty ze zbiornika reaktora [4].

Fig. 7. A set of fuel rods removed from the reactor vessel [4].

Zastosowanie mobilnych kamer VIT Ca-Zoom oraz robota ROVVER umożliwiło prawidłowe i szybkie przeprowadzenie montażu (demontażu) prętów paliwowych ze zbiornika reaktora i przede wszystkim zmniejszyło czas zagrożenia ludzi napromieniowaniem.

4. Ocena wizualna powierzchni koszulki elementu paliwowego

Laboratorium Badań Materiałowych NCBJ dostało zlecenie od Zakładu Reaktora MARIA dokonać ocenę stanu powierzchni koszulki elementu paliwowego oraz wykonania pomiarów wymiarów geometrycznych rysy na powierzchni koszulki elementu paliwowego (Rys. 8).

Szczególną uwagę zwrócono na fakt, że dla tego typu elementu bardzo istotna jest, obok długości i szerokości rysy, również jej głębokość.

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics



Rys. 8. Koszulka elementu paliwowego. **Fig. 8.** Coating of the fuel rod.

W większości przypadków podczas badań wizualnych mierzone są jedynie wymiary liniowe: długość i rzadziej szerokość uszkodzeń. Zlecenie pomiaru wymiarów geometrycznych rysy na powierzchni koszulki elementu paliwowego z oceną jej głębokości było wyzwaniem.

Dlatego też szczególnie wiele nadziei pokładano w wykorzystaniu układów pomiarowych stanowiących wyposażenie wideoendoskopu XLG 3 VideoProbe udostępnionego do badań przez firmę Everest VIT Polska.

Badania nieniszczące metodą wizualną powierzchni koszulki elementu paliwowego prowadzono na terenie reaktora MARIA w NCBJ Świerk. Badania prowadzono okiem nieuzbrojonym, mikroskopem cyfrowym Delta Optical Smart (Rys. 9) oraz wideoendoskopem XLG 3 VideoProbe (Rys. 10) z użyciem różnych obiektywów - obiektywem zwykłym, obiektywem pomiarowym stereo oraz obiektywem pomiarowym 3D.



Rys. 9. Mikroskop cyfrowy Delta Optical. **Fig. 9.** Delta Optical digital microscope.

Badania rozpoczęto od przeglądu wzrokowego. Stwierdzono, że: rysa jest długa i o nierównych krawędziach. Usytuowana jest ona na powierzchni zewnętrznej 6-tej rury elementu paliwowego, mniej więcej na środku odległości pomiędzy żebrami dystansującymi. Długość rysy pomierzona zwijaną miarką metalową wynosi około 530 mm.



Rys. 10. Wideoendoskop XLG 3 VideoProbe. **Fig. 10.** Videoendoscope XLG 3 VideoProbe.

Następnie przeprowadzono obserwację rysy za pomocą mikroskopu cyfrowego Delta Optical Smart. Wykorzystując możliwości techniczne mikroskopu przeprowadzano przegląd rysy stosując powiększenie w zakresie 50x-250x. W kilku wybranych miejscach wykonano zdjęcia odcinków rysy. W wyniku tych obserwacji potwierdzono, że materiał w rejonie rysy jest silnie poszarpany, a rysa ma nierówne krawędzie. Wykorzystując oprogramowanie mikroskopu cyfrowego dokonano pomiaru szerokości rysy, która wynosiła od około 0,97 mm do 1,06 mm (Rys. 11).



Rys. 11. Szerokość rysy około 0,97mm (Mikroskop cyfrowy). **Fig. 11.** The width of the scratches is approximately 0.97 mm (Digital microscope).

Następnie przystąpiono do badań za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą stereo. Na podstawie oględzin wzrokowych wybrano miejsca, w którym rysa wydawała się najgłębsza i za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą stereo dokonano w tym miejscu pomiaru ich głębokości (Rys. 12).

Kolejnym etapem badań były pomiary wymiarów geometrycznych rysy za pomocą wideoendoskopu XLG3 VideoProbe z obiektywem do pomiarów metodą 3D. W wybranych punktach pomiarowych oceniono głębokość rysy na około od 0,12 mm do 0,20 mm (Rys. 13). Na rysunku 14 przedstawiono przekrój poprzeczny rysy z pomierzoną głębokością rysy.



Rys. 12. Głębokość rysy w najgłębszym miejscu –metoda stereo (0,33 mm).

Fig. 12. Depth of scratches in the deepest place - stereo method (0.33 mm).



Rys. 13. Pomiar głębokości rysy – metoda 3D (0,20 mm). **Fig. 13.** Depth scratch measurement - 3D method (0.20 mm).



Rys. 14. Przekrój poprzeczny rysy-metoda 3D (0,20 mm). Fig. 14. Cross section scratches - 3D method (0.20 mm).

5. Podsumowanie

Duży postęp, jaki dokonał się w technice badań wizualnych, a szczególnie zdalnych badaniach wizualnych (RVI) pozwala na przeprowadzanie badań w środowiskach o wysokim natężeniu promieniowania, wymagających użycia systemów wideo odpornych na promieniowanie. Systemy te z reguły są kosztowne i wymagają stosowania osłon. Wydarzenia takie jak w Palo Verde oraz w reaktorze GINNA, umożliwiły zaprojektowanie i wykorzystanie specjalnych systemów badań wizualnych. Systemy te wykorzystujące przetworniki CCD o dużych możliwościach powiększania, zapewniły lepszą jakość oglądania, mniejsze nakłady na przeglądy i konserwację elementów elektrowni jądrowej, a szczególnie przyczyniły się do zwiększenia bezpieczeństwa ludzi pracujących przy obsłudze elementów silnie promieniujących.

6. Literatura

- [1] Bruce A. Pellegrino, "Development of a Large-Area Visual Inspection Device for Nuclear Containment Building Inspection" XVII WCNDT Shanghai, China, 2008
- [2] ASME BVPN, Section XI, Division 1, Table IWF-2500-1
- [3] William Ryder, "Remote handling and robotic inspections of Palo Verde reactor vessel internals" NDT.net., Vol.3 No.8; 1999;
- [4] J. J. Serena, "SICOM: On -Site inspection systems" IAEA-TE-1277, pp. 32-40, 2001



Piotr Synaszko¹, Bogdan Zając^{2*} ¹Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa ²Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock - Świerk

Wykrywanie pęknięć w połączeniach nitowanych elementów lotniczych z wykorzystaniem technologii EC Array

Detection of cracks in connections of riveted aircraft elements using EC Array technology

ABSTRACT

STRESZCZENIE Autorzy zaprezentowali wynik badań fragmentów konstrukcji lotniczej

The authors presented the results of tests of fragments of the aircraft structure with damage below the first layer of material. The OLYMPUS set based on the MX2 OMV and EC ARRAY head and comparative MAUS V kit were used for the research. The results, in both cases, are represented by C-type imaging. Interpretation of signals from the internal layers of the structure using traditional A-type imaging is difficult, which affects both for the duration of the implementation and the reliability of the results obtained. The use of C-type imaging makes it easier to interpret and report damage. In addition, the EC Array head, due to its large scanning area, significantly shortens the time of testing. An important element of the article is the presentation of the methodology for the selection of parameters for testing multilayer structures.

Keywords: aviation, eddy currents, EC Array

1. Wprowadzenie

W referacie omówiono badania poszycia samolotu dwoma aparatami. Pierwszy to system MAUS V wyposażony w skaner przesuwający sondę stykową, ołówkową po powierzchni próbki. Drugi to defektoskop OMNISCAN MX EC ARRAY wykorzystujący głowicę wieloprzetwornikową. Należy jednak zwrócić uwagę na rozmiar przetworników. W przypadku skanujących systemów ultradźwiękowych jedno lub wieloprzetwornikowych zwykle rozdzielczość zobrazowania typu C związana jest z rozdzielczością układu skanującego. Oznacza to, że jeśli głowica przemieszcza się w wierszach oddalonych od siebie o 1 mm, to elementarny punkt na skanie posiada rozmiar 1 x 1 mm i jego wartości przyporządkowany jest poziom sygnału zmierzonego w tym obszarze. W przypadku systemu EC ARRAY kształt wskazania na ekranie ze względu na rozmiar przetworników jest bardziej symboliczny.

2. Obiekt badań

Do badań wykorzystano wycinek dolnej powierzchni skrzydła samolotu PZL-130 ORLIK TCII. Elementy podłużnicy wykonane zostały ze stopu AL 2024. Wycinek zawierał naturalne pęknięcie w dolnej warstwie (podłużnicy) (Rys. 1a i 2a) oraz z drugiej strony żebra, na tej samej podłużnicy sztuczną wadę w postaci nacięcia (Rys. 1b i 2b). Wycinek poszycia skrzydła pochodzi z samolotu poddanego pełnoskalowej próbie zmęczeniowej realizowanej w ramach opracowywania programu przejścia z eksploatacji według resursu na eksploatację według stanu technicznego.

z uszkodzeniami znajdującymi się poniżej pierwszej warstwy materia-

łu. Do badań wykorzystano zestaw firmy OLYMPUS oparty na systemie

OMNISCAN MX2 i głowicy EC ARRAY oraz porównawczo, zestaw

MAUS V. Wyniki, w obu przypadkach przedstawiono za pomocą zobra-

zowania typu C. Interpretacja sygnałów pochodzących z wewnętrznych

warstw konstrukcji przy zastosowaniu tradycyjnego zobrazowania typu

A jest utrudniona, co wpływa zarówno na czas realizacji jak i wiarygod-

ność otrzymanych wyników. Zastosowanie zobrazowania typu C ułatwia

interpretację i raportowanie uszkodzeń. Ponadto głowica EC Array ze względu na dużą powierzchnię skanowania znacząco skraca czas realizacji

badań. Istotnym elementem artykułu jest przedstawienie metodologii do-

boru parametrów do badań konstrukcji wielowarstwowych.

Słowa kluczowe: lotnictwo, prądy wirowe, EC Array

3. Badania z wykorzystaniem systemu MAUS V

Najpierw badania wycinka poszycia przeprowadzono wykorzystując System MAUS V [1].

Do powierzchni zewnętrznej próbki (wycinka poszycia) zamocowano skaner i z rozdzielczością 1mm przeprowadzono skanowanie powierzchni sondą stykową. Wynik badań przedstawiono w trybie C. Częstotliwość, przy której wykonano badanie wynosiła 1 kHz. Na Rys. 3 przedstawiono wynik badania próbki. Paleta barw została dobrana tak, aby osiągnąć możliwie wysoki kontrast pomiędzy sygnałem od podłużnic i pęknięciami podłużnicy (ciemno czerwony). Tym niemniej najbardziej wyraźne wskazania pochodzą od pęknięć poszycia, (warstwy zewnętrznej). Jasno brązowo (zaznaczono) widoczne wskazania od wad na drugiej warstwie. Procedura przygotowania systemu do badań była stosunkowo prosta. Wymagała ona wprowadzenia geometrii w postaci punktów ograniczających obszar skanowania, oraz ustawienia parametrów pomiarowych, co odbywa się w sposób zbliżony do badania defektoskopem ręcznym ze zobrazowaniem w trybie A. Czas skanowania elementu wynosi około 3 minuty. Istotnym aspektem praktycznym badania są gabaryty skanera. W przypadku badania

© 2018 Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.049

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: b.zajac.pl@gmail.com

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS



Rys. 1. Wycinek poszycia samolotu PZL-130 ORLIK TCII: a) widok od strony zewnętrznej; b) widok od strony wewnętrznej **Fig. 1.** Fragment of the PZL-130 ORLIK TCII plane: a) view from the outside; b) view from the inside



Rys. 2. Poszycie od strony wewnętrznej: a) pęknięcie naturalne podłużnicy; b) nacięcia mechaniczne podłużnicy

Fig. 2. View of the plating from the inside: a) natural longitudinal fracture; b) mechanical stringer inclinations

niewielkich powierzchni samolotu czas przygotowania skanera jest stosunkowo długi. W sytuacji, gdy badana jest boczna lub dolna powierzchnia samolotu szyna, po której porusza się skaner musi zostać zamocowana za pomocą uchwytów podciśnieniowych, co wymaga dodatkowego osprzętu i przygotowania powierzchni. Z praktycznego punktu widzenia System jest bardzo użyteczny, ale w przypadku stosunkowo dużych powierzchni.



Rys. 3. Wynik badania EC Systemem MAUS V **Fig. 3.** EC test result with the MAUS V System

4. Badania z wykorzystaniem EC ARRAY

W odróżnieniu od systemu MAUS V, OmniScan MX z głowicą EC ARRAY jest urządzeniem, które ze względu na gabaryty lepiej sprawdza się przy badaniu mniejszych powierzchni. Jednak zastosowana głowica EC ARRAY zawiera stosunkowo duże przetworniki, w związku z czym rozdzielczość głowicy w zakresie częstotliwości 1-25 kHz wynosi 2.1 mm.

Do przeprowadzenia badania wycinka dolnej powierzchni skrzydła metodą prądów wirowych niezbędne było określenie szeregu parametrów, w tym optymalnej częstotliwości pracy sond prądowirowych.

Do wyznaczenia najlepszej częstotliwości pracy wykorzystano ogólne wzory stosowane w badaniach metodą prądów wirowych. Posłużono się wzorem na częstotliwość graniczną f_{a} [2]

$$f_g = \frac{503^2}{\mu_r * \sigma * D^2}$$
(1)

gdzie: μ_r - przenikalność magnetyczna względna; σ - przewodność badanego materiału w % IACS; D - grubość badanej próbki [mm].

Częstotliwość graniczna jako wartość teoretyczna odzwierciedla częstotliwość przy której dla danego materiału występuje e-krotny spadek sygnału na głębokości *D*.

Częstotliwość graniczną wyliczono, podstawiając poniższe dane:

- przenikalność magnetyczna względna μ_r, dla stopów aluminium przyjęto do obliczeń 1,
- przewodność elektryczna σ, dla stopu AL 2024 wynosi około 30% IACS,

Ponieważ postawione zadanie dotyczyło badania dolnej (drugiej) warstwy podłużnicy, jako parametr *D* przyjęto całkowitą grubość ścianki (suma grubości obu blach + szczelina powietrzna między nimi - do obliczeń przyjęto *D* = 3 mm) Po podstawieniu danych do wzoru (1) otrzymano $f_g = \frac{503^2}{1*30*3^2} = 937 Hz$ Ponieważ rzeczywiste oddziaływanie prądów wirowych

Ponieważ rzeczywiste oddziaływanie prądów wirowych w głąb materiału jest znacznie większe niż standardowa głębokość wnikania δ , przy analizach należy uwzględniać efektywną głębokość wnikania, którą przyjmuję się jako 3δ . Jednocześnie trzeba uwzględnić fakt, że sygnały przetworników prądowirowych są zarówno funkcją nieciągłości materiałowych, jak i nieciągłości geometrycznych. W celu zapewnienia optymalnych warunków badania trzeba wybrać częstotliwość pracy będącą wielokrotnością częstotliwości granicznej o tzw. stałą roboczą K_a . Najczęściej wartość K_a zawiera się od 1 do 5 [3].

$$1 \le \frac{f}{f_g} \le 5 \tag{2}$$

Następnie sprawdzono, dla jakich częstotliwości pracy wskazania okazały się najlepsze (Tab. 1). W naszym wypadku zdecydowano się wybrać częstotliwość pracy f = 3 kHz.

Tab. 1. Częstotliwość pracy dla różnych wartości stałych roboczych $K_{\rm a}$

Tab. 1. Operating frequency for various values of work constants K_a

Ka	1	2	3	4	5
f pracy [Hz]	937	1874	2811	3748	4685



Rys. 4. Wynik pierwszego skanowania (f = 3 kHz) **Fig. 4.** The result of the first scan (f = 3 kHz)



Rys. 5. Wynik drugiego skanowania (9 kHz) **Fig. 5.** The result of the second scan (9 kHz)

Po wyliczeniu optymalnej częstotliwości pracy głowicy przystąpiono do procedury skalowania zgodnie z zaleceniami producenta.

Przygotowanie systemu do badania wymaga przeprowadzenia procedury. Pierwszym krokiem jest zebranie sygnału przy niskiej częstotliwości umożliwiającej uzyskanie wskazania od uszkodzenia w dolnej warstwie (podłużnicy). Na skanie należy wskazać obszar uszkodzenia i ustawić zgodnie z zaleceniami producenta wzmocnienie i kąt fazowy sygnału (Rys. 4). Następnie należy zebrać sygnał przy trzy razy wyższej częstotliwości z tego samego obszaru i ponownie ustawić parametry zgodnie z wytycznymi producenta (Rys. 5). Po przetworzeniu danych system jest gotowy do pracy. Pomimo stosunkowo niskiej rozdzielczości wynikającej z rozmiaru głowic zastosowane procedury przetwarzania sygnału oraz odpowiedni dobór filtrów umożliwiają uzyskanie bardzo wyraźnych wskazań dla uszkodzeń znajdujących się w drugiej warstwie konstrukcji (Rys. 6).



Rys. 6. Wynik badania po poprawnie wykonanej procedurze kalibracji

Fig. 6. The result of the test after a properly performed calibration procedure

5. Podsumowanie

Próby wykrycia pęknięć poszycia konstrukcji nitowanej przeprowadzone metodą prądowirową z zastosowaniem Systemu MAUS oraz z wykorzystaniem EC Array i aparatem OmniScan MX pokazały, że oba systemy są bardzo czułe. Jednak pomimo tego, że rozdzielczość EC Array jest nieco mniejsza, to metoda ta pozwoliła na wykrycie pęknięć w drugiej warstwie blach ze stopu aluminium. Pozwala to na pomyślne rozwijanie zastosowania tej metody w badaniach poszycia statków powietrznych.

6. Literatura/References

- [1] MAUS V Automated System, Manual, 2016
- [2] Ch. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, 2003
- [3] Cz. Dybiec, Materiały szkoleniowe, Ośrodek Doskonalenia Kadr Interprofesja, Warszawa, 2003

Jie Fu*, Lenka Dojcanova, Jizeng Ma International Atomic Energy Agency

ISEMIR-IR: A worldwide tool to optimize occupational radiation protection in industrial radiography

ISEMIR-IR: Globalne narzędzie do optymalizacji ochrony przed promieniowaniem na stanowisku pracy w radiografii przemysłowej

ABSTRACT

Industrial Radiography is widely used in non-destructive testing (NDT) in the world. Workers in the sector exposure if incidents happen. The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research: Industrial Radiography so called ISEMIR-IR was developed by the IAEA as a web-based tool for a regular data collection and analysis of occupational exposure. The system was launched with full function in 2017. It was designed based on the data from an extensive research and results of the worldwide surveys. It assists NDT companies to benchmark their own companies and individual performance against others in the database. NDT companies all around the world are encouraged to participate in the database to enable it to become a worldwide tool for implementing optimization of occupational radiation protection.

Keywords: ISEMIR; occupational radiation protection; Industrial Radiography, NDT

1. Introduction

Industrial radiography is a method of inspecting materials for seeing hidden flaws by using the ability of short X-rays, gamma rays and neutrons to penetrate various materials. It is a major element of non-destructive testing(NDT) and has been widely used all over the world. Industrial radiography work poses a small radiation risk to workers and members of the public if it is performed using appropriate equipment and in accordance with required procedures. However, the practice of industrial radiography continues to result in large numbers of deterministic effects among occupationally exposed individuals and members of the public. Such accidents have resulted in high doses to workers, causing severe health consequences such as radiation burns and, in a few cases, death[1].

The IAEA has developed the safety standards series related to industrial radiography and organized technical meetings to improve the safety level of this field. However, a global perspective is lacking, as is the availability of a systematic means for improving occupational radiation protection in industrial radiography worldwide. Realizing this situation, the IAEA initiated in early 2009 the Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research, referred to as the ISEMIR STRESZCZENIE

Radiografia przemysłowa jest szeroko stosowana w badaniach nieniszczących (NDT) na świecie. Pracownicy tego sektora w przypadku wystąpienia incydentów mogą być narażeni na niebezpieczeństwo. System Informacji o narażeniu zawodowym w medycynie, przemyśle i badaniach: Radiografia przemysłowa (ang. The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research: Industrial Radiography) nazwany ISEMIR-IR został opracowany przez IAEA jako internetowe narzędzie do regularnego gromadzenia danych i analizy narażenia zawodowego. System został uruchomiony z pełną funkcjonalnością w 2017 roku. Zaprojektowano go w oparciu o dane pochodzące z obszernych badań i wyników światowych sondaży. Pomaga firmom z branży NDT w porównywaniu własnych i indywidualnych wyników z innymi wynikami w bazie danych. Firmy NDT na całym świecie są zachęcane do uczestnictwa w tworzeniu bazy danych, aby umożliwić jej stanie się światowym narzędziem do wdrażania optymalizacji ochrony przed promieniowaniem zawodowym.

Słowa kluczowe: ISEMIR; ochrona przed promieniowaniem w ramach czynności zawodowych, radiografia przemysłowa, badania nieniszczące

project, which arose from the Occupational Radiation Protection International Action Plan (approved by the IAEA Board of Governors in September 2003), which identified in Action 7 the need to establish networks for the exchange of information on experience and lessons learned between interested parties[2].

Two specific topic areas are inclued in ISEMIR which are Industrial radiography(IR) and Interventional cardiology(IC). ISEMIR-IR was designed based on the data from an extensive research and results of the worldwide surveys. It assists NDT companies carrying out benchmarking their data against the others in the system, and hence in promoting and in implementation of optimization of occupational radiation protection.

2. Development of ISEMIR-IR

2.1 The Working Group on Industrial Radiography

In order to develop the ISEMIR-IR system, a Working Group on Industrial Radiography (WGIR) was formed in 2010. The membership of WGIR is comprised of professionals with experience of working for NDT companies, client companies, NDT societies, technical service organizations, including education, training and inspection, and regulatory bodies.

The objective of WGIR was: to gain a world-wide overview of occupational exposures and radiation protection of individuals in industrial radiography; to identify both good practices and

^{*}Autor korespondencyjny. E-mail: j.fu@iaea.org

^{© 2018} Proceedings of 47th National Conference on Nondestructive Testing (KKBN), Kołobrzeg, Poland Published by "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" SIMP Publishing Agenda DOI: 10.26357/BNiD.2018.050

shortcomings, and hence define actions to be implemented for assisting each industry, clients and regulatory bodies as well in improving occupational radiation protection; to propose recommendations for harmonizing monitoring procedures; and finally to set up a system for systematically collecting and analyzing occupational doses for individuals in industrial radiography and reporting incidents, and dissemination of this information as well to improve occupational radiation protection[3].

2.2 Worldwide survey of industrial radiography

The main activity of WGIR is to gain insight into occupational radiation protection in industrial radiography worldwide using questionnaires. Three different types of questionnaires were designed and distributed to the national or state regulatory bodies responsible for radiation protection, NDT companies, and individual industrial radiographers of IAEA Member States. The survey was distributed for a period of one year, from 2010 until 2011. The Topics addressed by each questionnaire included training in radiation protection; incidents; safety of the radiographer, the public and sources; inspections; emergency plans and individual monitoring.

Responses were received from 432 industrial radiographers, 95 NDT companies, and 59 regulatory bodies. Analysis of the survey results indicated that there is a need for improved implementation of the radiation protection principle of protection optimization and safety in industrial radiography world-wide[4].

2.3 ISEMIR-IR system

It is clear from the world-wide survey that there is a need to explore an international database for the systematic collection and analysis of occupational doses for individuals in industrial radiography, and then for the use of this information to improve occupational radiation protection. In the design phase, the IAEA was assisted by an Advisory Group with representatives of international organizations from five main world regions. In June 2017, ISEMIR-IR was launched and it assists NDT companies in implementation of the optimization principle in occupational radiation protection.

ISEMIR-IR can provide three broad types of analyses which are: occupational doses per radiographic exposure for a given industrial radiographer as a function of personnel and facility attributes, benchmarking and trends with time. With the help of ISEMIR-IR, the NDT facilities are able to benchmark their own companies and individual personnel performance against global, regional or even country data. They can also identify areas for improvment and corrective actions that should lead to an improvement in radiation protection.

The participation is free of charge and many parts of the data entry are voluntary in order to make it accessible to all interested parties[5]. Each participating NDT company is able to provide annual information about company, inculding the sources used, company procedures, training related to radiation protection, and individual industrial radiographers in the company. As an outcome of the data entry, a NDT company is able to assess the effectiveness of the optimization of radiation protection. The metric is determined by occupational dose per radiographic exposure for a given industrial radiographer.

The IAEA is currently on the process of disseminating ISEMIR-IR to the Member States and collecting the anonymous data from all world. After more than one year since the official launch, 34 companies regularly participate in the data collection and others have expressed their interest. Once the data reaches a significant level, the IAEA plans to publish a report, which will identify areas for improvement and corrective actions that should lead to enhancements in radiation protection worldwide.

3. Functions of ISEMIR-IR

ISEMIR-IR can provide 2 types of analysis and benchmarking, one is company-based while the other one is individual-based.

3.1 Company-based analysis and benchmarking

The company-based analysis and benchmarking is defined by the main metric – mean occupational effective dose per exposure. The user can conduct analysis of it's own company's mean dose per exposure, as well as average effective dose base on the collecting data. Figure 1 and 2 displayed an example of the company-based report[6].



Fig. 1. Company-based annual collective dose and mean dose per exposure report.

Rys. 1. Roczna dawka zbiorcza i średnia dawka dla firmy przypadająca na raport dotyczący narażenia.



Fig. 2. Company-based average effective dose report. Rys. 2. Raport ze średniej skutecznej dawki (dane firmowe).



Fig. 3. Company-based benchmarking of mean dose per exposure.

Rys. 3. Analiza porównawcza średniej dawki na ekspozycję w oparciu o dane firmowe.

The user could also benchmark its company against others relating the radiation protection level such as mean dose per exposure. Figure 3 shows an example of the benchmarking analysis of a company named "Test RSM 1". As shown in the figure, there are 7 companies apart of company "Test RSM 1". The mean dose of Test RSM 1 is 5 μ Sv, which is lower than the mean dose per exposure of the 7 other companies.

In addition, the ISEMIR also offers the graph showing annual collective dose of all companies based on the selected filters. If the user would be interested in taking into consideration the number of employees or size of the company, he/she can also proceed with this option.

3.2 Individual-based analysis and benchmarking

The individual-based analysis and benchmarking is defined by the main metric – mean occupational effective dose per exposure. Figure 4 shows an example of a worker's individual-based dose report. It can be seen that the worker's annual effective dose as well as the mean dose per exposure has been higher in the years 2007-2009, and the annual effective dose dropped to 3 mSv in 2010 and remained at that level through 2012.



Rys. 4. Raport dotyczący dawki dla osób indywidualnych.

The ISEMIR-IR can offer two kinds of benchmarking for the employees in the user's company against others in the database. Fig. 5. is the example of company Test RSM 1 benchmarking the mean dose per exposure of individuals against the others in the database. We can see that there are 20 full time industrial radiographers in the database who have all radiation protection training as filtered in advance. Their mean dose per exposure is 7.22 μ Sv while the ones in company Test RSM 1 is 2.81 μ Sv. This means that the individual radiographers working in the company Test RSM 1 have a lower occupational exposure on average than the others having the same radiation protection training[7].



Fig. 5. Benchmarking of mean dose of individuals. Rys. 5. Raport dotyczący dawki dla osób indywidualnych.

In addition, if the user prefers to compare the annual effective dose instead of the mean dose per exposure, he/she can see the following graph fig. 6 which is automatically displayed in the screen.



Fig. 6. Benchmarking of annual effective dose of individuals Rys. 6. Porównanie rocznej skutecznej indywidualnej dawki.

4. Conclusions

Optimization of protection is one of the three fundamental principles in radiological protection system. The ISEMIR-IR database is being developed to provide a tool that can be used by NDT companies to improve their implementation of optimization of occupational radiation protection in industrial radiography.

The 60th and 61st IAEA General Conference Resolutions addressed that the Secretariat to promote ISEMIR to facilitate the implementation of as low as reasonably achievable (ALARA) practices and effective exposure control, and recommends that Member States provide data on occupational exposure to the ISEMIR programme.

NDT companies all around the world are encouraged to actively participate in the database to enable it to become a worldwide tool for implementing optimization of occupational radiation protection. It is necessary for the IAEA to introduce ISEMIR-IR system to the Member States especially to the industrial radiography companies and employees. The individuals and companies are anonymized in the database. IAEA can't reveal the identity of company, all submitted data are considered to be confidential and will not be shared.

5. References/Literatura

- International Atomic Energy Agency, "Radiation Safety in Industrial Radiography", Safety Standards Series No. SSG-11, pp. 1, 2011.
- [2] International Atomic Energy Agency and International Labour Office, "Action Plan for Occupational Radiation Protection", Results of the International Conference on Occupational Radiatin Protection, held in Geneva, Switzerland, pp. 10, 2002.
- [3] International Atomic Energy Agency, "The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography", IAEA-TECDOC-1747, pp. 1, 2014.
- [4] International Atomic Energy Agency, "The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography", IAEA-TECDOC-1747, pp. 42, 2014.
- [5] International Atomic Energy Agency, "User Guide: The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography", pp. 5, 2017.
- [6] International Atomic Energy Agency, "User Guide: The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography", pp. 20-21, 2017.
- [7] International Atomic Energy Agency, "User Guide: The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography", pp. 24-27, 2017.

Bogusław Olech Życiorys - Jacek Szelążek

Jacek Szelążek, po studiach na Politechnice Warszawskiej (Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, specjalizacja silniki lotnicze), rozpoczął pracę w IPPT w roku 1974. Został przyjęty na stanowisko asystenta w Zakładzie Badań Nieniszczących (ZBN) kierowanym przez prof. Zdzisława Pawłowskiego. IPPT nie był dla niego obcy, ponieważ w latach studenckich wykonywał rysunki techniczne dla Działu Wydawnictw IPPT i często tam bywał.

Rok 1975 to czas budowy rurociągu Orenburskiego a wprowadzanie zautomatyzowanych badań ultradźwiękowych spoin tego rurociągu prowadzone było pod nadzorem ZBN. Początkowo Jacek Szelążek zajmował się oceną wielkości wad wykrywanych metodą ultradźwiękową w spoinach doczołowych. Taki też był temat otwartego przewodu doktorskiego a promotorem pracy miał być prof. Zdzisław Pawłowski. W tym samym czasie dr Julian Deputat, kierownik jednej z pracowni ZBN, rozpoczął prace na ultradźwiękowymi badaniami naprężeń. Jacek Szelążek powoli włączył się w tę ciekawą tematykę i coraz mniej uwagi poświęcał badaniami spoin.

W roku 1980 Jacek Szelążek wraz z pracownią dr. Juliana Deputata znalazł się w Zakładzie Akustoelektroniki IPPT a potem, w roku 1984, w Zakładzie Teorii Ośrodków Ciągłych. Prowadził tam prace nad budową zestawów głowic ultradźwiękowych do precyzyjnych pomiarów czasu przejścia fal ultradźwiękowych. Równolegle, pod merytoryczna opieką dr. Juliana Deputata, pracował nad symulacją numeryczną oceny wielkości wad metodą przemieszczenia poprzecznego głowicy. Wyniki tych badań opisał w powstałej w 1987 roku pracy doktorskiej "Metoda przemieszczenia głowicy ultradźwiękowej w zastosowaniu do pomiarów nieciągłości materiałów", której promotorem został prof. Zbigniew Wesołowski i w roku 1998 Jacek Szelążek uzyskał tytuł doktora nauk technicznych.

W grupie skupionej wokół dr. Juliana Deputata wiodącą tematyką prac stały się ultradźwiękowe pomiary naprężeń i budowa aparatury pomiarowej. Powstały pierwsze aparaty DEBRO początkowo przeznaczone do pomiarów naprężeń własnych w szynach kolejowych. Jacek Szelążek zajmował się konstrukcją i budową układów głowic ultradźwiękowych współpracujących z aparatami DEBRO. Kilka tych aparatów zostało zakupionych przez czołowych producentów szyn kolejowych w Europie.

W latach 1986-89 grupa dr hab. Juliana Deputata brała udział w zorganizowanych przez Europejską Unię Kolejową badaniach rozwoju naprężeń własnych w monoblokowych kołach kolejowych. Celem badań było sprawdzenie wiarygodności metody ultradźwiękowej. Program obejmował szeroki zakres badań kół hamowanych zarówno w hamowni (Vitry, Francja) jak i podczas prób na torze próbnym (Velim, Czechy). W pomiarach prowadzonych aparaten DEBRO-20 wykorzystano zbudowane przez Jacka Szelążka głowice ultradźwiękowe do pomiaru anizotropii akustycznej. Wyniki badań, i porównanie ich z wynikami pomiarów metodą dyfrakcji promieni x, wykazały pełna przydatność metody ultradźwiękowej a niedługo potem została ona zaakceptowana w środowisku kolejowych jako wiarygodna, nieniszcząca technika oceny stanu naprężeń w kołach kolejowych.

W roku 1990 Jacek Szelążek rozpoczął badania nad ultradźwiękową metodą oceny wartości naprężeń termicznych i sił podłużnych w szynach toru ciągle spawanego. Opublikowana w 1993 roku, w internetowym Forum Badań Nieniszczących, praca opisująca te badania uznana została za pracę miesiąca.

W latach 1992-5 Jacek Szelążek przebywał dwukrotnie w USA gdzie w National Institute of Standards and Technology (Boulder, Kolorado) zajmował się ultradźwiękowymi pomiarami naprężeń w stosowanych w USA odlewanych kołach kolejowych. Praca opisująca wyniki tych badań została w 1997 roku wyróżniona przez Amerykańskie Towarzystwo Badań Nieniszczących nagrodą "1997 Outstanding Paper Award".

Po odejściu na emeryturę prof. Juliana Deputata Jacek Szelążek został kierownikiem Pracowni Badań Ultradźwiękowych a potem kierownikiem Zakładu Akustyki Fizycznej. W roku 2004 uzyskał stopień doktora habilitowanego a w roku 2007 stanowisko profesora IPPT PAN.

W roku 2010 Jacek Szelążek, wraz z kolegami z Pracowni, prowadził ultradźwiękowe pomiary zmian naprężeń w elementach mostu kolejowego nad Kanałem Żerańskim w Nieporęcie. Wykazano, że metoda ultradźwiękowa, z wykorzystaniem techniki impulsowej lub fali ciągłej, dostarcza więcej informacji niż tensometria oporowa. W latach 2010-14 starał się wprowadzić do nauki badań ultradźwiękowych, zamiast próbek stalowych z różnego wadami sztucznymi o prostej geometrii, próbki szklane w których reflektory fal ultradźwiękowych o dowolnych kształtach wykonane były techniką podpowierzchniowego grawerowania laserowego.

Jacek Szelążek brał udział jako wykładowca w różnego typu kursach i szkoleniach. Od roku 1975, początkowo jako asystent później jako wykładowca, w Kursach Badań Ultradźwiękowych i specjalistycznych Kursach Badania Spoin organizowanych przez ZBN i SIMP w Warszawie. Potem jako wykładowca w kursach badan ultradźwiękowych Ośrodku Szkoleniowym w Chorzowie, następnie w Gliwicach. Wykładał na studium podyplomowych na wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, na studium doktoranckim w IPPT a na koniec w kursach ultradźwiękowych w Ośrodku Szkoleniowym Lucchini, w Mińsku Mazowieckim.

Od 1995 roku Jacek Szelążek brał udział w corocznych Seminariach Szkoleniowych Nieniszczące Badania Materiałów odbywających się w marcu, w Zakopanem. Początkowo jako "pomocnik" prof. Juliana Deputata i Bogusława Osuchowskiego (współzałożycieli Seminarium) a potem jako organizator tych seminariów.

Za prace związane z ultradźwiękową ocena naprężeń został nagrodzony zespołowymi nagrodami Sekretarza Naukowego PAN: w roku 1983 nagrodą za metodę i urządzenie do ultradźwiękowych badań naprężeń a w roku 1989 za opracowanie aparatu DEBRO-30. W latach 1991 i 1994 zespół prof. Juliana Deputata, którego członkiem był Jacek Szelążek, otrzymał tytuł Mistrza Techniki za opracowanie aparatów do ultradźwiękowych badań naprężeń. Za najcenniejsze wyróżnienie uznaje przyznanie mu przez środowisko badań nieniszczących indywidualnej nagrody w marcu 2007 roku, w czasie Seminarium Szkoleniowego w Zakopanem.

Jacek Szelążek jest autorem kilkudziesięciu publikacji naukowych, kilku książek i kilkunastu patentów. Za najciekawsze swoje osiągnięcia uważa pracę o pomiarach naprężeń termicznych w szynach toru ciągle spawanego (NDT&E International, 1992), za najlepszy patent opracowanie wraz z Andrzejem Brokowskim układu wielogłowicowego do pomiaru czasu przejścia impulsów fal podpowierzchniowych (1992, Patent PL 5,549,001) a za najciekawsze konstrukcje dwie łódki żaglowo/motorowe do pływania po Wiśle. Za swoją porażkę uznaje niedokończenie projektu szklanych próbek do nauki i egzaminowania studentów na kursach badań ultradźwiękowych. Obecnie Jacek Szelążek jest emerytem i, poza pływaniem po Wiśle i łatwymi wspinaczkami w Tatrach, zajmuje się produkcją i serwisowaniem Ultradźwiękowych Mierników Naprężeń DEBBIE. Są to przenośne aparaty stosowane dzisiaj w 21 krajach w rutynowych pomiarach naprężeń obwodowych w monoblokowych kołach kolejowych.

Krzysztof Schabowicz Życiorys - Leonard Runkiewicz



Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz urodził się w 25 sierpnia 1939 r. w miejscowości Góra Grabowiec na Zamojszczyźnie. W 1961 roku otrzymał tytuł magistra inżyniera budownictwa lądowego na Wydziale Budownictwa Przemysłowego Politechniki Warszawskiej. Kariera zawodowa profesora Leonarda Runkiewicza rozpoczęła się rok wcześniej na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Budowlanej, w Katedrze Teorii Sprężystości i Plastyczności, kierowanej przez profesora W. Olszaka. Pracując w Katedrze, oprócz zajęć dydaktycznych, brał również udział w pracach naukowo-badawczych z dziedziny mechaniki stosowanej oraz w pracach naukowo-usługowych z zakresu oceny istniejących konstrukcji inżynierskich. Przez cały okres pracy w wykonawstwie i projektowaniu brał również udział w badaniach prowadzonych przez Katedrę Teorii Sprężystości i Plastyczności Politechniki Warszawskiej w zakresie nieniszczących metod badań, będąc współautorem dwóch prac naukowo-badawczych dotyczących sklerometrycznych i ultradźwiękowych metod badania betonu w konstrukcjach.

Leonard Runkiewicz zawsze interesował się pracami badawczymi. Z tego względu w 1965 roku rozpoczął pracę w Instytucie Techniki Budowlanej, gdzie nadal pracuje na stanowisku profesora. Jako badacz, profesor mógł także spełniać się w ITB. Zajmował się tam głównie metodami badań konstrukcji budowlanych, w tym szczególnie nieniszczącymi badaniami sklerometrycznymi, ultradźwiękowymi, radiologicznymi a także badaniami seminieniszczącymi konstrukcji budowlanych zasadami oceny jakości, nośności i niezawodności konstrukcji inżynierskich, analizą i doskonaleniem projektowania konstrukcji żelbetowych oraz zagadnieniami bezpieczeństwa niezawodności i diagnostyki istniejących konstrukcji budowlanych. Działania z zakresu badań, jak i wczesne rozpoczęcie kariery naukowej pozwoliło na uzyskanie w 1971 r. stopnia naukowego doktora nauk technicznych, a w 1981 r. doktora habilitowanego na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w dyscyplinie budownictwo, specjalności konstrukcje budowlane i budownictwo ogólne. Sześć lat po tym wydarzeniu Leonard Runkiewicz otrzymał nadany przez Radę Państwa tytuł profesora nadzwyczajnego nauk technicznych.

Równolegle z pracą w Instytucie Techniki Budowlanej od 1990 r. prowadził wykłady oraz prace dyplomowe z konstrukcji żelbetowych oraz budownictwa uprzemysłowionego na Politechnice Lubelskiej, Świętokrzyskiej oraz do dzisiaj na Politechnice Warszawskiej. Ponadto był wykładowcą na studiach podyplomowych Politechniki Warszawskiej, Krakowskiej, Białostockiej, Poznańskiej, Szczecińskiej, Rzeszowskiej i Lubelskiej. Był promotorem ponad 160 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich na Politechnice Warszawskiej i Politechnice Lubelskiej.

Profesor Leonard Runkiewicz współpracował z Profesorem Pawłowskim między innymi przy organizacji VII Światowego Kongresu Badań Nieniszczących w Warszawie, Kongresu Badań Nieniszczących w Moskwie, 3 Krajowych Sympozjów Badań Nieniszczących w Budownictwie Krajowych Konferencji Badań Nieniszczących (KKBN). Ich wspólna współpraca w Komitecie ds. Badań Nieniszczących w Polskim Komitecie Normalizacyjnym zaowocowała opracowaniem trzech norm dotyczących badań nieniszczących w budownictwie.

Poza pracami naukowo-badawczymi organizował i wykonywał prace badawczo-konstrukcyjne z dziedziny oceny i diagnostyki odpowiedzialnych i trudnych konstrukcji, m.in. zbiorników i silosów, przemysłowych konstrukcji żelbetowych a także obiektów w Fabrykach Papieru i Celulozy, Siłowni Wodnych, Zakładów Petrochemicznych, Zakładów Wodociągowych, Cementowniach, Hutach, Fabrykach motoryzacyjnych itp. Były to najczęściej hale przemysłowe, zbiorniki, wieże, maszty, kominy, silosy, fundamenty pod maszyny, a także ponadto budynki, teatry, mosty, wiadukty, hale sportowe itp.

Profesor nie próżnował podczas swojej kariery zawodowej. Dotychczas profesor Runkiewicz był głównym referentem ok. 150 prac oraz członkiem zespołu wykonawczego 80 prac naukowo-badawczych, 10 norm oraz 40 wytycznych lub instrukcji stosowania. Opublikował ponad 500 prac naukowych, w tym ponad 300 samodzielnych. Wygłosił ponad 150 referatów na konferencjach naukowo-technicznych krajowych i międzynarodowych. Recenzował, konsultował i opiniował ok. 40 prac doktorskich, habilitacyjnych oraz na tytuł i stanowisko profesora. Poza pracami w Instytucie Techniki Budowlanej wykonywał opinie prac ośrodków badawczo-projektowych oraz brał udział przy opracowywaniu orzeczeń w charakterze rzeczoznawcy. Poza wymienionymi pracami brał także udział w działalności Grup Roboczych: CEN, RILEM, CICIND, Komitecie Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Komisjach Normalizacyjnych, PKN, Komitetach PZITB, Radach Naukowych oraz szeregu Kolegiach Naukowo-Technicznych Dotychczas wykonał ponad 600 prac naukowo-projektowych (ekspertyz) istniejących obiektów budowlanych w zakresie budownictwa ogólnego, przemysłowego i specjalnego w konstrukcji, z betonu zbrojonego i sprężonego oraz konstrukcji skomplikowanych i pionierskich z uwzględnieniem dynamiki budowli. Działalność organizacyjną profesor zawsze realizował z pełnym zaangażowaniem i dobrymi wynikami. Z wielkim skupieniem poświęcał się nauce i pomaganiu innym we wkroczeniu w świat nauk ścisłych. Za swe tak liczne osiągnięcia otrzymał szereg odznaczeń i wyróżnień.



MAPOWANIE KOROZJI ORAZ WIZUALIZACJA PROFILU BADANEJ ŚCIANKI

PETROCHEMIA - ENERGETYKA - PRZEMYSŁ MORSKI

v swift R-SCAN

SWIFT + Scorpion2 - system pomiaru profilu grubości w trybie automatycznym

- » Głowice oponowe
- Zapis danych A- i B-Scan pełna analiza wyników, zapis danych w plikach .xls
- Prędkość badania: do 180mm/s
- Zasilanie akumulatorowe czołgacza
- 4 niezależne koła magnetyczne z funkcją kompensacji jazdy "po linii"
- Pokonywanie przeszkód o wysokości do 12mm
- Możliwość pracy z ręczną sondą R-Scan

WIELOPRZETWORNIKOWE SONDY WIROPRADOWE SHARCK™

WYKRYWANIE I POMIAR WAD POWIERZCHNIOWYCH W STALACH WEGLOWYCH

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

- 33
- Pomiar głębokości wad do 7mm
- Wbudowany enkoder pozwala na tworzenie pełnego
- Sprężynujące osłony cewek pomiarowych dopasowujące się do kształtu badanej powierzchni 77 .
- » Brak konieczności usuwania farby i powłok
- » Zgodność z ASTM E3052
- » Alternatywa dla badań PT i MT z pełną rejestracją



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



eddyfi

47. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących

Streszczenia pozostałych publikacji

Nr 5.

Dźwięk czyni muzykę - Badanie NDT uszkodzonego instrumentu muzycznego

The sound makes the music - The NDT of a destroyed music instrument *Christian Segebade, U. Menzel*

A trumpet made of silver/copper alloy, manufactured in 1744, was studied using nondestructive techniques, e.g. material analysis by photon activation analysis (PAA), wall thickness measurement by gamma-ray absorption, computer-aided X-ray tomography (CT) and other methods. The purpose of this study was two-fold; first, to obtain the ground material parameters, the major, minor, ad trace components in particular (the instrument had been destroyed at the end of World War II, and several parts were lost, and had to be remade). Second, some relevant details of the original manufacturing techniques were unknown. Finally, these could be

rediscovered, and the trumpet could be restored completely and

Nr 6.

made playable again.

Etyka na rynku badań i inspekcji - ze skandynawskiej perspektywy Ethics in Testing & Inspection Market – from a Scandinavian perspective Jörgen Backersgård jorgen.backersgard@dekra.com DEKRA Material Testing and Inspection, Sweden

Confidence and trust to independent testing, inspection and certification are crucial for our industry's continued development. Ultimately, everything is about safety and the technical assessments conducted by TIC companies should always be carried out with high quality and integrity.

The Scandinavian, or the Nordic countries, are seen in many contexts as role models for quality, reliability and freedom from corruption. In this presentation you will find some examples of the basic principles of business ethics and compliance guidelines that the Swedish Association for Testing, Inspection and Certification are working with, and in addition, there are company-based policies and guidelines that govern the business, so that trust in what we do never be questioned and our role and contribution to safety, quality and reliability is maintained.

Nr 12.

Diagnozowanie układów cylindrowych tłokowych sprężarek wodoru

Diagnosis methods for hydrogen reciprocating compressors cylinder systems

Paweł Białek pawel.bialek@grupalotos.pl Grupa LOTOS S.A., Polska

Sprężarki tłokowe wodoru stanowią nieodzowny element rafineryjnych systemów produkcyjnych. Eksploatacje tłokowych sprężarek wodoru cechuje duże ryzyko. Największe ryzyko, rozumiane jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń oraz kosztów usuwania skutków tych uszkodzeń, należy przypisać układom cylindrowym tych maszyn. Autor wskazuje iż ryzyko to można obniżyć miedzy innymi poprzez diagnozowanie. W pracy zostaje zdefiniowane pojęcie układu cylindrowego oraz przedstawiony jego wpływ na ryzyko eksploatacji tłokowych sprężarek wodoru. Autor wymienia i opisuje wszystkie dostępne w praktyce metody diagnozowania zespołów funkcjonalnych, tworzących układy cylindrowe tłokowych sprężarek wodoru. Autor dokonuje charakterystyki rzeczonych metod diagnozowania oraz wskazuje na różnice w efektywności poszczególnych metod.

Nr 16.

Badania kompozytów z zastosowaniem shearography Inspection of composites using shearography Barend van den Bos barend.vandenbos@dekra.com DEKRA Industrial AB, Sweden

Composites and sandwich structures are finding more and more use in the industry. As an example, for each new aircraft generation the amount of composites increase. The main reason is to reduce weight while maintaining a high strength. From an NDT perspective, composites and sandwich structure behave differently compared to metals: the materials as such are different, but defects that may occur also. This has led to the development of new NDT methods designated to be used on composites. Shearography is an optical method primarily used to detect defects in "laminar" structures, such as polymer composites, sandwich structures and other bonded structures. Shearography is one of very few active NDT methods, and by that we mean that it is subjected to some kind of structural load during the inspection, and that the inspection result reflects the response to that load. Shearography can detect most defects and discontinuities that occur in composite structures, including: disbonds, delaminations, cracked cores, crushed cores, kissing bonds, wrinkling, fluid ingresses, porosity, cracks, repair defects and impact damage (BVlDs). Other advantages with shearography is that it allows for a high inspection speed and can be non-contact.

Nr 21.

Badania nieniszczące metodą termografii skaningowej Scanning laser spot thermography Roemer Jakub, Pieczonka Łukasz

jroemer@agh.edu.pl

Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie, Polska

Badania nieniszczące stanowią integralną cześć współczesnej inżynierii. Konieczność ich stosowania występuje wszędzie tam, gdzie wykorzystywane są urządzenia których bezawaryjna praca ma znaczenie strategiczne dla funkcjonowania przedsiębiorstwa, a ewentualne nieplanowane przestoje skutkują istotnymi stratami finansowymi, bądź są zagrożeniem dla zdrowia i życia personelu bądź ludności. Mimo istnienia wielu certyfikowanych metod badań nieniszczących takich jak np. ultradźwięki, badania penetracyjne czy badania radiologiczne, wciąż poszukuje się nowych metod, których stosowanie w specyficznych aplikacjach mogłoby być skuteczniejsze, wydajniejsze bądź tańsze od metod o ugruntowanej pozycji. W śród takich metod niewątpliwie znajduje się termografia aktywna wraz z jej różnymi wariantami takimi jak wibrotermografia, termografia impulsowa czy wreszcie termografia laserowa. Z uwagi na dynamiczny rozwój kamer termowizyjnych i idący w raz z nim spadek ich cen powoduje, że wszelkie badania oparte o techniki termografii spotykają się z coraz to większym zainteresowaniem ze strony przemysłu. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących z wykorzystaniem termografii laserowej w układzie skaningowym.

Nr 23

Bezpośrednia diagnostyka kompozytowej konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego z wykorzystaniem sieci czuiników

In situ diagnostics od the composite structure UAV with the use of sensors network

Krzysztof Dragan, Michał Dziendzikowski, Artur Kurnyta, Kamil Kowalczyk krzysztof.dragan@itwl.pl

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Polska

Opracowanie niezawodnych systemów zautomatyzowanego monitorowania stanu konstrukcji lotniczych (SHM), pozwalających bezpośrednią ocenę stanu danego statku powietrznego oraz obniżenie kosztów jego eksploatacji stanowi jeden z wiodących kierunków rozwoju technologii w przemyśle lotniczym. Ten problem jest szczególnie istotny w eksploatacji statków bezzałogowych. Jedna z idei budowy takiego systemu jest wykorzystanie sieci czujników pozwalających na generację fal Lamba wzbudzonych w danym elemencie konstrukcji przez sieć przetworników piezoelektrycznych PZT. W artykule przedstawiono koncepcję zbudowanego systemu detekcji uszkodzeń dla diagnostyki kompozytowych struktur oraz bieżącego ich monitorowania w strukturze bezzałogowego statku powietrznego. W artykule poruszono zagadnienia związane z integracją czujników z monitorowaną strukturą, przedstawiono algorytmy analizy sygnałowej jak również przedstawiono przykładowy wynik działania systemu w wykrywaniu uszkodzeń wraz z korelacją z metodą badań ultradźwiękowych.

Nr 25.

Zapewnienie jakości w budowie i eksploatacji rurociągów dla elektrowni jądrowych na przykładzie wymagań budowy NNP Olkiluoto III w Finlandii

Quality assurance in erection and exploatation of piping for nuclear power plant as example of quality requirements at NNP Olkiluoto III in Finland

Michał Jadczak michal.jadczak@ncbj.gov.pl Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Jakość i niezawodność w budowie i eksploatacji urządzeń ciśnieniowych dla elektrowni jądrowych ma ogromne znaczenie. System zapewnienia jakości dla elektrowni jądrowych wymusza prowadzenie wszelkich działań i operacji zgodnie z wymaganiami jakościowymi na każdym etapie wytwarzania późniejszej eksploatacji. Dlatego Fiński Urząd ds. Atomistyki (STUK) wydał odpowiednie przewodniki regulujące zapisy jakościowe na płaszczyznach budowy i eksploatacji elektrowni jądrowych. W artykule przedstawiono sposób podziału rurociągów ze względu na poziom bezpieczeństwa jądrowego oraz omówiono zasady zapewnienia i kontroli jakości w budowie i późniejszej eksploatacji.

Nr 26.

Głowice ultradźwiękowe w przemyśle i ultrasonograficzne w medycynie

Ultrasound probes in industry and ultrasonic probes in medicine

Natalia Piotrowska

natalia.piotrowska@ncbj.gov.pl Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Ultradźwięki ze względu na specyfikę oddziaływań z materią znajdują szerokie zastosowanie w inżynierii, przemyśle i medycynie. Elementami wprowadzającymi impuls fali ultradźwiękowej są w przemyśle głowice ultradźwiękowe a medycynie - ultrasonograficzne. W referacie przedstawiono i porównano wyżej wymienione rodzaje głowic pod kątem budowy i mechanizmu działania, uwzględniając ich specyficzne zastosowania. Zaobserwowane różnice mogą być źródłem rozwoju techniki ultradźwiękowej w przemyśle, bazując na rozwiązaniach zastosowanych w medycynie.

Nr 27.

Rodzaje urządzeń wykorzystywanych do badań jądrowych reaktorów energetycznych metodami NDT Kinds of devices used for researchnig nuclear power reactors using NDT methods Grzegorz Olszewski

grzegorz.olszewski@ncbj.gov.pl Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska

Zapewnienie jakości i bezpieczeństwa w trakcie eksploatacji reaktorów jądrowych, nakazuje poprzez odpowiednie zapisy w normach i specyfikacjach, konieczność badania i sprawdzenia poprawności użytkowej ww. obiektów. Zasada działania reaktorów jądrowych niesie ze sobą możliwość narażenia urządzeń i innych elementów na promieniowanie jonizujące. Wymusza to już na etapie projektowania opracowanie dostępu do elementów narażonych na promieniowanie w celach kontrolnych. Kontrola elementu napromienionego oraz poddanego obciążeniom mechanicznym, może zostać przeprowadzona za pomocą badań nieniszczących. W posterze zostaną przedstawione urządzenia i techniki do badań nieniszczących wykorzystywanych do zapewnienia bezpieczeństwa nuklearnego reaktorów jądrowych w trakcie ich eksploatacji.

Nr 28.

Hazard pictograms interpretation on the labels of consumables for penetrant and magnetic particles inspection Yuriv Yaremenko

yaremenko@mr-chemie.de MR[®] Chemie GmbH, Germany

We, MR Chemie GrnbH, continuously use benefits of own R&D Laboratory by customizing our existent solutions or developing new products according to customer needs. Following our philosophy to provide personnel and environment friendly test media, as core requirement for each new development, we engineer our new solutions taking into account different process conditions and safety regulations. In this presentation, we would like to spotlight hazard pictograms, which typically label MPI and PT product. We will help you to interpret meaning of hazard pictograms and give them gravity in sense of health risks levels.

Nr 30.

Badania nieniszczące kompozytowych pakietów naprawczych klapek górnego wlotu powietrza do silników RD-33 samolotów MiG-29

Non-destructive testing of the composite recovery package MiG-29 "Fulcrum" upper air intake flaps

Adam Rdzanek

adam.rdzanek@itwl.pl

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Polska

W artykule przedstawiono metodę modernizacji klapek górnego wlotu powietrza do silnika RD-33 samolotów MiG-29 oraz omówiono wyniki badań nieniszczących zmodernizowanych klapek zamontowanych na eksploatowanych w Siłach Powietrznych RP samolotach typu MiG-29. Podstawową metodą monitorowania stanu kompozytowych pakietów naprawczych są badania nieniszczące metodą termografii impulsowej. Dodatkowo przedstawiono w pracy wyniki pomiarów innymi metodami za pomocą mobilnego skanera (MAUS V). Artykuł omawia budowę klapek wlotów powietrza wraz z typowymi uszkodzeniami. Praca przedstawia podstawowe elementy użytych systemów pomiarowych, akwizycję i analizę danych przy pomocy dedykowanego oprogramowania. W artykule omówiono wyniki badań uzyskane różnymi

BADANIA NIENISZCZĄCE I DIAGNOSTYKA 4 (2018) Nondestructive testing and diagnostics

metodami NDT, z kilku lat eksploatacji. Oceniono przydatność poszczególnych metod w okresowej diagnostyce zmodernizowanego elementu.

Nr 31.

Model wiroprądowego przetwornika z wykorzystaniem pochodnych niecałkowitego rzędu Model of eddy current transducer with use of fractional order derivatives

Ryszard Sikora, Bogdan Grzywacz, Tomasz Chady tchady@zut.edu.pl

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

Pochodne ułamkowego rzędu są znane od wielu lat, jednakże przez długi czas nie znaleziono istotnych obszarów zastosowań dla tego rachunku. Obecnie można zaobserwować wzrastającą liczbę publikacji naukowych dotyczących wykorzystania pochodnych ułamkowego rzędu w różnych zastosowaniach, w tym również związanych z elektrotechniką. W niniejszym artykule zaproponowano użycie pochodnych ułamkowych w matematycznym modelu przetwornika przeznaczonego do badań nieniszczących metodą prądów wirowych. Dzięki temu uzyskano większą swobodę kształtowania odpowiedzi częstotliwościowej przetwornika na nieciągłości występujące w badanym materiale. Zmieniające się parametry modelu wykorzystano do identyfikacji nieciągłości, a w szczególności do określenia jej głębokości. Dane do testów pozyskano z pomiarów przeprowadzonych systemem do wieloczęstotliwościowych badań metodą wiroprądową, a testowaniu poddano płytki wykonane z INCONELU, w których wytworzono sztuczne defekty w postaci nacięć o różnej długości i głębokości.

Nr 37.

Badania rurociągów wysokoprężnych metodą replik triafolowych

Testing of high-pressure pipelines using replicas Anna Kołodziej, Dariusz Paryż, Michał Kwiecień, Adam Paryż

akolodziej@energopomiar.com.pl Energopomiar Sp. z o.o., Polska

Badania wykonywane metodą replik triafolowych stanowią jedno z ważniejszych badań nieniszczących, w szczególności w przypadku wykrywania procesów pełzania. Jako badanie stosunkowo łatwe, szybkie i ekonomiczne w wykonaniu - pozwala na poznanie stanu mikrostruktury elementu po eksploatacji bez konieczności pobierania wycinka i późniejszej naprawy. Jednocześnie z punktu widzenia oceny stanu badanego elementu jest to badanie niezastąpione. Regularne wykonywanie badań diagnostycznych za pomocą replik pozwala na wychwycenie nawet drobnych zmian, które zapoczątkowują procesy degradacji struktury materiału. Przydatność badań replikami wykazały badania diagnostyczne przeprowadzane na elementach eksploatowanych w warunkach pełzania i środowisku mającym wpływ na zmiany struktury w czasie m.in. wysokie ciśnienie i temperatura oraz w prawidłowo wytypowanych miejscach wykonania badania. Praca przedstawia analizę kilku przypadków, które potwierdziły konieczność wykonywania badania przy pomocy replik triafolowych - zarówno jako uzupełnienie innych badań NDT, potwierdzając istnienie nieciągłości, jak również wykrycie i śledzenie w czasie zmian związanych z postępowaniem procesów pełzania i degradacji struktury.

Nr 41.

Zasady uznawania laboratoriów badawczych Robert Chudzik, Wojciech Manaj wojciech.manaj@udt.gov.pl Urząd Dozoru Technicznego, Polska

Urząd Dozoru Technicznego (UDT) realizuje zadania związane

z wykonywaniem dozoru technicznego w zakresie określonym w ustawie z dnia 21 grudnia 2000r. o dozorze technicznym (Dz. U. z 2017, poz. 1040 z późn. zm.). Dozorem technicznym są określone ustawą działania zmierzające do zapewnienia bezpiecznego funkcjonowania urządzeń technicznych. Ustawa o dozorze technicznym stwarza również możliwości przeprowadzania badań niszczących i nieniszczących wytwarzanych, naprawianych lub modernizowanych urządzeń technicznych oraz ich elementów i materiałów we własnym laboratorium uprawnionego przedsiębiorcy lub laboratorium uznanym przez organ właściwej jednostki dozoru technicznego. W artykule przedstawiono zmiany wymaganiach w zakresie uznawania i nadzoru nad laboratoriami uznanymi.

Nr 43.

Kalibracja detektora - analiza jakościowa w ujęciu radiografii cyfrowei

Calibration of DDA - quality analyses of image in digital radiography Jacek Słania, Marcin Matuszewski marcin.matuszewski@is.aliwice.pl

Instytut Spawalnictwa, Polska

Radiografia cyfrowa (DR) coraz powszechniej stosowana w kontroli jakości połączeń spawanych i odlewów, wymaga przygotowania detektora do badań, ale także weryfikacji jego stabilności pracy podczas długotrwałej eksploatacji. Technika DR wymaga kalibracji systemu (detektor wraz z źródłem promieniowania) w zależności od: typu źródła, stosowanej energii promieniowania, odległości detektor - źródło, ustawień wewnętrznych detektora takich jak: czułość, liczba klatek na sekundę, czy progów w mapie błędnych pixeli. Odpowiedni dobór warunków badania musi pozwolić na spełnianie wymagań jakościowych wyrobu zgodnie z wymaganą normą. Producenci detektorów cyfrowych DDA posiadają różne rozwiązania i podejście do w/w tematyk, mimo iż w wielu przypadkach wykorzystywane jest ten sam typ sprzętu. W tym, celu poruszono zagadnienie związane z tematyką kalibracji i ustawienia detektora, tak by móc otrzymać optymalny obraz, a tym samy zapewnić wykrywalność na jak najwyższym poziomie.

Nr 44.

Studium przypadków - Porównanie radiografii analogowej i cyfrowej

Paweł Irek, Marcin Matuszewski marcin.matuszewski@is.gliwice.pl Instytut Spawalnictwa, Polska

W referacie poruszone zostaną aspekty zastosowania radiografii cyfrowej i analogowej W ujęciu różnych badań przemysłowych m.in: w przemyśle energetycznym i konstrukcjach spawanych. Przedstawione zostaną wyniki badań porównawczych radiografii klasycznej z radiografią cyfrową wraz z analizą aspektów jakościowych zdjęć i różnic w poziomie wykrywalności i ocenie wykrytych niezgodności. Obszar porównania techniki cyfrowej z detektorem o rozdzielczości 100 µm w odniesieniu do filmów o różnej czułości.

Nr 47.

System pomiarowy do badań nieniszczących materiałów kompozytowych metodą mikrofalową

Microwave NDT system for composite structures evaluation

Przemysław Łopato, Rafał Mazurczyk, Walysson Faria, Carlos Eduardo dos Santos

plopato@zut.edu.pl

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

Microwave imaging is a versatile inspection modality for nondestructive evaluation of dielectric or semi dielectric structures including nonmetallic composites. This technique is used, among others for testing sandwich materials, penetration of moisture in building structures, detection of cracks and rust under anti-corrosion coatings and detection of discontinuities in metal piping systems. In this paper structure and imaging capabilities of proposed microwave NDT system are shown. The obtained results of dielectric and composite materials evaluation will be presented and discussed.

Nr 32.

Nieniszczące badania sztywności tymczasowych podpór budynków składających się z siłownika i stalowych elementów sześciennych

Non-destructive stiffness tests of the temporary supports of the building consisting of jack and steel underlay

Krzysztof Gromysz, Mateusz Smolana krzysztof.gromysz@polsl.pl

Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

Podpory składające się z siłowników hydraulicznych oraz stalowych elementów sześciennych wykorzystywane są podczas usuwania wychyleń budynków. Usuwanie wychyleń polega na zabudowaniu podpór w ścianach obiektów a następnie nierównomiernym podnoszeniu budynku za ich pomocą. W trakcie usuwania wychylenia na podporach spoczywa cały ciężar budynku. Wskutek braku osiowego ustawienia elementów podpory i niedokładności montażu występuje mimośród niezamierzony.

W referacie przedstawiono wyniki nieniszczących badań podpór obciążonych siłą osiową oraz siłą przyłożoną na mimośrodzie niezamierzonym. Na podstawie zrelacjonowanych badań wyznaczono sztywność podpór w kierunku działającego obciążenia oraz wykazano wpływ mimośrodu niezamierzonego na tę sztywność. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych badań, opracowano sposób wyznaczania sztywności podpór w zależności od jej parametrów.

Nr 40.

Zastosowanie techniki AE i termografii do oceny objętości osadu w zbiornikach ropy naftowej

Application of AE technique and thermography for assessment of

sludge volume inside crude oil storage tanks

Ireneusz Baran, Tomasz Dunaj, Marek Nowak

ireneusz.baran@udt.gov.pl

Urząd Dozoru Technicznego, Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego, Warszawa, Polska

Podczas magazynowania ropy naftowej, zwłaszcza w dużych zbiornikach magazynowych, systematycznie na dnie osadzają się cząstki organiczne o wysokiej masie cząsteczkowej (np. parafina), cząstki stałe (piasek, muł, produkty korozji itp.), jak również woda. Po pewnym okresie eksploatacji zbiornika cząstki te gromadząc się, tworzą osad (osady), co powoduje m.in. zmniejszenie pojemności magazynowej. Składniki o wysokiej zawartości węglowodorów są nadal cennym surowcem, a właściwy sposób odzyskiwania pozwala na ich dalsze wykorzystanie do procesów rafinacji.

Z wyżej wymienionych powodów istotna jest wiedza o kształcie i objętości osadów na dnie zbiornika, gdyż pozwala na określanie najlepszej formy przeciwdziałania i kontrolowania poziomu osadów (w trakcie eksploatacji) oraz wybranie odpowiedniej metody ich usuwania (w przypadku wyłączenia z eksploatacji i otwarcia zbiornika).

Znajomość objętości i kształtu osadów w zbiornikach jest ważna dla użytkowników baz magazynowych ropy naftowej, przede wszystkim z następujących powodów:

• utrzymanie odpowiedniej pojemności magazynowej zbiorników oraz kontrolowanie i monitorowanie poziomu osadów,

• w przypadku zastosowania konwencjonalnych metod usuwania

osadów ropy naftowej, istnieje podwyższone ryzyko wystąpienia zagrożenia dla środowiska, dlatego też wybór odpowiedniej metody czyszczenia zbiornika jest bardzo istotny,

 większość konstrukcji zbiorników magazynowych posiada pływające dachy, co w przypadku gdy wewnątrz znajduje się wysoki poziom osadów, może powodować problemy lub nawet uszkodzenie dachu przy niskim poziomie składowanej ropy naftowej.

W artykule zostanie zaprezentowane zastosowanie technik AE i termografii do oceny poziomu, objętości i kształtu osadów zalegających na dnie w zbiorniku magazynowym.

W roku 2017 w Urzędzie Dozoru Technicznego otwarty został projekt na opracowanie systemu do oceny poziomu i ilości osadów w zbiornikach magazynowych ropy naftowej, z wykorzystaniem techniki AE i termografii. W ramach realizacji projektu, UDT podjął współpracę z firmą PERN S.A.

The role of continuing professional development (CPD) in enhancing professional competence

David Gilbert CEng MInstNDT MIET, CEO BINDT, Northampton NN1 5NX UK T: +44 (0)1604 438281 E-mail: david.gilbert@bindt.org

Continuing Professional Development (CPD) is understood across most professions as the systematic acquisition of knowledge and skills and the development of personal qualities to maintain and enhance professional competence.

All members of professional engineering institutions have an obligation to undertake CPD and to support the learning of others.

CPD can take a variety of forms. At its heart is informal learning through the challenges and opportunities of working life and interaction with others (e.g. colleagues, customers, suppliers), including professionals from other disciplines. However, this may be supplemented by structured activities such as courses, distance learning programmes, private study, preparation of papers and presentations, mentoring, involvement in professional body activities or relevant voluntary work.

While most engineering professionals undertake CPD, this is often on a casual basis, without any deliberate planning, recording of activities or conscious reflection. Whatever its purpose or nature, learning through CPD should be reflective and should relate to specific objectives, even if these are only to maintain professional engineering competence.

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 jednoszpałtowego wynosi 8,5 cm, natomiast dwuszpałtowego 17,5 cm.

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

Jednostki - układ SI.

Artykuł powinien zwierać:

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

Artykuły w formie pliku Word należy przysłać na adres e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl wraz z wypełnionym drukiem "Zgłoszenie publikacji" dostępnym na naszej stronie www: www.bnid.pl.

OGŁOSZENIA I ARTYKUŁY PROMOCYJNE

Ogłoszenia i artykuły promocyjne w kwartalniku "Badania Nieniszczące i Diagnostyka" – czasopiśmie ogólnopolskim dostępnym w formie drukowanej i elektronicznej na naszej stronie internetowej docierają do szerokiej grupy specjalistów.

W czasopiśmie zamieszczane są kolorowe i czarno-białe: ogłoszenia reklamowe na okładkach lub wewnątrz numeru oraz wrzutki dostarczane przez zleceniodawcę; artykuły techniczno-informacyjne jak również informacje o wydarzeniach oraz imprezach naukowo-technicznych. Cennik i forma ogłoszeń dostępne są na naszej stronie www: www.bnid.pl.

PRENUMERATA

Aktualne wydania dostępne w prenumeracie: 1–4/2018 oraz archiwalne: 1–2/2016; 1–2/2017; 3/2017; 4/2017. Prenumerata realizowana jest przez Redakcję. Kontakt i zamówienia pod adresem mailowym: prenumerata@bnid.pl.



telemond-holding.com







facebook.com/telemond

W skład Holdingu Telemond wchodzą 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 ofertę przede wszystkim w stronę sektora offshore systemów kontenerowych. Teleyard wykonuje także specjalne projekty w zakresie produkcji o dużych wymiarach i ciężarze. Spółka wybudowała w 2015 roku fabrykę w Szczecinie, która specjalizuje się w wielkogabarytowych konstrukcjach stalowych. Powstają w niej między innymi części dźwigów, chwytaków, specjalistyczne wyposażenie pogłębiarek.









Mentor Visual iQ teraz w wersji HD

Najlepszy WideoBoroskop na rynku teraz z sondą High Definition

Nowy Mentor Visual iQ, teraz z **TrueSight Imaging** w wersji HD to jeszcze szybsze i dokładniejsze badania. Nowy intuicyjny ekran dotykowy, indywidualne profile użytkownika oraz trójwymiarowe obrazowanie w Pomiarze Fazowym **Real3D Measurement**, to tylko niektóre możliwości, znacznie podnoszące efektywność badań wizualnych. Inteligentne rozwiązania wbudowane w platformę Mentor Visual iQ, to większa efektywność badań oraz trafniejsze decyzje.

Więcej na temat nowego podejścia GE do badań nieniszczących na: everestvit.pl lub endoskopy.pl



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