

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2012

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

**42. mezinárodní konference
42nd International Conference**



30. říjen–1. listopad 2012
October 30–November 1, 2012

Seč u Chrudimi, Czech Republic

**42. mezinárodní konference
DEFEKTOSKOPIE 2012/
NDE for Safety**

je sponzorována:

hlavní sponzoři / main sponsors



AQUACHEMIE 



OLYMPUS®

Your Vision, Our Future

sponzoři / sponsors



RAP^{s.r.o.}_{eo}

Czech Society for Nondestructive Testing
Česká společnost pro nedestruktivní testování



NDE for Safety DEFEKTOSKOPIE 2012

**42nd International Conference and NDT Exhibition
42. mezinárodní konference a výstava NDT techniky**

PROCEEDINGS SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

**October 30 - November 1, 2012
30. říjen - 1. listopad 2012**

Seč u Chrudimi, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera and Pavel Mazal

Konference se koná pod záštitou děkana Fakulty strojního inženýrství
Vysokého učení technického v Brně

All articles were reviewed by members of Scientific Committee.
Editors are not responsible for the reproduction quality in these Proceedings.
The contributions may be copied freely but credit should be given to the Proceedings.

Scientific Committee / Reviewers:

- Prof. Jaroslav Fiala – ZČU Plzeň (CZ)
- Prof. Janez Grum – University Ljubljana (SI)
- Prof. Karel Hájek – UN Brno (CZ)
- Assoc.Prof. Vladimír Husárek – Sofranel (F)
- Assoc.Prof. Marta Korenska – VUT v Brně (CZ)
- Prof. Olga Korobeynikova – ISTU Izhevsk (RU)
- Prof. Vitaly Muraviev – SSTU Novosibirsk (RU)
- Dr. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha (CZ)
- Dipl.Eng. Piotr Sullik (PL)
- Prof. Josef Šikula – VUT v Brně (CZ)

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal

Copyright © 2012
Czech Society for Nondestructive Testing
All rights reserved

Published by:
Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Technická 2, CZ 616 69 Brno

for

Czech Society for Nondestructive Testing
Technická 2, CZ 616 69 Brno

Printed by:
BETIS, spol. s r.o.
Areál VU Praha-Běchovice

ISBN 978-80-214-4609-0

CONTENTS / OBSAH

Katarzyna BIERNAT, Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ, Konrad NITA, Stefan WÓJTOWICZ ESTIMATING PARAMETERS OF REBARS IN CONCRETE EMPLOYING NONINVASIVE ELECTROMAGNETIC TOMOGRAPHY	1
Katarzyna BIERNAT, Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ, Konrad NITA, Jan SIKORA, Stefan WÓJTOWICZ NONDESTRUCTIVE IMPEDANCE METHOD OF BRICKWORK DAMP IDENTIFICATION	7
Irina BOLOTINA, Konstantin KVASNIKOV, Michael KROENING, Victor MAKAROV, Alexey I. SOLDATOV, Alexey A. SOLDATOV, Pavel SOROKIN MODELLING THE PATTERN OF ACOUSTIC ARRAY FOR PULSE MODE	13
Radosław DRELICH, Tomasz GORZELAŃCZYK, Michał PAKULA, Krzysztof SCHABOWICZ NDT TESTING OF CELLULOSE FIBER CEMENT BOARDS USING NON-CONTACT ULTRASOUND	21
Katarzyna FABIANIAK NONDESTRUCTIVE METHODS USEFUL IN ASSESSMENT OF CORROSION HAZARD TO CONCRETE STRUCTURES	29
Lukáš FAIT, Zdeněk SKÁLA, Jan VÍT Automatizované zkoušení tlakových nádob reaktorů typu VVER ultrazvukem AUTOMATED ULTRASONIC TESTING OF WWER REACTOR PRESSURE VESSELS	37
J. FIALA, P. MAZAL, M. KOLEGA, F. VLAŠIC, P. LIŠKUTÍN Mikrostrukturální procesy doprovázející únavu materiálu MICROSTRUCTURAL PROCESSES ACCOMPANYING MATERIALS FATIGUE	63
Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI, Krzysztof SCHABOWICZ EVALUATION OF CONCRETE HOMOGENEITY IN MASSIVE STRUCTURAL ELEMENT OF HYDROELECTRIC POWER PLANT BY MEANS OF NONDESTRUCTIVE IMPULSE RESPONSE METHOD	71
Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI, Krzysztof SCHABOWICZ EVALUATION OF CONCRETE HOMOGENEITY IN MASSIVE WALL OF HYDROTECHNICAL STRUCTURE BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPHY METHOD	77
Tomasz GORZELAŃCZYK, Krzysztof SCHABOWICZ NONDESTRUCTIVE TESTING OF THICKNESS OF CONCRETE MINE LIFT SHAFT SHELL BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPHY	83

Bilgin GULLER, Adnan GULLER, Gökhan KAZAZ	89
IS RESISTOGRAPH AN APPROPRIATE TOOL FOR THE ANNUAL RING MEASUREMENT OF PINUS BRUTIA?	
Štěpán HEFNER, Josef SLOWIK, Lukáš PINDOR, Jiří CIBULKA	95
Zkoušení podpovrchové oblasti kontinuálně odlévaného sochoru v Třineckých železárnách, a.s. TESTING OF THE SUBSURFACE AREA OF CAST BILLETS IN TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, A.S.	
Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI, Jacek REINER, Maciej STANKIEWICZ	101
CONCRETE SURFACE ROUGHNESS TESTING USING NONDESTRUCTIVE THREE-DIMENSIONAL OPTICAL METHOD	
Eleni CHEILAKOU, Panagiotis THEODORAKEAS, Maria KOU, Serafeim MOUSTAKIDIS, Christos ZERIS	107
APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) AS A DIAGNOSTIC TECHNIQUE IN CONCRETE BRIDGES INSPECTION	
Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ, Stefan WÓJTOWICZ	115
APPLICATION OF ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY IN MATERIAL DISTRIBUTION MEASUREMENT IN THE PROCESS OF MAGNETIC SEPARATION	
Jan KOLÁŘ	123
Význam a nenahraditelnost vizuální kontroly při kvalifikaci procesu svařování VISUAL TESTING IMPORTANCE AND IRREPLACEABILITY IN THE PROCESS OF WELDING PROCEDURE QUALIFICATION	
Bernard KOPEC	129
Etika v NDT ETHICS IN NDT	
Marta KORENSKA, Lubos PAZDERA, Monika MANYCHOVA, Josef STRYK	131
ON THE USE OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD TO DIAGNOSING A BRIDGE ELEMENT STRUCTURE	
Marta KORENSKA, Monika MANYCHOVA, Michal MATYSIK	139
EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE INTEGRITY AFTER TEMPERATURE DEGRADATION VIA NONLINEAR ULTRASONIC MEASUREMENTS	
Ondřej KOVACS, Břetislav SKRBEK, Andrzej ZYSKA	143
Diagnostika porozity lehkých slitin vířivými proudy na obrobených plochách DIAGNOSTICS POROSITY LIGHT ALLOYS EDDY CURRENTS ON MACHINED SURFACES	
Ivo KUSÁK, Miroslav LUŇÁK	153
Chování stavebních materiálů ve střídavém elektrickém poli BUILDING MATERIALS PROPERTIES CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD	
V. MAKAROV, C. DEMIN	159
THE METHOD AND DEVICE FOR MEASURING OF MECHANICAL STRESSES IN COMPONENTS	

Pavel MAREŠ, Ondřej HOUFEK, Ivan BULDRA	165
Problematika zkoušení heterogenních svarových spojů na JE typu VVER DISSIMILAR METAL WELDS EXAMINATION ISSUES ON NPP TYPE WWER	
Valeria NENAKHOVA, Karel HÁJEK	173
Algoritmy analýzy impact-echo signálů pro stanovení defektů ALGORITHMS FOR ANALYSIS OF IMPACT-ECHO SIGNALS FOR DETERMINATION OF DEFECT	
Adelajda PALA	181
COMPARATIVE ANALYSIS OF NONDESTRUCTIVE BRICK WALL DAMPNES ASSESSMENTS BASED ON HYPOTHETICAL DEPENDENCE AND CORRELATIONAL DEPENDENCE	
Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Jaroslav SMUTNÝ	189
APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD DURING SETTING AND HARDENING CONCRETE IN TIMBER AND METAL MOULD	
Lukáš PINDOR, Lubomír GRMELA, Pavel TOFEL, Petr SEDLAK, Jiří MAJZNER, Gabriel CSEFALVAY, Štěpán HEFNER	195
Experimentální použití laserové triangulační metody v Třineckých železárnách, a.s. EXPERIMENTAL USING OF THE LASER TRIANGULATION METHOD IN TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, A.S.	
Miloslav PROCHÁZKA	201
Nedestruktivní kontroly skladovacích nádrží STORAGE TANK NONDESTRUCTIVE INSPECTION	
P. RAFIEE, M. LEDERER, G. KHATIBI	211
NON-DESTRUCTIVE DAMAGE DETECTION USING A SCANNING LASER DOPPLER VIBROMETER AND THE CORRELATION METHOD	
Krzysztof SCHABOWICZ	221
STANDARD SIGNALS RECORDED BY ULTRASONIC TOMOGRAPH, FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CONCRETE ELEMENT THICKNESS	
Lubomír SODOMKA	229
Rentgenodifraktometrické hodnocení dokonalosti supravodivé keramiky RÖNTGENODIFRACTOMETRIC ESTIMATION OF SUPERCONDUCTING CERAMIC PERFECTION	
Lubomír SODOMKA	233
Využití nedestruktivních metod k hodnocení technologií, struktury a vlastností nanovláken THE USE OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR THE EVALUATION OF TECHNOLOGY, STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOFIBRES	
Lesław SOZAŃSKI, Piotr SULLIK	243
Analýza normalizace zkoušení svarů kapilární metodou ANALYSIS OF PENETRATION TESTS STANDARDIZATION OF WELDED JOINTS	
Jiří SVOBODA	249
Infračervené termografické (nedestruktivní) testování INFRARED THERMOGRAPHIC (NON-DESTRUCTIVE) TESTING	

J. TLAČBABA, M. ČERNÝ, D. VARNER	257
Monitoring tepelně ovlivnitelné aktivity včelstva MONITORING OF TEMPERATURE-DEPENDENT ACTIVITY IN A HONEY BEE COLONY	
Libor TOPOLÁŘ, Luboš PAZDERA, Vlastimil BÍLEK, Lenka DĚDEČKOVÁ, Jaroslav SMUTNÝ	263
MONITORING FOUR POINT BENDING OF CONCRETE BEAM BY ACOUSTIC EMISSION METHOD	
Jaroslav VÁCLAVÍK, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN, Otakar WEINBERG	271
Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí APPLICATION OF SOME METHODS FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT	
František VLAŠIC, Václav KOULA, Pavel MAZAL, Pavel GEJDOŠ	279
Monitorování plastické deformace v raných stádiích únavového procesu užitím metody akustické emise ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF PLASTIC DEFORMATION IN INITIAL STAGES OF FATIGUE PROCESS	
ABSTRACTS AND PAPERS AFTER DEADLINE ABSTRAKTY A PŘÍSPĚVKY DODANÉ PO TERMÍNU	289
Janez GRUM, Zoran BERGANT, Ivan POLAJNAR	291
MONITORING THE GMAW PROCESS BY DETECTION OF WELDING CURRENT, LIGHT INTENSITY AND SOUND PRESSURE	
Jan HETTLER, Jan KOBER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ	301
Monitorování rozvoje poškození v betonových dílcích pomocí metod nelineární spektroskopie elastických vln MONITORING OF THE DAMAGE EVOLUTION IN CONCRETE SLABS BY MEANS OF NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY	
Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Jan HEŘMÁNEK	309
Diagnostika převodovky vrtulníku pomocí spojité akustické emise DIAGNOSTICS OF HELICOPTER GEAR BOX BY CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION	
Libor NOHÁL, Pavel MAZAL, Libor TOPOLÁŘ, Luboš PAZDERA	319
Metoda akustické emise v hodnocení kvality odporového bodového svařování ACOUSTIC EMISSION TESTING IN QUALITY CONTROL OF RESISTANCE SPOT WELDING	
Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Zuzana FAROVÁ	325
Lokalizace a identifikace zdrojů ae pomocí časové reverzních zrcadel LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF AE SOURCES BY THE HELP OF TIME REVERSAL MIRRORS	
Afshin YOUSEFI et al.	333
HEAVY WALL PIPE LINE INSPECTION BY PHASED ARRAY ULTRASONIC TEST (PAUT) AND COMPARISON WITH CONVENTIONAL NDT METHODS	

Afshin YOUSEFI et al.	334
THE COMPARISON BETWEEN TOFD AND CONVENTIONAL UT CAPABILITIES IN DEFECT SIZING AND MONITORING FOR STEEL STRUCTURES UNDER CYCLIC AND DYNAMIC LOADING	
Bilgin GÜLLER, H. Tuğba DOĞMUŞ-LEHTIJÄRVI, Asko T. LEHTIJÄRVI	335
DETERMINATION OF FUNGAL ACTIVITY ON WOOD AT EARLY STAGES OF FUNGAL COLONIZATION USING THERMOGRAPHY	
Václav KOULA, Martin DRÁB, Josef VOLÁK	337
Některé aspekty detekce únavových trhlin metodou akustické emise SELECTED ASPECTS OF FATIGUE CRACKS DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION	
Valentin PETROV, Aleksandr PETROV	338
ACOUSTIC EMISSION TESTING (AET) DURING THE OPERATION	
Amir REICHENSTEIN, Noam AMIR, Harel PRIMACK, Dov FURMAN, Silviu ZILBERMAN	341
TUBE INSPECTION USING ACOUSTIC PULSE REFLECTOMETRY: APPLICATION TO A TUBULAR AIR HEATER	
Stanislav ŠTARMAN	342
Přenosný ultrazvukový systém s implementovanou technologií phased array ULTRASONIC PORTABLE SYSTEM WITH IMPLEMENTED PHASED ARRAY TECHNOLOGY	

AUTHORS INDEX / INDEX AUTORŮ

Amir N.	341	Manychova M.	131, 139
Bergant Z.	291	Mareš P.	165
Biernat K.	1, 7	Matysik M.	139
Bílek V.	263	Mazal P.	63, 279, 319
Bohdan P.	271	Moustakidis S.	107
Bolotina I.	13	Nenakhova V.	173
Buldra I.	165	Nita K.	1, 7
Bunda Z.	271	Nohál L.	319
Cibulka J.	95	Pakula M.	21
Csefalvay G.	195	Pala A.	181
Černý M.	257	Pazdera L.	131, 189, 263, 319
Dědečková L.	263	Petrov A.	338
Demin C.	159	Petrov V.	338
Doğmuş-Lehtijärvi H. T.	335	Pindor L.	95, 195
Dráb M.	337	Polajnar I.	291
Drelich R.	21	Primack H.	341
Fabianiak K.	29	Procházka M.	201
Fait L.	37	Převorovský Z.	301, 309, 325
Farová Z.	325	Rafiee P.	211
Fiala J.	63	Reichenstein A.	341
Furman D.	341	Reiner J.	101
Gejdoš P.	279	Sadowski Ł.	71, 77, 101
Gorzelańczyk T.	21, 71, 77, 83	Sedlak P.	195
Gmela L.	195	Schabowicz K.	21, 71, 77, 83, 221
Grum J.	291	Sikora J.	7
Guller A.	89	Skála Z.	37
Guller B.	89, 335	Skrbek B.	143
Hájek K.	173	Slowik J.	95
Hefner Š.	95, 195	Smutný J.	189, 263
Hefmánek J.	309	Sodomka L.	229, 233
Hettler J.	301	Soldatov A. A.	13
Hola J.	71, 77, 101	Soldatov A. I.	13
Houfek O.	165	Sorokin P.	13
Cheilakou E.	107	Sozański L.	243
Chlada M.	309, 325	Stankiewicz M.	101
Idziaszek-Gonzalez A.	1, 7, 115	Stryk J.	131
Kazaz G.	89	Sullik P.	243
Khatibi G.	211	Svoboda J.	249
Kober J.	301	Štarman S.	342
Kolář J.	123	Theodorakeas P.	107
Kolega M.	63	Tlačbaba J.	257
Kopec B.	129	Tofel P.	195
Korenska M.	131, 139	Topolář L.	189, 263, 319
Koui M.	107	Václavík J.	271
Koula V.	279, 337	Varner D.	257
Kovacs O.	143	Vít J.	37
Kroening M.	13	Vlašic F.	63, 279
Krofta J.	325	Volák J.	337
Kusák I.	153	Weinberg O.	271
Kvasnikov K.	13	Wójtowicz S.	1, 7, 115
Lederer M.	211	Yousefi A.	333, 334
Lehtijärvi A. T.	335	Zeris Ch.	107
Liškutín P.	63	Zilberman S.	341
Luňák M.	153	Zyska A.	143
Majzner J.	195		
Makarov V.	13, 159		

PAPERS / PŘÍSPĚVKY

NOTES / POZNÁMKY



ESTIMATING PARAMETERS OF REBARS IN CONCRETE EMPLOYING NONINVASIVE ELECTROMAGNETIC TOMOGRAPHY

Katarzyna BIERNAT*, Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ*, Konrad NITA*,
Stefan WÓJTOWICZ*

*Electrotechnical Institute, Warsaw, Poland

Contact e-mail: gonzalez@iel.waw.pl

Abstract

Noninvasive monitoring of concrete structure is an important element of building inspection. A new model of inductive sensor and reconstruction algorithm of rebar location is presented. The Measurement and Diagnostics Department in the Electrotechnical Institute performs research and development in that field. A new electromagnetic tomographic method is explored that can be combined with other methods due to fusion of output data at the image reconstruction phase. Reinforcement of concrete structure is made of ferromagnetic material characterized by high conductivity. Concrete cover is featured by low conductivity. The investigated area of concrete construction is stimulated by magnetic field generated by head. The variation in spatial distribution due to conductivity difference is registered simultaneously at a few points for different input frequencies. The resulted data is the reference spatial image for various frequencies. On the basis of the resemblance the most probable image is selected. As a result of digital processing the spatial image of reinforcement is obtained and further estimation of cover thickness, rebar diameter and its location can be done. The paper discusses applied method and shows the experimental setup, head structure and algorithm for signal processing.

Key words: *Electromagnetic Tomography, reinforcement of concrete, multifrequency sensor*

1. Introduction

The key problem in examination of reinforced concrete is to estimate size and condition of rebars. The first step of testing procedure is determining location and dimensions of individual rebars. That testing can be done by noninvasive methods [3, 4] and is the crucial element of concrete structure inspections. At Department of Measurement and Diagnostic Systems in Electrotechnical Institute in collaboration with Szczecin University of Technology and Building Research Institute [2, 6, 9] the research on developing of methods for localization, estimating dimensions of rebars and their covers were performed. The continuation of the performed research is proposing new, cost effective technique that allows measurements with minimal measurement uncertainty.

The work presents a general concept of that technique and device utilizing imaging of reinforcement structures. The aims of research being performed are to better the measurement precision of reinforcement geometry and detect existing rebar corrosion. In experiment inductive multi-sensor heads of various sizes [8] with multi-frequency current source [1] are used.

2. Methods.

The concrete reinforcement is made of ferromagnetic material characterized by high conductivity. The concrete cover is made up of low conductivity material. The inductive head generates magnetic field penetrating tested concrete area. Rebars present in that area change the magnetic field distribution. The field is registered at few points for different frequencies. The excitation is given by the following formula:

$$X(t) = \sum_1^N x_i \sin(\omega_{xi}t + \phi_{xi}) \tag{1}$$

where: x_i - amplitude of i-th sinusoidal excitation,
 ω_{xi} - angular frequency of i-th sinusoidal excitation,
 ϕ_{xi} - phase of i-th sinusoidal excitation.

The object modifies incoming signals to that registered by coil:

$$y(t) = K(X(t), \mathbf{P}) \tag{2}$$

where: $K()$ - given function,
 \mathbf{P} - vector of parameters characterizing reinforcement.

Assuming that the conversion is linear the following expression is obtained:

$$y(t) = \sum_1^N k_{xi} x_i \sin(\omega_{yi}t + k_{i\phi} \phi_{yi}) \tag{3}$$

Where: x_i - amplitude of i-th sinusoidal excitation,
 k_{xi} -coefficient of of i-th sinusoidal excitation,
 ω_{yi} - angular frequency of i-th sinusoidal excitation,
 ϕ_{yi} - phase of i-th sinusoidal excitation.

The information on reinforcement geometry is contained in $k_{\omega i}$ and $k_{\phi i}$ coefficients. Using an A/D probe a measurement is taken at time m :

$$y_m = y(t_m) = \sum_1^N k_{wi} w_i \sin(\omega_{yi}t_m + k_{i\phi} \phi_{yi}) \tag{4}$$

The signal y_m is registered in probe's memory. The record is accessible by serial interface. Independent on registration the microprocessor follows FFT algorithm.

The values of the amplitudes of the measured signal equal:

$$h_i = k_{vi} \cdot x_i \quad (5)$$

The estimation of the discrete values at a given point in time is carried out according to the measurement model taking into account metrological characteristics of sampling [9]. The above relationships show analog-to-digital conversions of the temporary values and amplitude values of the frequency components. Having those values the algorithm EIT creates an image.

3. Measurement system setup.

The data base is being built at laboratory site [2] that enables reinforced concrete testing with the use of various scanning probes and identification algorithms

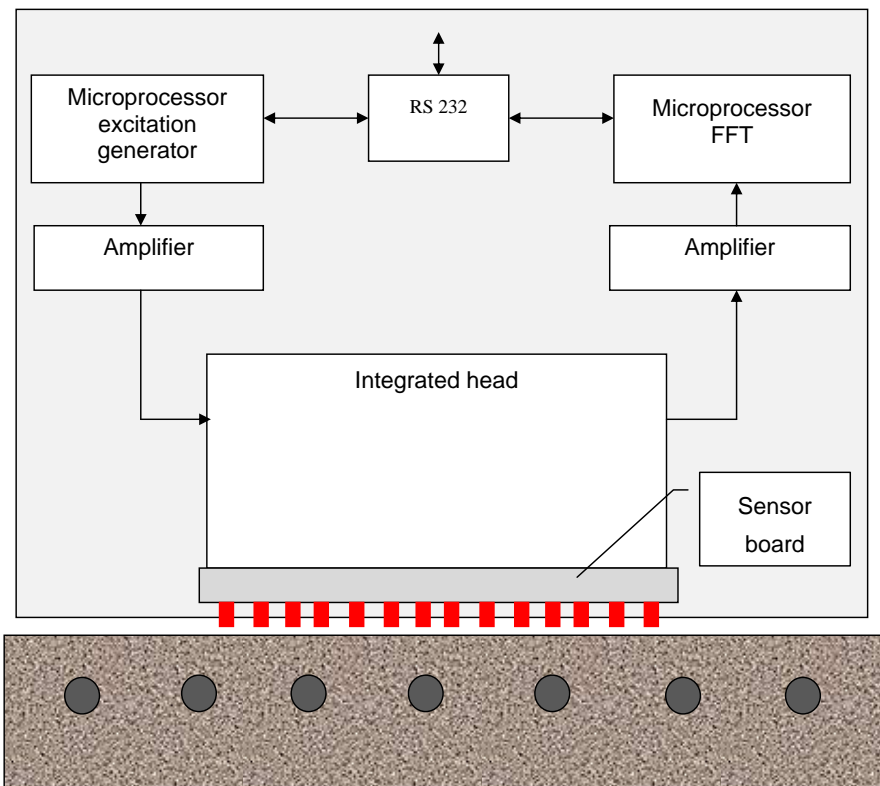


Fig.1 Functional schema of microprocessor head.

The experimental setup consists of: scanning manipulator, excitation probe, generator of excitation function, excitation signal amplifier, measured signal amplifiers, data acquisition system, industrial PC and terminal for graphical data

display device. An important element of the system is a probe based on the integrated sensor consisting of a number of identical elements with excitation and measurement coils [6. 8]. Microprocessor generator combines individual sinusoidal components. The parameters of excitation functions are chosen from outside of the probe by the parallel interface. Digital version of the signal is converted by A/D converter, next, after amplifying; the signal controls excitation coils of the integrated sensor.

4. Signal processing algorithms.

The measurement of the field distribution on the object's surface is done for versatile excitement coil location. The output data are compared with the template that was created by gathering the data prior to the experiment.

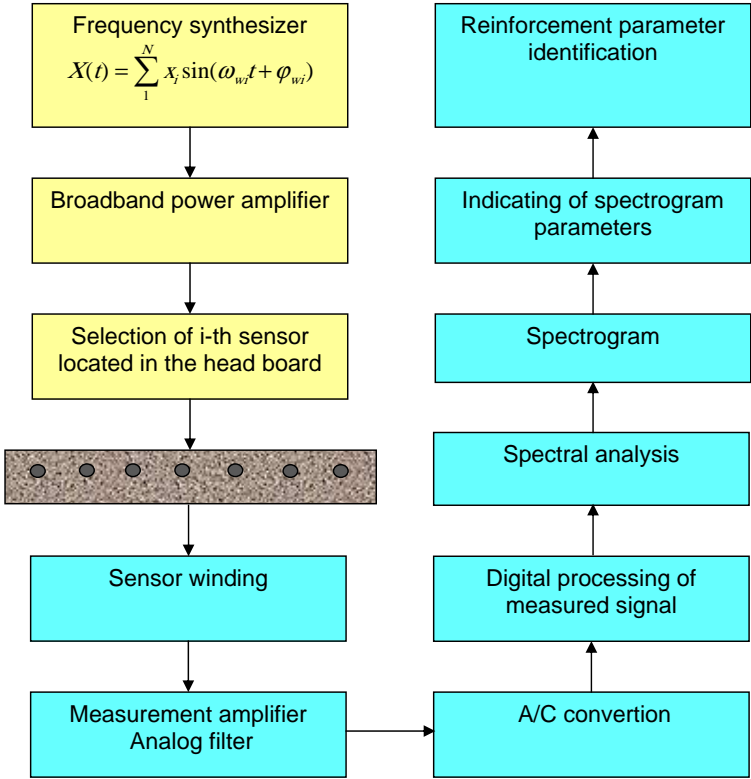


Fig.2 Flowchart representing a process of excitement and measured signal processing.

The data base comprises of image templates produced for different frequencies. As a result of comparison the most analogous image set is chosen. The probability is calculated employing probabilistic methods. The result of digital converting is a spatial image of reinforcement location that allows for estimating the cover thickness; rebar diameters and distances between individual rebars. For given reinforcement configuration the measured signal sent by sensor coil is characterized by temporal variations, registered as changes in signal spectrum. The most important parameters for geometry measurement are, as it has been confirmed by previous experiments, the amplitudes of sinusoidal components. The taken signals are verified for error detection, to eliminate stochastic disturbances and potential sampling failures. [9].

The employed software is capable of multi-frequency synthesis of excitement functions, data acquisition, signal frequency analysis and 3D reconstruction image of reinforcement placed inside the tested area. The experimental setup enables for measurement of multi-frequency signals sent by the probe coils. Considering the complexity of computations during the experimental time, the used PC needs to have big computing power. At every point of scanned area a spectrogram is created for sensors of various geometries being the part of the head. The obtained spectrograms are the input data for the EIT algorithms.

5. Conclusions.

The paper presents the application of multi-frequency method for rebar testing. The reinforcement image is created by measurement signal processing after receiving the outputs to excitation. The variation of coil location on the surface of the examined area causes scanning effect to occur. The EIT algorithms allow for reconstructing an image by comparing output data with prototypes found at the calibration stand. The head with a number of sensors and multi-frequency excitement has been implemented. The proposed method delivers more information that allows for effective identification of model's structure and precise identification of parameter values. The electromagnetic field penetrates the conducting material in the way that depends of applied frequencies, so that the sensor can detect nonuniformity of the material providing the signal are of different frequencies [5, 7].

In the experiment the sensor of various sizes were used. The reinforcement parameters are obtained based on the comparison procedure of excitements and replies. The different rebar configurations provide various signal images as a response to the same excitement. The applied tomographic method can be combined with other methods due to output data fusion at the reconstruction stage of the experiment. It is possible to optimize measurement sensors, sampling and identification algorithms. The aim is to develop a portable device for 3D imaging of concrete reinforcement. The presented results indicate that the multisensor head construction gives the possibility of outcoming data to differ depending on rebar location and its size. The EIT algorithms application leads to improvement of resolution and high noise tolerance.

6. References.

1. Chady T., Sikora R.: Optimization of Eddy-Current Sensor for Multifrequency Systems. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 39, No. 3 May 2003.

2. Chady T., Runkiewicz L., Sikora R., Wójtowicz S.: Model systemu pomiarowego do testowania zbrojenia w budowlanych elementach żelbetowych. XIII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych. Kraków, AGH, 2003, s. 37-44.
3. Chady T., Enokizono M., Sikora R., Takeuchi K., Kinoshita T.: Eddy current testing of concrete structures. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics. 15(2001/2002) 33-37s. IOS Press.
4. Chady T., Sikora R., Gratkowski S., Wójtowicz S., Nagata S.: Eddy Current Inspection of Reinforcement Bars in Concrete Structures. Proceedings of the Tenth International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Michigan State University, June 1-2 2004.
5. Greve-Dierfeld S., Gehlen C., Menzel K.: DFG Research Group 537: Modelling of reinforcement corrosion – Validation of corrosion model. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3, 407-413.
6. Nita K., Wójtowicz S.: Multichannel Measuring Setup in Application to Impedance Tomography. Chapter 11 in: Industrial and Biological Tomography, Theoretical Basis and Applications. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2010.
7. Seppänen A., Karhunen K., Lehtikoinen A., Kaipio J.P., Monteiro P.J.M.: Electrical resistance tomography imaging of concrete. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds) 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3p .571-577.
8. Wójtowicz S., Matuszewski A.: Mikroprocesorowa sonda do wykrywania zbrojenia budowlanych elementach żelbetowych, Zeszyty Problemowe Badania Nieniszczące, 2003 nr 8.
9. Wójtowicz S., Sikora J.: „Metrological Analysis of Data Acquisition System for Impedance Tomography” PROCTOM 2006 4th International Symposium on Process Tomography, 14-15 września 2006r.



NONDESTRUCTIVE IMPEDANCE METHOD OF BRICKWORK DAMP IDENTIFICATION

Katarzyna BIERNAT*, Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ*, Konrad NITA*,

Jan SIKORA*, Stefan WÓJTOWICZ*,

*Electrotechnical Institute, Warsaw, Poland

Contact e-mail: gonzalez@iel.waw.pl

Abstract

The objective is to present an application of the Electric Impedance Tomography (EIT) method to brickwork damp identification. The dampness of brickwork in building structures is the key element of building maintenance. The walls of most historical buildings are highly damp and saline because of the lack of any damp insulation. As a result of the damage caused by dampness the strength parameters deteriorate being hazardous to the building and environment. In order to stop the progressive damp damage adequate proofing needs to be applied. The way to select proofing solution is determining the moisture content distribution along both the height and the width of the walls. The paper discusses the project that aimed at development of a method of assessing the dampness of brickwork by conductivity measurement. The spatial distribution of conductivity is obtained by digital processing of surface potential measurements existing due to low current flow. The accuracy of the conductivity mapping depends mainly on data acquisition method. The tomographic unit is equipped in multielectrode array adapted to various materials surfaces, switching electronics, analog to digital (A/D) converter. The main issue is the application of the general impedance tomography algorithm made to spatial imaging and experimental testing that results indicate conductivity- dampness relation assuming given wall structure. The paper shows the functional structure of impedance tomographic unit applied to brickwork damp identification. The measurement data of measuring chains are presented.

Key words: *Electromagnetic Tomography, brickwork damp identification, spatial distribution of conductivity, multielectrode array*

1. Introduction

Determination of the brickwork dampness is an important factor of building condition evaluation. The walls of most historical buildings are highly damp and saline due to weather conditions and environmental impact. As a result of damage caused by the high moisture content the strength parameters of the brick become lowered which often poses a hazard to the safety of the building. To stop the progress in damage the proper proofing and materials need to be chosen. The moisture content influences electric parameters of the construction that can be used in technical diagnostics [6, 7]. Electric Impedance Tomography (EIT) allows for brickwork damp identification inside the object in a nondestructive way. Based on the performed tests the objects can be distinguished according to the applicable drying methods.

In the rehabilitation process drying can be controllable. The aim of the described procedures is to further develop of damp identification based on the conductivity spatial distribution inside the inspected object without any destruction of its structure.

The spatial conductivity distribution is obtained by digital processing of surface potential measurements existing due to low current flow. The application of EIT as a nondestructive method is developed at the Electrotechnical Institute [1, 2]. The paper presents the schema of the experimental setup built to multipoint voltage measurement used to determine impedance parameters.

2. Electric Impedance Tomography

The objective of EIT method is to find out the internal conductivity distribution of the object. The conductivity measurements are taken on the surface of the investigated object [3, 4]. The distribution of the measurement points on the boundary must take into account linear independency of measurements and could not be freely dense. The relation between potentials and conductivity distribution is expressed by:

$$v = T(\mathcal{J}, \gamma) \tag{1}$$

- where: v – measured potentials,
- \mathcal{J} – current density vector,
- γ – conductivity distribution,
- T – nonlinear mapping based on Laplace equation.

In order to increase the number of information on conductivity distribution the data are taken for different, independent power sources. This relation is described by the following matrix form:

$$v = A\gamma \tag{2}$$

- where: v – vector of measured potential,
- γ – conductivity vector,
- A – matrix of mapping function T .

The inverse problem could be written as:

$$\gamma = A^{-1}v \tag{3}$$

Such formulated inverse problem of finding the conductivity distribution having measured the potentials, is usually ill posed and has no unique solution. The numerical methods are applied to get the proper solution. The analytic solutions are of cognitive and didactic nature and works for linear, isotropic objects with simple geometry.

3. Functional system architecture.

The voltage measurement on the surface of tested object is taken by multielectrode system. The electrode's location on the surface is fixed. Output data are gathered sequentially for different exciting electrodes. The signal generators

together with switching electronics are controlled by a PC-computer. Based on the block diagram in Fig. 1 the measuring system was assembled comprising of a PC-computer, switching and measuring boards and the software [5]. The electrodes are connected in parallel way through the signal conditioning system to the multiplexer and switching unit. The multiplexer is a two-stage, semiconductor device to assure simultaneous data acquisition in 32 channels.

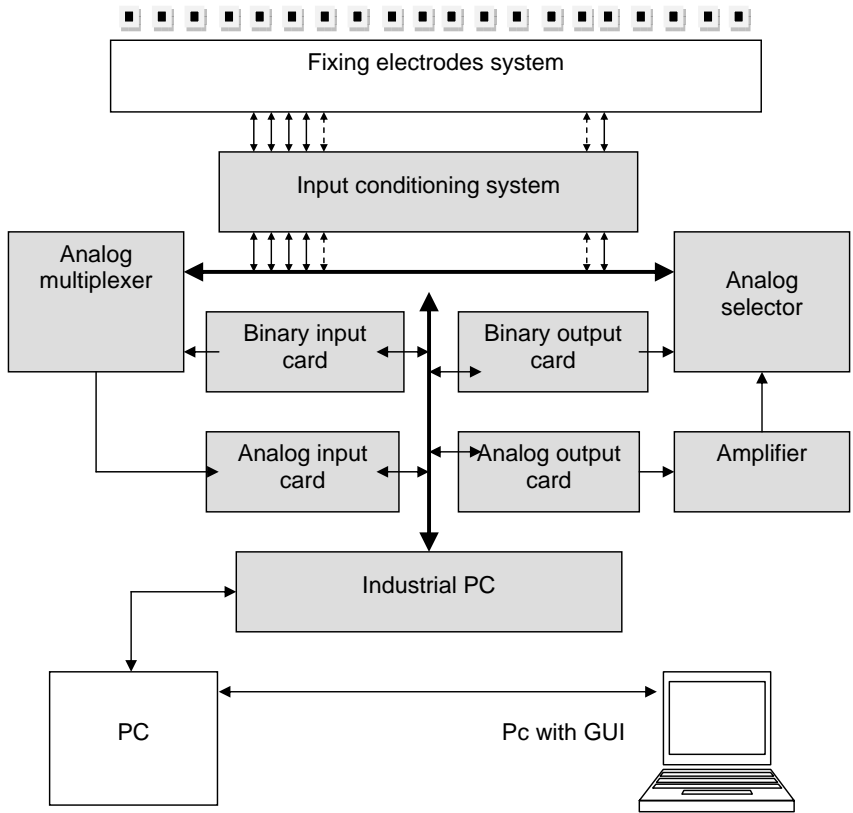


Fig. 1. Block diagram of data acquisition system

An A/D converter assures 12-bit precision with maximum frequency sampling of 300 kHz. Additional precision is accomplished by the use of programmable amplifier preceding the A/D converter [8]. The application based on the general algorithm of EIT for spatial imaging has been setup. The results show the conductivity and dampness relationship at given internal structure. The obtained data of temporary voltage values are gathered in 3D matrix and then post processed using internal image reconstruction algorithm. The system architecture related to its functionality is based on the PC and specialized boards [4, 5].

3. Results

The electrodes are fixed to the surface of the tested brick. (Fig. 2, 3). As it was planned the source voltage is applied to the electrodes.

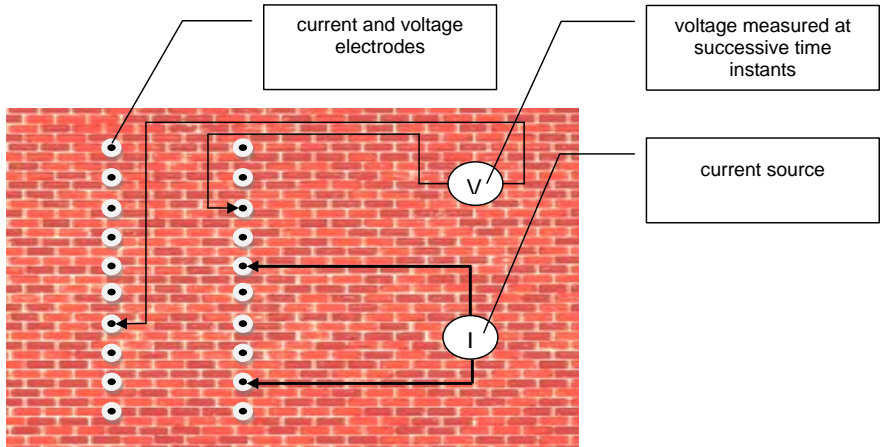


Fig. 2. Outline of one-sided electrode placement on the surface of the wall.



Fig. 3. Electrodes fixed to the both sides of the wall.

The investigation was performed on the purpose-built wall that enables dampness and fast drying process control. [6, 7]. The measurements were taken for specific frequencies of source current. The laboratory stand is presented in Fig. 4. The aim of

the performed research was to evaluate dependence between electrical impedance and dampness inside the wall.



Fig.4 Laboratory stand for preliminary investigation.

Some of the results taken at 1 kHz frequency are presented in the Fig. 5.. One determined the correlation between the dampness images and frequencies.

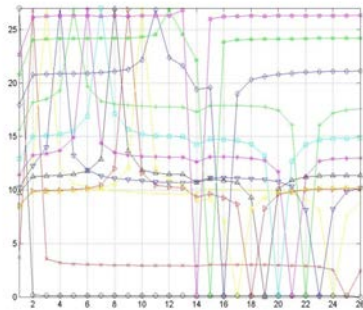


Fig.5 Potential distribution on electrodes at 1 kHz frequency.

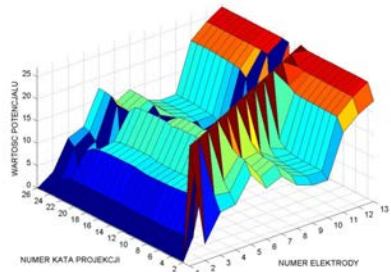


Fig.6 Potential distribution dependency on projection angle and specific electrode.

5. Conclusions

The results of the experiment enable the non-invasive diagnostics of brickwork employing EIT method. The output data provide cross section graphic of tested

objects containing information on damp distribution. Such images can be archived, compared and contrasted with others collected at any time. The method can be of great importance in quality controlling of proofing solution and also in checking on fast drying processes applied after installing the insulation, particularly in the case of thick walls. The tomographic measurement system is characterized by the time and spatial phase's distribution of data processing. This allows for significant cost reduction of portable measurement devices and also for shortening the computational time.

6. References

1. Berowski P., Filipowicz S.F., Sikora J., Wójtowicz S.: Determining Location of Moisture Area of the Wall by 3D Electrical Impedance Tomography. 4th World Congress on Industrial Process Tomography, Aizu, Japan 2005 vol 1 s 214-219
2. Biernat K., Nita K., Sikora J., Wójtowicz S.: Impedance tomography data acquisition system for brick walls humidity level evaluation, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11'2007, str. 171-173.
3. Biernat K., Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K., Wojtowicz S.: Tomographic method of humidity level evaluation for walls in brick, XIIth Science and technology conference, REMO, 6-8 grudnia, Wrocław 2007, str. 192-199.
4. Biernat K., Nita K., Sikora J., Wójtowicz S.: Impedance Tomography Data Acquisition System for Brick Walls Humidity Level Evaluation, *ISTET 2007*, June 20-23, 2007, Szczecin, pp. 96.
5. Biernat K., Filipowicz S.F., Sikora J., Wójtowicz S.: The data acquisition system for impedance Tomography for measuring the distribution of moisture in walls, *The 9th International Conference: Modern Building Materials, Structures and Techniques*, May 16-18, 2007, Vilnius Lithuania, pp.123-124.
6. Hoła J., Wójtowicz S. Scientific editors. Authors: Hoła J., Sikora J., Filipowicz S., Matkowski Z., Nita K., Schabowicz K., Wójtowicz S., Biernat K.: New tomographic method of brickwork damp identification. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2010.
7. Hoła J., Matkowski Z., Schabowicz K., Sikora J., Wójtowicz S.: New method of investigation of rising damp in brick walls by means of impedance tomography, *World Conference on Nondestructive Testing*, 25-28 October 2008, Shanghai, China.
8. Wójtowicz S., Sikora J.: „Metrological Analysis of Data Acquisition System for Impedance Tomography” *PROCTOM 2006 4th International Symposium on Process Tomography*, September 14-15, 2006, Warsaw.



MODELLING THE PATTERN OF ACOUSTIC ARRAY FOR PULSE MODE

Irina BOLOTINA*, Konstantin KVASNIKOV*, Michael KROENING*,
Victor MAKAROV*, Alexey I. SOLDATOV*, Alexey A. SOLDATOV*,
Pavel SOROKIN*

*Tomsk polytechnic university

Contact e-mail: bolotina@tpu.ru

Abstract

The problem of analytical determination of the pattern of complex acoustic array for pulse mode is an extremely difficult task. If to take into consideration the existing in practice form of probe influence which, as a rule, does not undergo analytical description then the task becomes practically impossible to complete. However to solve many problems of non-destructive testing it is necessary to determine and analyze the pattern of multi-element acoustic array for pulse mode. The method of numerical simulation of a linear equidistant antenna array with information processing by the algorithm SAFT, which enables the calculation of the radiation pattern of antenna array operating in pulse mode, is proposed in the paper. Results presented in the article include discussion of the simulation results and experimental studies that illustrate the spatial parameters of the pattern and characterize the possibility of quantifying the size of defects, also they allow to make the conclusion about high efficiency of the method suggested.

Key words: SAFT, radiation pattern, side-lobe, line array, numerical simulation

1. Introduction

Development of acoustic methods of nondestructive testing goes on the way of implementing ultrasound antenna arrays. This direction is called for several advantages in comparison with single transducers. A very significant feature is the capability to increase the signal/noise relation. Multiple sources of noises determined separately as a rule form a noise which is characterized by probabilistic parameters. The processing algorithm SAFT [1] presupposes coherent summation of signals of separate elements which constitute an array. Under the normal law of noises probability density distribution, the increase of signal/noise relation is in proportion to the number of elements in the array.

Another positive feature of antenna arrays application is the possibility to form two- and three-dimensional images of defects. The grounds for this are the capability to scan by directional diagram (DD) within the required control area. With much certainty the control area can be considered a linear field and, consequently,

possessing additivity properties. The obtained data represents the discrete set which characterizes the state of each point of scan area separately. In pulse-echo method the pattern of forming a signal-response will be formed, first of all, on such characteristic as directional diagram. SAFT algorithm suggests realization of integral value of this parameter in the radiation mode and in the receive mode.

Another factor which influences the signal-response is the coefficient of acoustic radiation reflection by discrete point of analyzed object. In general terms it can be written down as:

$$F(x, y, z) = R(x, y, z) \otimes L(x, y, z), \tag{1}$$

where x, y, z – Cartesian coordinates, $F(x,y,z)$ – acoustic image of the object, represented by signal-response, $R(x,y,z)$ – impulse spatial directional diagram in echo-pulse mode, $L(x,y,z)$ – reflection characteristic of object under control, \otimes - compression symbol.

Expression (1) allows to formulate the required condition for calculation of acoustic image of the object under control which is at maximum approximated to its geometrical configuration. Desired function is $L(x,y,z)$, known (measured) function – $F(x,y,z)$. Therefore, to solve equation (1), it is necessary to determine $R(x,y,z)$ – impulsed spatial directional diagram of antenna array in echo-pulse mode. Such variant of directional diagram representation differs in some way from traditional definition.

2. Antenna array directional diagram calculation for harmonic wave.

Traditionally directional diagram is defined as the function which describes the relation of acoustic pressure (or the amplitude of oscillating speed) from angular coordinates (angle of elevation and azimuth) with constant distance to the given point of field. The majority of antenna systems allow separation of variables x and y in the expression of function which describes the directional characteristic. Physical interpretation of such separation is that each factor describes directional diagram of linear antenna array oriented accordingly by selection from the whole antenna system. Therefore, the problem can be formulated as calculation of directional diagram of linear antenna array.

The theory of antennas [2] gives expression for the directional diagram of equidistant linear array under harmonic wave of irradiated signal:

$$R(\theta, \varphi) = R_i(\theta, \varphi) \cdot R_N(\theta), \tag{2}$$

where $R(\theta, \varphi)$ – the directional diagram of linear antenna array, $R_i(\theta, \varphi)$ – the directional diagram of antenna element, $R_N(\theta)$ – factor of equidistant linear array.

The last factor is identifies by the formula:

$$R_N(\theta) = \frac{\sin \frac{N \cdot \varphi}{2}}{N \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}, \tag{3}$$

where N – number of elements in antenna array, Ψ – generalized angular coordinate identified by the expression $k \cdot d \cdot \cos \theta$, k – wave number, d – the distance between neighboring elements of array.

The sizes of antenna element are chosen in such a way as to provide the maximum area of scanning. Apart from that, highly desirable is the presence of only one principle maximum. For that it is necessary to meet the condition $d < \lambda$, where λ – the length of acoustic radiation wave [3]. That is why the sizes of antenna element along the longitudinal axis of antenna array do not exceed half the wave length and the width of corresponding directional diagram approximates 180° . Calculation of fulfilled in such way antenna system is simplified as the function $Ri(\theta, \varphi)$ in expression(2) can be set equal to unit. Then the factor of antenna array will fully characterize its directional diagram. It is necessary to mention that expression (3) is obtained with allowing some randomness assumption which are typical for the work in far field zone.

The principle of echo-locating equipment work is based on application of impulse signals of probing. The calculation of directional diagram in this case represents considerably more complicated problem. It seems that the only one method of analytic analysis is the application of spectral decomposition of pickup signal in Fourier series with the following weight summation of elementary directional diagrams for harmonic components. This procedure requires large expenses and due to this reason didn't find wide application. Extra complexities arise with analytic description of applied in practice probing signals. In most cases it is accompanied by the whole number of approximations and assumptions which decrease reliability relation of acquired results to true data.

Another means of obtaining directional diagram for arbitrary type of antenna array and arbitrary form of probing signal is computational modeling with application of this or that computational mathematic editor. The widest possibilities are offered by MATLAB which was used for obtaining the described below results.

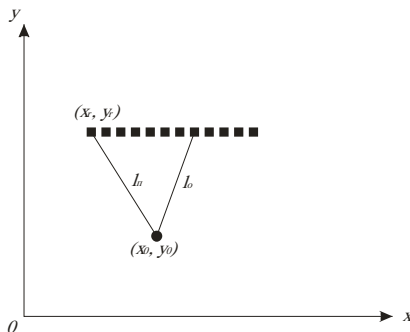


Fig.1 Location of acoustic tract in Cartesian coordinate system.

The process of directional diagram modeling according to the algorithm SAFT consists of two stages. The first stage is about forming sets of A-scans, quantity of n_a of which is connected with number n of elementary transducers in relation $n_a = n_2$. Preliminary it is necessary to define the sizes of control zone, scanning pitch in

transverse direction and longitudinal direction, location of point scattered and speed of sound in the control zone. Geometry of acoustic tract in Cartesian coordinate system is given in Fig 1.

It is possible to define three zones on time base of each of A-scans. The first occupies the time interval from the probing moment till the moment when reflected signal still hasn't got into transducer. The time equals $(l_m + l_o)/c$, where c – speed of sound. It is filled with zeros. The next zone represents by itself the digital form of reflected acoustic impulse. It is evident that this form can possess absolutely arbitrary configuration because it doesn't require analytic description. The last zone is the zone of zeros, the beginning of which is given by the moment of the end of response signal and the end of which is determined by the control zone boundary. It is reasonable to convert a set of A-scans into 3-D matrix, the first application of which equals to the number of oscillators, the second – to the number of receivers, and the third – to the number of minimum resolutions of full time axis.

The second stage of modeling contains the algorithm of coherent summation in accordance with SAFT method. In the beginning the time of signal response arrival from each point located in control zone is determined. Then summation of A-scans data selected in definite points of time takes place. In such a way the volumetric (3 dimensional) image of acoustic field distribution in the control zone with the condition of arbitrary location of reflecting point is being formed. By definition this image presents by itself the directional diagram of antenna array.

The main difference of impulse mode work from the work in harmonic mode is localization in time of the field structure in control zone. That is why the corresponding directional diagrams also differ by this characteristic. Antenna array which is using harmonic signal possesses the orientability only in transverse direction in relation to the acoustic beam path. That is why the typical image of such directional diagram in Cartesian coordinate system has the function mode which relates only to one argument. As an example the directional diagram of linear antenna array which is working in the frequency of 2 MHz is shown in Fig 2. The distance between two oscillators is 1,5 mm and the environment of the control zone is characterized by the speed of ultrasound which is equal to 1500 m/sec.

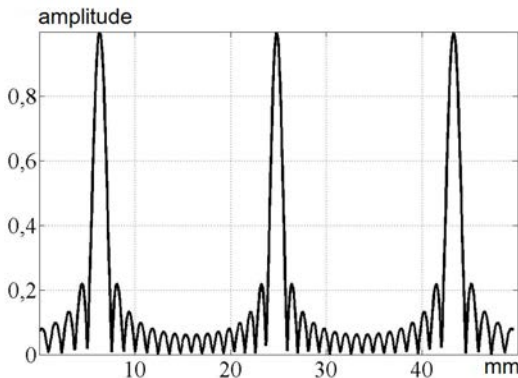


Fig.2. Directional diagram in harmonic mode.

Cross-sections of elementary piezoelectric element do not exceed the half of the wave length, that is why its directional diagram wasn't taken into consideration.

The distance from array aperture till the control point is taken as equal to 40 mm. Changes in the phase in side lobes in 180° are not shown in Fig. 2. Scan angle rate is taken as equal to 0°.

In the Figure the three principal maximums are seen, one of which is the central maximum (typically it is taken as workable) and there are two lateral ones which create noise reflections. Side principal lobes are attempted, as a rule, to be excluded from the control zone by the means of corresponding choice of the distance between the matrix elements. Side lobes possess considerably smaller sizes but they also produce noises. The peak value is possessed by the first lobe located close to the central principal one. It comprises approximately minus 13 dB. The width of the principal maximum of directional diagram by the level 0,5 equals to 0,8 mm.

3. Antenna array directional diagram calculation for impulse mode. Experiential studies` results

The directional diagram of antenna array has more complex structure when probing with impulse signals. The results of experiential studies of linear equidistant acoustic antenna array the parameters of which were used for directional diagram calculation in harmonic sound mode are shown in Fig.3.

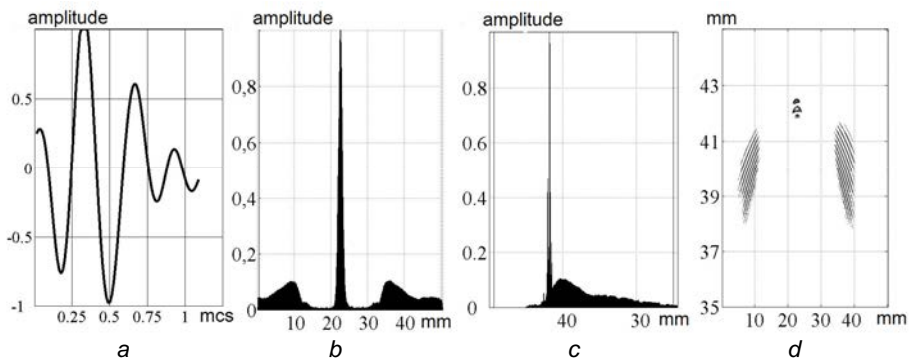


Fig. 3 Experiential directional diagram in impulse mode.

- a – configuration of probing signal; b – frontal view of directional diagram;
- c – up projection of directional diagram; d – top view of directional diagram.

It is necessary to point out that only positive part is shown on directional diagram images while the negative part mirror located to axis x and fully symmetric to the first one, is omitted. The configuration of experiential probing signal normalized to unit is shown in Fig 3. Fig 3b shows the result of processing according to SAFT algorithm of pickup A-scans in case of using pellet as a defect model with diameter of 0,8 mm, placed at the distance of 41 mm from the radiating surface of array. It is possible to approximately consider it as point scatterer while spacial distribution of the field amplitude in the given control zone – as directional diagram. There are

distinguished principal side lobes in the Figure. They constitute less than minus 20 dB of the principal, i.e. less than the first side maximum in harmonic mode for 7 dB. The width of the principal lobe in frontal projection is less than 1,05 mm, that is a bit more than the corresponding characteristic of harmonic mode.

Fig. 3c shows the profile projection of directional diagram which is not typical for harmonic mode work. Axis x of this Figure graded in units of length is obtained in

accordance with expression $\frac{ct}{2}$, where c – speed of sound in control zone, t – time of echo-pulse arrival. Detailed analysis of the principal lobe shows that its form matches the form of probing signal. The length of this projection of directional diagram is identified by the wavelength of acoustic radiation in control zone and by the number of probing signal cycles. The maximum value of side lobes is observed in the area located near the principal lobe. Then their amplitude decreases steadily.

Fig. 3d shows the top view on directional diagram. It is visible that the principal lobe and side lobes are located in the control zone quite nonuniformly. In addition, side lobes occupy considerable part of the control zone cross-section area. It is interesting to mention that directional diagram obtained when treating source information processed by SAFT method has the form of circular arc which center coincides with the antenna array center.

4. Results of directional diagram computational modeling for impulse mode

The results of antenna array` directional diagram modeling with information processing by SAFT method and by probing signal which is maximally approximated to experiential signal waveform are presented in Fig 4. It was performed in order to evaluate the degree of credibility of simulation method. The acoustic tract parameters and the image content correspond to the conditions presented in Fig. 3.

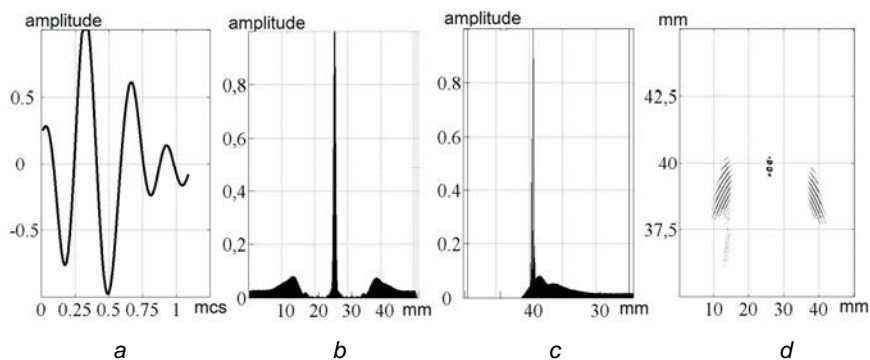


Fig. 4 Calculated directional diagram in impulse mode.

a – configuration of probing signal; b – frontal view of directional diagram;
c – up projection of directional diagram; d – top view of directional diagram.

Detailed comparison of Fig. 3 and Fig. 4 shows closely approximated matching of the main characteristics of presented results. The predicted level of side lobes constitutes minus 22 dB, while the width of directional diagram frontal cross section on the level 0,5 – is not more than 0,6 mm. The form of profile cross section also repeats the probing signal waveform. The difference in directional diagram width which constitutes 0,45 mm, is explained by the presence of distinct cross section area of defect model which was used in the experiment. The calculation of acoustic tract` geometrical characteristics, typology of which is shown in Fig. 1, shows that the surface on which acoustic waves fall approximates by its form to the pellet segment with the radius equal to 0,4 mm. It constitutes the difference of point scatterer from the experimental sample. This fact evidently appears to be also the reason for some differences in the form and sizes of side lobes presented in Fig. 3d and Fig. 4d.

The presented here results illustrate quite high degree of reliability of modeling method of antenna array directional diagram with data processing by SAFT method.

4. Conclusions

The carried out research allows to make the following conclusions.

1. The technique of computer modeling of antenna array with information processing with SAFT algorithm allows more vividly and with high degree of reliability conduct the analysis of spatial parameters of directional diagram.
2. Directional diagram in impulse mode work possesses the characteristic of spatial and time-interval localization which depends on the probing pulse duration.
3. The directional diagram cross section width depends on the probing pulse duration, more than that, it occurs to be less, the lesser the duration is.
4. The directional diagram form in the direction of acoustic beam propagation repeats the form of probing signal.
5. The side lobes amplitude is much less than the corresponding amplitude in harmonic mode and the decrease is more, the shorter the probing impact is.

References:

1. Bernus L. von, Bulavinov A., Dalichow M., Joneit D., Kröning M., Reddy K.M.: Sampling Antenna array: A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging, In: Insight. Volume 48, Issue 9, Pages 545-549, September 2006.
2. Amitei N., Galindo B., By Ch. Theory and analysis of phased arrays. Translation form English, editor A.F. Chaplin. – Moscow.: Mir. – 1974, 455 p.
3. Manual on elements of radioelectronic devices. Editors V.N. Dulina, M.S. Zhuck. – Moscow.: Energy.- 1977, 576 p.



NDT TESTING OF CELLULOSE FIBER CEMENT BOARDS USING NON-CONTACT ULTRASOUND

Radosław DRELICH*, Tomasz GORZELAŃCZYK**, Michał PAKULA*,
Krzysztof SCHABOWICZ**

*Institute of Mechanics and Applied Computer Science, Kazimierz Wielki University
in Bydgoszcz, **Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Contact e-mail: k.schabowicz@pwr.wroc.pl

Abstract

This paper presents experimental studies of cellulose fiber cement boards using non-contact ultrasonic system were performed. Both the theoretical and experimental studies were performed on cellulose fiber cement boards. Cellulose fiber cement boards are the materials commonly used in architectural engineering for many external and internal applications such as buildings elevation or as walls and roofs covering materials. The theoretical studies of plate waves served to identification of the wave mode measured in the boards. It was found that the flexural (A0) mode, having velocity about 1200 m/s, propagates in the material. The preliminary experiments were done for the cement boards specimens, using 3D laboratory non-contact ultrasonic system and then, based on the obtained results new dedicated 1D scanner was designed and built. The obtained results confirmed applicability of the non-contact ultrasonic method using plate waves to studies of cellulose fiber cement boards. It allowed distinguishing between healthy and defective area within the boards and thus the method can be found as promising tool for future factory production control.

Key words: *acoustic methods, non-contact ultrasound, nondestructive testing, cellulose fiber cement boards*

1. Introduction

Cellulose fiber cement boards are the materials commonly used in architectural engineering for many external and internal applications such as buildings elevation or as walls and roofs covering materials [1, 2]. Modern boards are asbestos-free and are classified as eco-friendly constructional materials. They are characterized by good fire-proof and heat insulation as well as moisture-proof performance. Moreover, they are easy for construction, light weight, they have stable dimensions durability and long service life.

Accordingly to the polish norm [2], the manufacturer of the cellulose fiber cement boards, which are used in architectural engineering, is obliged to organize engineering inspection department in the factory, responsible to regular control of products. The factory production control process is based on studies of repeatability of geometrical parameters, apparent density, leak test, vapor permeability test and standard mechanical bending strength testing [2].

The main disadvantage of most of the standard inspection methods, specified by polish norms [2, 3, 4] is their selective (the size of testes specimens is much smaller than the size of the whole element) and destructive character.

The abovementioned limitations can be significantly reduced by application of complementary, non-destructive tests e.g. using ultrasonic methods, which are recognized as a powerful tool widely applied tool in NDT community.

The main purpose of the paper is to evaluate the applicability of the non-contact ultrasonic method to study of the cellulose fiber cement boards during their production. The paper is focused on both theoretical and experimental studies of the plate wave propagation phenomena in the material. Within theoretical framework the analysis of the Lamb waves (A0 – asymmetric zero mode) was performed, which was found to be the most convenient to diagnose the quality of the cellulose fiber cement boards. The preliminary experiments were done for the cement boards specimens, using 3D laboratory non-contact ultrasonic system and then, based on the obtained results new dedicated 1D scanner was designed and built.

2. Ultrasonic studies

2.1. Theoretical studies

Lamb waves (also called plate waves) can be generated in a plate with free boundaries with an infinite number of modes for both symmetric and antisymmetric displacements within the layer, [11]. The symmetric modes are also called longitudinal because the average displacement over the thickness of the plate or layer is in the longitudinal direction. The antisymmetric modes exhibit average displacement in the transverse direction and also called flexural modes. The Rayleigh-Lamb frequency equations for both modes, describing the dispersion of phase velocity can be written as, [11]:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{for symmetric modes,} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad \text{for antisymmetric modes,} \quad (2)$$

where p and q are given by:

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k^2 \quad \text{and} \quad q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k^2. \quad (3)$$

In the expression (1) and (2) the quantity $h=d/2$, where d is the board thickness, c_L and c_T are longitudinal and shear wave velocities of the plate, respectively. The wavenumber k is equal to ω/c_p , where c_p is the phase velocity of the Lamb wave mode and ω is the circular frequency. Fig. 1 plots the calculated dispersion curves, calculated as a solution of the equation (2), for cellulose fiber cement board are presented. The numerical values of the material properties used for calculations are listed in Table 1.

It is visible in Fig.1 that the cut-off frequencies of the first symmetric mode (S1) is 0.25 MHz, while anti-symmetric mode (A1) is 0.2 MHz. Considering the range of fre-

quencies used in experiments (50-150 kHz), theoretical results give information that in the cement boards only S0 and A0 modes can exist.

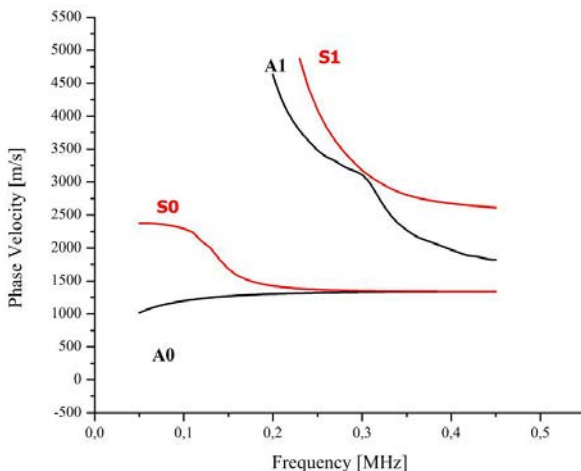


Fig. 1. Calculated dispersion curves for a cellulose fiber cement board.

Table 1. Material properties of cellulose fiber cement board

Density, ρ (g/cm ³)	1.6
Longitudinal wave velocity, c_L (m/s)	2630
Shear wave velocity, c_T (m/s)	1446
Board thickness, d (cm)	7.8

2.2. Experiments

Ultrasonic studies of the cellulose fiber cement boards were performed using non-contact ultrasonic system. Prior to the pivotal tests the preliminary theoretical and numerical studies were performed aiming at selection of optimal experimental conditions such as frequency, shape of generated impulse, distance between transducers and board. The tests allowed also to evaluate which of considered wave modes (longitudinal wave, surface wave, Lamb wave) is the most effective from the point of view of transmitted energy. Moreover, such studies have given possibility to understand if, how and which of the material properties influence on the measured wave parameters. Results of simulation studies yielded the qualitative evaluation of the role of the defects geometry (shape, size) on measured signals and estimation of the role of local inhomogeneity of the material on wave parameters.

The laboratory version of non-contact 3D ultrasonic scanner is shown in Fig.2. The device allow to studies of materials using various methods: in transmission or echo

mode, using wave reflectometry as well as spectroscopy of surface waves. Preliminary tests were performed on the device on the specimens of various sizes (obtained from the whole board) in order to estimate maximal dimensions of the boards for which the signal to noise ratio is high enough to be acceptable.

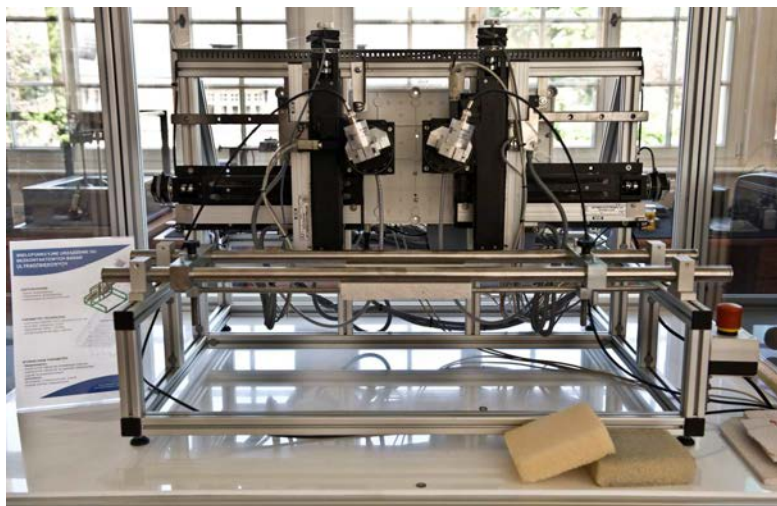


Fig.2. Photography of laboratory non-contact ultrasonic scanner.

Following the results of preliminary tests, the Lamb waves operating at 50 and 100 kHz frequency were chosen as the most effective to study the material and the simplified version of 1D non-contact ultrasonic scanner was built (see Fig. 3b).

The studies were performed on the cellulose fiber cement boards using Lamb waves propagating along the surface of the materials. In the Fig. 3a scheme of experimental configuration for Lamb wave composed of a pair of transducers, having 50 and 100 kHz center frequency (ULTRAN Group). The transducers were excited (by arbitrary generator) using the linear chirp (signal for which the instantaneous frequency varies linearly with time within the certain bandwidth) having the frequency range fitted to their bandwidth. The waveforms were recorded by digital oscilloscope at 10 MHz frequency rate. The signal generation and reception was done by a professional computer controlled measuring instrument Handyscope HS3 (TiePie engineering) via USB. Moreover, the system was equipped in stepper motor and feed rollers to move the board along line.

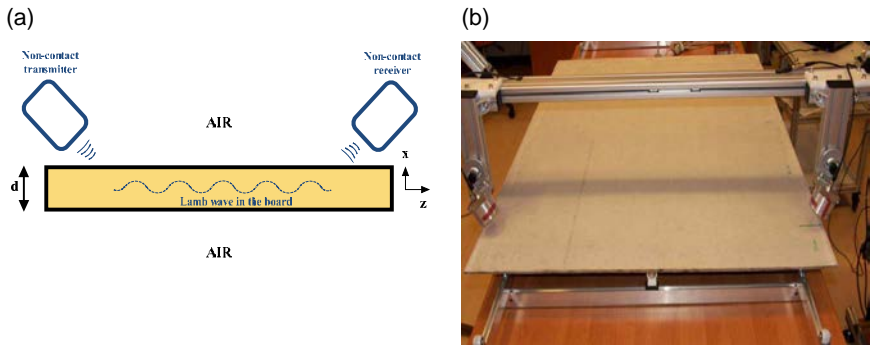


Fig. 3 Scheme of experimental configuration for non-contact ultrasonic tests using Lamb waves (a) and photography of experimental setup to study of the cellulose fiber cement boards (b)

3. Results and analysis

In Fig. 4 and Fig. 5 exemplary results of studies obtained by non-contact ultrasonic scanner are presented. The Fig. 4 presents the B-scan of the whole cellulose fiber cement boards in linear (left) and logarithmic (right) scale. In the Fig. 5 the partial B-scan of the board, focused on cracked part of the cement board is presented.

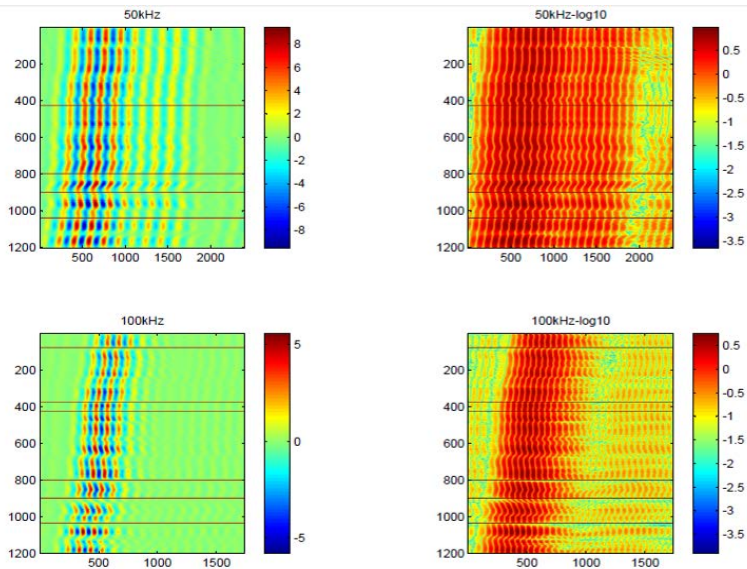


Fig. 4. B-scan in of the of the whole cellulose fiber cement boards in linear and logarithmic scale (vertical axis – boards length [mm], horizontal axis - samples, colorbar – signal amplitude)

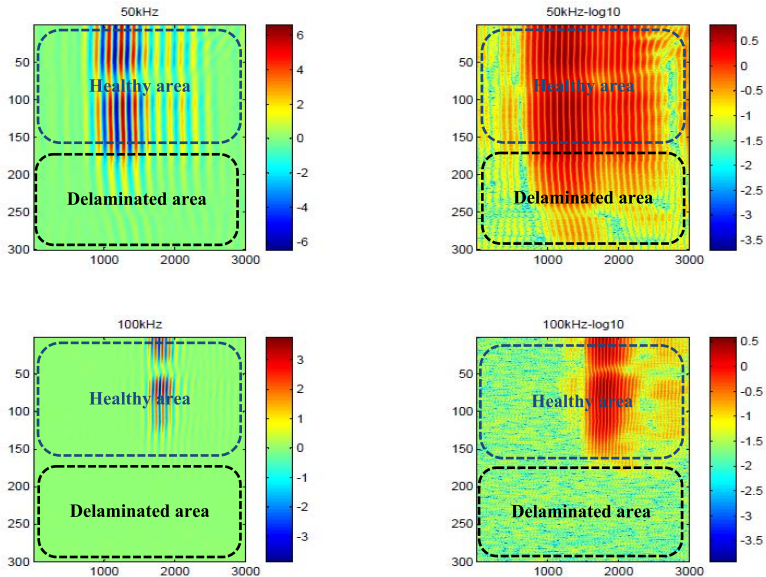


Fig. 5. Partial B-scan in of the cement boards in linear and logarithmic scale (vertical axis – boards length [mm], horizontal axis - samples, colorbar – signal amplitude

The results presented in the Fig. 4 and 5 concern the A0 mode, which was identified considering theoretical predictions (velocity about 1200 m/s @ 100 kHz) and then confirmed in ultrasonic experiments. Analysis of the B-scans allows distinguishing between healthy and defective area. In the case of results for the board presented in the Fig.5 it was possible to identify visually the type of defect – delamination. However, in general the source of the changes of amplitude of the signal may be different. For example it is not known how the local thickness changes or local inhomogeneity of the material, being result of complex procedures of production of the cement boards, influence on the signal parameters.

4. Conclusions

In the paper experimental studies of cellulose fiber cement boards using non-contact ultrasonic system were performed. The main purpose was to evaluate of the applicability of the method to study of the boards during their production. Therefore, in order to find optimal experimental conditions the first phase the studies were focused on laboratory tests using 3D non-contact ultrasonic scanner on the board specimens (of smaller size). Then, new 1D scanner working with Lamb (or surface) waves was designed and made.

Both the theoretical and experimental studies were performed on cellulose fiber cement boards. The theoretical studies of plate waves served to identification of the

wave mode measured in the boards. It was found that the flexural (A0) mode, having velocity about 1200 m/s, propagates in the material.

The obtained results confirmed applicability of the non-contact ultrasonic method using plate waves to studies of cellulose fiber cement boards. It allowed distinguishing between healthy and defective area within the boards and thus the method can be found as promising tool for future factory production control. However, the further studies, for larger group of representative materials are necessary in order to verify and optimize its efficacy.

In the paper only the amplitudes of transmitted Lamb waves as a function of position within the plate were analyzed. In general the sources of the changes of amplitude of the signal may be different. For example it is not known how the local thickness changes or local inhomogeneity of the material, being result of complex procedures of production of the cement boards, influence on the signal parameters. Therefore, one of the directions of the future studies will be focused on identification of the material defects (cracks, delamination etc.) or their geometry, while the second direction should be focused on studies of effective descriptors of the defects in the material. It can be achieved by application of simulation of wave propagation phenomena, where the defects can be directly introduced into the model and by development of the advanced signal processing methods for effective extraction of the information from transmitted signals.

References

1. Hola J., Schabowicz K., State-of-the-art nondestructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11, 2010.
2. PN-EN 12467 - Plyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań, Polska Norma, 2009,
3. P. J. Lim, H. C. Wu, V. C. Li, B. deLhoneux, A. A. S. Akers, Micromechanics-based durability study of cellulose cement in flexure, Cement and Concrete Research, 29, 1999, 201-208.
4. N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites, Cement&Concrete Composites, 26, 2004, 359-370.
5. S. Yashiro, J. Takatsubo, N. Toyama, An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation, Composites Science and Technology, 67, 2007, 3202-3208.
6. D. Doring, I. Solodov, G. Busse, Air-coupled surface acoustic waves: Opportunities and limitations for NDT-applications, IV NDT in Progress, 2007 Prague.
7. H. B. Kichou, J. A. Chavez, A. Turo, J. Salazar, M. J. Garcia-Hernandes, Lamb waves beam deviation due to small inclination of the test structure in air-coupled ultrasonic NDT, Ultrasonics 44, 2006, 1077-1082.

8. R. A. Smith, L. J. Nelson, Automated analysis and automated defect characterization from ultrasonic scans of composites, J. British Institute of NDT, 51, 2, 2009, 82-87.
9. D. Doring, F. Siegmund, M. Rheinfurth, I. Solodov, G. Busse, E. Haberstroh, Air-coupled ultrasonic Lamb waves for process monitoring, Proc. 10th European Conference on NDT, Moscow 2010.
10. N. Ryden, C. B. Park, P. Ulriksen, R. D. Miller, Lamb wave analysis for non-destructive testing of concrete plate structures, Proc. SAGEEP 2003.
11. Rose JL. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge University Press; 1999.



NONDESTRUCTIVE METHODS USEFUL IN ASSESSMENT OF CORROSION HAZARD TO CONCRETE STRUCTURES

Katarzyna FABIANIAK

Wrocław University of Technology, Institute of Building Engineering

Contact e-mail: katarzyna.fabianiak@pwr.wroc.pl

Abstract

This paper presents a survey of current methods of identifying corrosion hazard to concrete and reinforced concrete structures. As advances in technology are made and our knowledge on diagnosing concrete structures increases, new methods, equipment and tests for monitoring the degree of corrosion hazard become available. In the paper the relevant investigative methods are divided into: nondestructive, semidestructive and destructive ones. Attention is focused on the first two kinds of methods and their classification is presented. Also an example of the practical application of one of the methods is provided.

Key words: *corrosion, concrete structures, diagnostic methods*

1. Introduction

The problem of corrosion of concrete and reinforced concrete structures is still the subject of research. Corrosion affects both concrete and the reinforcement. Depending on how long and in what environment a given structure has been in service, the degree of corrosion may be higher or smaller. If corrosion affects the whole structure and is intensive, a risk to the operational safety of the structure may arise with the passing of time.

As knowledge on corrosion increases, so does the development of concrete structure diagnostics and new testing equipment helping one to diagnose the corrosion hazard to structures and monitor the progress of corrosion.

The diagnostic methods useful for assessing the corrosion hazard and corrosion progress in concrete elements can be divided into destructive, nondestructive and semidestructive methods. Particularly interesting are nondestructive and semidestructive methods since they enable one to determine, in a simple and quick way, how far advanced the corrosion of concrete or reinforced concrete is. A classification of the methods is presented in a chart shown in fig. 1. The more interesting of the methods are then described and, what may be important for the reader, the source references are given.

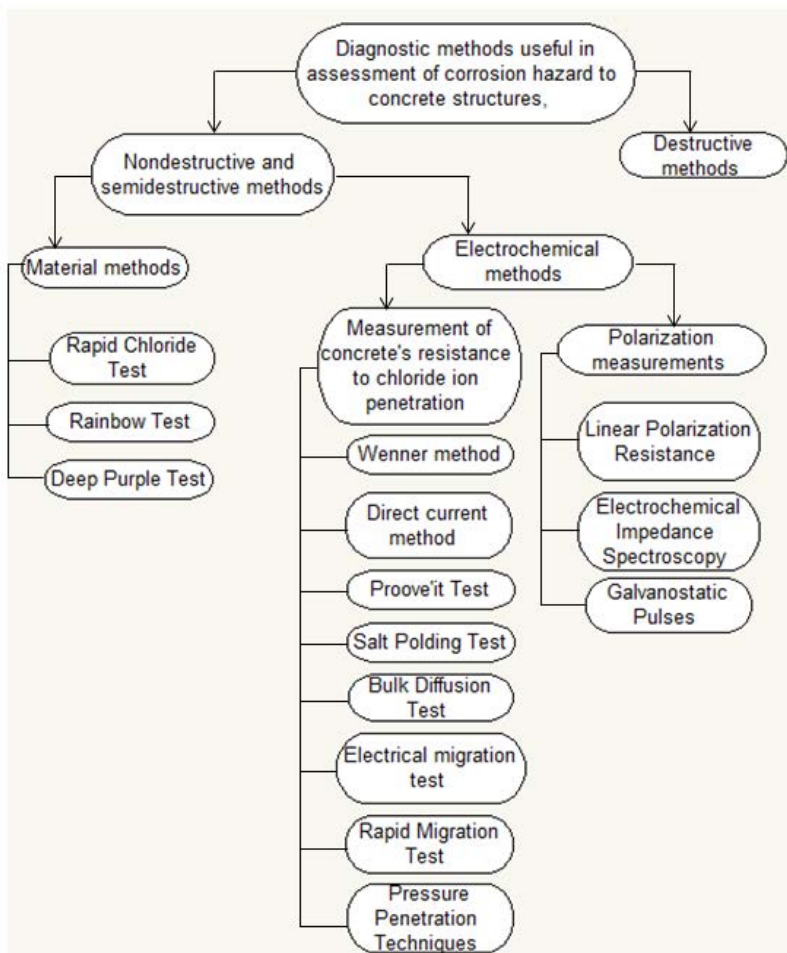


Fig. 1. Classification of diagnostic methods useful for assessing corrosion hazard to concrete structures.

2. Material methods

As shown in figure 1, the group of material methods comprises: the Rapid Chloride Test, the Rainbow Test and the Deep Purple Test. These are very simple methods, but highly useful in building practice.

In the Rapid Chloride Test the amount of chloride ions contained in a powdered concrete sample taken from the tested structure is evaluated *in situ* or in a laboratory. The test is used to determine the concentration of chloride ions in concrete constituting the reinforcement cover.

The Rainbow Test and the Deep Purple Tests are used to determine the depth of concrete carbonation. A special preparation is sprayed onto the fracture surface of a drill core sample taken from the tested structure, or onto the side surface of an exposure. Depending on the degree of carbonation, the surface of the concrete assumes a certain colour. By comparing this colour with that of the test kit pH reference one can determine the pH of the concrete.



Fig. 2. Rapid Chloride Test kit for measuring chloride ion concentration in concrete.

3. Electrochemical methods

This group comprises several test methods deriving from electrochemistry, which have been adapted to the complicated conditions prevailing in concrete. Using these methods one can noninvasively evaluate the intensity of reinforcement corrosion and identify areas with a different degree of corrosion hazard on the surface of a concrete structure [1].

The Wenner method and the direct current method [7] are based on measuring concrete resistivity by passing current between electrodes spaced at an equal distance from one another and being in contact with the tested concrete surface. The corrosion rate is evaluated on the basis of the measured resistivity, which has an influence on, among other things, the transfer of chloride ions in concrete. In the Wenner method alternating current with a frequency of about 1300 Hz is passed through the two middle electrodes [4], as illustrated by the diagram shown in fig. 3.

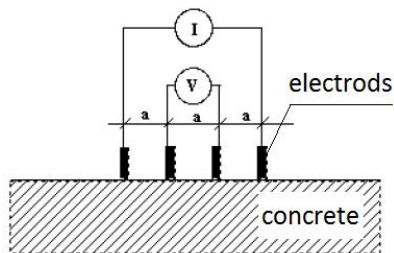


Fig. 3. General diagram of testing concrete resistivity by Wenner method and direct current method [7].

The PROOVE'it Test [2] is used to test the resistance of concrete to the penetration of chloride ions. It is determined how easily chloride ions penetrate into saturated concrete at an applied specific electrical potential.

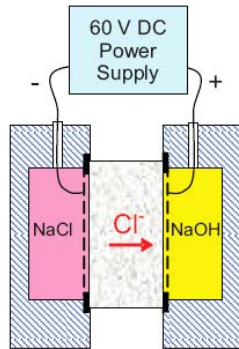


Fig.4. Schematic showing how sample is connected to test chamber containers filled with chemical solutions and to power supply.

During the test, current intensity is measured. The apparatus automatically integrates the curve describing the change in current intensity over time (A/s), whereby the test result is displayed in coulombs. The charge values in coulombs are used to classify the concrete according to ASTM C1202-91 [10]. The table used to classify concretes depending on their permeability to chloride ions is shown below.

Table.1. Classification of concretes according to their permeability to chloride ions [10].

Values in coulombs	Permeability class	Typical for concretes
> 4000	High	with w/c>0.5
4000 - 2000	Average	with w/c=0.4-0.5
2000 - 1000	Low	with w/c< 0.4
1000 - 100	Very low	modified
< 100	irrelevant	with addition of polymers

The Salt Ponding Test [10] is used to measure the susceptibility of concrete to chloride ion penetration. During the test the solution which is poured over the sample permeates into the concrete through its pores. Pore transmission of the solution from the sample's wet face through its top surface to the dry air takes place, which increases the absorption of the water containing chloride ions by the concrete. The concentration of chloride ions at every 1.22 cm along the whole thickness of the sample section is determined.

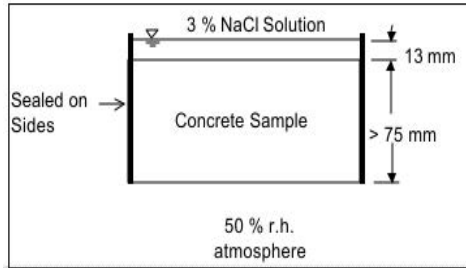


Fig. 5. Schematic of Salt Ponding Test according to AASHTO T259 [11].

The Bulk Diffusion Test is also used to measure the resistance of concrete to chloride ion penetration. Chloride ions penetrate, without any external intervention, into the concrete. After a certain time the concentration of the ions in the cross section of the tested sample is determined.

In the Electrical Migration Test a concrete sample's permeability to chloride ions is measured. The movement of the chlorides is caused by low intensity current. The sample is placed between two chambers, as shown in fig. 6. The liquid in the chamber connected to the anode is monitored and the concentration of chloride ions in the sample is determined. From the change in the concentration of chloride ions in the course of the test one can calculate the diffusion coefficient on the basis of which the time after which the reinforcement will begin to corrode can be predicted.

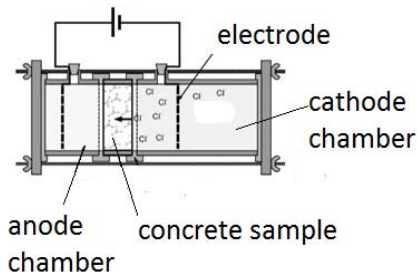


Fig. 6. Test chamber used in Electrical Migration Test [11].

The Rapid Migration Test (CTH Test) [10] consists in measuring the migration of chloride ions through a concrete sample under the applied voltage of 30V in accordance with the principle shown in fig. 7. The depth of chloride ion penetration is measured by spraying silver nitrate solution on the sample's fracture surface where the reaction takes place. The areas in which chloride ions are absent turn brown. The determined penetration depth can be used to calculate the coefficient of chloride ion diffusion

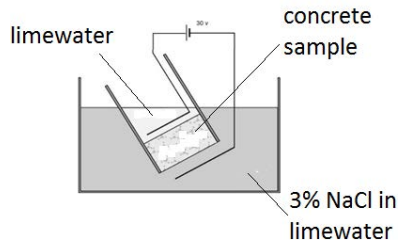


Fig. 7. Schematic of test chamber used in Rapid Migration Test [11].

Pressure Penetration Techniques [10] consist in accelerating the permeation of a solution containing chloride ions into concrete by exerting pressure on the solution, as illustrated by the schematic shown in fig. 8. This testing of permeability to chloride ions is similar to the testing of permeability to water under pressure. The depth of permeability is measured using calorimetric methods.

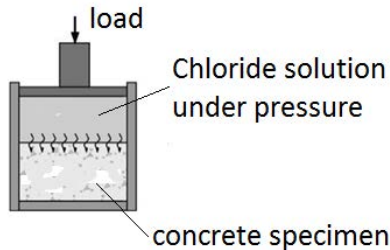


Fig. 8. Schematic of Pressure Penetration Test [11].

The polarization methods, used to determine the rate of corrosion on the basis of the corrosion system's response, are very accurate measuring methods which supply information about the electrochemical state of the reinforcement in concrete. The test results can be used to calculate, e.g., the increase in reinforcement surface loss, whereby one can estimate the decrease in the load-bearing capacity of a reinforce concrete element in the structure [8].

The Linear Polarization Resistance method belongs to the more effective electrochemical methods of measuring corrosion. By monitoring the dependence between the electrochemical potential and the current generated between the electrically charged electrodes one can obtain information about the degree of corrosion. This method is most effective when an aqueous solution is used. The method has proved to be quick and effective [9].

Electrochemical Impedance Spectroscopy consists in applying alternating current with a wide frequency range to the tested electrode (reinforcement). As a result of the sinusoidal disturbance of the tested electrode's potential, an impedance spectrum characterizing the response of the corrosion system (the reinforcement in the concrete) is obtained. The measured impedance defines the apparent resistance of the electrode (the reinforcement) to the alternating current [9].

The Galvanostatic Pulses method consists in upsetting the test electrode's equilibrium by applying a current with a specified strength, which polarizes the cathode electrode. The action of the current is limited to a certain short time after which the corrosion system regains its equilibrium. During both the action of the current and after the latter is switched off the change in the electrode potential over time is recorded [9].

4. Exemplary results of PROOVE'it test

Concrete drill cores taken from two different road viaducts were tested. Two samples from each drill core were marked as: 1/1, 2/1 and 2/2. They were cut from the head of the drill cores taken from the side of the viaducts' girders. Samples 1/1 and 2/1 came from the near-surface layer while samples 1/2 and 2/2 came from the deeper layer.

The average compressive strength of the concrete for samples 1/1, 1/2 amounted to 42 MPa. Preliminary tests using the Rapid Chloride Test showed no concrete carbonation and the chloride concentration in the near-surface layer was slight – below the permissible value.

In the case of samples 2/1, 2/2, the average compressive strength of the concrete amounted to 25 MPa. Preliminary tests using the same method as above indicated a carbonation depth of 18 mm and the concentration of chlorides was exceeded to a depth of 0.5 cm. Deeper, the chloride concentration was small – below the permissible value.

The resistance of the concrete to the penetration of chloride ions was tested in accordance with [2] and the obtained results are presented in table 2.



Fig. 9. PROOVE'it test set with connected four test chambers containing concrete samples 1/1, 1/2, 2/1,2/2 taken from road viaducts.

Table 2. Test results for concrete samples taken from road viaducts.

Sample number	Average compressive strength of concrete, [MPa]	Charge in coulombs	Class of concrete permeability
1/1	42	1775	low
1/2		1063	low
2/1	25	962	very low
2/2		847	very low

The tests showed that concrete samples 1/1, 2/1 taken from the near-surface layer of the viaducts' girders were characterized by lower resistance to the penetration by chloride ions, whereas the samples taken from the deeper layer showed slightly higher resistance. All the tested samples were classified as belonging to concretes with low permeability to chloride ions.

5. Conclusion

A classification of methods useful for assessing the corrosion hazard to structures made of concrete has been presented, with special focus on nondestructive and semidestructive methods among which material and electrochemical methods are distinguished. The group of material methods comprises three methods (tests). The group of electrochemical methods comprises 11 methods, including 8 methods based on the measurement of concrete resistance to the penetration of chloride ions and 3 polarization methods. All the methods are concisely described and an example of the practical use of the Proove'it Test is provided.

6. References

1. Jaśniok M., Jaśniok T.: Methods of diagnosing corrosion hazard to reinforcement in reinforced concrete structures (part I), characterization of reinforcement process in concrete (in Polish), Silesian Polytechnic, Przegląd Budowlany 2/2007.
2. Directions for carrying out test using PROOVE'it equipment, German Instruments, link: www.germann.org/?strArticle=test_systems.
3. Directions for carrying out test using Rapid Chloride Test(RCT) and Rapid Chloride Test Water(RCTW) equipment made by German Instruments, link: www.germann.org/?strArticle=test_systems.
4. Ściślewski Z.: Reinforcement corrosion and protection (in Polish), Wydawnictwo Arkady, Warsaw 1981.
5. Moczko A., Łakomy T.: Methods of nondestructive diagnosis of corrosion hazard to reinforcing steel in concrete structures (in Polish), Budownictwo, technologie, architektura, April 2002.
6. Wawrusiewicz A.: Preliminary guidelines for potentiometric detection of zones of corroding reinforcement in concrete bridges (in Polish), Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warsaw 1992.
7. Sadowski Ł.: New non-destructive method for linear polarisation resistance corrosion rate measurement, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 10, no. 2, 2010.
8. Jaśniok M., Jaśniok T., Silesian Polytechnic, Methods of nondestructive diagnosis of corrosion hazard to reinforcing steel in concrete structures (part IV)", Przegląd Budowlany 7-8/2007.
9. Caproco, Internal Corrosion Monitoring Specialists: Linear Polarization Resistance (LPR) General Information.
10. ASTM C 1202-91, 05
11. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1. General regulations and regulations for buildings (in Polish)



AUTOMATED ULTRASONIC TESTING OF WWER REACTOR PRESSURE VESSELS

AUTOMATIZOVANÉ ZKOUŠENÍ TLAKOVÝCH NÁDOB REAKTORŮ TYPU VVER ULTRAZVUKEM

Lukáš FAIT ¹⁾, Zdeněk SKÁLA ²⁾, Jan VÍT ²⁾

ŠKODA JS a.s., ¹⁾ ZLDEF a ²⁾ ZLPK

Contact e-mail: jan.vit@skoda-js.cz

Abstract

At present time the operators of nuclear power plants increase the installed output of units with pressurised water reactors in operation and plan to prolong their safe and reliable operation over a period originally anticipated by project documents. The reactor pressure vessel is the device, which in WWER (Water-Water Energetic Reactor) type nuclear power plants has the crucial impact on the nuclear and technical safety and fundamentally determines the life time of the whole primary circuit. The status of pressure vessel is monitored in regular intervals by in-service inspections, which are a part of planned outages necessary for refuelling and reconfiguration of nuclear fuel in the reactor core.

The paper gives not only the description of inspection systems for the automated non-destructive testing of WWER reactor pressure vessels, but also a short excursion into the history of thirty years of automated ultrasonic testing, which SKODA JS has round off this year.

Keywords: reactor pressure vessel, nuclear power plant, ultrasonic testing, automated testing

Abstrakt

Provozovatelé jaderných elektráren v současné době zvyšují instalovaný výkon provozovaných bloků s tlakovodními reaktory a plánují jejich bezpečný a spolehlivý provoz po dobu delší, než původně předpokládal projekt. Tlaková nádoba reaktoru je u bloků jaderných elektráren typu VVER (vodo-vodňanaj energetičeskij reaktor) zařízením, které má rozhodující vliv na jadernou i technickou bezpečnost a zásadním způsobem určuje životnost celého primárního okruhu. V pravidelných intervalech je monitorován stav tlakové nádoby při provozních kontrolách, které jsou součástí plánovaných odstávek nezbytných pro výměnu a překládání jaderného paliva v aktivní zóně reaktoru.

Příspěvek obsahuje nejen popis zkušebních systémů pro automatizované nedestruktivní zkoušení tlakových nádob reaktorů typu VVER, ale i krátkou exkurzi do historie třiceti let automatizovaného zkoušení ultrazvukem, které ŠKODA JS a.s. v letošním roce završila.

Klíčová slova: tlaková nádoba reaktoru, jaderná elektrárna, zkoušení ultrazvukem, automatizované zkoušení

1. TLAKOVODNÍ REAKTORY

Základní koncepce tlakovodních reaktorů se od spuštění první velké komerční elektrárny s blokem PWR (Yankee, USA, 1961, 175 MWe) prakticky nezměnila. Konstrukce reaktorové části navazovala na tlakovodní reaktor elektrárny Shippingport-1 (USA, 1957), který byl původně plánován jako prototyp pohonného systému pro jaderné ponorky.

Podobnosti základních projektů tlakovodních reaktorů jsou mnohem výraznější než jejich jednotlivé rozdíly. Velmi rychlý a úspěšný komerční vývoj těchto reaktorů je v neposlední řadě důsledkem faktu, že naprostá většina ledoborců, válečných lodí a ponorek na jaderný pohon byla a stále je poháněna reaktory právě tohoto typu.

Moderátorem i chladivem tlakovodních reaktorů je upravená lehká voda (H_2O), která se v aktivní zóně ohřívá pouze pod mez sytosti. To vyžaduje vysoké tlaky a silnostěnné tlakové nádoby reaktorů, v nichž je aktivní zóna uložena.

Typické znaky tlakovodních reaktorů jsou:

- Parogenerátory oddělený primární a sekundární okruh, tím je radioaktivita omezena teoreticky pouze na primární okruh.
- Použití kyseliny trihydrogenborité (H_3BO_3) v primárním okruhu jaderné elektrárny (JE) ke dlouhodobé kompenzaci reaktivity.
- Vysoký tlak chladicí vody v primárním okruhu vyžaduje silné stěny komponent, zejména reaktorové nádoby reaktoru.

2. ZÁKLADNÍ PROJEKTOVÁ HAVÁRIE

Každá jaderná elektrárna zaručuje svoji bezpečnou funkci i v podmínkách při určité havárii (poruše) až do tzv. základní projektové havárie (DBA). K nejhorším důsledkům může vést na jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory havárie spojená se ztrátou chladiva (LOCA). Všechny moderní tlakovodní reaktory mají základní projektovou havárii stanovenou jako úplné roztržení hlavního cirkulačního potrubí (HCP) v nejnebezpečnějším průřezu s následným výtokem primárního chladiva oběma konci porušeného potrubí (tzv. gilotinový efekt) při současně úplné ztrátě napájení JE ze sítě. Porušení tlakové nádoby reaktoru (TNR) se neuvažuje. Žádný z dnes provozovaných bloků PWR (VVER) není projektován na porušení celistvosti TNR, i když se v současné době intenzivně řeší problematika tzv. nadprojektové havárie, která se týká tavení AZ a tím v některých případech také porušení integrity TNR.

U jaderných elektráren s tlakovodními reaktory je logicky zcela zásadní otázkou celistvost tlakové nádoby reaktoru po celou dobu provozu. Proto je u jaderných elektráren typu PWR, respektive VVER, věnována zvýšená pozornost provozním kontrolám (prohlídkám) tlakových nádob reaktorů.

3. TLAKOVÁ NÁDOBA REAKTORU (TNR)

Tlakové nádoby reaktorů patří k nejtěžším a také k nejrozměrnějším zařízením jaderných elektráren. Požadavky na ně kladené – pokud jde o vysoký provozní přetlak, pracovní teploty, materiál a provozní bezpečnost – jsou mimořádně vysoké a podstatně přesahující požadavky kladené na tlakové nádoby používané v jiných průmyslových odvětvích. Zcela novým důležitým faktorem v projekci, konstrukci i v provozu TNR je působení ionizujícího záření, jehož účinky na konstrukční materiál jsou nepříznivé (objemový vývin tepla, aktivace a radiační poškození).

Tlaková nádoba jaderného reaktoru plní podle několika důležitých úkolů:

- Odděluje prostor aktivní zóny a chladicího média od okolí.
- Je ústřední nosnou částí aktivní zóny s příslušenstvím.
- Představuje druhou bariéru bránící úniku (šíření) produktů štěpení do okolí.

Vzhledem k primárnímu okruhu je TNR pevným bodem uložení, ostatní součásti primárního okruhu, tj. hlavní cirkulační čerpadla, parogenerátory a případně i hlavní uzavírací armatury, musejí být uloženy tak, aby se na TNR nepřenášely žádné velké přídavné síly.

Komplet reaktoru typu VVER tvoří:

- Těleso tlakové nádoby.
- Horní blok reaktoru (tj. víko včetně pohonů regulačních mechanismů).
- Těsnění přírubového spoje.
- Hlavní šroubový spoj (svorníky, matice, závitová lůžka a podložky). M 140x6 (VVER 440) nebo M 170x6 (VVER 1000).
- Vnitřní části reaktoru (např. BOT, KAZ nebo PAZ, ŠR, případně DŠ).

Těleso tlakové nádoby má válcový tvar, ve spodní části je uzavřeno poloeliptickým dnem a v horní části je ukončeno obvykle pevnou přírubou. V horní části tělesa jsou umístěna hrdla pro připojení primárního potrubí a těsně pod spodními hrdly TNR je systém opěr nádoby. Osazení na vnitřní straně příruby tělesa a soustava konzol („klínů“) a vodičích per uvnitř tlakové nádoby slouží k zavěšení vnitřních částí reaktoru.

Tlakové nádoby typu VVER jsou vyráběny z celokovaných prstenců. Celý vnitřní povrch je obvykle opatřen výstelkou z austenitické korozivzdorné oceli.

Svarové spoje jsou nejvíce citlivé na radiační poškození, a proto jsou umístovány co nejdále od aktivní zóny. Válcovou část TNR v oblasti aktivní zóny tvoří tedy prstenec, jehož výška (limitovaná velikostí ingotu) je volena tak, aby svary sousedních prstenců byly pokud možno umístěny souměrně od horizontální roviny symetrie AZ. U reaktorů typu VVER jsou pracovní teploty pod oblastí, v níž je nutno uvažovat tečení.

Charakteristickým rysem TNR typu VVER je možnost jejich transportu po železnici. Z toho vyplývají jejich rozměry (zejména průměr) a některá konstrukční řešení – např. tzv. nástavce hrdel u TNR typu VVER 440.

Příspěvek je věnován především automatizovanému (mechanizovanému) zkoušení TNR typu VVER ultrazvukem. Proto se dále budeme věnovat těm částem kompletu TNR, kde je toto zkoušení v praxi používáno.

Vnitřní části reaktoru jsou vyrobeny téměř výhradně z austenitické oceli značky 08Ch18N10T. Hlavní metodou NDT je zde vizuální zkoušení (VT) a to jak přímé, tak i nepřímé zkoušení pomocí televizních kamer.

Při zkoušení elementů hlavního šroubového spoje je věnován důraz na povrchové metody (VT, ET a MT). Logicky je hlavní pozornost věnována nosným závitům M 140x6 a M 170x6, které jsou zkoušeny automatizovaným způsobem vířivými proudy (ET). Ultrazvukové zkoušení je stručně popsáno v následujícím odstavci.

4. HLAVNÍ ŠROUBOVÝ SPOJ

Uzel hlavního přírubového spoje tlakové nádoby zajišťuje těsnost tlakové nádoby reaktoru ve všech provozních režimech.

Sférické víko dosedá na přírubu tělesa tlakové nádoby. Utěsnění místa styku přírub víka a tělesa TNR je provedeno pomocí profilového těsnění z niklového prutu. Víko je k přírubě připevněno 60 kusy svorníků M 140x6 (VVER 440) nebo 54 kusy svorníků M 170x6 (VVER 1000). Svorníky jsou zeslabeny centrálním otvorem (průměr 35 mm) pro měřicí tyčku. Pod maticemi svorníků jsou dvě kulové podložky – vydutá a vypuklá.

Závitová hnízda (lůžka) v přírubě TNR a matice v axiálním směru se zkoušejí ultrazvukem přímými sondami zpravidla ručním způsobem.

Podložky se zkoušejí pouze povrchovými metodami (VT a MT).

Svorníky M 140x6 (M 170x6) lze nedestruktivně zkoušet automatizovaně (mechanizovaně) ultrazvukem ze středového vývrtnu. Výhodou je, že oba typy svorníků mají středový vývrt o stejném průměru a že i jejich délka je přibližně stejná. Není obtížné pro jejich zkoušení používat jeden univerzální manipulátor.

Při nedestruktivním zkoušení svorníků M 140x6 (M 170x6) se hlavní pozornost věnuje necelistvostem, které korespondují s vnějším povrchem. Takové necelistvosti jsou zjištělné především povrchovými metodami NDT (zejména metodou vířivých proudů) na povrchu nosných závitů, v oblasti výběhu nosných závitů a i na povrchu hladké části dílku svorníku. Ultrazvuková metoda vhodně doplňuje povrchové metody NDT. Zaměřuje se na detekci a určování pravděpodobných (skutečných) velikostí povrchových necelistvostí nacházejících se v hladké části dílku svorníku. Kromě toho je ultrazvukem prozvučován také prakticky celý vnitřní objem materiálu svorníku. Výskyt vnitřních necelistvostí je minimalizován středovým vývrtem o průměru 35 mm, což potvrzují výsledky všech zatím provedených provozních (předprovozních) kontrol.

Poloha svorníků M 140x6 (M 170x6) při automatizovaném (mechanizovaném) zkoušení může být dvojí:

- Vertikální.
- Horizontální.

V našich „zeměpisných šířkách“ se preferuje vertikální uspořádání. Příkladem může být manipulátor KOMAŠ II (Škoda JS, Česko). Snímek z provozní kontroly svorníků M 140x6 (Jaderná elektrárna DUKOVANY) je na Obrázku 1.



Fig. 1: Manipulator KOMAŠ II (Škoda JS, Czech Republic)
Obr. 1: Manipulátor KOMAŠ II (Škoda JS, Česko)

Příkladem méně rozšířeného zkoušení svorníků v horizontální poloze je zkušební systém SK 33 ruské firmy NIKIMT – viz Obrázek 2.

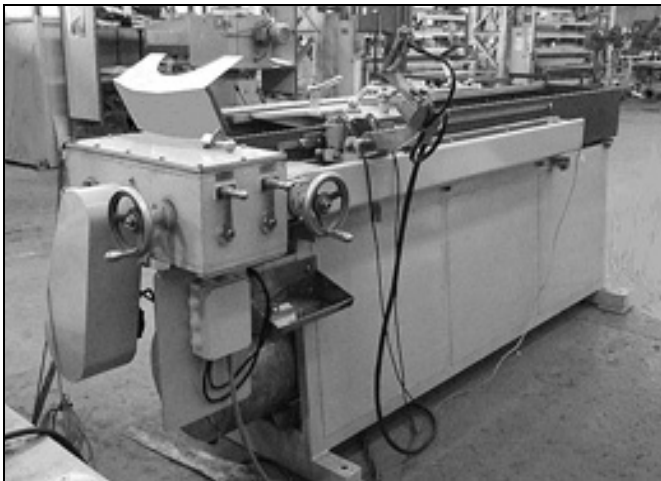


Fig. 2: Manipulator SK-33 (NIKIMT, Russia)
Obr. 2: Manipulátor SK-33 (NIKIMT, Rusko)

Pro stručný popis metodiky ultrazukového zkoušení je dále popisován způsob zkoušení ve vertikální poloze. Hlavní částí manipulátoru KOMAŠ II je stojan, do kterého se upíná svorník M 140x6 (M 170x6) ve svislé poloze. Stojan vyvozuje rotační pohyb svorníku a současně podélný posuvný pohyb nosičů sond. Oba pohyby jsou vzájemně vázané, jedné otáčce svorníku odpovídá vertikální posun o 6 mm (stoupání závitu). Další podrobnosti lze nalézt např. v Ae 13691 / Dok [1].

Ultrazukové sondy jsou umístěny v tyči, která se vkládá do středového vývrtu tělesa svorníku. Vývrt je dole utěsněný na otočném talíři a je vyplněný vodou s inhibitorem koroze, která slouží jako vazební prostředek.

Svorníky jsou prozvučovány v axiálním směru úhlovými ultrazukovými sondami příčných vln s jmenovitou frekvencí 4,0 MHz. Dvojice tzv. sdružených sond (každá představuje dvě jednoduché úhlové sondy, otočené vůči sobě o 180°) umožňuje prozkoušet celý objem materiálu svorníku při jednom skenu. Horní sdružená sonda prozvučuje horní polovinu svorníku, dolní sdružená sonda analogicky polovinu spodní. Sdružené sondy jsou v tyči odpružené pomocí pružin. V případě jednoduchého manipulátoru, jako je např. KOMAŠ II, mohou být ultrazukové trasy tvořeny koaxiálními kabely, protože zde lze jednoduše eliminovat případné rušení ultrazukového signálu.

Snímek sdružené ultrazukové sondy je Obrázku 3.

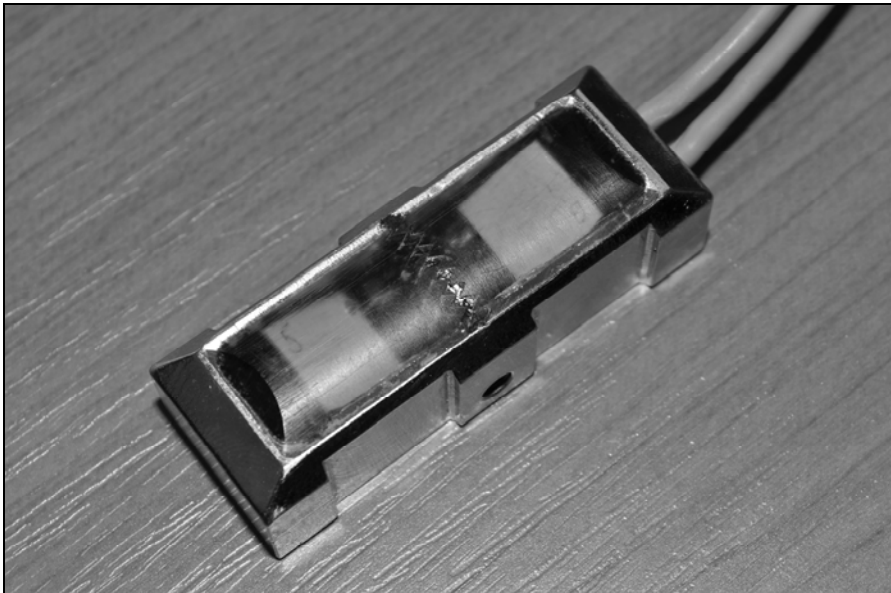


Fig. 3: Multi Element Probe
Obr. 3: Sdružená ultrazuková sonda

5. VÍKO TNR

Automatizovaným způsobem se zkouší nejčastěji obvodový svar víka TNR. Jako příklad bude dále uvedeno zkoušení obvodového svaru víka VVER 440.

Víko TNR typu VVER 440 je vyrobeno z materiálu 15Ch2MFA (18Ch2MFA). Obvodový svar byl u starších TNR realizován elektrostruskovým způsobem, u novějších jsou svary úzkomezerové (šířka 34 mm). Svary mají jmenovitou tloušťku 200 mm a jsou na vnitřním povrchu TNR překryty austenitickým ochranným návarem o nominální tloušťce 8 mm. Osa svarového spoje je 120 mm nad přírubou víka TNR. Svarový spoj se zkouší nedestruktivními metodami z vnějšího povrchu. Kromě povrchových metod (VT, MT nebo ET) je hlavní zkušební metodou NDT ultrazvuk.

Zkušební systémy (manipulátory) pro zkoušení obvodového svaru víka TNR můžeme rozdělit podle principu do dvou skupin:

- Manipulátory s magnetickými kolečkami.
- Manipulátory s pohybem po pomocné vodící kolejnici.

5.1. Manipulátory s magnetickými kolečkami

Modifikovaný manipulátor MIMIC (Sonomatic, Velká Británie) používá Škoda JS od roku 1996. MIMIC je jednoduchý dvounápravový vozík (magnetická kolečka) s příčným skenerem. Umožňuje nesení dvojice ultrazvukových sond, případně i sond pro zkoušení vířivými proudy. Snímek manipulátor MIMIC je Obrázku 4.

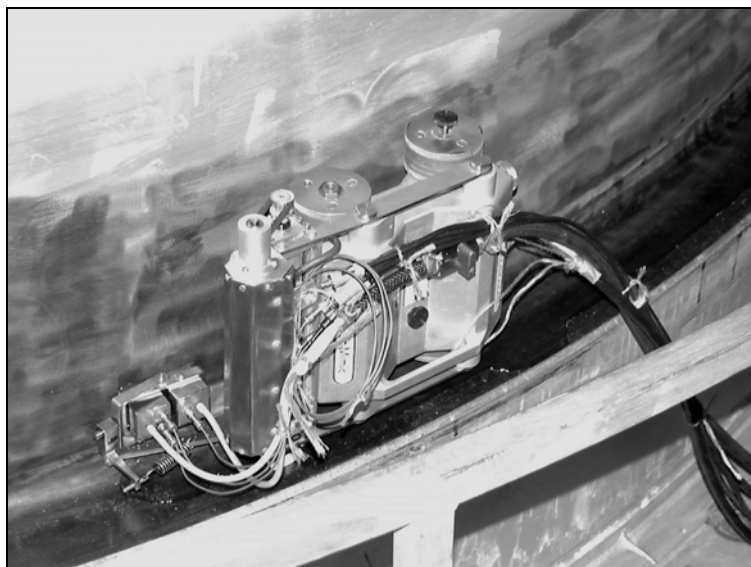


Fig. 4: Manipulátor MIMIC
Obr. 4: Manipulátor MIMIC

Obvodový svar víka TNR je prozvučován dvojicí úhlových sond příčných vln ve všech čtyřech směrech a také dvojicí přímých sond (jednoduchou i dvojitou). To vyžaduje celkem pět objездů svarového spoje kolem dokola, což je při vnějším průměru 3440 mm časově náročné. Pokud se zkusí i metodou vířivých proudů (ET), potom se celkový počet objездů zvýší na šest. Každý objезд kolem dokola je rozdělen po čtvrtinách na jednotlivé skeny. Hlavním důvodem je dosažení co nejlepší přesnosti souřadnice v obvodovém směru. V axiálním směru se manipulátor MIMIC opírá o hlavní přírubu víka TNR, tím se zaručena poloha k ose svarového spoje.

MIMIC je ovládán přímo ultrazvukovým přístrojem Microplus I nebo Microplus II. Ultrazvukové sondy jsou speciálně navrženy a vyrobené pro automatizované zkoušení. Mají pouzdro z nerezavějící oceli (půdorys 30x30 mm), jsou opatřeny rozvodem kontaktní kapaliny a z odolněny proti opotřebení. Sondy se po zkušebním povrchu pohybují meandrovitým způsobem – hlavní přímočarý vratný měřicí pohyb je v axiálním směru. Jmenovitá frekvence ultrazvukových sond je 2,0 MHz. Citlivost zkoušení odrazovou technikou je stejná nebo i vyšší než při výrobních kontrolách [2].

Přístupnost svarového spoje víka TNR umožňuje využívat tzv. podmíněné zkoušení ultrazvukem. Základem provozní kontroly je zkoušení odrazovou technikou. Indikace necelistvostí, které podléhají analýze (posouzení) jsou dále ověřovány odrazovou technikou ručním způsobem. Pro určení charakteru, typu necelistvostí a jejich pravděpodobných (skutečných) rozměrů se dále podle potřeby využívá difrakční technika ToFD nebo technika Phased Array (PA).

5.2. Manipulátory s pohybem po pomocné vodící kolejnici

Na víko TNR VVER 440 lze upevnit pomocnou vodící kolejnici, po které se může pohybovat manipulátor podobný tomu, který se používá při zkoušení obvodových svarů TNR VVER 440 typ V-213 v oblasti hrdlových prstenců. Tento typ manipulátoru (tzv. traktor) bude podrobněji popsán v kapitole 6.

Škoda JS poprvé nasadila v letošním roce manipulátor „Traktor HB“ při provozní kontrole 2. bloku EDU. Pro sběr dat i řízení manipulátoru byl použit ultrazvukový přístroj Microplus II (Sonomatic, Velká Británie).

Hlavními výhodami je přesnější snímání polohy v obvodovém směru, větší rozměry sond (půdorys 40x40 mm), rozšíření rozsahu zkoušení, více sond ve zkušební hlavici (v našem případě šest) a z toho vyplývající menší počet objездů kolem dokola – stačí pouze dva. I přes nutnost montáže a demontáže pomocné vodící kolejnice dochází k celkovému zkrácení celkové času, který je potřebný pro provedení provozní (předprovozní) kontroly.

Prakticky stejná jmenovitá tloušťka obvodového svaru víka TNR a obvodových svarů TNR v oblasti hrdlových prstenců umožňuje sjednotit metodiky zkoušení a používat shodné ultrazvukové sondy i sondy vířivých proudů.

Objězdy manipulátorem kolem dokola víka TNR jsou rozděleny opět po čtvrtinách obvodu na skeny.

Rozměry a nosnost manipulátoru umožňují automatizovat (mechanizovat) také případné zkoušení difrakční technikou ToFD nebo technikou PA.

Snímek zkušebního systému (manipulátoru) Traktor HB je Obrázku 5.



Fig. 5: Manipulátor Traktor HB (Škoda JS, Czech Republic)
Obr. 5: Manipulátor Traktor HB (Škoda JS, Česko)

6. TĚLESO TNR

Vzhledem k rozsahu provozních kontrol TNR typu VVER bude hlavním pozornost věnována nedestruktivnímu zkoušení obvodových svarových spojů ultrazvukem.

TNR typu PWR se téměř výhradně zkoušejí ultrazvukem z jejich vnitřního povrchu. JE s reaktory VVER 440 typ V-213 (např. EDU, EBO, EMO, Paks a Loviisa) i s reaktory VVER 1000 typ V-320 (např. ETE) umožňují zkoušet TNR z obou jejich povrchů. Je možné zvolit různé varianty provádění provozních kontrol – střídání zkoušení z vnitřního a vnějšího povrchu v plném rozsahu nebo kombinaci zkoušení z obou povrchů v různém rozsahu. Stanovení intervalu a rozsahu provozních kontrol je dnes plně v kompetenci provozovatelů JE a celý proces podléhá schválení orgánům státního dozoru (u nás SÚJB).

V Rusku platí program provozních kontrol ATPE-2-2005 [3], který stanovuje pro ultrazvukové zkoušení TNR typu VVER 440 interval max. 30000 provozních hodin (4 roky). Zkoušení ultrazvukem se provádí vždy pouze z jednoho povrchu a to podle zkušebního systému (manipulátoru), který je na konkrétní JE k dispozici.

6.1. Zkoušení z vnitřního povrchu TNR

Pro automatizované nedestruktivní zkoušení TNR typu VVER (PWR) z vnitřního povrchu se používají dálkově ovládané systémy (manipulátory), které umožňují kontrolu nejen válcové části TNR, ale i hrdel, dna a v některých případech i příruby TNR. Konstrukční provedení jednotlivých manipulátorů se od sebe liší; dnes používané manipulátory můžeme rozdělit do čtyř skupin:

- Manipulátor s výsuvným teleskopickým sloupem.
- Manipulátor s centrálním (pevným) sloupem.
- Manipulátor s decentrálním (excentrickým) sloupem.
- Ponorka (ROV ... Remotely Operated underwater Vehicle).

6.1.1. Manipulátor s výsuvným teleskopickým sloupem

Skupinu manipulátorů s výsuvným teleskopickým sloupem můžeme dále rozdělit do tří podskupin. Jejich názvy jsou zjednodušeně zvoleny tak, aby co nejlépe vystihovaly charakteristický znak konstrukce manipulátoru:

- **Trojnožka.**
V závitových hnízdech hlavní dělicí roviny TNR je ustavena pevná část manipulátoru charakteristického tvaru. Rotační pohyb vykonává pouze teleskopický sloup s hlavicemi. Např. zkušební systémy firmy Tecnatom (Španělsko) a Škoda JS – MKS (Česko).
- **Kolejnice.**
Na hlavní dělicí rovině TNR je umístěna kolejnice (kruhová dráha), po které se pohybuje manipulátor jako celek. Např. zkušební systémy firem TRC (Švédsko) a Škoda JS – SKIN (Česko).
- **Stínící deska.**
Součástí manipulátoru je stínící deska (překrytí TNR). Zkušební systém je opět položen na hlavní dělicí rovině TNR. Např. zkušební systémy firmy NIKIMT (Rusko).

Manipulátory na principu trojnožky jsou ve světě velmi rozšířené, ale jsou zatím využívány pouze při kontrolách reaktorů typu PWR.

V roce 1993 ověřovala firma Tecnatom (Španělsko) možnost nasazení tohoto typu manipulátoru na maďarské JE Paks (VVER 440 typ V-213). Ilustrativní snímek manipulátoru firmy Tecnatom je na Obrázku 6.

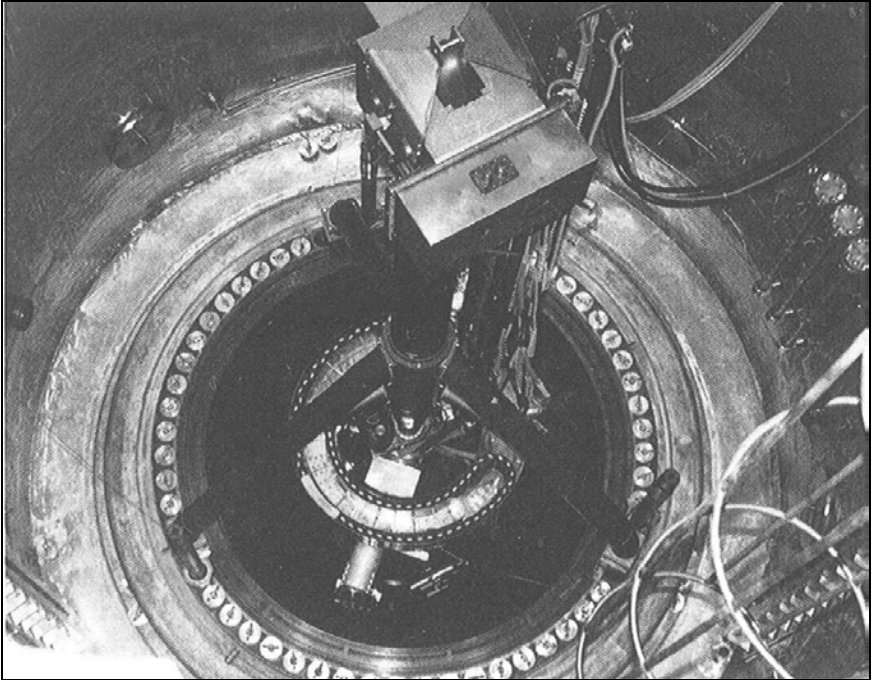


Fig. 6: Manipulator Tecnatom (Spain)
Obr. 6: Manipulátor Tecnatom (Španělsko)

Škoda JS v současné době dokončuje vývoj a vyrábí nový zkušební systém (manipulátor) MKS („Modulární kontrolní systém“), který bude také této koncepce. Jeho první nasazení při provozních kontrolách TNR typu VVER je plánováno na rok 2014.

Hlavním cílem projektu MKS je zkrácení celkové doby provozních (předprovozních) kontrol TNR oproti stávajícímu zařízení SKIN. Zachovává možnost zkoušení TNR typu VVER 440 a VVER 1000 a navíc rozšiřuje použitelnost i pro TNR typu VVER 1200 (MIR) a AP 1000. Vzhledem k velké odlišnosti rozměrů (průměru) TNR typu EPR 1600 v oblasti hlavního přírubového spoje není možné použít univerzální portál manipulátoru. Konstrukce MKS však umožňuje použití na TNR typu EPR 1600 náhradou opěrných komponent.

Schéma manipulátoru MKS je na Obrázku 7.

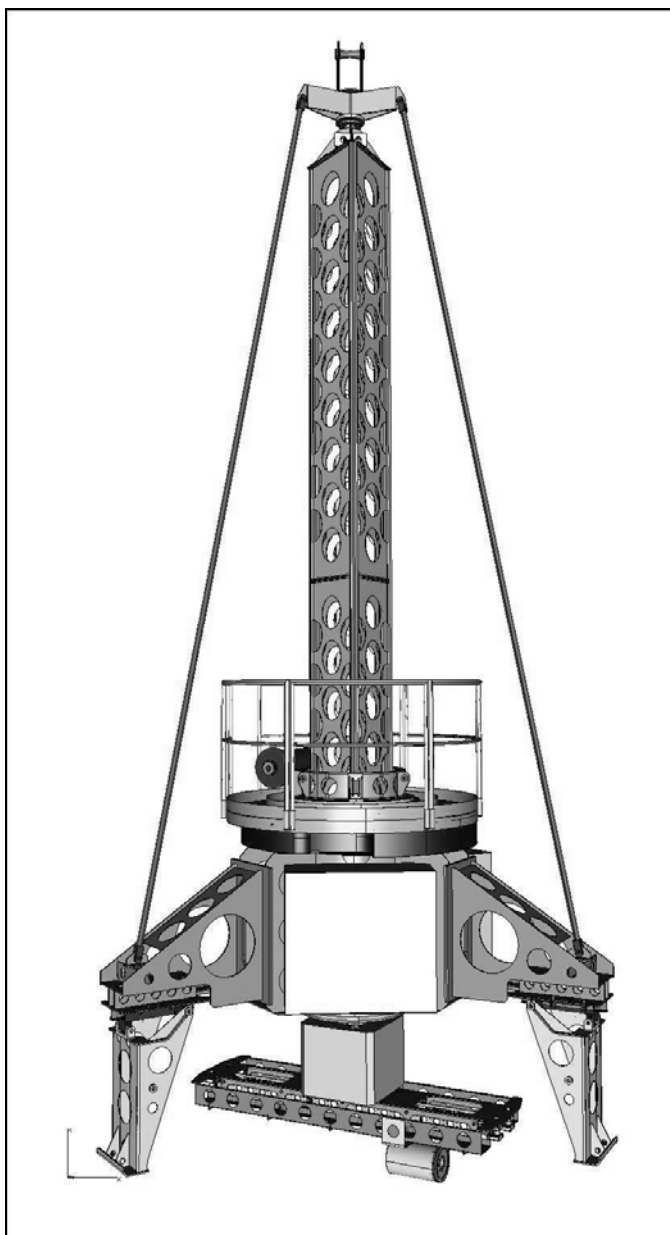


Fig. 7: Manipulator MKS (Škoda JS, Czech Republic)
Obr. 7: Manipulátor MKS (Škoda JS, Česko)

ŠKODA JS a.s. má třicetileté zkušenosti s provozem zkušebních systémů (manipulátorů) s výsuvným teleskopickým sloupem na principu kolejniče.

Zkušební systém švédské firmy TRC nesl plný název Škoda REACTORTEST TRC a byl v letech 1982+92 použit celkem při 31-ti provozních (předprovozních) kontrolách tlakových nádob reaktorů pouze typu VVER 440. Snímek manipulátoru TRC je na Obrázku 8.

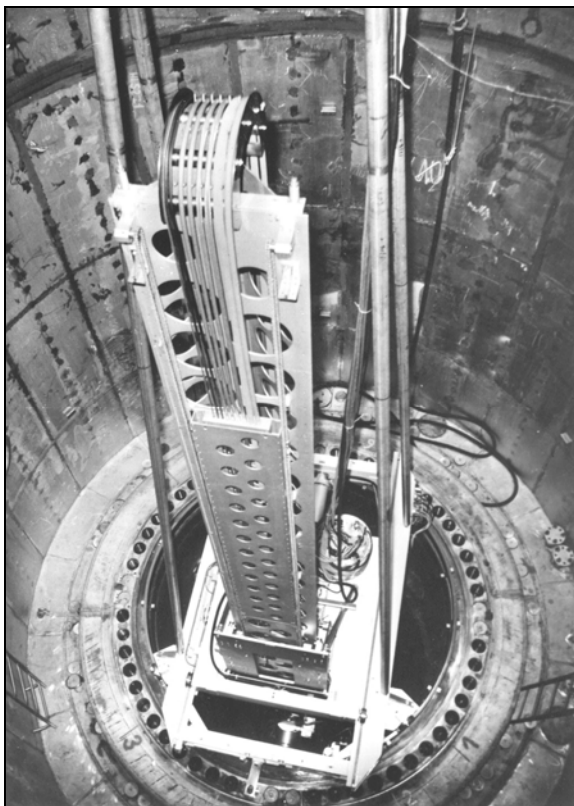


Fig. 8: Manipulator TRC (Sweden)
Obr. 8: Manipulátor TRC (Švédsko)

Zkušenosti z provozu manipulátoru Škoda REACTORTEST TRC byly plně využity při vývoji, konstrukci a výrobě nového manipulátoru SKIN. Od roku 1992 byl manipulátor SKIN zatím použit při 37-ti provozních (předprovozních) kontrolách TNR typu VVER 440 a VVER 1000. V době konání konference Defektoskopie 2012 právě probíhá provozní kontrola 2. bloku Arménské JE (VVER 440 typ V-270) tímto zkušebním systémem. Půjde-li vše podle plánu, tak to bude jeho derniéra a tím i konec dvacetileté kariéry. Snímek manipulátoru SKIN na Obrázku 9.

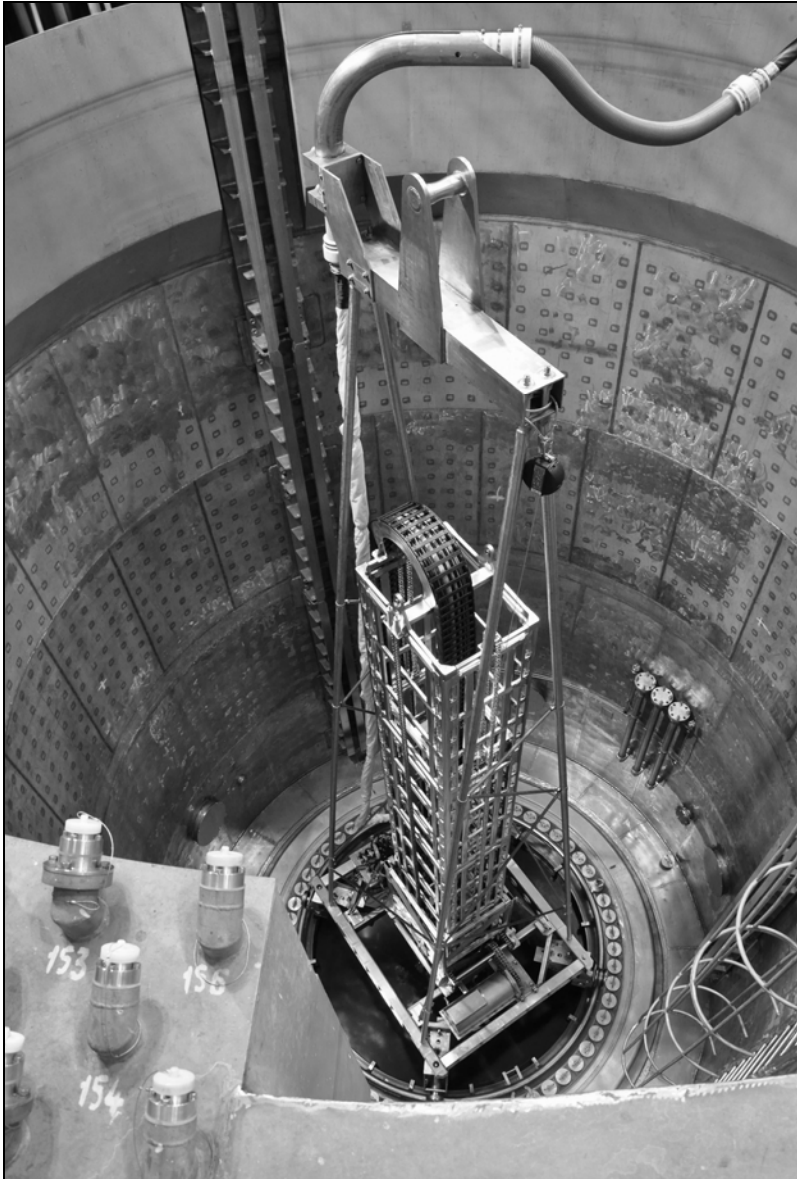


Fig. 9: Manipulator SKIN (Škoda JS, Czech Republic)
Obr. 9: Manipulátor SKIN (Škoda JS, Česko)

Manipulátory na principu stínící desky vyrábí a používá pouze ruská firma NIKIMT. Autorům příspěvku se nepodařilo získat kvalitní snímek, proto je zde ukázán všeobecný výkres – viz Obrázek 10. Charakteristickým rysem těchto manipulátorů je vysoká hmotnost (cca 40 t). Manipulátor SK-27 byl použit např. při předprovozních kontrolách na čínské JE Tianwan (VVER 1000 typ V-428). Na tomto zkušebním systému je stále využívána ultrazvuková technika TTL – viz příspěvek [4].

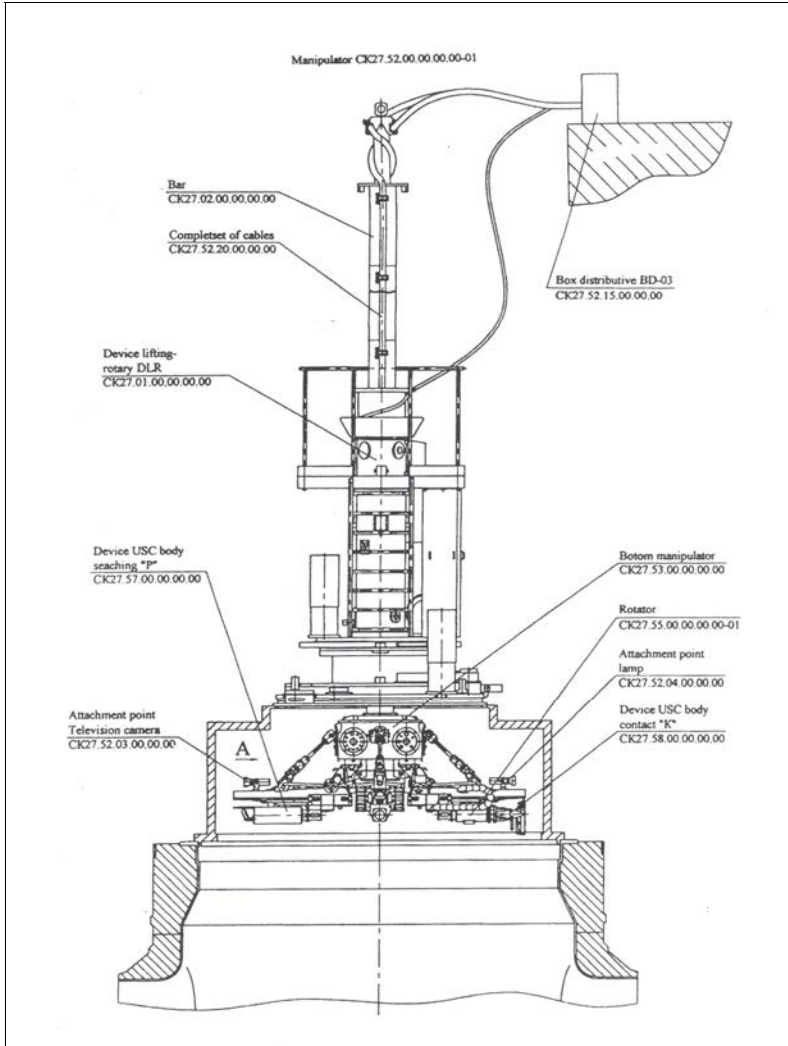


Fig. 10: Manipulator SK-27 (NIKIMT, Russia)
Obr. 10: Manipulátor SK-27 (NIKIMT, Rusko)

6.1.2. Manipulátor s centrálním (pevným) sloupem

Pro laickou i odbornou veřejnost je manipulátor s centrálním (pevným) sloupem spojen s německou firmou KWU (Siemens) – systém ZMM (Zentral Mast Manipulator) a to i navzdory faktu, že prototyp a první generaci těchto manipulátorů vyrobila firma MAN (Německo). Snímek manipulátoru ZMM (viz Obrázek 11) sice není z kontroly reaktorů typu VVER, ale to na principu jistě nic nemění. Poprvé byl tento manipulátor použit při provozních kontrolách TNR typu VVER 440 na JE NORD (býv. NDR) v roce 1987.

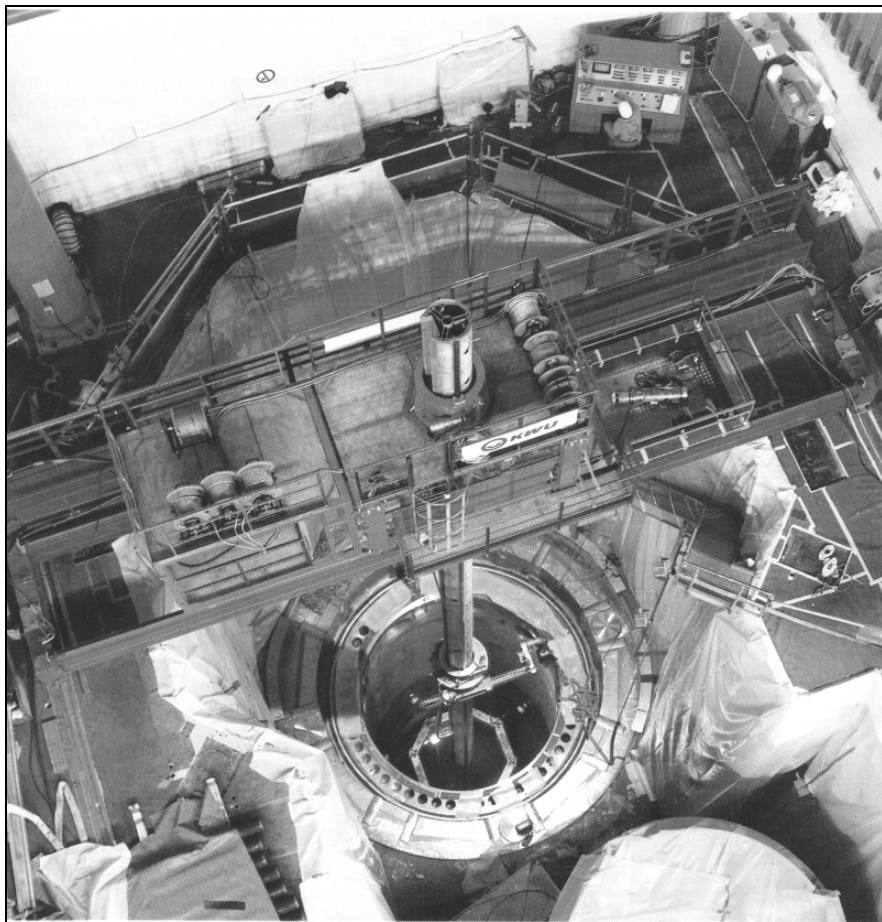


Fig. 11: Manipulátor ZMM (Siemens – KWU, Germany)
Obr. 11: Manipulátor ZMM (Siemens – KWU, Německo)

Zkušební systém firmy INETEC (Chorvatsko) je představitelem relativně subtilního a lehkého manipulátoru s centrálním (pevným) sloupem. Snímek tohoto manipulátoru v transportní poloze je na Obrázku 12 (JE Loviisa, Finsko). Loviisa je jedinou provozovanou JE s reaktory typu VVER 440, která je vybavena ochrannou obálkou (kontejnmentem).

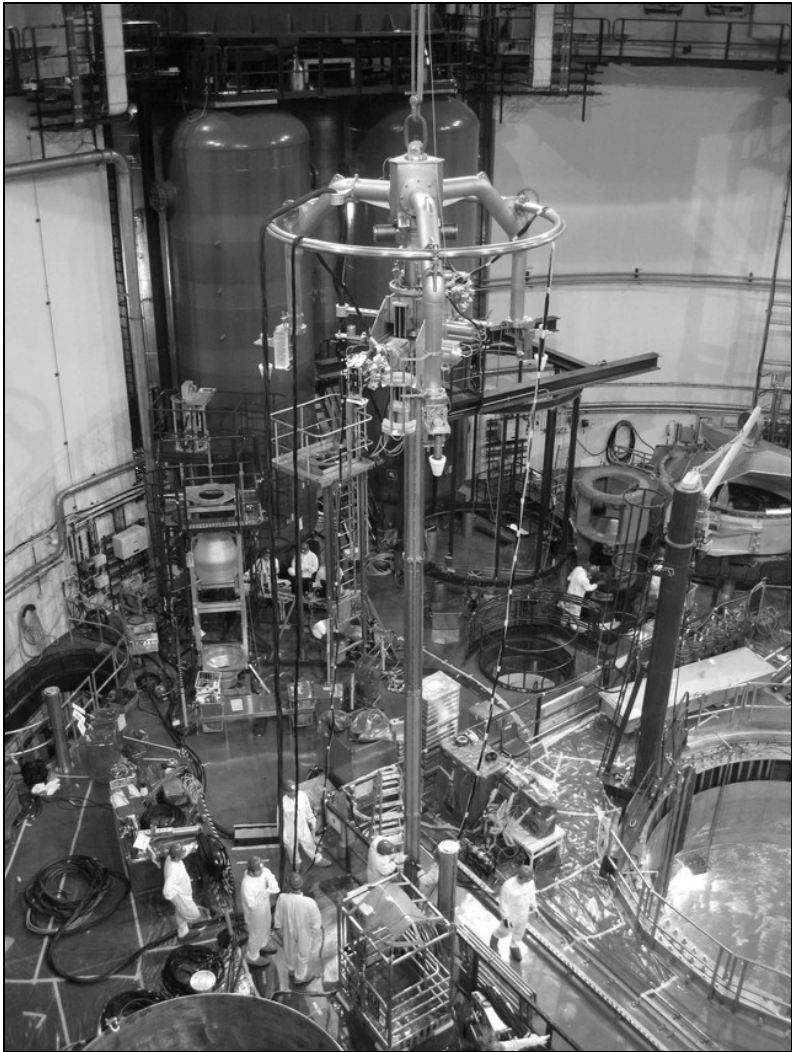


Fig. 12: Manipulator INETEC (Croatia)
Obr. 12: Manipulátor INETEC (Chorvatsko)

6.1.3. Manipulátor s decentrálním (excentrickým) sloupem

První zkušební systém s decentrálním (excentrickým) sloupem PIONEER byl vyvinut firmou MAN (Německo) koncem 80. let minulého století, když firma General Electric (USA) hledala spolupráci při provozních kontrolách starších bloků JE s reaktory typu PWR. Při provozních (předprovozních) kontrolách TNR typu VVER zatím nebyly manipulátory tohoto typu použity.

V září 2010 přeložila švédská firma AF Kontroll (koncern DEKRA) návrh zkušebnímu systému pro zkoušení TNR typu VVER 1000 [5], který můžeme vidět na Obrázku 13.

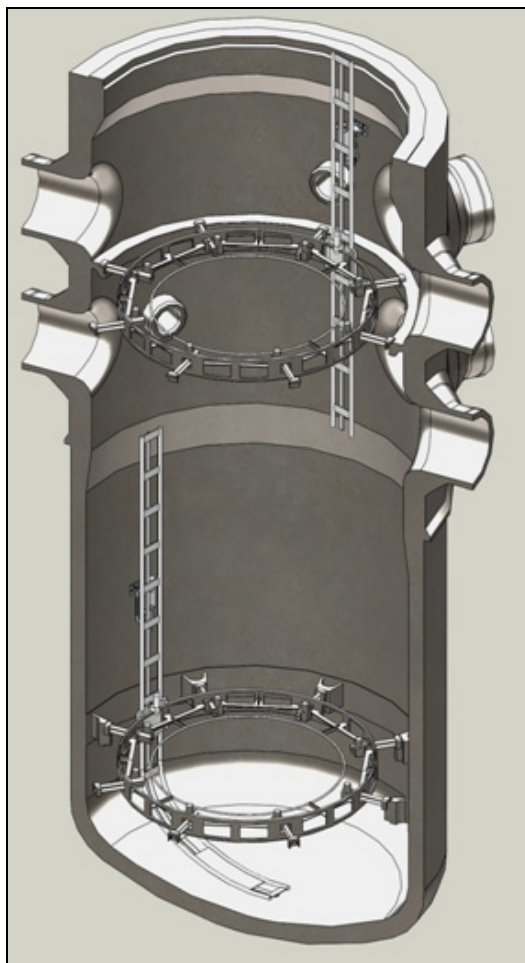


Fig. 13: Manipulátor AF Kontroll (Sweden)
Obr. 13: Manipulátor AF Kontroll (Švédsko)

6.1.4. Ponorka (ROV ... Remotely Operated underwater Vehicle)

Ponorky (ROV) zatím nebyly použity při provozních kontrolách TNR typu VVER, protože jejich hlavní zkušební metodou NDT je VT. Pro příklad zde uvádíme nezávislý TV inspekční systém SUSI 420 (AREVA NP GmbH, Německo), který byl primárně vyvinutý pro dálkové vizuální zkoušení komponent primárního okruhu pod vodou, včetně zkoušení TNR – viz Obrázek 14.



Fig. 14: ROV SUSI 420 (Germany)

Obr. 14: ROV SUSI 420 (Německo)

Japonská firma IHI používá pro ultrazvukové zkoušení podvodní zkušební robot, který nese označení AIRIS 21 a je použitelný pro zkoušení jak TNR typu PWR, tak i TNR typu BWR. AIRIS 21 můžeme vidět na Obrázku 15.

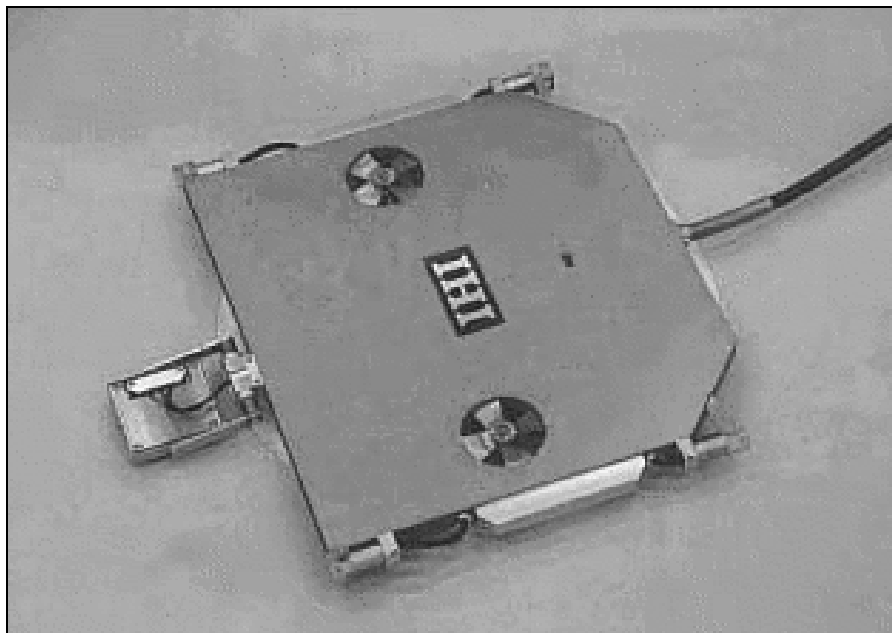


Fig. 15: ROV IHI (Japan)
Obr. 15: ROV IHI (Japonsko)

6.2. Zkoušení z vnějšího povrchu TNR

Tlakové nádoby reaktorů typu VVER jsou zavěšeny na osazení (systém opěr nádoby) pod spodními hrdly TNR. Tím je nedestruktivní zkoušení TNR z vnějšího povrchu rozděleno na dvě zcela odlišné oblasti:

- Spodní hladká válcová část a dno TNR.
- Oblast hrdel (nátrubků) TNR.

Spodní hladká válcové část a dno TNR se zkouší nedestruktivními metodami automatizovaným způsobem buď přenosnými manipulátory s magnetickými kolečky (např. ASK-172) nebo pomocí stabilních zkušebních systémů, které byly přímo součástí dodávky kompletů TNR (např. USK-213 a SK-187).

Zařízení (zkušební systém) ASK-172 je určeno pro zkoušení reaktorů VVER 1000 z vnějšího povrchu. Bylo vyvinuto a vyrobeno v ruské firmě Atomenergoremont. Zkušební systém se skládá z jednotlivých manipulátorů (podsystemy), které se pohybují po zkušebním povrchu pomocí magnetických koleček. První prototyp, ještě pod označením ASK-133, byl poprvé použit v roce 1988 při provozní kontrole na Kalininské JE (Rusko). Schéma zkušebního systému ASK-172 je na Obrázku 16.

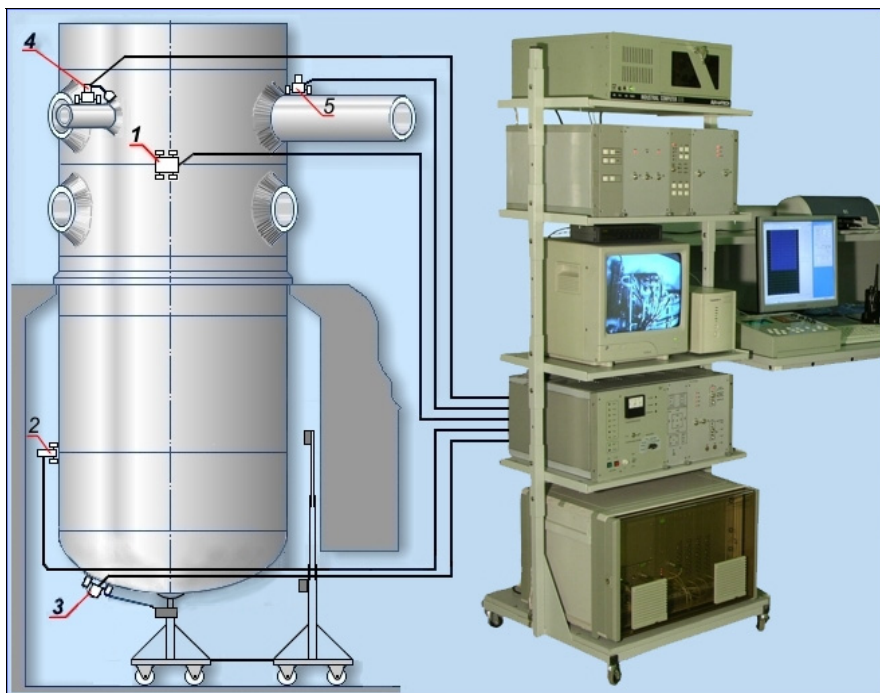


Fig. 16: System ASK-172 (Atomenergoremont, Russia)
Obr. 16: Systém ASK-172 (Atomenergoremont, Rusko)

Daleko rozšířenější způsob nedestruktivního zkoušení hladké válcové části a dna TNR je pomocí stabilních zkušebních systémů (manipulátorů) firmy NIKIMT (Rusko) – USK-213 (VVER 440) a SK-187 (VVER 1000).

Pro zkoušení hladké válcové části TNR se využívá teleskopický sloup, který se vysouvá do mezery mezi TNR a biologickým stíněním. Sloup nese zkušební hlavici, včetně TV kamer.

Zkušební systémy USK-213 a SK-187 byly dodány jako součást kompletů TNR. Prakticky všichni provozovatelé JE nebo dodavatelé provozních (předprovozních) kontrol tyto zkušební systémy průběžně modernizují.

Zajímavou součástí původních (nemodernizovaných) systémů bylo použití ultrazvukové techniky TTL – viz příspěvek [4] – pro prozvučování obvodových svarových spojů v oblasti aktivní zóny.

Snímek manipulátoru SK-187 – modernizovaného podsystému pro zkoušení spodní hladké válcové části a dna TNR typu VVER 1000 (ETE) je na Obrázku 17. Modernizace manipulátoru byla provedena ve firmě Škoda JS. Manipulátor (tzv. tančík) je vyfocen v parkovací poloze před zajištěním do prostoru pod TNR.

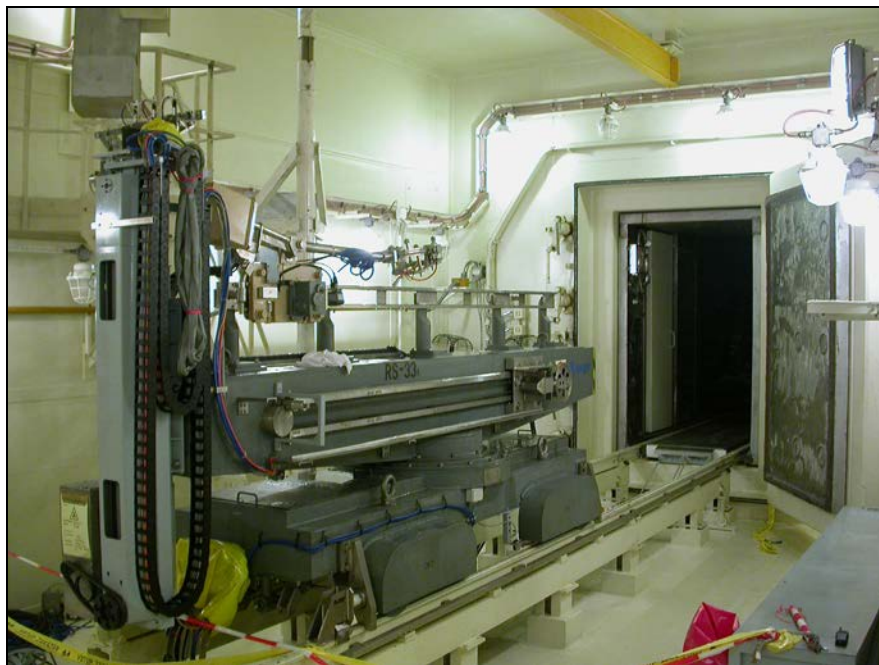


Fig. 17: System SK-187 (NIKIMT, Russia / Škoda JS, Czech Republic)
Obr. 17: Systém SK-187 (NIKIMT, Rusko / Škoda JS, Česko)

Zkoušení oblasti hrdel (nátrubků) automatizovaným způsobem je usnadněno faktem, že jsou v této oblasti na vnějším povrchu TNR upevněny vodící kolejnice, které umožňují pohyb podsystémů pro nedestruktivní zkoušení obvodových svarů TNR. Obdobné manipulátory se používají pro zkoušení víka TNR – viz kapitola 5.2.

Manipulátory, které pocházejí z původních zkušebních systémů USK-213 a SK-187, se slangově nazývají „traktory“. Procházejí také průběžně modernizacemi, liší se zejména rozsahem pohybu pohybového mechanismu (skeneru), který vykonává přímočarý vratný pohyb.

Svarové spoje TNR v oblasti hrdel lze zkoušet i ručním způsobem; radiační situace to při odstávce s rozšířenou výměnou paliva umožňuje. Standardně se zde provádí přímá vizuální kontrola (VT).

Zkušební systém USK-213 byl na maďarské JE Paks po modernizaci přejmenován na systém Trias. Snímek je na Obrázku 18.

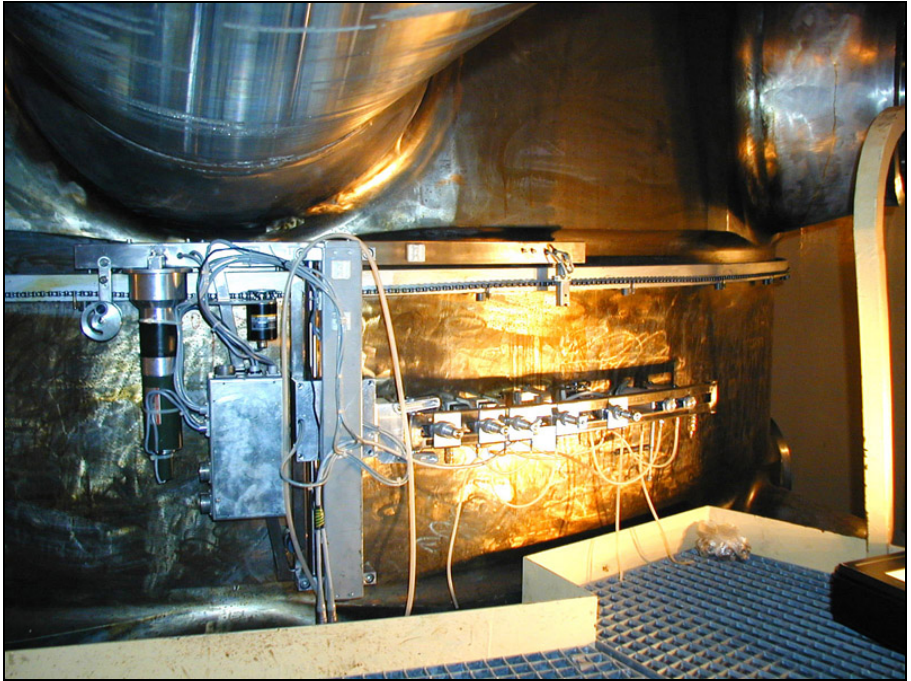


Fig. 18: System Trias (PA Zrt, Hungary)
Obr. 18: Systém Trias (PA Zrt, Maďarsko)

6.3. Metodika ultrazvukového zkoušení

Metodický přístup k provádění a vyhodnocování výsledků ultrazvukové zkoušení TNR při provozních kontrolách je dvojitý – buď se vychází stále z požadavků a kritérií pro výrobní kontroly nebo existují speciální předpisy pouze pro kontroly provozní. Citlivost zkoušení se zvyšuje, běžně se používají difrakční technika ToFD nebo technika PA a jsou zohledňovány požadavky z tzv. technických kvalifikací. Celé problematice byla věnována již řada příspěvků – např. na konferenci Defektoskopie 2010 [6] nebo i v loňském roce [7].

7. STATISTIKA

Odbor Provozní prohlídky a prohlídky (Škoda JS, divize Servis JE) realizoval za uplynulých 30 let celou řadu předprovozních a provozních kontrol tlakových nádob reaktorů (TNR), svarů hlavního cirkulačního potrubí (HCP), vnitřních částí reaktorů (VČR) a parogenerátorů (PG) typu VVER automatizovaným (mechanizovaným) způsobem.

Zde jsou uvedeny souhrnné počty k dnešnímu dni:

- **66** kontrol **TNR** typu VVER z **vnitřního** povrchu (od roku 1982)
- **77** kontrol svorníků, matic a závitových hnízd (lůžek) **TNR** typu VVER 440 a VVER 1000 (od roku 1982)
- **49** kontrol **TNR** typu VVER z **vnějšího** povrchu (od roku 1986)
- **74** kontrol **smyček** (á 6 svarů) **HCP** typu VVER 440 (od roku 1996)
- **16** kontrol svaru **víka** **TNR** typu VVER 440 (od roku 1999)
- **28** kontrol **větví** (á 5 svarů) **HCP** typu VVER 1000 (od roku 2000)
- **20** kontrol **VČR** typu VVER 1000 (od 2003)
- **2** odběry **vzorků z TNR** typu VVER 440 (od roku 2005)
- **11** kontrol **teplosměnných** trubek (á 1 kolektor) **PG** typu VVER 440 a VVER 1000 (od roku 2011)

8. ZÁVĚR

Autoři příspěvku pouze naznačili problematiku nedestruktivního zkoušení TNR typu VVER. Uvedené příklady vycházejí především z již třicetiletých zkušeností s automatizovaným (mechanizovaným) nedestruktivním zkoušením, které Škoda JS v letošním završila. Při orální prezentaci budou všechny obrázky předvedeny v lepší kvalitě a pochopitelně barevně. Další informaci o nedestruktivním zkoušení TNR typu VVER naleznou případní zájemci v příspěvcích z předcházejících konferencí „Defektoskopie“, kde byla publikována celá řada informací, které v tomto příspěvku nebyly z prostorových a časových důvodů uvedeny.

POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] Ae 13691 / Dok Rev. 2
Technické zdůvodnění zkoušení svorníků M 140x6 ultrazvukovou metodou kolektiv autorů, ŠKODA JS a.s., výzkumná zpráva, Plzeň, 2011.
- [2] Ae 13367 / Dok Rev. 1
Zkoušení obvodového svaru víka TNR VVER 440 z vnějšího povrchu ultrazvukem – odrazová technika kolektiv autorů, ŠKODA JS a.s., technický postup (instrukce), Plzeň, 2012.
- [3] ATPE-2-2005
Tipovaja programma kontrolja za sostojaniem osnovnogo metalla i svarnych soedinenij oborudovanija i truboprovodov atomnych elektrostancij s reaktornoj ustanovkoj VVER 440 pri ekspluatacii FGUP koncern „Rosenergoatom“, Moskva, 2005.
- [4] Technika TLL („Tandem“)
kolektiv autorů, konference Defektoskopie 2009, příspěvek, Praha, 2009.
- [5] Delivery of Manipulators for Inspection of Reactor Pressure Vessel and Nozzles for WWER 440 and WWER 1000
kolektiv autorů, AF Kontroll, prezentace, Temelín, 2010.
- [6] Automatizované zkoušení TNR typu VVER ultrazvukem
kolektiv autorů, konference Defektoskopie 2010, příspěvek, Plzeň, 2010.
- [7] Optimalizace ultrazvukového zkoušení TNR typu VVER při provozních kontrolách kolektiv autorů, konference Defektoskopie 2011, příspěvek, Ostrava, 2011.



MICROSTRUCTURAL PROCESSES ACCOMPANYING MATERIALS FATIGUE

MIKROSTRUKTURNÍ PROCESY DOPROVÁZEJÍCÍ ÚNAVU MATERIÁLU

J. FIALA^{*}, P. MAZAL^{**}, M. KOLEGA^{*}, F. VLAŠIC^{**}, P. LIŠKUTÍN^{**}

^{*}University of West Bohemia Plzeň CZ

^{**}Brno University of Technology

Abstract

Changes in the structure of duralumin caused by its cyclic loading up to failure have been followed using x-ray diffraction. For that purpose, the loading has been interrupted after every 5.000 or 10.000 cycles (up to 39 times at the most resistant sample). Different modes of loading were applied and structure has been analyzed at three spots on the surface of each sample. The results obtained confirm our previous findings concerning other samples: that the materials texture (orientation distribution of its mosaic blocks) changes in the course of the cyclic loading with notable regularity. In order to explain what lies at the root of these changes, we designed a structural model based on the balance of the interface energy of the mosaic aggregate and the volume energy of individual blocks. So as to verify this model, we propose to monitor the redox potential of the surface of loaded samples in the course of cyclic loading.

Key words: fatigue, x-ray diffraction, paracrystalline distortions

Abstrakt

Pomocí rtg difrakce jsme sledovali změny, ke kterým dochází ve struktuře duralu během jeho cyklického zatěžování až do lomu. Za účelem analýzy bylo cyklování po každých 5.000 resp. 10.000 cyklech přerušováno (u nejodolnějšího vzorku celkem 39-krát). Vzorky byly zatěžovány různým způsobem a strukturní analýzu jsme prováděli na třech místech povrchu každého vzorku. Výsledky potvrzují to, co jsme zjistili dříve u jiných vzorků: že textura materiálu (orientační distribuce jeho mosaikových bloků) se během cyklického zatěžování mění s pozoruhodnou pravidelností. Abychom vysvětlili co je příčinou těchto změn, zkonstruovali jsme strukturní model, vycházející z bilance mezipovrchové energie mosaikového agregátu a objemové energie jednotlivých bloků. Pro verifikaci toho modelu navrhujeme monitorovat během cyklování redoxní potenciál povrchu zatěžovaných vzorků.

Klíčová slova: únava, rentgenová difrakce, parakrystalické distorse

1. Úvod

Cyklické zatěžování vnáší do tělesa energii nevratné (plastické) deformace. Ta se v něm postupně, každým zatěžovacím cyklem kumuluje a když je dost velká, může se podílet na aktivaci různých strukturních přeměn. Spektrum stavů, jichž těmito změnami struktura tělesa může nabývat, je omezené potenciální energií vzájemného působení jeho atomů. Změny struktury proto nejsou monotónní: opakují se, vrací se a (kvasi)periodicky se střídají. A protože se jedná o systém obrovského množství stavebních součástí, hraje přitom důležitou úlohu náhoda. Náhodným souběhem při tom koloběhu strukturních přeměn vznikne kritická konfigurace (nestabilní necelistvost), která má vzápětí za následek únavový lom. Pravděpodobnost takové náhody roste s počtem restitucí, návratů k historicky předešlému stavu struktury tělesa v důsledku jeho cyklického zatěžování. Monitorováním rytmických strukturních změn můžeme vysledovat jejich zákonitost a na základě toho pak odhadnout kolik zátěžných cyklů těleso ještě vydrží.

2. Spontánní strukturalizace

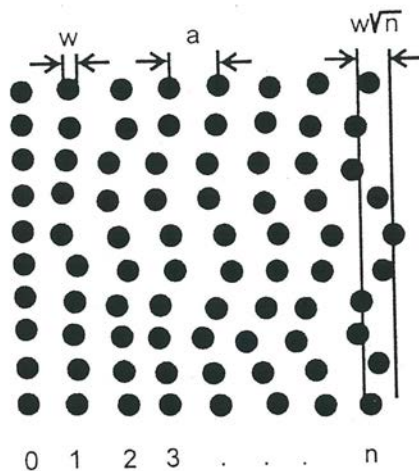
Jednorázovou a dočasnou (ideálně) elastickou deformací se do tělesa žádná energie nevloží. Skutečná deformace reálných těles zatěžovaných pod mezi kluzu však není ideálně elastická, ale anelastická (viskoelastická). Nenastává totiž ihned po zatížení tělesa, ale s určitým časovým zpožděním. A to způsobuje, že po odlehčení (anelasticky deformovaného) tělesa v něm určitá energie zůstane. Při každém cyklu proměnného zatěžování tělesa se do něj ukládá stále nová a nová energie a jejím hromaděním roste potenciál, který se pak využije na vykonání práce spojené s únavovým poškozením a posléze s lomem cyklicky namáhaného tělesa. Energie, vkládaná při cyklickém namáhání do zatěžovaného tělesa, v něm vyvolá kmitavý pohyb dislokací sem a tam v rytmu zatěžování. Při takovém pohybu spolu dislokace interagují mnohem živěji než při statickém nebo monotónním zatěžování. Určitou formou interakce dvou dislokací (protínáním) může dojít k omezení jejich pohyblivosti. Když se pak s takovou dvojicí znehybnělých dislokací protne ještě nějaká další, třetí dislokace, je pravděpodobnost zablokování jejího dalšího pohybu větší, než když se protne s jedinou dislokací [1]. Znehybnělé dislokace se hromadí a tím se pole dislokací strukturalizuje, dichotomisuje na „políčka“ (mosaikové bloky) s relativně nízkou hustotou volně pohyblivých dislokací a „meze“ (rozhraní) mosaikových bloků, tvořené shluky znehybnělých dislokací, jejichž hustota je na těchto rozhraních vysoká.

3. Hrubnutí struktury

Strukturalizací pole dislokací v něm vzniknou rozhraní a ta jsou sídlem povrchové energie. Povrchová energie je lineárně úměrná ploše rozhraní (koeficient této úměrnosti, plošná hustota povrchové energie, je povrchové napětí). Strukturalizací pole dislokací se tudíž zvětšuje jeho energie. A to tím více, čím jsou mosaikové bloky menší. Což je hnací silou hrubnutí mosaikové struktury. Hrubnutí mosaikové struktury je tedy spontánní proces, neboť je spojen se snížením jejího termodynamického potenciálu (probíhá-li hrubnutí za konstantní teploty a tlaku, je tím potenciálem volná entalpie, Gibbsova funkce); jinými slovy, afinita hrubnutí mosaikové struktury je kladná. Rychlost hrubnutí mosaikové struktury je ovšem dána aktivační energií, kterou je třeba vynaložit při překonávání překážek, jež jsou s tím (byť spontánním) procesem spojené a ta arci s velikostí mezipovrchové energie agregátu mosaikových bloků souvisí jen zprostředkovaně.

4. Zjemňování struktury

Když mosaiková struktura hrubne, zvětšují se (tedy rostou) mosaikové bloky, (víceméně) koherentní krystalky (s minimem odchylek od ideální krystalové struktury). Tomuto procesu se říká Ostwaldovo stárnutí nebo také sekundární rekristalísace a spočívá v tom, že některé krystalky (mosaikové bloky) při svém růstu pohltí krystalky jiné (menší, méně dokonalé, nepříznivě orientované [povrchové napětí a tedy i rychlost růstu jsou směrově závislé] či ty, které mají menší počet stěn). Při (jakkoli vyvolaném) růstu krystalů se však v nich hromadí (růstové čili) parakrystalické distorse: atomy se uloží v rostoucím krystalu do „nesprávné“ polohy (jiné než je ta, kde jsou umístěny ve struktuře ideálního „bezdefektního“ krystalu). Pokud k nápravě takové chyby nedojde v době, během které je atom v krystalizační zóně, budou (pozdější) korekce velmi obtížné (neboť se musí realizovat difusí, jež je v dokonalém krystalu bez defektů velmi pomalá). Chyby vznikající při růstu mosaikového bloku (krystalku) se proto hromadí (obr.1) a jejich počet (a objemová hustota) roste [2]. Tím se zvyšuje energie mosaikového bloku, což posléze vyústí v jeho rozpad. Rozpadem bloků se mosaiková struktura zjemňuje. Zjemňování mosaikové struktury je tedy stejně jako její hrubnutí procesem spontánním, neboť je provázáno snížením příslušného termodynamického potenciálu. A opět je třeba mít na zřeteli, že rychlost zjemňování mosaikové struktury je dána aktivační energií (nukleace a růstu trhlin, kterými se rozpad mosaikových bloků uskutečňuje), jež s velikostí energie parakrystalické distorse, nahromaděné během růstu mosaikových bloků, souvisí jen zprostředkovaně.

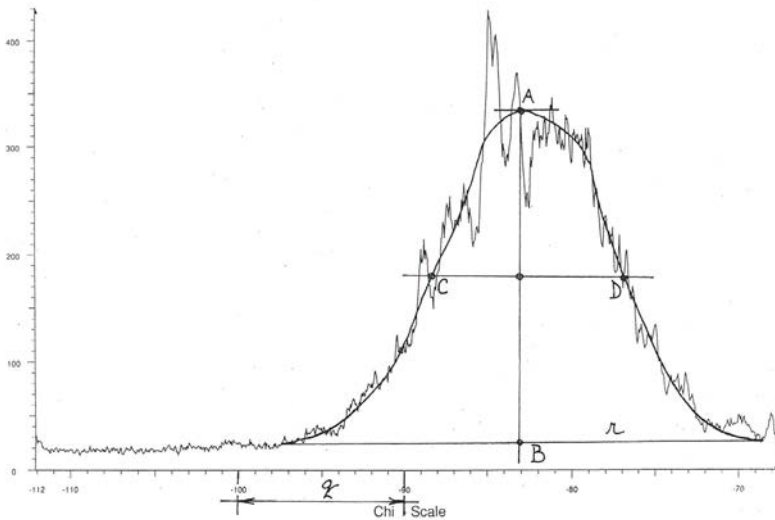


Obr.1. Při růstu krystalu se v jeho struktuře hromadí defekty, čímž vzniká pnutí, které další růst krystalu posléze zastaví.

Fig. 1. In course of the growth of a crystal, defects accumulate in its structure, creating stress which finally stops its further growth.

5. Strukturní oscilace

Cyklicky zatěžované těleso může existovat ve dvou termodynamicky stacionárních stavech: jedné a téže hodnotě jeho energie (termodynamického potenciálu) přísluší dva konfiguračně odlišné stavy – hrubozrný a jemnozrný. A struktura toho tělesa může mezi těmito dvěma stavy oscilovat, ale to jenom díky přísunu energie zvenčí (tedy díky tomu, že se jedná o soustavu termodynamicky otevřenou, která je tím přísunem energie zvenčí od termodynamické rovnováhy oddalovaná). Jedná se tedy o disipativní strukturu, tolerantní k alternativám (což je příznačné pro chaos), které jsou však jednoznačně definované (což je negací chaosu) [3,4]. V průběhu cyklického zatěžování přechází těleso z jednoho stacionárního stavu do druhého, a protože tento proces je stochastický, může ale nemusí vygenerovat (jako růstový defekt) kritickou konfiguraci (nadkritickou trhlinu) a následně únavový lom. Únava materiálu tedy nevzniká postupným hromaděním strukturálních poruch, ale kumulací pravděpodobnosti, že vznikne kritická porucha (strukturální konfigurace). A k této kumulaci dochází opakovaným přechodem mezi dvěma stacionárními (metastabilními) stavy mikrostruktury tělesa. Monitorováním (počtu) těchto přechodů (např. rtg difrakcí nebo elektrochemicky) lze proto odhad zbytkové životnosti cyklicky zatěžovaného tělesa zpřesnit.



Obr. 2. Konstrukce hodnoty K , charakterizující azimutální profil sledované rentgenové difrakční linie (dle textu).

Fig. 2. Construction of K value characterizing the azimuthal profile of the diffraction line under consideration (according to the text).

6. Rentgenografická měření

Strukturální oscilace (střídavé zjemňování a hrubnutí struktury) lze sledovat pomocí rentgenové difrakce, a to:

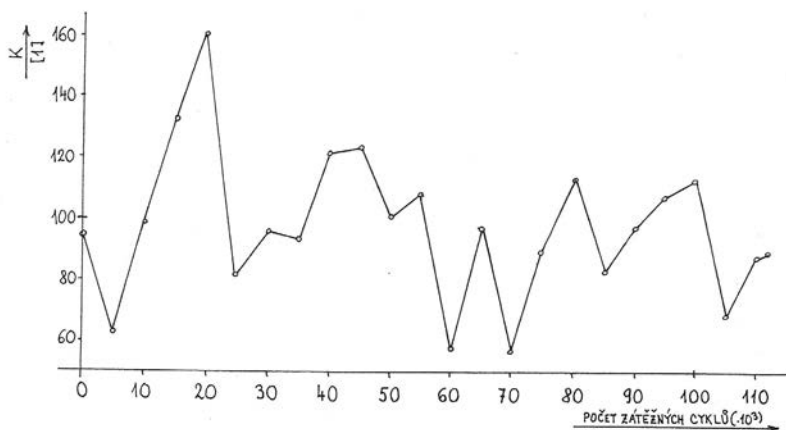
- měřením šířky radiálního profilu difrakčních linií;
- hodnocením azimutálního profilu difrakčních linií;
- určováním poměru intenzit předních a zadních difrakčních linií.

Ta první metoda je účinná pouze tehdy, když mosaikové bloky jsou nanodispersní (jejich velikost je koloidní). Azimutální profil difrakčních linií lze hodnotit buď na základě poměru integrální intenzity soliterních píků a spojitého pozadí (pokud jsou hrubé mosaikové bloky větší než 10 μm a jemné mosaikové bloky menší než 10 μm) [5] anebo podle směrové distribuce intenzity difraktovaného záření [6]. Poměr intenzit předních a zadních linií je citlivou funkcí tzv. pnutí 3. druhu, které vzniká výchytkami atomů z jejich rovnovážné polohy v důsledku parakrystalických distorsí, jež se hromadí ve struktuře mosaikových bloků při jejich růstu.

V této práci jsme změny ve struktuře cyklicky zatěžovaných vzorků hliníkové slitiny EN AW-2017A (dural: 4%Cu; 0,6%Mg; 0,7%Si) sledovali měřením šířky K azimutálního profilu, tj. směrové distribuce intenzity difraktovaného záření podél difrakční linie (200) hliníkové matrice. Šířka azimutálního profilu je přímo úměrná disorientaci (dispersi orientace) mosaikových bloků: pro hrubozrnnou strukturu je K malé, pro jemnozrnnou velké [6]. Geometrická konstrukce hodnoty

$$K = 100 \cdot \frac{p}{q}$$

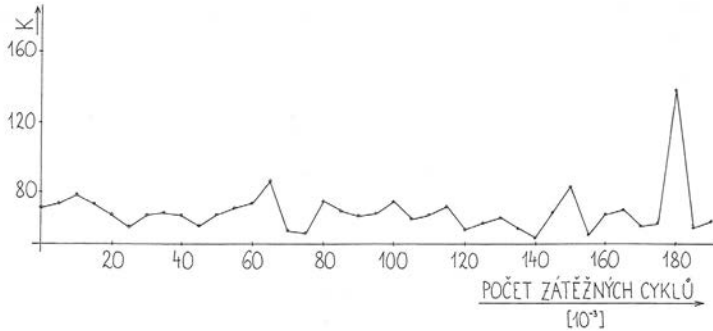
je znázorněna na obr.2. p je délka horizontální úsečky CD, která pólí úsečku AB mezi



Obr. 3. Závislost veličiny K, charakterizující směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků na počtu zátěžných cyklů.

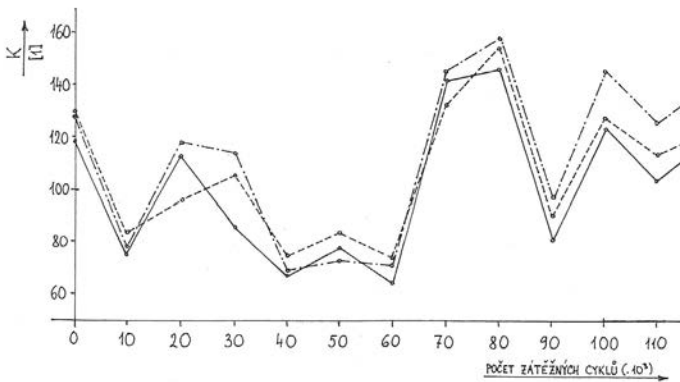
Fig. 3. Dependence of the quantity K, characterizing the orientation distribution (disorientation) of mosaic blocks on the number of loading cycles.

maximem distribuce A a bodem B. Bod B je průsečíkem vertikály vedené bodem A a přímkou r aproximující pozadí distribuční křivky. Hodnota q (měřítková korekce) je odlehlost bodů „-100“ a „-90“ na horizontální ose souřadně, charakterizující směr. Na vertikální ose se uvádí intenzita záření difraktovaného v daném směru.



Obr. 4. Ke strukturální oscilaci dochází až když se ve vzorku cyklickým zatěžováním nahromadí dost velká energie.

Fig. 4. Structural oscillation sets in only after an energy large enough has been accumulated by cyclic loading.



Obr. 5. Strukturální oscilace, indikované ve třech různých bodech jednoho a téhož vzorku, se liší jen málo.

Fig. 5. Structural oscillations, indicated in three different spots of the same sample, differ only slightly.

7. Výsledky

Obrázek 3 dokumentuje rytmické změny textury (směrové distribuce) mosaikových bloků vzorku během jeho cyklického zatěžování. Obrázek 4 ukazuje, že ke strukturní oscilaci dochází až když se ve vzorku cyklickým zatěžováním nashromáždí dost velká energie. Obrázek 5 dokazuje, že strukturní oscilace, indikované rentgenograficky ve třech různých bodech (A,B,C) jednoho a téhož vzorku, se vzájemně jen velmi málo liší.

8. Závěr

- (a) Termodynamický potenciál mosaikové struktury je nelineární bimodální funkcí její disperse.
- (b) Stabilita obou konfiguračních modů klesá s energií, která se v tělese hromadí jeho cyklickým zatěžováním, což posléze přivodí tepelně excitované strukturní oscilace.
- (c) S počtem uskutečněných přechodů mezi oběma stacionárními strukturními stavy roste pravděpodobnost vzniku nadkritické necelistvosti a únavového lomu.

Literatura

- [1] J.Fiala, V.Mentl, P.Šutta: Struktura a vlastnosti materiálů, Academia, Praha 2003, 45-46.
- [2] J.Fiala: Paracrystallinity. In Applied Crystallography, H.Morawiec, D.Stroz (eds), World Scientific, Singapore 1998, 107-115.
- [3] L.Treindl: Chemická kinetika, Slovenské pedagogické nakladatelstvo, Bratislava 1990, 311-324.
- [4] J.Briggs, F.D.Peat: Die Entdeckung des Chaos, Carl Hanser Verlag, München 1990, 207-212.
- [5] J.Fiala, I.Schindler, R.Foret, S.Němeček: Sledování struktury konstrukčních materiálů a její degradace rtg difrakcí, Strojnícky časopis **53** (2002), 1-23.
- [6] J.Fiala, P.Mazal, M.Kolega, P.Liškutín: Rentgenografické zkoumání únavového procesu. In Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2010, P.Mazal, L.Pazdera (eds), Brno University of Technology, Brno 2010, 49-56.



EVALUATION OF CONCRETE HOMOGENEITY IN MASSIVE STRUCTURAL ELEMENT OF HYDROELECTRIC POWER PLANT BY MEANS OF NONDESTRUCTIVE IMPULSE RESPONSE METHOD

Tomasz GORZELAŃCZYK¹, Jerzy HOŁA¹, Łukasz SADOWSKI¹,
Krzysztof SCHABOWICZ¹

¹Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Abstract

When erecting concrete structures one may notice defects, in the form of inhomogeneities (due to improper concrete compaction), in some areas of the structural elements. Since they occur on the surface such defects are easily detectable. It is, however, difficult to detect defects occurring inside structural elements. Nondestructive test methods can be useful for this purpose. This paper presents tests of concrete homogeneity inside a structural element constituting a concrete wall of the hydroelectric power plant suction pipe, carried out using the nondestructive impulse response method. The results of the tests showed that this method can be successfully used to identify concrete zones characterized by inhomogeneity (honeycombing) inside massive structural elements.

Key words: concrete, nondestructive tests, impulse response method

1. Introduction

Concrete is one of the most widely used construction materials. All kinds of structures and structural elements are built from concrete. It owes its widespread use to the availability of its constituents, the relatively low costs of its production and the fact that it can be used in various atmospheric conditions and to erect structural elements and structures by different methods [1].

In construction practice quite often in some areas of concrete structural elements defects in the form of concrete inhomogeneity appear. Defects of this kind particularly often affect massive structural elements, which has a significant bearing on their durability, compressive strength and voids index. There are many kinds of concrete inhomogeneity, but the most common is the so-called honeycombing, i.e. zones of concrete characterized by different degrees of compaction, formed as a result of the improper compaction of the concrete. As opposed to defects occurring on the surface of structural elements, the internal defects are difficult to detect. They may appear only in the course of service, whereby a repair is required to remove them. Therefore nondestructive test methods are increasingly used to evaluate the homogeneity of concrete in building structures [2-5]. The state-of-the-art acoustic impulse-response method is particularly suitable for this purpose. The method is described in detail in [6-10].

This paper presents the testing of the homogeneity of concrete in a massive structural element, i.e. the concrete wall of the suction pipe in a hydroelectric power plant, by means of the impulse response method.

2. Range of tests

The impulse response measuring apparatus was used to test a massive structural element constituting the concrete wall of a hydroelectric power plant suction pipe. The about 1000 mm thick structural element was made of grade C25/30 concrete with 32 mm maximum aggregate grading, reinforced with smooth rebars made of A-I St3S steel. Altogether tests were carried out in 80 testing areas. In each testing area a 3 x 4 to 11 x 5 grid of measuring points was marked. The distances between the points of the grid amounted to about 50 cm. The total number of measuring points was about 2000. In each of the measuring points an elastic wave was produced in a nondestructive way by means of a special calibrated hammer with a rubber end. The ambient temperature, measured using a Trotec T200 for quick checking relative air humidity in the vicinity of the measuring point, was $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ while the relative humidity amounted to $82\%\pm 5\%$. At the same time the signal was being recorded in the graphic form, using a geophone, as shown in fig. 1. Then the data were transformed to produce four maps of such characteristic parameters as average mobility, stiffness, mobility slope and voids index. Since average mobility and stiffness are the parameters used in this method exemplary tests results in the form of distribution maps of these parameters are presented below.



Fig. 1. Testing of massive structural element, i.e. concrete wall of hydroelectric power plant suction pipe, by means of impulse response apparatus.

3. Exemplary test results and their analysis

Below, exemplary results of the tests of the massive structural element constituting the concrete wall of the hydroelectric power plant suction pipe are presented for two experimental cases. In case no. 1 no concrete inhomogeneity occurs. In case no. 2 zones of concrete characterized by different degrees of compaction (honeycombing) were detected. The test results in the form of maps of average mobility and stiffness and histograms of the parameters, obtained by the impulse response method for experimental cases 1 and 2 are presented in respectively Sections 3.1 and 3.2. Case 1 occurred in 55 of the 80 testing areas.

3.1. Experimental case 1

In experimental case 1, mobility is constant in the whole testing area while stiffness may change only locally. An example here is testing area 10. A map and a histogram of average mobility for this area are shown in fig. 2 while a map and a histogram of stiffness are shown in fig. 3.

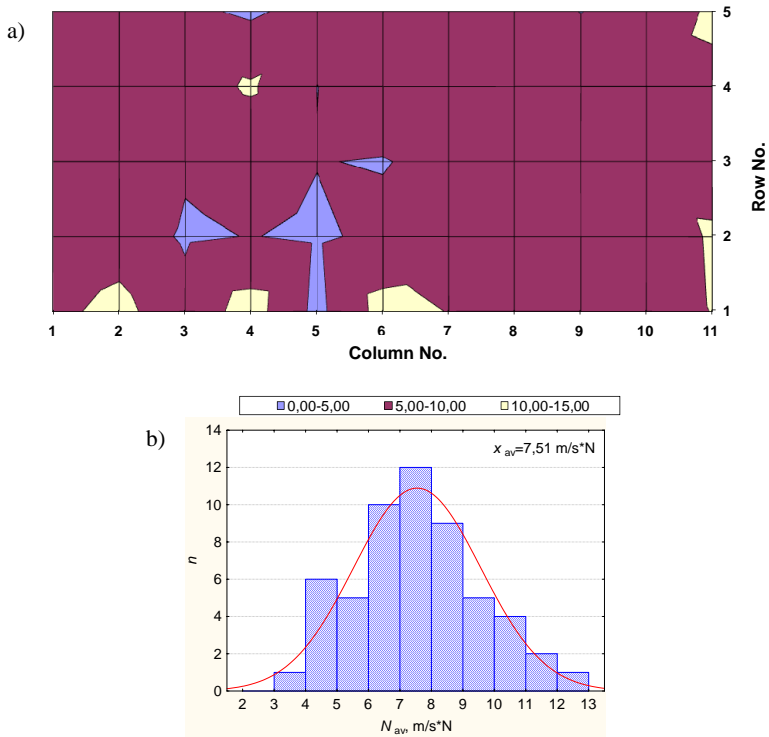


Fig. 2. Map of average mobility (a) and histogram of average mobility (b) for concrete wall of suction pipe in testing area no. 10.

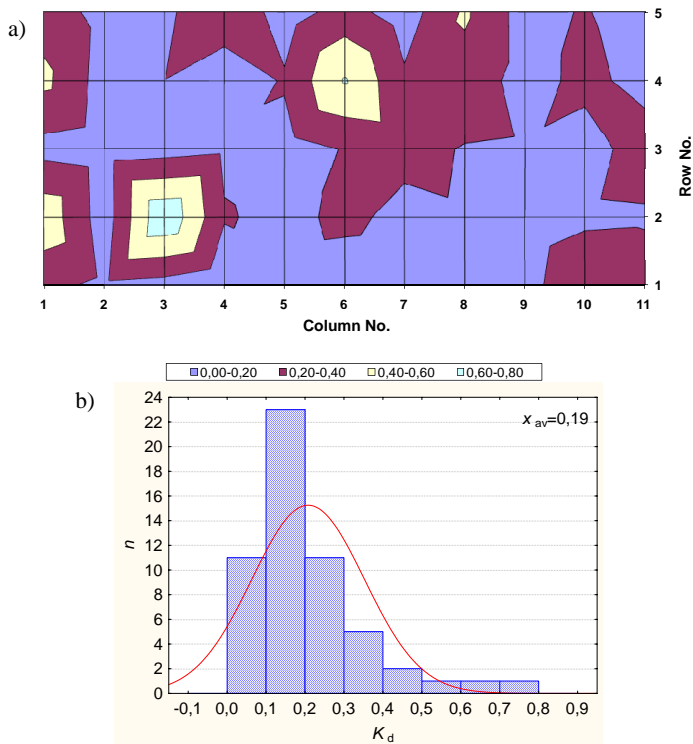


Fig. 3. Map of stiffness (a) and histogram of stiffness (b) for concrete wall of suction pipe in testing area no. 10.

As it appears from figs 2a and 3a in most of the measuring points average mobility is in a range of 5-10 N·m/s, i.e. it is within the average, while between measuring points 1-2, 1-3, 1-4, 2-4, 3-4, 3-3, 3-2 and 2-2 (row no.-column no.) stiffness ranges from 0.4 to 0.8 (above the average). In the other measuring points, stiffness is in an interval of 0-0.4, i.e. it is within the average. As it appears from the histograms of the parameters, shown in figs 2b and 3b, the average mobility and the average stiffness amount to respectively 7.51 m/s·N and 0.19. The maps of average mobility and stiffness and their histograms for the suction pipe concrete wall in testing area 10 indicate that no concrete inhomogeneity occurs in this area.

3.2. Experimental case 2

In experimental case 2, different values of the two main parameters, i.e. average mobility and stiffness, are obtained. An example here is testing area no. 3. A map and a histogram of average mobility are shown in fig. 4 while a map and a histogram of stiffness are shown in fig. 5.

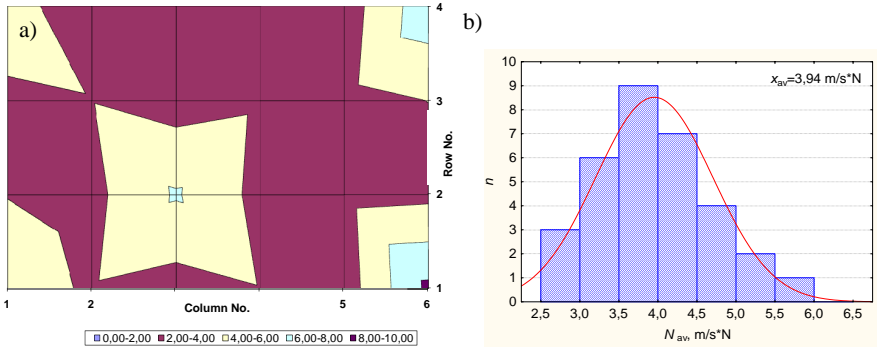


Fig. 4. Map of average mobility (a) and histogram of average mobility (b) for concrete suction pipe wall in testing area no. 3.

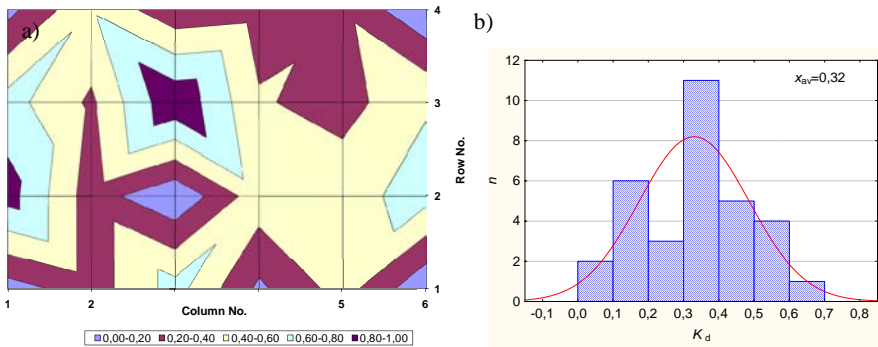


Fig. 5. Map of stiffness (a) and histogram of stiffness (b) for concrete suction pipe wall in testing area no. 3.

As it appears from figs 3a and 4a, between measuring points 1-2, 1-3, 1-4, 2-2, 2-4, 3-4, 3-3 and 3-2 (the first digit stands for the row number and the second digit for the column number) average mobility is in a range of 4-6 N·m/s, i.e. it is above the average, while stiffness is in a range of 0-0.6. Within measuring point 4-6, average mobility ranges from 8 to 10 N·m/s (it is much below the average) while stiffness ranges from 0 to 0.2 (it is below the average). In the other measuring points, average mobility is in a range of 2-4 N·m/s (it is below the average) while stiffness is in a range of 0.6-1.0 (it is above the average). As it appears from the histograms of the parameters, shown in figs 2b and 3b, the averages of average mobility and stiffness amount to respectively 3.94 m/s·N and 0.32. The local increase in average mobility and the low value of stiffness indicate that the material is deformable, which may be evidence of the existence of zones characterized by different degrees of compaction (honeycombing) in this area. The low values of stiffness also indicate poorer quality of the concrete in these testing points in comparison with the other testing points. The presented maps of average mobility and stiffness and the histograms of the parameters for the concrete suction pipe wall in testing area no. 3 indicate that concrete inhomogeneity (honeycombing) occurs in this area.

4. Conclusion

Exemplary tests of concrete inhomogeneity in a massive structural element, constituting the wall of the suction pipe in a hydroelectric power plant, by means of the nondestructive acoustic impulse response method have been presented.

The tests have demonstrated that the impulse response method can be successfully used to evaluate the inhomogeneity of concrete in this kind of structures with massive structural concrete elements. Using this method one can discern zones of concrete differing in their degree of compaction.

The nondestructive tests showed that in 55 of the 80 testing areas no concrete inhomogeneity occurs, whereas in the other 25 areas concrete inhomogeneities in the form of zones characterized by different degrees of compaction (honeycombing) occur. Such inhomogeneities may form as a result of improper compaction of concrete or due to the use of aggregate with grading much exceeding the design specifications.

References

1. Czarnecki L., Emmons P., Repair and protection of concrete structures (in Polish), Polski Cement, Kraków (2002).
2. Bungey J., Millard S., Gratham M., Testing of concrete in structures, Taylor & Francis, London and New York (2006).
3. Beutel R., Reinhardt H., Grosse C., Glaubitt A., Krause M., Maierhofer C., Algernon D., Wigggenhauser H., Schickert M., Comparative performance tests and validation of ndt methods for concrete testing, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 27, 1-3, pp. 59-65 (2008).
4. Pérez M., Gil L., Oller S., Non-destructive testing evaluation of low velocity impact damage in carbon fiber-reinforced laminated composites, *Ultrasound*, 66-2, pp. 21-27 (2011).
5. Hoła J., Schabowicz K., State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures - anticipated development trends, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10-3, pp. 5-18 (2010).
6. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Diagnostics of reinforced concrete structures. Vol. 1, Methodology, field tests and laboratory tests of concrete and steel (in Polish), Polskie Wydawnictwo Naukowe (2010).
7. Davis A.: The non-destructive impulse response test in North America: 1985-2001, *NDT&E International*, 36, pp. 185-193 (2003).
8. Hertlein B., Davis A.: Performance-based and condition-based NDT for predicting maintenance needs of concrete highways and airport pavements, *Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports and Aerospace Hardware*, Proceedings of SPIE 2945, 1, Scottsdale, pp. 273-281 (1996).
9. Ottosen N., Ristinmaa M., Davis A., Theoretical interpretation of impulse response tests of embedded concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 130, pp. 1062-1071 (2004).
10. Hoła J., Sadowski Ł., Schabowicz K., Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods, *Automation in Construction*, 20-7, pp. 799-807 (2011).



EVALUATION OF CONCRETE HOMOGENEITY IN MASSIVE WALL OF HYDROTECHNICAL STRUCTURE BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPHY METHOD

Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI,
Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Contact e-mail: t.gorzelanczyk@pwr.wroc.pl

Abstract

This paper presents the results of nondestructive tests of concrete inhomogeneity in a massive wall of a communication gallery in a hydroelectric power plant located on one of the largest rivers in Poland. The tests were carried out using the ultrasonic tomography method. An analysis of the test results showed that in most of the selected measuring places the quality of the concrete is satisfactory. Concrete inhomogeneity, probably in the form of large air voids which had formed as a result of improper concrete compaction or because large aggregate particles had not been properly enveloped in concrete, was detected in only a few places. In such places the microstructure of concrete is inhomogeneous and loose, whereby they are susceptible to water leaks through the wall. The investigations have shown that the ultrasonic tomography method can be successfully used for this purpose. It enables one to quickly detect concrete zones with a different degree of compaction and larger air voids formed as a result of, e.g., improper concrete compaction.

Key words: acoustic methods, ultrasonic tomograph, nondestructive testing, concrete

1. Introduction

Nondestructive methods are currently increasingly often used to diagnose various building structures, including massive hydrotechnical structures [2-4, 7, 8]. The advantage of such methods is their noninvasiveness, which in some situations is simply irreplaceable. Acoustic methods belong to commonly used nondestructive methods. One of the latest acoustic methods is ultrasonic tomography [4] which was employed in this research to evaluate the homogeneity of concrete in the wall of a communication gallery in a hydroelectric power plant.

The investigated object is a hydroelectric power plant (built in the 1970s) located on one of the largest rivers in Poland. It consists of three power generation units separated by isolation joints. Each of the units includes two turbine-generator sets forming two sections called hydroelectric sets. The underground part of the hydroelectric set consists of the following major parts: an inlet scroll, a suction pipe and galleries connecting all the hydroelectric sets. Since they are located below the water level these components should be watertight. Despite repeated waterproofing and sealing, leaks continue to appear on the walls of the structure, also on the walls of the communication gallery tested in this research. The leaks occur not only in the expansion joints,

but also in places where the structure of the concrete is probably inhomogeneous and loose. These may be zones of improperly compacted concrete (honeycombing). There is a problem with such invisible defects occurring inside structural elements, since they become apparent only in the course of service, and then require repairs to remove them.

Figure 1 shows a general view of the investigated communication gallery and a water leak on the gallery wall is shown in fig. 2.



Fig. 1. General view of investigated gallery.



Fig. 2. Water leaking through gallery wall.

This paper presents investigations of concrete homogeneity in a structural element constituting the concrete wall of the hydroelectric power plant communication gallery by means of the ultrasonic tomography method.

2. Description of tests

As mentioned above, an ultrasonic tomograph, shown in figs 3 and 4, was used to investigate the concrete wall of the communication gallery.

The tomograph includes a special multihead ultrasonic antenna and a laptop with dedicated software for recording graphical images. The antenna, having 40 independent heads (probes) with dry point contact, is used to excite, receive and process ultrasonic signals. The tomograph has been adapted for testing unilaterally accessible (up to 2500 mm thick) structural elements in order to detect air voids and other places which may be empty or filled with liquid [1, 3-8].

The communication gallery wall was tested by means of the ultrasonic tomograph in 30 measuring places shown in fig. 5. About 500 mm wide and 1500 mm long measuring zones were tested in each of the measuring places. In the course of the test, in a given band the ultrasonic tomograph antenna was continuously moved at every 100 mm in one direction. The total number of measuring points amounted to about

450. Images of the cross sections in each position were stored in a three-dimensional matrix table and three mutually intersecting cross sections of the investigated object (images B, C and D) were obtained on the basis of the matrix table. Figure 6 shows the names of the cross sections (images) of the investigated object and the tomograph antenna coordinate system.



Fig. 3. View of ultrasonic tomograph.



Fig. 4. Testing by means of ultrasonic tomograph.

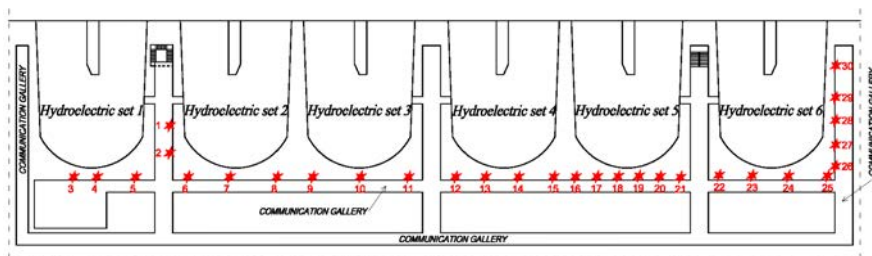


Fig. 5. Location of measuring places on communication gallery wall.

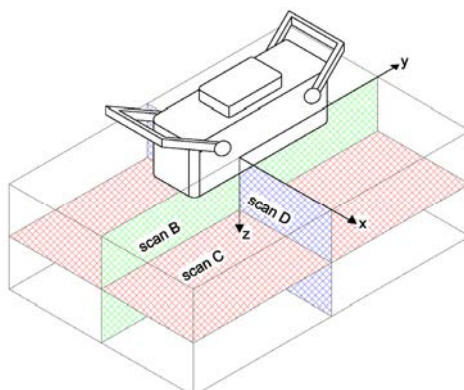


Fig. 6. Names of investigated object's cross sections, and tomograph antenna coordinate system [4,6].

3. Test results and their analysis

Exemplary results of the nondestructive ultrasonic tomography tests, showing images of type B and D, are presented in figs 7 and 8. The images were obtained in measuring places 19 and 23. It should be mentioned measuring place 23 was situated close to a water leak through the gallery wall. In the right upper corner there is a scale showing correspondence between the ultrasonic dispersion level in the tested point of the gallery wall and the colour representing it. The ultrasonic dispersion level indicates that the physical characteristics of the media vary in the tested area. The arrows point to the identified areas of concrete inhomogeneity.

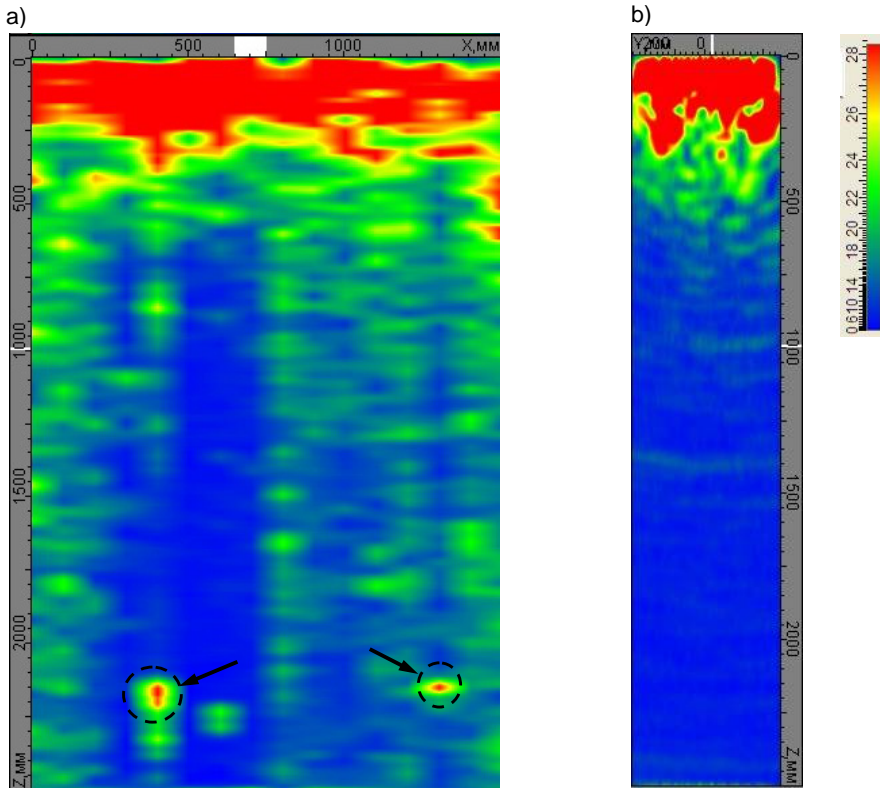


Fig. 7. Measuring place 19: a) image D, b) image B.

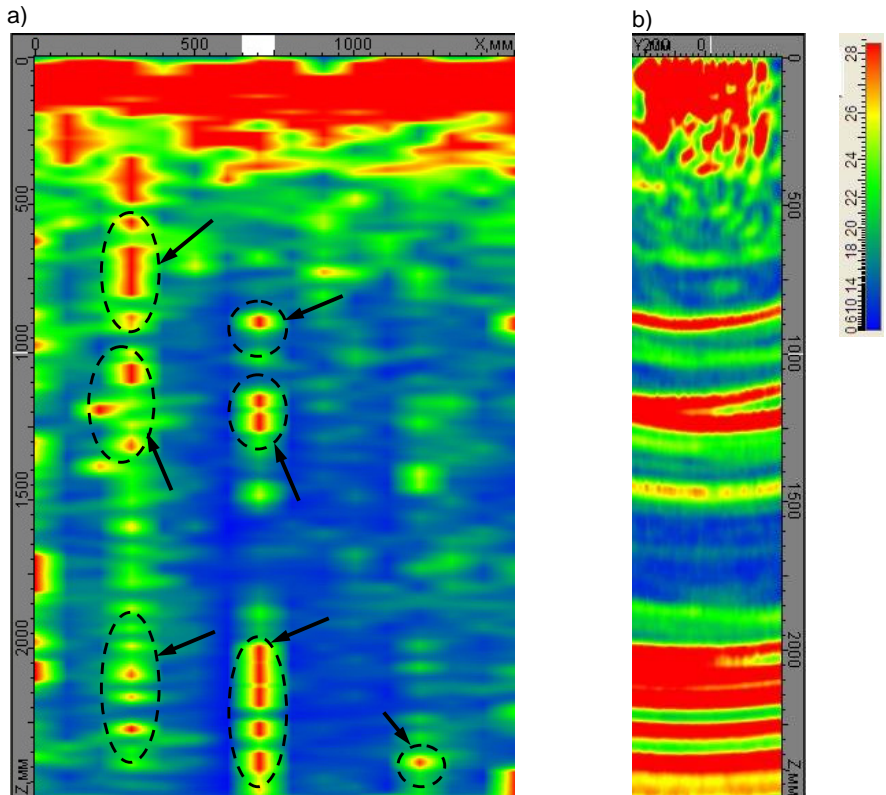


Fig. 8. Measuring place 23: a) image D, b) image B.

The results of the ultrasonic tomography tests carried out in the 30 measuring places showed no significant concrete quality problems in 25 of them. An example here is measuring place 19. It appears from the images in figure 7 that there are two small concrete inhomogeneity zones at a depth of about 2200 mm.

However, in five of the 30 measuring places there occur zones of concrete characterized by high inhomogeneity. One of such areas is place 23 where water leaked through the gallery wall. When examining the images in fig. 8 one should notice ten to twenty places located at different depths, where probably large air voids occur. In such places the structure of concrete may be inhomogeneous and loose, which results in leaks. One should suppose that the existing situation is due to the improper compaction of the concrete mixture during construction or to the use of too large aggregate particles (with a diameter larger than 70 mm) which were not properly enveloped with cement grout. Unfortunately the test results could not be verified by taking drill cores since the owner of the investigated object did not give permission for destructive testing.

4. Conclusions

Thanks to the ultrasonic tomography tests it was possible to evaluate the homogeneity of concrete in the wall of the hydroelectric power plant communication gallery. An analysis of the test results showed that the quality of the concrete in most of the selected places is satisfactory. Concrete inhomogeneity, probably in the form of large air voids which had formed as a result of improper concrete compaction or because large aggregate particles had not been properly enveloped with concrete, was detected in only a few places. In such places the microstructure of concrete is inhomogeneous and loose, which has a significant bearing on the durability of the structure since such places are susceptible to water leaks through the wall.

Moreover, the investigations showed that the ultrasonic tomography method is useful for evaluating concrete homogeneity in a massive structural element to which a destructive test method cannot be applied. It would be advisable to confirm the nondestructively obtained results by taking drill cores from randomly selected places.

The authors also note the lack of standard images obtained by the ultrasonic tomography method in laboratory conditions from structural elements with modelled defects. Such standard images assigned to the particular defects would be very useful in the interpretation of results obtained from real objects.

References

1. Bishko A. V., Samokrutov A. A, Shevaldykin V. G.: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics. vol. 13, 2008.
2. Garbacz A.: Nondestructive investigations of polymer-concrete composites using stress waves – repair efficiency evaluation (in Polish). Scientific Papers. Civil Engineering. No. 147, Warsaw Polytechnic Publishing House, 2007.
3. Gorzelańczyk T., Hoła J., K. Schabowicz K., Nondestructive tests aimed at determining the thickness of the concrete shell of a heat pipe carrying tunnel, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012.
4. Hoła J., Schabowicz K., State-of-the-art nondestructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11, 2010.
5. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Thickness Measurements and Flaw Detection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method. J. Nondestructive Testing and Evaluation. – 1997, Vol. 13, pp. 73-84.
6. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities. The 5th International Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry". Mashinostroenie, 2006, p.152.
7. Schabowicz K., Hoła J., Styś D.: Nondestructive elastic-wave tests of concrete in foundation slab, 10th European Conference on Nondestructive Testing, Moscow, Russia, 2010.
8. Schabowicz K., Hoła J., Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, Materials Transactions, 53, 2012, pp. 296-302.



NONDESTRUCTIVE TESTING OF THICKNESS OF CONCRETE MINE LIFT SHAFT SHELL BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPH

Tomasz GORZELAŃCZYK, Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Contact e-mail: t.gorzelanczyk@pwr.wroc.pl

Abstract

This paper presents the results of the nondestructive testing of the thickness of the concrete shell of a mine lift shaft. The shaft is located on the premises of one of the largest and deepest mines in Poland. The mine was opened in the 1970s. The shaft is 1200 m deep. Currently, in connection with the planned upgrading of the shaft it became necessary to determine the thickness of the unilaterally accessible shaft shell and the variation in its thickness along the shaft length. The tests were carried out using the nondestructive ultrasonic tomography method. Consequently, the thickness of the concrete shell of the shaft and the differences in this thickness along the shaft length were nondestructively determined. The test results were destructively verified (through control borings) in randomly selected places.

Key words: *acoustic methods, ultrasonic tomograph, nondestructive testing, concrete*

1. Introduction

Nondestructive methods are today increasingly often used to diagnose all kinds of building structures [2-4, 7, 8]. Since they are noninvasive, they are irreplaceable in some situations. Most often acoustic methods are used. One of such methods is the ultrasonic tomography method [4]. In this research it was employed to determine the thickness of the concrete shell of a mine lift shaft.

The lift shaft has a diameter of 7.5 and is located on the premises of one of the largest and deepest mines in Poland. The mine is also one of the largest mines in the world and has 10 shafts in this area. The mine was opened in the 1970s and the investigated shaft was bored over 35 years ago. The shaft is 1200 m deep. A general view of the investigated shaft is shown in fig. 1. The deposit started to be mined at a depth of 850-900 m. Today mining takes place at a depth of over 1150 m and in the nearest future it is to take place below 1200 m.

The shaft was sunk using the conventional method. Steel tubing was used to line the shaft to a depth of about 300 m, and below a one-layer concrete lining was used. A general view of the inside of the investigated shaft is shown in fig. 2.



Fig. 1. Outside view of investigated shaft.



Fig. 2. Inside view of investigated shaft

Currently, in connection with the planned upgrading of the shaft it became necessary to evaluate the load-bearing capacity and technical condition of the concrete shaft shell. Not only to the thickness of the unilaterally accessible shaft shell, but above all the variation in this thickness along the shaft length had to be determined. Because of the peculiar location of this structure, only a few destructive (boring) tests could be carried out. Therefore a decision was made to test the shaft shell nondestructively in selected (by the designers) points using the ultrasonic tomography method.

2. Description of tests

As mentioned above, an ultrasonic tomograph, shown in fig. 3, was used to investigate the concrete shell of the lift shaft. The tomograph includes a special multihead ultrasonic antenna and a laptop with dedicated software for recording graphical images. The antenna, having 40 independent heads (probes) with dry point contact, is used to excite, receive and process ultrasonic signals. The tomograph has been adapted for testing unilaterally accessible concrete elements in order to determine their thickness and detect cracks, inclusions, air voids and other spaces which may be empty or filled with liquid or other material differing in its density from the surrounding concrete or having different physical and mechanical properties [1, 3-8].

The ultrasonic tomography tests were carried out in twenty measuring places spaced at every 10 m along the shaft length from the depth of 500 m to 700 m. In each of the places measurements were performed in about 500 mm wide and 1500 long bands. In the course of testing the ultrasonic tomograph antenna was continuously moved at every 100 mm in a given band in one direction. The total number of measuring points amounted to about 300. The images of the cross sections in each of the positions were stored in a three-dimensional matrix table, and three mutually intersecting cross sections of the investigated object (images B, C and D) were obtained on the basis the matrix table. Figure 4 shows the names of the cross sections (images) of the tested object and the tomograph antenna coordinate system. Image B is situated on

the right side while images C and D are situated respectively at the top and bottom. Figure 5 shows the adopted measuring places in the shaft.



Fig. 3. View of ultrasonic tomograph.

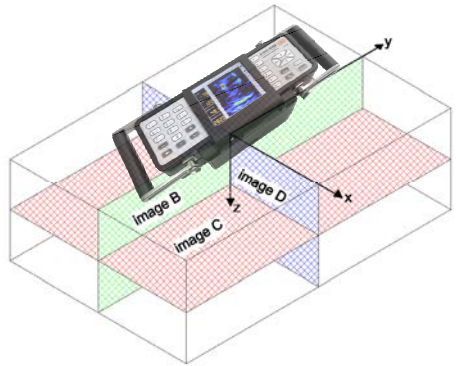


Fig. 4. Names of cross sections of tested object and tomograph antenna coordinate system [4, 6].

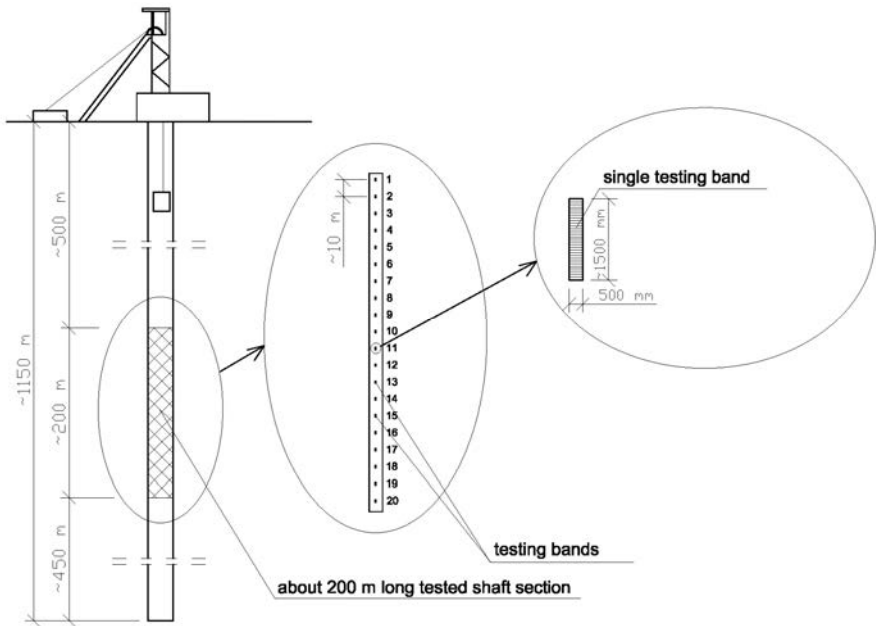


Fig. 5 Measuring places in investigated shaft.

3. Test results and their analysis

Exemplary results of the nondestructive testing by means of the ultrasonic tomograph, in the form of images type B and D, are shown in figs 6 and 7. The images were obtained from a measuring band located at a depth of about 550 m and 700 m, respectively. A scale of correspondence between the ultrasonic dispersion level in a point of the tested shaft shell and the colour representing this level is shown in the top right corner in each of the figures. The ultrasonic dispersion level indicates a difference in the physical characteristics of the media in the tested area. The arrows mark the identified external surface of the tested shell. By marking the positions of the arrows on a vertical axis one can read the thickness of the concrete shell of the investigated shaft.

A diagram showing the shaft shell thickness determined in the particular testing bands on the basis of an analysis of the images is presented in fig. 8. The black colour and the grey colour represent respectively the minimum and maximum shaft shell thickness in a testing band. The figure also shows the averaged shaft shell thickness in the testing band.

It appears from figures 6-8 that the thickness of the concrete shell is not identical along the height of the shaft and depending on the depth of the testing band, it ranges from 580 to 630 mm.

In order to verify the obtained results random destructive tests, consisting in control borings in a few selected places, were carried out.

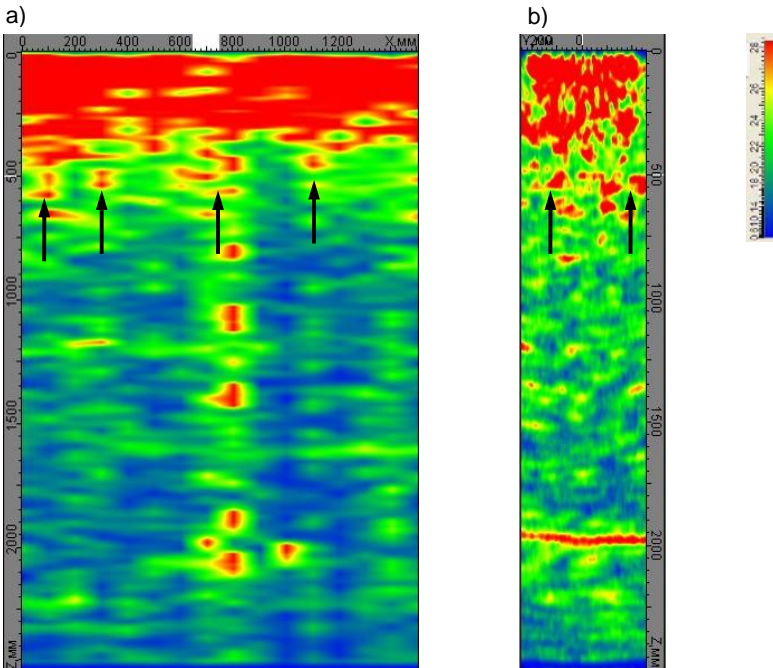


Fig. 6. Measuring band at depth of 550 m: a) image D, b) image B.

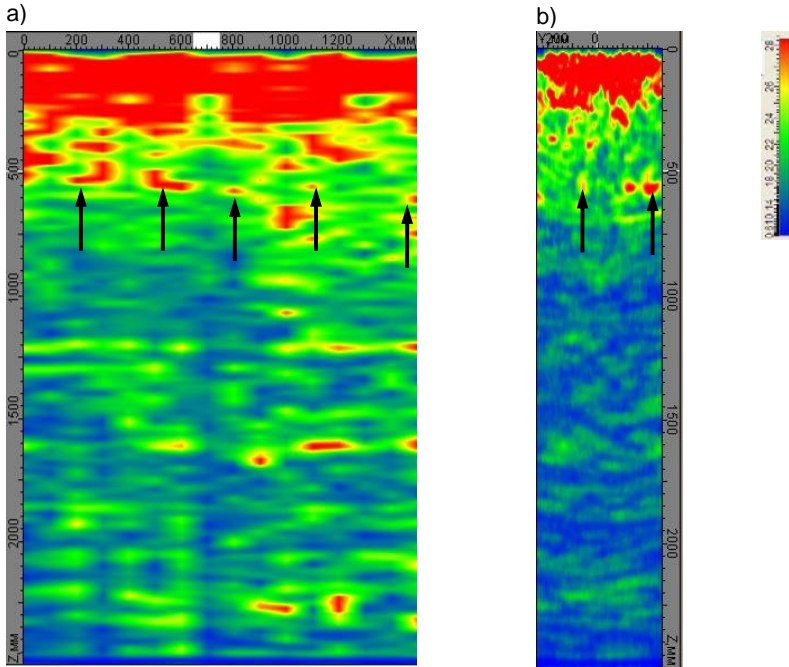


Fig. 7. Measuring band at depth of 700 m: a) image D, b) image B.

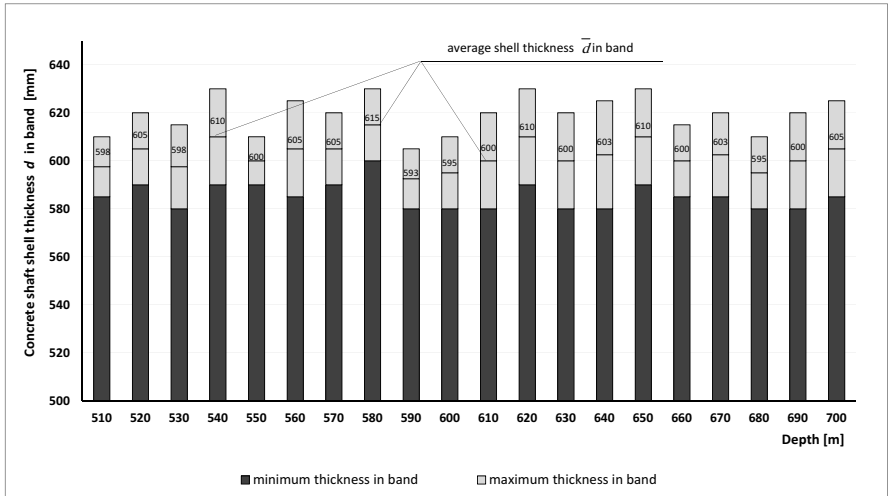


Fig. 8. Concrete shaft shell thickness determined in particular testing bands by ultrasonic tomography method.

4. Conclusions

Thanks to the tests carried out using the ultrasonic tomography method the thickness of the unilaterally accessible concrete shell of the mine lift shaft was determined. An analysis of the obtained results showed that the thickness of the shell, due to the different tunnelling methods used, is not the same along the length of the shaft, ranging from 580 to 630 mm. Thus one should suppose that the design thickness of the concrete shaft was probably 600 mm. This was confirmed by data obtained from the shaft contractor.

Since the nondestructively obtained results showed considerable scatter they were verified destructively through control borings in several randomly selected places. The tests have demonstrated that the ultrasonic tomography method is useful for determining the thickness of concrete elements to which the conventional destructive method cannot be applied. Nevertheless, the results of such tests should be verified by another nondestructive method in order to validate them. For a case like this the authors recommend to carry out tests in selected places, using the impact-echo method.

Moreover, the authors note the lack of a test methodology for this state-of-the-art nondestructive ultrasonic tomography method, which would be suitable for the diagnostics of concrete objects.

References

1. Bishko A. V., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics. vol. 13, 2008.
2. Garbacz A.: Nondestructive investigations of polymer-concrete composites using stress waves – repair efficiency evaluation (in Polish). Scientific Papers. Civil Engineering. No. 147, Warsaw Polytechnic Publishing House, 2007.
3. Gorzelańczyk T., Hoła J., K. Schabowicz K., Nondestructive tests aimed at determining the thickness of the concrete shell of a heat pipe carrying tunnel, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012.
4. Hoła J., Schabowicz K., State-of-the-art nondestructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11, 2010.
5. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Thickness Measurements and Flaw Detection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method. J. Nondestructive Testing and Evaluation. – 1997, Vol. 13, pp. 73-84.
6. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities. The 5th International Conference “Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry”. Mashinostroenie, 2006, p.152.
7. Schabowicz K., Hoła J., Styś D.: Nondestructive elastic-wave tests of concrete in foundation slab, 10th European Conference on Nondestructive Testing, Moscow, Russia, 2010.
8. Schabowicz K., Hoła J., Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, Materials Transactions, 53, 2012, pp. 296-302.



IS RESISTOGRAPH AN APPROPRIATE TOOL FOR THE ANNUAL RING MEASUREMENT OF PINUS BRUTIA?

Bilgin GULLER *, Adnan GULLER**, Gökhan KAZAZ*

*Suleyman Demirel University, Faculty of Forestry, 32260 Isparta, Turkiye

** Forestry Administrative Department of Egirdir, Isparta, Turkiye

Abstract

The study reports on the applicability of the IML RESI F500-S Resistograph for efficient and practical determination of some ring properties (mainly annual ring) of Pinus brutia depending on preliminary results of an ongoing project. For this purpose increment core samples and resistograph data were collected from Mediterranean Region of Turkey. The preliminary results reveal that resistograph is very promising for annual ring measurement of P. brutia.

Keywords: NDE, Pinus brutia, Resistograph, annual ring.

1. Introduction

Pinus brutia is naturally distributed mainly in the eastern Mediterranean Basin encompassing Turkey, Greece, Cyprus, Syria, Palestine, Jordan and Iraq (Boydak, 2004). The species has been given a high priority in plantations in various countries with Mediterranean climate due to its relatively fast growth rate and wide ecological adaptability (Arbez 1974). The species has a wide geographic distribution (5,420,524 ha forest land) in Turkey, and is an important source of forest products in the country (Guller 2007; <http://amenajman.ogm.gov.tr/>). Determination of ring width is crucial for many areas in forestry. Generally increment coring is used for annual ring measurement all around the world. Although this is accepted as semi destructive sampling method, depending on the core diameter (increasing core diameter) this may be considerably destructive for living trees. Additionally it is time consuming. The Resistograph is an instrument that penetration resistance of a fine drill needle is measured and recorded. In recent years the use of Resistograph is widening for the purpose of non-destructive evaluation of some properties of standing trees (Rinn et al.1996; Chantre and Rozenberg 1997; Isik and Li 2003; Bouffier et al.2008; Saez et al. 2008; Ukrainetz and O'Neill 2010). In fact this method is quasi non-destructive, since the diameter of the needle is so small, that the weakening effect caused by the whole is negligible. Because of this negligible destruction many researchers mention it as a non-destructive instrument.

The resistograph provides a graphic representation (resistogram) of the energy which is consumed by the electric engine in penetrating the sample. Thus, given the internal constitution of the wood, a series of variables can be determined relating the characteristics of the material (Rinn et al. 1996). The total energy consumed in penetrating the sample is closely related to the material density. Due to anatomical nature of *Pinus brutia*, early wood and late wood visually separable and denser wood (late wood) formed at the end of the growth ring. Thus, the resistogram appears as a succession of peaks and valleys, corresponding to the varying difficulty in penetrating early and late wood part of annual rings.

The purpose of our project (TUBİTAK 110-O-560, started in 2011 and will be ended in 2013) is the determination of *P. brutia* wood properties using NDE techniques. The study reports our preliminary results on the applicability of the IML RESI F500-S Resistograph for efficient and practical determination of some ring properties (mainly annual rings).

2. Material and Method

Wood samples examined in the study were collected from 35-40-year-old trees planted at a provenance test trial (36° 55' 18" N, 30° 37' 00" E) within the optimal distribution range of the species near Antalya in South-western Turkey.



Figure 1. Collecting of increment cores

One increment core (5 mm thick) per tree was taken at breast height (1.3 m) in the north-south direction from bark to bark, intersecting the pith.

IML RESI F500-S and its software (F-Tools) used for resistograph measurements. Resistograph measurements were obtained from the closest place and same direction of coring.



Figure 2. Resistograph (IML RESI F500-S) measurements at field

Ring width was measured on increment cores via image analysis method (Data set RW1, Image analysis system of the Faculty of Forestry, Suleyman Demirel University was used for the measurements). Normally an additional software module (including export option) must be purchased to obtain each amplitude values. But, in the study a free and easy way (free software, Image J, used for exporting resistograph data proposed by Guller, 2012) which allows exporting data without any additional purchased module was preferred. Because of moisture differences between standing trees and increment cores, all the cores were acclimatized (12% equilibrium) before the measurements and the moisture of each sample was determined after the measurements. Radial shrinkage of samples was calculated as 4.1% following the Formula 1 below (Haygreen and Bowyer, 1996) and then, considering moisture differences, resistograph ring measurements were converted to the new data set which had the same moisture content of increment cores according to the Formulas 2 and 3 below. Statistical comparisons were applied for converted data, moisture corrected (RW2), and unconverted (raw measurements from standing trees) data set (RW3). Ring measurements obtained from two populations (98 measurements for population 1; 37 measurements for population two, hence 135 in total) using two different ways (resistograph and increment cores) were compared for each individual ring and mean values by using statistical analysis (paired sample t test and ANOVA).

$$\beta_r = \frac{\Delta dr}{dr} \times 100 \quad (1)$$

where;

β_r : Radial shrinkage (%)

Δdr : Decrease in radial dimension

dr : original radial dimension of sample (mm)

$$\Sigma \beta_r = k\beta_r \times \Delta m \times dr \quad (2)$$

$$RW2 = RW3 - \Sigma \beta_r \quad (3)$$

where;

$\Sigma \beta_r$: Total radial shrinkage (mm)

Δm : Moisture difference (from fiber saturation point (28%) to sample moisture; ie:28-12=16)

dr : Original radial dimension of sample (mm)

$k\beta_r$: Radial shrinkage value for 1% moisture change from FSP to 0% moisture; 0.001464 for our samples)

3. Findings

Correlation is significant (Pearson correlation coefficient found as 0.97) at the 0.01 level for ring widths between resistograph and core measurements. Descriptive statistics for all data (Table 1) and separate for two populations are given (Table 2) below.

Table 1. Descriptive statistics for all data

Measured properties	N	Mean	Std. Error	Std. Deviation
RW1 (Increment core)	135	2.613	0.125	1.452
RW2 (resistograph-moisture corrected)	135	2.784	0.139	1.612
RW3 (resistograph-raw)	135	2.851	0.142	1.651

RW: Ring width (mm)

Table 2. Descriptive statistics for two populations

Population	Measured properties	N	Mean	Std. Error	Std. Deviation
1	RW1	98	2.618	0.148	1.460
	RW2	98	2.842	0.169	1.676
	RW3	98	2.910	0.173	1.716
2	RW1	37	2.599	0.238	1.448
	RW2	37	2.631	0.237	1.439
	RW3	37	2.695	0.242	1.474

Although there is high correlation ($r=0.97$) between resistograph and increment core measurements and good match for many of the ring boundaries (Figure 3), paired sample t-test results show that the difference between two ways is statistically significant at 95% confidence level (Table 3). This finding shows that the ring widths measured by resistograph are different from core measurements at ring basis. However, if the mean values of the populations are compared (Table 4), there are no significant differences indicating that the resistograph can be used to determine population mean ring width.

Table 3. Paired sample t-test for all data (ring basis)

		Mean	Std. Deviation	Std. Error	t	df	Sig.
Pair 1	RW1-RW2	-0.172	0.394	0.034	-5.055	134	0.000
Pair 2	RW1-RW3	-0.238	0.415	0.036	-6.668	134	0.000

Table 4. Comparison of means for two populations and three grouping data set

Population	Groups (RW1, RW2 and RW3)	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Between Groups	4.582	2	2.291	0.871	0.419
	Within Groups	765.016	291	2.629		
	Total	769.597	293			
2	Between Groups	0.174	2	0.087	0.041	0.96
	Within Groups	228.267	108	2.114		
	Total	228.442	110			

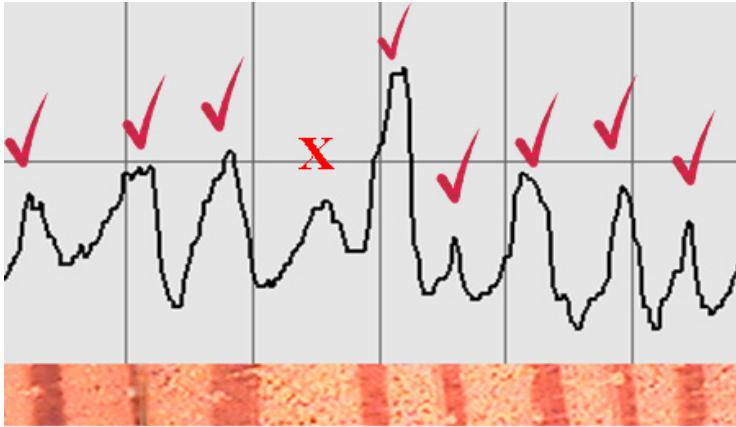


Figure 3. Matching of resistograph chart (A) and annual rings (B)

Images obtained from increment cores and resistograph chart for each sample are overlaid and all failures were determined (Figure 3); also the possible causes of the failures were examined.

4. Results

- The preliminary results for the project show that resistograph is very promising for annual ring measurement of *P. brutia* as a practical hand tool in the field, particularly for the determination of population mean value.
- Resistograph measurement should be a straight direction intersecting pith. Any slope causes a failure for matching ring boundaries.
- Viscosity of resin in the summer period affects the efficiency of the work with the tool (Resistograph needle should be changed more frequently).
- The first part of resistograph charts (from starting point to pith) shows better synchronization with the ring boundaries than continuing part of chart (generally shows gradual increasing slope from pith to the end point, possible cause of increasing resistance)
- All defects such as cracks, decay, resin pockets affect reliability of resistograph ring measurements. The instant paper graph should be followed carefully for each measurement.

References

- Arbez M., (1974). Distribution, ecology and variation of *Pinus brutia* in Turkey. FAO Forest genetics Resources Information, 3: 21-23.
- Boydak M., (2004). Silvicultural Characteristics and Natural Regeneration of *Pinus brutia* Ten.-a review. Plant Ecology 171: 153 – 163.
- Bouffier L., Charlot C., Raffin A., Rozenberg P., Kremer A., (2008). Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)?, Ann. For. Sci. 65 (1)- 106.
- Chantre G., Rozenberg P., (1997). Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas-fir wood? in: Proc. of CTIA -

- IUFRO International Wood Quality Workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value, Québec, 18-22 August 1997, pp. 41-47
- Eckard J. T., (2007). Rapid Screening for Solid Wood Quality Traits in Clones of Loblolly Pine (*Pinus Taeda* L.) by Indirect Measurements, master Thesis, the Graduate Faculty of North Carolina State University, NC,USA
- Guller B., (2007). The effects of thinning treatments on density, MOE, MOR and maximum crushing strength of *Pinus brutia* Ten. wood. *Ann For Sci* 64: 467–475
- Guller B., (2012). A practical way proposal to obtain numeric data via resistograph charts using image analysis (For measuring annual rings), Kastamonu University, *Journal of Forestry*, 12(1):157-160
- Haygreen J.G., Bowyer J.L., (1996). *Wood Science and Forest Products - An Introduction* (3rd ed.). Iowa State University Press.
- Isik F., Li B., (2003). Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs, *Can. J. For. Res.* 33: 2426–2435.
- Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E.,(1996). Resistograph and Xray density charts of wood: comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, *Holzforchung*, Vol. 50: 303-311.
- Saez J.L., Corona C., Berger F., (2008). Use of resistograph for dendrogeomorphological analysis of avalanche impacts (massif de l'Oisans, France), *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-01311. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-01311
- Ukrainetz N. K., O'Neill G. A., (2010). An analysis of sensitivities contributing measurement error to Resistograph values, *Canadian Journal of Forest Research*, 40(4): 806-811.
- <http://amenajman.ogm.gov.tr/> (21/11/2012)



ZKOUŠENÍ PODPOVRCHOVÉ OBLASTI KONTINUÁLNĚ ODLÉVANÉHO SOCHORU V TŘINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH, A.S.

TESTING OF THE SUBSURFACE AREA OF CAST BILLETS IN TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, A.S.

Štěpán HEFNER, Josef SLOWIK, Lukáš PINDOR, Jiří CIBULKA

Třinecké železářny, a.s., Průmyslová 1000, 739 70 Třinec

E-mail: Stepan.Hefner@trz.cz, Josef.Slowik@trz.cz,

Lukas.Pindor@trz.cz, Jiri.Cibulka@trz.cz

Abstrakt

Príspevek se zabývá problematikou podpovrchové oblasti plynule litého sochoru. Navrženou imerzní hlavicí se zabudovanou ultrazvukovou sondou byly v reálných podmínkách detekovány plošné necelistvosti typu trhlin. Povrchová vrstva plynule litého sochoru v peci oxiduje, tedy shoří a tím mohou být obnaženy zárodky pro vznik povrchových trhlin na vývalku. Článek popisuje experiment s podpovrchovými vadami a jejich přenos na tyče po termomechanickém zpracování.

Klíčové slova: plynule litý sochor, imerzní hlavice, ultrazvuk, podpovrchové trhliny

Abstract

The paper deals with testing of the subsurface area of continuously cast billets. Certain types of flat subsurface defects (cracks) were detected in billets by the proposed immersion head including built-in ultrasonic probe. These subsurface defects can cause creation of surface cracks on rolled bars because surface layer of cast billets burns in the furnace, which leads to the exposure of cracks hidden inside the billets. Transfer of subsurface defects from billets to rolled bars after thermomechanical treatment is described in the paper as well.

Key words: continuously casted billets, immersion head, ultrasound, undersurface cracks

1. Úvod

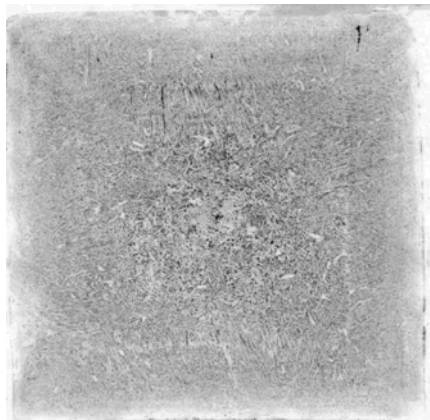
Plynule lité sochory z produkce Třineckých železáren, a.s. mají rozměry 150 x 150 mm a při délce 12 m váží cca 2 tuny. Ultrazvukové zkoušení plynule litého sochoru se běžně neprovádí, protože se jedná o hrubozrnnou strukturu a ve středové oblasti je značné množství staženin. Povrch plynule litého sochoru je zvrásněn pravidelnými oscilačními vráskami, což zhoršuje zkušební podmínky. Z důvodu výše uvedených nevýhod je patrné, že detekce vad ultrazvukem bude omezena na

vhodně orientované, velké a plošné vady typu trhlin. Ve spolupráci s technologií Třineckých železáren, a.s. se na zařízení plynulého odlévání podařilo řízenou úpravou parametrů odlévání vyrobit vadný sochor, který se stal předmětem této analýzy.

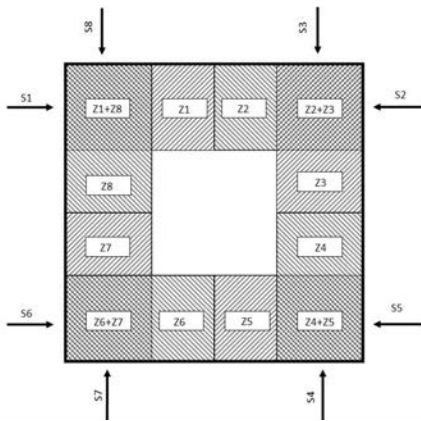
2. Metodika zkoušení a popis měřící aparatury

V průběhu plynulého odlévání oceli může vlivem nerovnoměrnosti chlazení či špatným vedením předlitku v zóně sekundárního chlazení docházet k formování náhodně se vyskytujících podpovrchových trhlin a dalších necelistvostí. Podpovrchové a vnitřní necelistvosti typu trhlin se v průběhu termomechanického zpracování obvykle svaří. Naším cílem bylo ověřit, zda se ultrazvukem detekované vady mohou obnažit při ohřevu v peci. V případě otevření trhliny na povrch a její oxidace již nelze se svařením nedokonalostí počítat a vada může být přenesena ze sochoru na vývalek.

Metodiku zkoušení jsme zvolili na základě prvotního experimentu, kde bylo provedeno ultrazvukové zkoušení podpovrchové oblasti vadného sochoru. Nalezenou UZ indikaci potvrdil Baumanův otisk viz obr. 1. Při současném návrhu 100% pokrytí podpovrchové vrstvy by musela mít automatizovaná UZ linka osm kanálů z důvodu širokého vstupního echa. Profil sochoru jsme rozdělili do osmi zón (viz obr. 2) kde písmena „S“ označují směry zvuku a písmena „Z“ označují zóny zkoušené oblasti. Třídící práh byl nastaven na druhou polovinu zkoušené tloušťky, tedy před KE. Například ze směru zvuku S1 byla zkoušena zóna Z2.



Obr. 1 Baumanův otisk zobrazující trhlínu v podpovrchové oblasti (vpravo nahoře)
Fig.1 Baumann printing showing the crack in the subsurface are (on the right up)

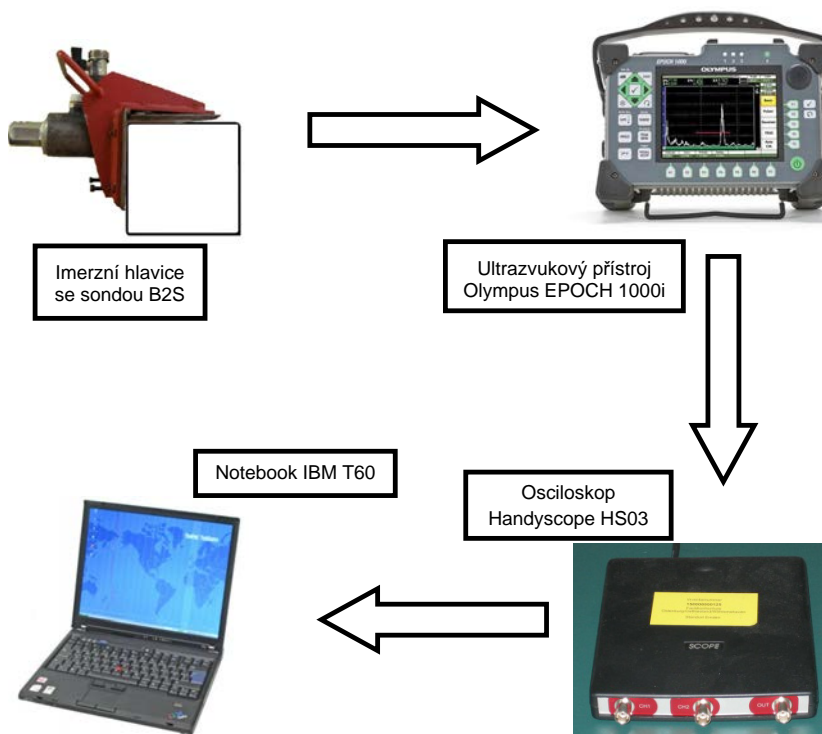


Obr. 2 Zobrazení zkoušených zón a směrů UZ svazků v profilu plynule litého sochoru
Fig.2 Picture of examinational zones and directions of UZ beams at the side face of casted billet

Měřící aparatura se skládá ze čtyř základních částí. Srdcem celého systému je konvenční ultrazvuková sonda B2S uložená ve speciálně navrženém přípravku pro vedení vodního sloupce (imerzní vazby), který byl pojmenován „imerzní hlavice“. Buzení sondy a zpracování odezvy mechanického kmitání bylo provedeno za pomoci

ultrazvukového přístroje Olympus EPOCH 1000i. Dvoukanálový osciloskop Handyscope HS03 sledoval alarm z výstupních konektorů UZ přístroje. Informace o poloze vad byly automaticky zaznamenány do připojeného notebooku Lenovo. Celý zkušební systém je zobrazen na blokovém schématu, viz obrázek č. 3. Záznamy z osciloskopu umožnily přesně monitorovat a mapovat polohu indikací na sochoru (při překročení třídicího prahu a také při podkročení koncového echa).

Z důvodu velké drsnosti a přítomnosti oscilačních vrásek na povrchu sochoru byl využit imerzní způsob vazby sonda-sochor. Tento způsob vazby současně chrání sondu před případným mechanickým poškozením. Voda je do imerzní hlavy přivedena hadicí z vodního řádu užitkové vody s přepadem do kanálu (neuzavřený okruh). Přetlak vody byl optimalizován, aby na povrchu zkoušeného materiálu bylo zajištěno dostatečné předsmačení.



Obr. 3 Blokové schéma systému pro zkoušení plynule litého sochoru
Fig.3 System diagram for testing of continuously casted billets

Zkoušení v laboratorních podmínkách

V laboratorních podmínkách (tedy ve statickém režimu, bez víření imerzní vazby, bez vibračních a nežádoucích vlivů) byly na vzorku s přirozenými a uměle vytvořenými vadami ověřeny různé typy sond. Vzhledem ke zkušebním podmínkám, se jako nejvhodnější jevílo použití sondy B2S. Citlivost systému byla ověřena na

příčných vývrtech o průměrech 3, 5 a 7 mm. S dostatečným odstupem signál/šum byl detekován vývrt o průměru 5 a 7 mm. Pomocí uměle vytvořených vývrtů v různých hloubkách byla sestavena DAC křivka.

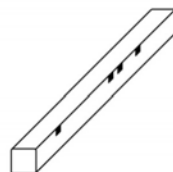
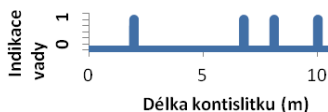
3. Experiment

Zkoušení v reálných podmínkách provozu (tedy za pohybu sochoru na valníku při rychlosti cca 0,5 m/s) zhoršuje zkušební podmínky nejen z hlediska vibrací, víření imerzní vazby, ale současně s polohováním imerzní hlavičky. Profil sochoru nemusí být vždy ideálně čtvercový a chvíli trvalo, než se podařilo optimalizovat mechanické vedení imerzní hlavičky vůči sochoru, abychom získali dobrou UZ vazbu po celé délce dvanácti metrů viz obr. 4. Povrch kontinuálně litého sochoru je zokujený, proto jsme provedli rovnání a tryskání, čímž bylo docíleno zlepšení vazebních podmínek. Jednotlivé indikace v závislosti na poloze jsou zaznamenány do grafu viz obr. 5. Na stejném obrázku je patrné rozložení vad v grafické podobě sochoru.



Obr. 4 Zkoušení sochoru imerzní hlavičkou v dynamickém režimu s indikací vady

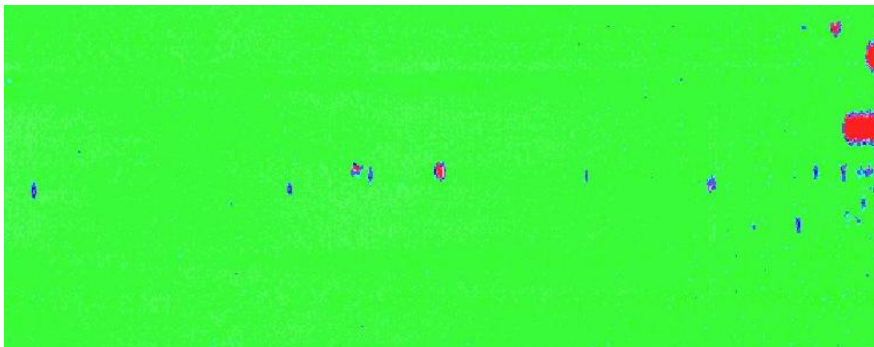
Fig.4 Testing of billet with a immersion head in the dynamic regime



Obr. 5 Náčrt s rozmístěním nalezených vad v sochoru

Fig.5 Sketch of found defects in the billet

Po ohřevu na 1100 °C byl sochor termomechanicky zpracován za pomoci šesti válcovacích stolic a dvou finálních ASC stolic na Kontijemné trati provozu VJ. Po odválcování sochoru bude mít vývalek délku cca 50 m při průměru 80 mm. Proto byly pro lepší identifikaci polohy vad vytvořeny úhlovou bruskou (15 cm před a 15 cm za trhlinou) příčné zářezy do hrany sochoru. Příčné zářezy na hraně sochoru vytvořily po odválcování viditelné přeložky, které označily místo pro odběr vzorků k další analýze. Vzorky byly vyřezány a podrobeny UZ zkoušce v imerzní vaně UPR4/HIC.



Obr. 6 C-sken UZ zkoušky v imersní vaně UPR4/HIC
Fig.6 C-scan of ultrasound testing in the immersion bath UPR4/HIC

Ukázka C-skenu jednoho vzorku je na obr. 6, kde jsou zobrazeny indikace uspořádané v řádku, v rozmezí velikosti FBH 1 až 2 mm a v hloubce cca 9 mm pod povrchem. Pro porovnání byly uměle vytvořeny osové vývrty o průměru 2 mm v podpovrchové oblasti tyče, které jsou zobrazeny na pravé straně C-skenu. Přenosným UZ přístrojem byla jedna z největších přirozených indikací přesně lokalizována a předána k řezání a metalografické analýze, jejímž výsledkem byl nález vměstků s potvrzením velikosti 1,57 mm. V místě kolem těchto vměstků může docházet k porušení materiálu.

4. Závěr

Provozní zkoušky potvrdily možnost detekce podpovrchových vad plynule litých sochorů pomocí ultrazvukového zařízení. Z nálezu je patrné, že řízenou úpravou parametrů na zařízení plynulého odlévání se uvolnily části strusky, které utuhly v podpovrchové oblasti. Tyto vměstky byly metalograficky identifikovány jako hlinito-křemičitany. Jedná se tedy o typ vměstků, které nejsou tvařitelné a v mikrostukově vytvářejí lokální napěťové koncentrátoři. Ukazuje se však, že se trhlinky kolem těchto vměstků mohou svařit po ohřevu v peci a po válcování. Pro přenesení podpovrchových vad z předlitku na vývalek totiž hraje důležitou roli také její umístění (hloubka uložení) a velikost. Další práce tak budou zaměřeny na stanovení kritických podmínek pro přenesení podpovrchových vad z litého do válcovaného stavu.

Poděkování

Příspěvek vznikl za přispění projektu FR - TI2 / 536, v rámci programu TIP 2010 - MPO ČR.



CONCRETE SURFACE ROUGHNESS TESTING USING NONDESTRUCTIVE THREE-DIMENSIONAL OPTICAL METHOD

Jerzy HOŁA¹, Łukasz SADOWSKI¹, Jacek REINER², Maciej STANKIEWICZ²

¹Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

²Institute of Machine Technology and Automation, Wrocław University of Technology

Abstract

In building practice the durability of concrete floors is to a large degree determined by the surface layer's pull-off adhesion to the structural layer. The strength of the bond between the two layers largely depends on the preparation of the structural layer. Structural layer preparation can be described by surface roughness parameters. This paper presents results of concrete floor structural layer surface roughness tests done using 3D optical surface scanning. Two differently prepared structural layers were examined in this way. The results show that this method can be successfully used for this purpose.

Key words: concrete, roughness, surface topography, bonding surface

1. Introduction

Concrete floors are found in most general and industrial building structures. Owing to their durability they are commonly used in housing and in multi-storey garages. Concrete floors are one of the most prominent elements in the interior finish of such buildings and one of the principal factors having a bearing on the architectural shape of the interiors and the use of the rooms. The durability of concrete floors is to a high degree determined by the pull-off adhesion of the surface layer to the structural layer. It should be noted that the proper preparation of the structural layer, describable by surface roughness parameters, has a significant influence on the mutual adhesion of the bonded layers [1].

Roughness is a surface's characteristic representing its irregularities (convexities and concavities) the height of which is at least one order of magnitude smaller than the size of the element. It is one of the properties describing a surface's geometrical structure, i.e. a set of all its irregularities, including shape deviations, waviness and roughness. The latter is regarded to be a major indicator of surface preparation.

The profile method is usually used to measure the roughness of concrete surfaces. In this way two-dimensional surface roughness parameters are determined. In [2], concrete floor surface roughness parameters were determined for five different ways of preparing the surface. The roughness of the surface was described using the parameters determined by the profile method.

A single flat profile does not describe well enough a surface which has a three-dimensional character. Concrete surfaces undoubtedly belong to this category. Even though roughness

parameters describing a flat profile are still successfully used in construction [3], recent years have brought a critical re-evaluation of the two-dimensional analysis, and new solutions in its description [4-7]. As a result, the surface method, which enables one to determine roughness parameters in three-dimensionality, has been increasingly used.

Functional volumetric parameters can be useful in the evaluation of the roughness of concrete surfaces. Such parameters are determined on the basis of the Abbott-Firestone curve for a given surface [8]. According to [9], the functional volumetric parameters include: peak material volume of scale limited surface V_{mp} , core material volume of scale limited surface V_{mc} , core void volume of scale limited surface V_{vc} and pit void volume of scale limited surface V_{vp} . It should be noted that the Abbott-Firestone curve represents surface topography structure as a cumulative probability density of the amplitudes of its particular points. In the case of the functional parameters, the volumetric curve is an integral over the examined surface. Hence the position of the surface of a section relative to the highest point of the topography is marked on the Y-axis while the percentage of the material relative to the highest surface point is marked on the X-axis.

The results of concrete surface testing using the three-dimensional optical method and the volumetric parameters are presented below.

2. Description of the surface roughness testing method

The set for the optical testing of surface roughness comprises a laser profile scanner SICK IVC-3D mounted on a linear drive with a guide bar, an encoder and a laptop (fig. 1a). Scanning is effected by manually shifting the head above the measuring area during which several surface profiles, separated from one another by a distance of 0.07 mm, are being recorded with a resolution of 0.074 mm. As a result of the scanning one obtains a cloud of points modelling the topography of the concrete surface with a vertical resolution of 0.015 mm. The data from the intelligent camera after prefiltration are sent to the laptop to be archived and later processed in order to determine the surface roughness parameters.

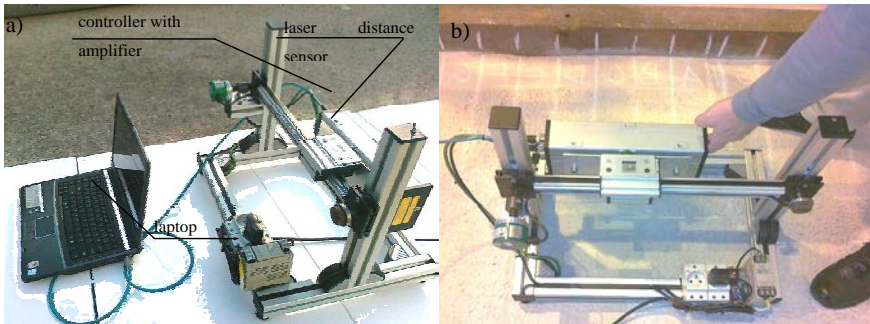


Fig. 1. View of: a) measuring set used in optical method, b) testing by nondestructive optical method.

The method of the optical scanning of surface topography is based on triangulation by means of a line of light [10]. It consists in taking photographs at an angle relative to the direction of lighting (fig. 2a). The photographs depict the deformation of the line-of-light profile caused by the shape of the illuminated object (fig. 2b). Because of its high concentration of energy,

a class II/2M VIS laser equipped with a special optical system is used as the illuminator. In the case of the IVC-3D scanner, a low power ($\lambda=658\text{nm}\pm 15\text{nm}$) diode laser was employed. The recorded image of the line contains information about the 3D geometry of a single section of the scene by a plane of light. For this reason this method is referred to as 2½D, as opposed to the methods capable of activating the full geometry of the whole measuring area (e.g. structural light, stereovision, tomography) [11]. Consequently, it is necessary to effect relative movement, which was achieved by means of the linear drive. During the relative shift of the object being scanned the discrete acquisition of photographs, synchronized by the encoder, takes place. Although the camera system offers a maximum scanning speed of 5000 profiles/sec., the actual scanning speed is limited by the exposure parameters and the profile line segmentation algorithms. In the case of the setup presented here manual shift is used instead of a controlled electric drive.

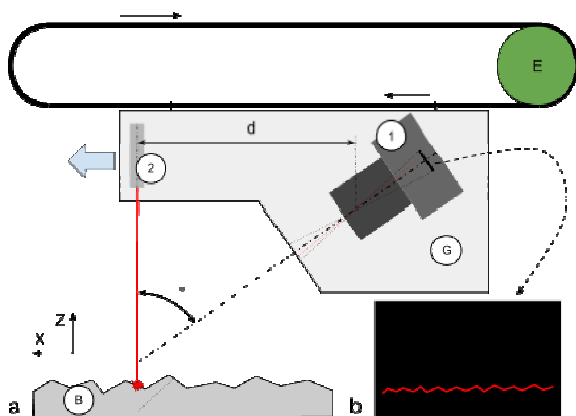


Fig. 1. Schematic of laser triangulation method (a) and of triangulation image (b) (1) – camera with lens, (2) – laser line generator, (B) – concrete, (G) – head, (E) – encoder.

In this scanning method only the parts of the scanned surface which are visible from both the camera and laser perspectives are mapped. As the triangulation angle (the angle between the plane of light and the camera's optical axis) decreases so does the number of invisible areas. But also the measurement resolution along the Z-axis decreases as a result. In the case of the IVC-3D scanner, both the lens and the triangulation angle (53°) have been set by the manufacturer to strike a balance between occlusion and resolution. The scanning system has been pre-calibrated and ensures constant resolution $\Delta z=0.015\text{mm}$ along the Z-axis.

For the adopted measuring area of $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ the following average resolutions are achieved:

- 0.07mm – along the shift (X-axis),
- 0.074mm – along the laser line (Y-axis),
- 0.015mm – height (Z-axis).

The time of scanning the investigated area did not exceed 2 sec. The measurement data were exported in the csv format to be further processed by the Talymap 3D Analysis Software.

3. Test results

Tests were carried out on two concrete 50×50mm surfaces constituting the structural layer of a concrete floor. The surfaces were made of C30/37 grade, S3 consistency concrete with ratio $w/c=0.5$ and a maximum aggregate grading of 8 mm. They matured in a natural way in a laboratory at an ambient temperature of $+18^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) and a relative air humidity of 60%. For the first 7 days they were stored covered with plastic wrap.

The following two ways of concrete surface preparation were used:

- surface I: mechanical grinding and dust removal,
- surface II: no surface preparation, i.e. the surface was left in the after-concreting condition.

Figure 1 shows spatial images (in false colours) of the scanned concrete surface for surface I and II.

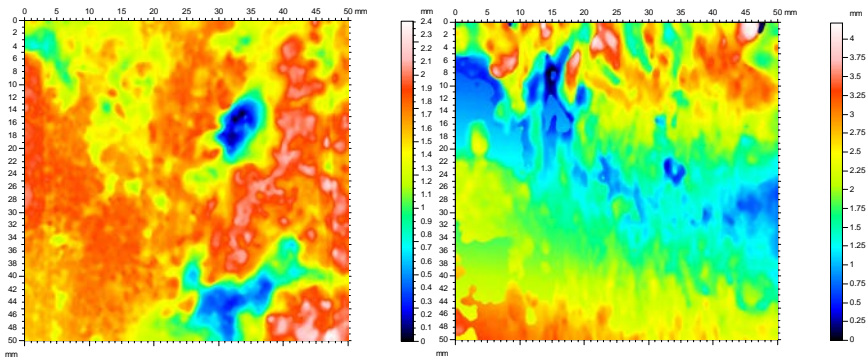


Fig. 1. Spatial image of scanned concrete surface for: a) surface I, b) surface II.

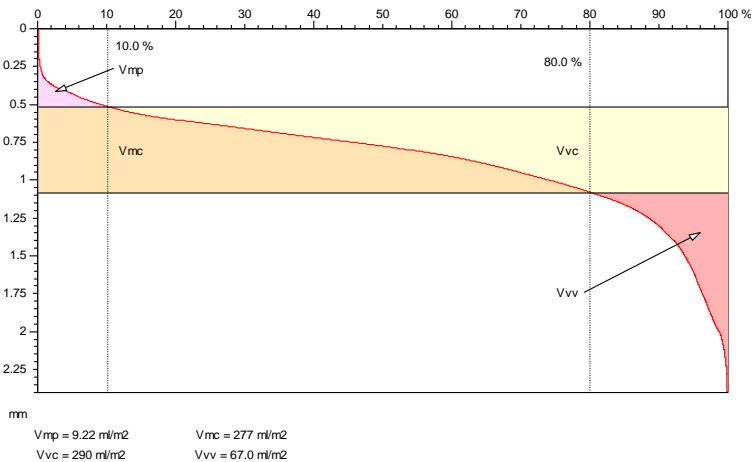


Fig. 2. Graphic analysis of volumetric parameters for surface I.

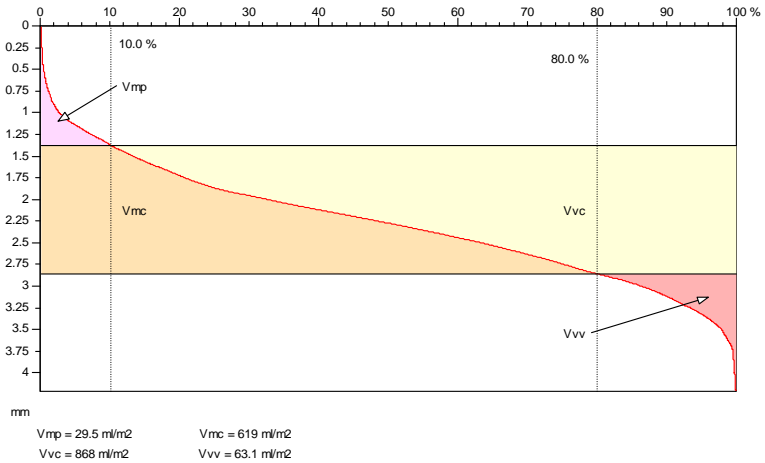


Fig. 3. Graphic analysis of volumetric parameters for surface II.

It appears from the graphic analyses of the volumetric parameters for surfaces I and II, shown in figs 2 and 3, that there are differences in the roughness parameters. For surface I the values of V_{mp} and V_{mc} are three times lower than for surface II, whereas the values of parameter V_{vc} are twice higher for surface II than for surface I, indicating greater surface irregularities of the concrete surface without preparation. It seems that parameter V_v is less useful for the analysis of concrete floor roughness since it does not reveal any differences between surface I and surface II.

4. Conclusion

The results of surface roughness tests for a concrete surface constituting the structural layer of a concrete floor, carried out using the 3D optical method have been presented.

Two concrete surfaces differing in the preparation of the structural layer were tested. The tests showed that the parameters: V_{mp} , V_{mc} and V_{vc} are particularly useful for evaluating the degree of roughness of the tested concrete surfaces.

The proposed optical surface scanning method and the SICK IVC-3D sensor used, ensured a resolution sufficient for measuring surface roughness of concrete screeds without any noticeable occlusion or speckle effects or disturbances caused by a change in reflectiveness, as noted in [12]. In the designed test setup the motor drive of the head was abandoned and owing to the high scanning speed ensured by the manual shift no profiles were lost. The parallelism between the scanned concrete surface plane and the scanner shift plane was not a critical acquisition parameter and it was corrected (through levelling) at the data processing stage.

5. References

1. Siewczyńska M.: Method for determining the parameters of surface roughness by usage of a 3D scanner, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 1-2, p. 83-89 (2012).
2. Franck A, De Belie N.: Concrete floor-bovine claw contact pressures related to floor roughness and deformation of the claw, Journal of Dairy Science, 89, 8 (2006).
3. Erdem S., Dawson A., Thom N.: Impact load-induced micro-structural damage and micro-structure associated mechanical response of concrete made with different surface roughness and porosity aggregates, Cement and Concrete Research, 42, s. 291–305 (2012).
4. Grzelka M., Chajda J., Budzik G., Gessner A., Wieczorowski M., Staniek R., Gapiński B., Koterak R., Krasicki P., Marciniak L.: Optical coordinate scanners applied for the inspection of large scale housings produced in foundry technology, Archives of Foundry Engineering, 49/1, 255-260 (2010).
5. Mathia T., Pawlus P., Wieczorowski M.: Recent trends in surface metrology, Wear, 271, s. 494–508 (2011).
6. Grzelka M., Majchrowski R., Sadowski Ł.: Investigations of concrete surface roughness by means of 3D scanner, Proceedings of Electrotechnical Institute, 16 (2011).
7. Gonzalez-Jorge H., Solla M., Armesto J., Arias P.: Novel method to determine laser scanner accuracy for applications in civil engineering, Optica Applicata, Vol. XLII, No. 1 (2012).
8. Abbott J., Firestone F.: Specifying surface quality: a method based on accurate measurement and comparison, Mechanical Engineering, 55, p. 569–572 (1933).
9. ISO 25178: Geometric Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.
10. Kowal J., Sioma A., Active vision system for 3D product inspection: Learn how to construct three-dimensional vision applications by reviewing the measurements procedures, Control Engineering USA; ISSN 0010-8049. vol. 56, pp. 46-48 (2009).
11. Tutsch R., Petz M., and Fischer M., Optical three-dimensional metrology with structured illumination, Optical Engineering, vol. 50, no. 10, p. 101507 (2011).
12. Reiner J., Stankiewicz M., and Wojcik M., Predictive segmentation method for 3D inspection accuracy and robustness improvement, in Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VI, Peter H. Lehmann, Editors, 73890A, Munich (2009).

Acknowledgements

This research was carried out as part of research project “Grant Plus” [POKL 8.2.2] co-funded within the framework of the European Social Fund.



APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) AS A DIAGNOSTIC TECHNIQUE IN CONCRETE BRIDGES INSPECTION

Eleni CHEILAKOU *,Panagiotis THEODORAKEAS*, Maria KOU1*,
Serafeim MOUSTAKIDIS*, Christos ZERIS**

* National Technical University of Athens, NDT Lab, School of Chemical Engineering,
Department of Materials Science & Engineering, 9, Iroon Polytechniou str., 15773,
Zografou, Athens, Greece.

** National Technical University of Athens, Reinforced Concrete Laboratory, School
of Civil Engineering, 9, Iroon Polytechniou str., 15773, Zografou, Athens, Greece.

Contact e-mail: panthead@mail.ntua.gr

Abstract

The inspection of reinforced and pre-stressed concrete bridges is a critical task and fundamental element continuing overall safety. Since the service life of those structures is mainly dependent on the normal age-related degradation and integrity loss of the embedded metallic reinforcement bars and tendon ducts, a detailed knowledge of the internal structural state of is essential for the prevention of further damage and the improved planning of maintenance and rehabilitation. Smart methods for assessing the structural integrity of such concrete bridges are therefore essential to ensure the safety of the structure, as well as to reduce the huge manufacturing costs and out of service time of the structure due to maintenance. Ground Penetrating Radar (GPR) is a well-established and among the leading diagnostic technologies in the field of NDT&E especially prepared for these purposes. In the last few decades, GPR has evolved as a powerful tool for the non destructive investigation of concrete bridges, as it is one of the fastest and most cost-effective non invasive methods, available to provide efficient information about the true position and condition of embedded reinforcement bars and tendons ducts. The present research work evaluates the potential of GPR for the inspection of pre-stressed concrete bridges and its usefulness to provide non visible information of the interior structural condition required for strengthening and rehabilitation purposes. For that purpose, different concrete blocks with embedded steel reinforcement bars and plastic ducts were investigated by means of GPR in order to locate the internal structural elements and verify the original drawings. A 3D survey was also performed with the aim to produce a 3D map of the interior concrete structure. The results obtained showed the effectiveness and reliability of GPR technique for concrete bridge investigations.

Keywords: Ground Penetrating Radar, non destructive inspection, tendon duct and rebar location, 3D map

1. Introduction

Pre-stressed concrete bridges represent well over 50% of all bridges built worldwide. This increase has resulted from advancements in design and analysis procedures as well as the entrance of new promising materials for such types of constructions.

However the life of the main concrete structure is still dependant on the normal age-related degradation and integrity loss of the internal steel reinforcement bars and tendons. Tendons are vital for the stability of the structure and may be pre-stressed in sections, or, for large structural beams, post-tensioned after construction. Post-tensioned tendons run through plastic or metallic ducts in the concrete and are tensioned after the concrete hardened. The hollow space within the duct is then filled with grouting to ensure the transmission of forces between tendon and concrete.

For pre-stressed concrete bridges the investigation of steel reinforcement bars and tendon ducts is one of the most essential test problems. During the construction and service life time of these concrete structures, many deficiencies may occur due to an incorrect application or changes of the internal structural elements position with respect to the original design plans, affecting seriously the performance of the whole structure. Frequently, areas with very poorly vibrated concrete, insufficiently grouted tendon ducts and incorrectly positioned reinforcement bars appear. Moreover, during rehabilitation processes, designers are often faced with a lack of original design plans and unawareness of the real position of re-bars and tendon ducts. Thus, a detailed knowledge of the internal structural state of concrete bridges is essential for the prevention of further damage and the improved planning of maintenance and rehabilitation. The localization of the ordinary reinforcement bars and tendon ducts is a fundamental element for efficient structural assessment and strengthening design, continuing overall safety of the bridge.

Ground Penetrating Radar (GPR) is one of the leading technologies in the field of NDT&E especially prepared for the above mentioned purposes. It is one of the fastest, most cost-effective and highest resolution investigation methods available to render any subsurface imaging, providing thus an efficient means for concrete structures evaluation studies [1]. Non destructive testing, quasi - continuous results and efficient data acquisition are the main advantages of GPR systems when compared to traditional methods, prescribing them as powerful tools for large concrete structures inspection such as bridges, bridge decks and road pavements [2]. Using a mobile GPR system to inspect such traffic-related structures permits a high rate of data acquisition with minimized traffic flow obstruction, as well.

Nowadays, GPR systems are increasingly being used as a diagnostic and quality assurance tool for the non destructive inspection and condition assessment of pre-stressed concrete bridges. Important applications concern the localization of internal metallic reinforcement bars and tendon ducts, the determination of the concrete cover of rebar and internal tendon ducts as well as the assessment of the pavement layer thickness [3-6]. The use of this tool has also been validated by numerous authors for the investigation of grouting condition inside plastic ducts [7], as well as for locating deterioration and defects detection within concrete structures [8].

The present research work evaluates the potential of GPR for the inspection of reinforced and pre-stressed concrete bridges, and its usefulness to provide non visible information of the interior structural condition required for strengthening and rehabilitation processes. For this purpose, different concrete specimens with embedded steel reinforcement bars and plastic ducts were investigated by means of GPR in laboratory environment, with the aim to localize the internal structural fittings and verify the original design drawings. A 3D survey was also performed in order to reveal a detailed insight of the interior concrete structure.

2. Experimental

Samples Description

For the present study, two concrete samples named as Sample 1 and Sample 2 were tested in laboratory environment by means of the GPR technique. The details of the samples are described below.

Sample 1, presented in Figure 1, has a length of 1.12 m, a width of 0.2 m and a thickness of 0.2 m. Totally 6 plastic ducts are embedded in its structure at equal distances (20 cm) and at a constant depth (9.2 cm), as illustrated in the original drawing of Sample 1 (Fig. 2).

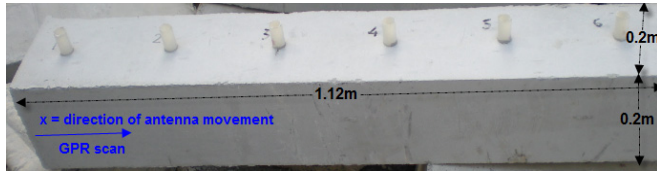


Fig.1 General view of Sample 1

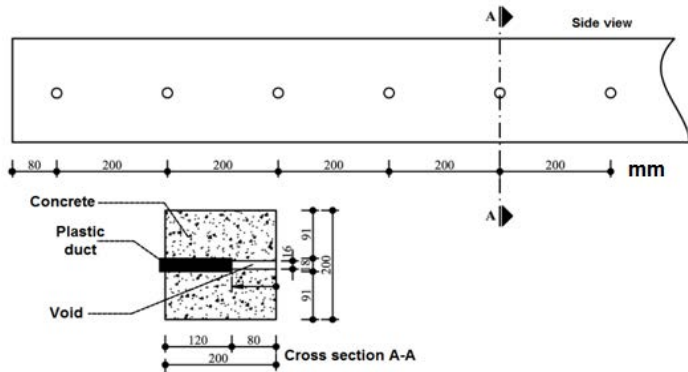


Fig.2 Drawing of Sample 1

Sample 2, that is presented in Figure 3, has a length of 1.5 m, a width of 0.5 m and a thickness of 0.3 m. Steel reinforcement bars tightened in the form of a cage are embedded in its structure. The reinforcement consists of 4 deformed longitudinal bars 16 mm diameter and 10 deformed transverse bars (closed stirrups) 8 mm diameter. According to the original drawing of Sample 2 that is demonstrated in Figure 4, the top layer of the rebar is placed at a constant depth of 3.5 cm. The distance between the longitudinal bars, as well as between the stirrups, is not constant but varying.

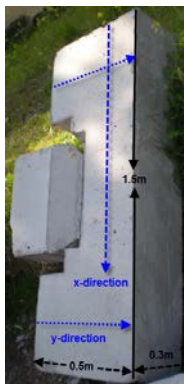


Fig.3 General view of Sample 2

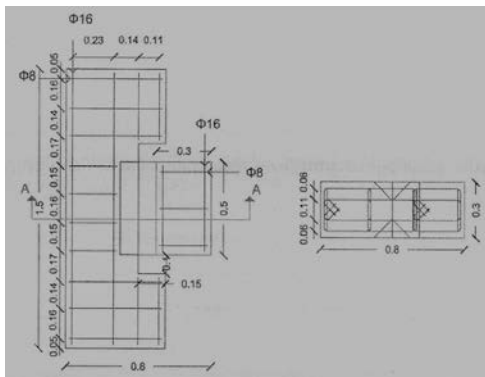


Fig.4 Drawing of Sample 2

GPR equipment and data acquisition

For the radar measurements a GSSI TerraSIRch SIR System-3000 with a 1.6 GHz high frequency antenna in reflection mode was used. GPR survey was carried out on Sample 1 along a single line in the x-direction, as indicated in Figure 1, in order to locate the internal plastic ducts. As regards Sample 2, GPR measurements were performed along a single line in the x- direction and along two single parallel lines in the y- direction (see Fig. 3), in order to locate the transverse and longitudinal bars, correspondingly. Such approach is important in order to locate tendon ducts at depths down to 50 cm, detecting voids and detachments, and measuring thickness of structures that are only accessible from one side [9]. A 3D survey was also carried out on Sample 2 in order to provide a detailed picture from the interior concrete structure. For the acquisition of 3D data, measurements were performed in a grid format both along parallel horizontal (x) and vertical (y) lines on the area marked in Figure 5. The distance between consecutive survey lines was set to 5 cm, which allowed sufficiently accurate data to be obtained for 3D subsequent processing. 2D data were collected along 7 horizontal lines parallel to x-axis and 11 vertical lines parallel to y-axis and interpolated in order to produce a 3D map of the interior concrete structure.

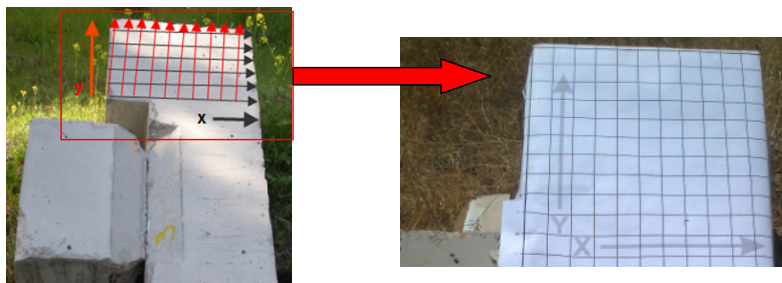


Fig. 5 3D survey area of Sample 2 in a grid format

During the GPR testing the essential set up parameters for concrete structures investigations were defined and are summarized in Table 1. The GPR data acquired were processed using the RADAN 7 software of GSSI.

Table 1: Set up parameters for GPR survey with 1.6 GHz Antenna

Dielectric Constant (ϵ) of concrete	6.25
Samples/ scan	512
Resolution, bits	16
Range, ns	12 ns
Rate (scans/s)	4
Number of gain points (dB)	5
Vertical High Pass Filter, MHz	75
Vertical Low Pass Filter, MHz	700
Transmit Rate, KHz	100

3. GPR results and interpretation

In Figure 6, the acquired 2D radargram of Sample 1 after data processing is presented. The horizontal axis corresponds to the length in the x-direction, and the vertical axis is the two-way travel- time scale (ns), that has been transformed into a depth scale using an estimated dielectric constant for concrete of 6.25 (see Table 1). The surface reflection has been corrected to time/ depth zero, which is an essential step during data processing. A corrected 0-position sets the top of the scan to a close approximation of the under inspection object surface, in order to provide a more accurate depth calculation of the embedded targets.

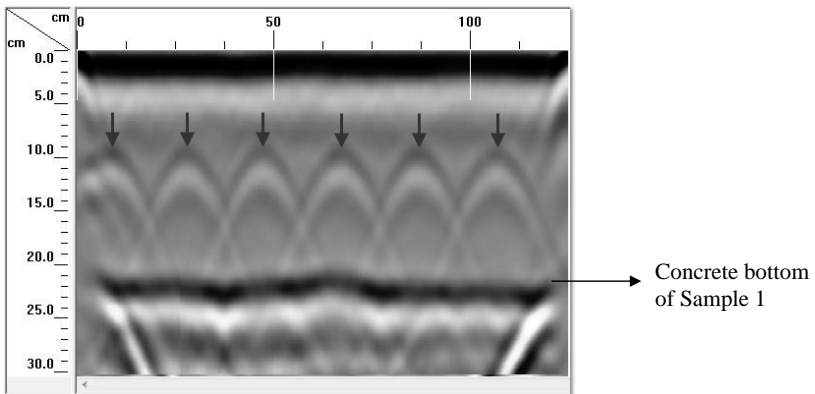


Fig.6 2D Radargram of Sample 1 revealing the position of the embedded plastic ducts perpendicular to the acquisition direction.

The hyperbolic reflections detected in the radargram of Sample 1, which are marked with vertical arrows, are interpreted as the embedded plastic ducts that are orientated perpendicularly to the survey line. The hyperbolas depict the true position and depth of the targets. From the radar profile it is observed that the plastic ducts are placed at a depth of 9.1 cm and the distance between them is constant around 20 cm,

matching the original drawing of Sample 1 (see Fig. 2). The radargram presented in Figure 7a represents a 2D data set after processing acquired along a survey line in the x- direction of Sample 2. The hyperbolic reflections detected reveal the location of the top layer of the 10 closed stirrups (8 mm diameter) that are running perpendicularly to the investigation axis. Figure 7b provides a radar profile after processing acquired along a line in the y-direction of Sample 2. Reflections from the 4 top deformed longitudinal bars (16 mm diameter) perpendicular to the y-direction of data acquisition are clearly visible. It must be noted that the bottom rebars were not detected due to overlapping reflections.

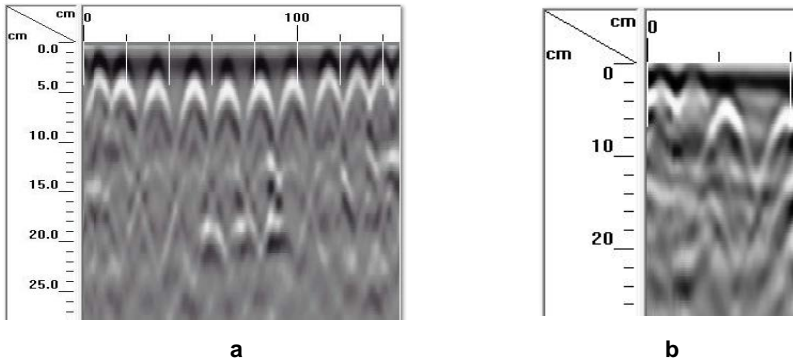


Fig.7 2D Radargrams of Sample 2 acquired along a survey line: (a) in the x-direction revealing the position of the embedded transverse stirrups (secondary reinforcement), and (b) in the y-direction revealing the position of the embedded longitudinal bars (primary reinforcement).

From the acquired radargrams it is observed that the distance between the secondary reinforcements (Fig. 7a), as well as the distance between the primary reinforcements (Fig. 7b), is varying and not constant, matching the original positions indicated at the design drawing of Sample 2 (see Fig.4). The middle of the white part of the hyperbolas is interpreted as the top layer of the metal targets. The radar profiles reveal that the depth of the rebars is not constant at 3.5 cm, especially illustrated in the case of the 4 longitudinal bars (Fig. 7b), but varies from 2.5 to 5 cm, which is not in accordance with the original drawing of the specimen. This might be due an incorrect application of the internal structural elements during the construction of the concrete block, or due to a possible shifting of the internal rebars with respect to the original design location.

3D display of radar data

The 2D data acquired along horizontal and vertical profile lines on the grid of Sample 2 (Fig. 5), were processed separately with a two-dimensional processing sequence. Migration is a necessary processing step applied after time zero correction in order to achieve a quality 3D display. Migration is a technique that moves dipping reflectors to their true subsurface positions and collapses hyperbolic diffractions into dots representing the actual targets. Figure 8 demonstrates the same radar profile of

The present paper focused on the application of GPR for the inspection of different concrete blocks with embedded steel reinforcement bars and plastic ducts. The state of the art GPR system with a high-frequency antenna that was used in this work, provided the accurate depth and position of the top rebars and plastic ducts, which is a fundamental element for the safety of bridges, once accurately detected. No information about deeper layers of rebar was obtained due to structural complexity. Furthermore, the 3D survey provided a detailed insight into the concrete structure. The results obtained showed the effectiveness and reliability of GPR technique for concrete bridge investigation, and its usefulness to provide non visible information of the interior structural condition required for strengthening and rehabilitation purposes.

Acknowledgements

Acknowledgements are attributed to the CROSS-IT project, which is a collaboration between the following organizations: TWI LIMITED, NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS, TECHNOLOGY ASSISTANCE BCNA 2010 SL, INETEC-INSTITUT ZA NUKLEARNU TEHNOLOGIJU DRUSTVO S OGRANICENOM ODGOVORNOSCU ZA ISTRAZIVACKO RAZVOJNE I KONSULTING USLUGE, PROIZVODNJU I TRGOVINU, ACUTECH EISAGOGES ANTIPROSOPEIES EPE, ATKINS CONSULTANTS LIMITED. The Project is co-ordinated and managed by TWI Ltd. The 2-year project began in November 2011 and is partly funded by the EC under the Research for the benefit of SMEs programme (FP7) Grant Agreement Number 286981. Furthermore, the authors would like to thank Dr N. P. Avdelidis for all his scientific support within the NDT Lab in NTUA.

References

1. Wiggenhauser, H. (2009) *Advanced NDT methods for the assessment of concrete structures*. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds), pp. 21-33.
2. Hugenschmidt, J. (2010) *Geophysics and non destructive testing for transport infrastructure, with special emphasis on ground penetrating radar*. Doctor of Sciences Thesis, ETH Zürich, Switzerland.
3. Streicher, D., Algernon, D., Wöstmann, J., Behrens, M., Wiggenhauser, H. (2006) *Automated NDE of Post-Tensioned Concrete Bridges Using Imaging Echo Methods*. ECNDT 2006 - We.1.3.1, pp. 1-8.
4. Hugenschmidt, J., Mastrangelo, R. (2006) *GPR inspection of concrete bridges*. Cement & Concrete Composites 28, pp. 384–392.
5. Cruz, J.S.P., Topczewska, L., Fernandes, M. F., Trela, C., Lourenco, B. P. (2008) *Application of radar techniques to the verification of design plans and the detection of defects in concrete bridges*. Structures and Infrastructure Engineering, pp. 1-13.
6. Scott, M., Rezaizadeh, A., Delahaza, A., Santos, C.G., Moore, M., Graybeal, B., Washer, G. (2003) *A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment*. NDT&E international 36, pp. 245–255.
7. Giannopolous, A., Macintyre, P., Rodgers, S., Forde, C. M. (2002) *GPR detection of voids in post-tensioned concrete bridge beams*. Proc. SPIE 4758: 376-381.
8. Maierhofer, Ch., Brink, A., Röllig, M., Wiggenhauser, H. (2003) *Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar*. NDT&E International 36, pp. 257-263.
9. Maierhofer, Ch. (2003) *Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar*. J. Mater. Civ. Eng. 15, pp. 287–297.



APPLICATION OF ELECTRIC IMPEDANCE TOMOGRAPHY IN MATERIAL DISTRIBUTION MEASUREMENT IN THE PROCESS OF MAGNETIC SEPARATION

Alicja IDZIASZEK-GONZALEZ*, Stefan WÓJTOWICZ*

*Electrotechnical Institute, Warsaw, Poland

Contact e-mail: gonzalez@iel.waw.pl

Abstract

The main objective of that work is to present a novel system solution that applies parameter control system to magnetic separator. The control system utilizes spatial distribution measurements taken by Electrical Impedance Tomography (EIT) unit. Magnetic separation is a process of material segregation based on difference in magnetic properties of materials. The key issue here is to obtain sufficiently high magnetic field and its gradient that is possible with application of superconducting magnets. The basis of superconducting technique in magnetic separation has been built for decades and is widely employed in High Gradient Magnetic Separators. The EIT is a noninvasive method of recovering electric parameters based on the electrical surface measurement. Presently some experimental projects are pursued aiming at commercial applications of proposed solution. In EIT the distribution of conductivity σ , permittivity ϵ and permeability μ is searched for. The EIT imaging is the solution of inverse problem, searching for parameter distribution that determines the conductivity or permittivity of investigated object. To find a general solution of that problem is difficult and cannot be obtained analytically. However it is possible to get an approximate solution based on iterative methods. The industrial applications are related to noninvasive examinations and belong to the area of process tomography. The main problem of applying tomographic imaging in magnetic separator is developing of multielectrode sensor array. The image is constructed based on measured signals coming from the sensors. The quality of image influences separation parameters in control system. The paper presents the schema of separation process control system, outline of separator device with superconducting magnetic field source and tomographic units and impedance tomography sensor.

Key words: magnetic separator, Electrical Impedance Tomography, high gradient magnetic field.

1. Introduction.

Separation in magnetic field characterized by high values of magnetic flux density and field gradient has been used in industry and science for several years. The progress in technologies utilizing magnetic separation is strictly correlated to achieving high fields at reasonable costs. The advances in magnetic technologies concern mainly water treatment, metal removal in food processing, kaolin decolorization in paper manufacturing industry, steel factories and power plants. High Gradient Magnetic Separation (HGMS) technique is beneficial to ore enrichment, coal desulfurization, food and pharmaceutical industries [2, 3]. The review of various

separation methods are discussed in [1]. Some of the limitations for applying superconductor magnets in magnetic separation process are listed in [4, 5]. Recently, the research on separation covers diverse commercial applications [6, 7].

2. Separation process.

The principle behind magnetic separation process is to segregate materials with different magnetic characteristics. The key issue here is achieving relatively high magnetic field and field gradient. It is obtainable due to employment of superconducting magnets. The basis for their applications in high field generating have been created for decades.

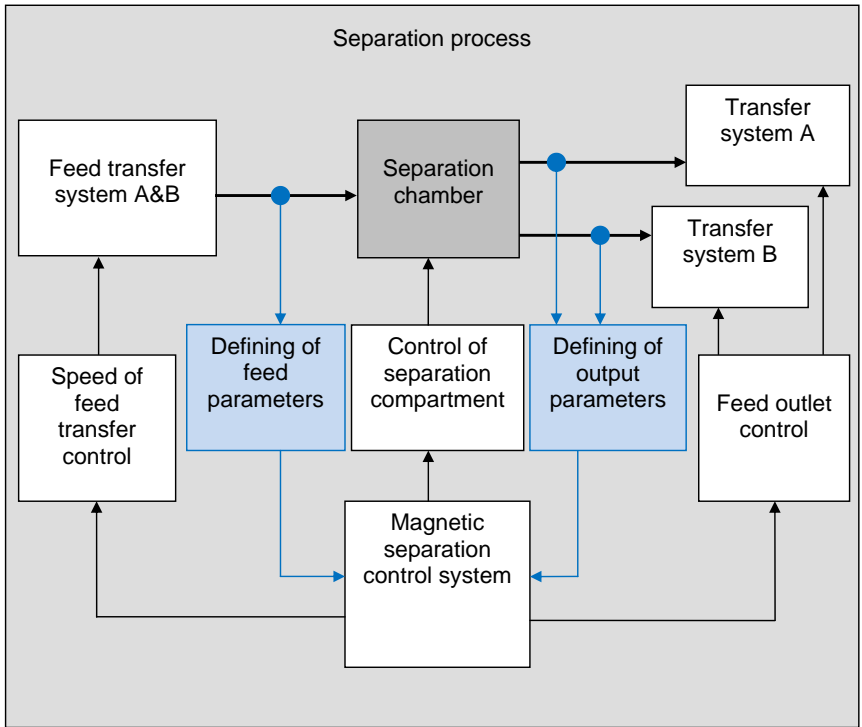


Fig.1 Scheme of the separation process.

Separation process takes place automatically if the system consists of following functional blocks:

- Feed transfer to the inlet of the separation chamber;
- Separation chamber that flowing feed is being separated within;
- Transfer system of isolated feed;

- Measurement system of ingoing and outgoing materials;
- Elements of control system of separation compartment, speed of feed transfer and isolated products
- Control system of separation process.

The connection between individual elements of the system is shown in Fig. 1. The indicator of the process quality is separation efficiency per unit time expressed by the following formula:

$$q_{iA} = \frac{S_{outiA}}{S_{inA}} = \frac{\frac{m_{outiA}}{m_{outiA} + m_{outiB}}}{\frac{m_{inA}}{m_{inA} + m_{inB}}} \quad (1)$$

where:

q_{iA} separation mass efficiency of material A determined at the separator outlet i ;

S_{outiA} portion of material A traversing per unit time measured at the separator outlet i ;

S_{inA} portion of material A traversing per unit time measured at the separator inlet;

m_{outiA} mass of material A per unit time traversing through the separator outlet i ;

m_{outiB} mass of material B per unit time traversing through the separator outlet i ;

m_{inA} mass of material A traversing per unit time through the inlet;

m_{inB} mass of material B traversing per unit time through the inlet;

$i = 1, 2, \dots, J$ indicates the outlet number.

Similarly, the separation efficiency indicator per unit volume and flow time can be determined. The indirectly measured values are material masses traversing in unit time and S_{out1A} , S_{out2A} and S_{inA} . Having measured the above values the separator

control system adjusts the position of the separation compartment, setpoint of flow speed and its value at the outlets.

3. Electrical Impedance Tomography

EIT is a noninvasive method of recovering electric parameters based on the electrical surface measurement. The parameters that space-time distribution is searching for are conductivity σ , dielectric permittivity ϵ oraz permeability μ . Recovering is the solution of inverse problem, i.e. searching for parameter

distribution that determines electrical quantities on the periphery of an object. Finding the general solution is difficult and cannot be obtained analytically. However it is possible to get an approximate solution based on iterative methods.

The industrial applications of EIT are related to noninvasive examinations and belong to the area of process tomography [10]. Feed is a mixture of components varying in electrical properties. Depending on the properties that distinguish investigated components one of the investigation method is chosen. The inlet and outlet sensors are disposed on the periphery of the separator chamber that has been depicted in Fig. 2. Paramagnetic particles (in red) response to high gradient magnetic field in the separation zone of the chamber. Diamagnetic parts (in blue) are passing through that zone practically not reacting to the field. The EIT inlet sensor registers spatial distribution of impedance before the feed enters the separation zone. Based on multielectrode sensor measurements the value of S_{in} is found. The spatial impedance distribution is characterized by the relationship developed in calibration process.

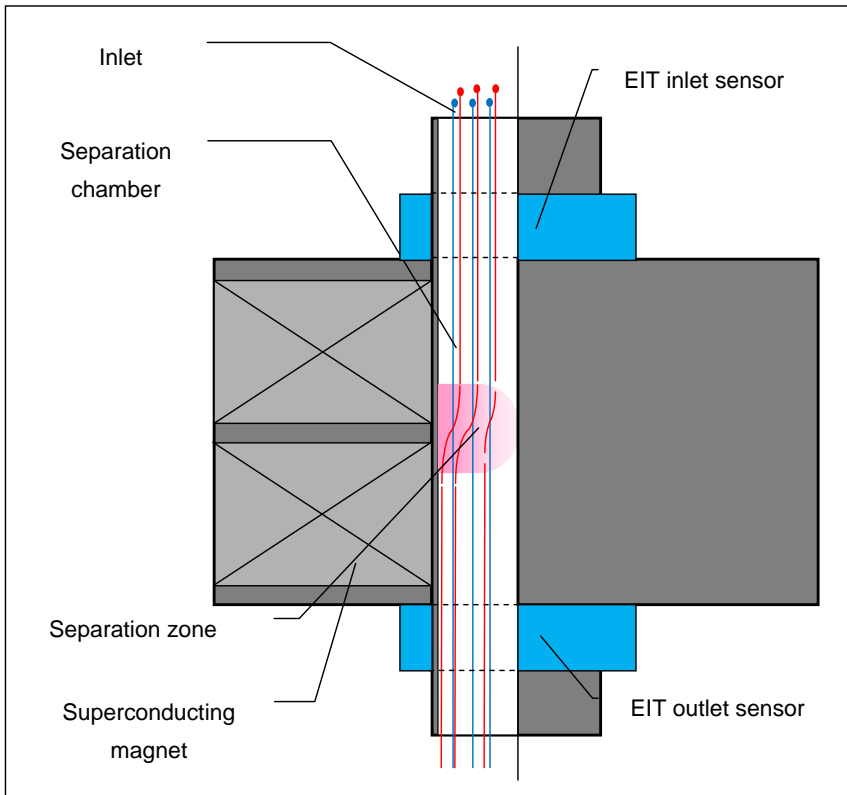


Fig.2 Separation chamber with indication of EIT sensor location

The EIT outlet placed below the separation zone measures impedance in multielectrode system using the data acquisition algorithm. The obtained spatial distribution of impedance parameters is the basis for distribution reconstruction of material A content S_{out1A} . Through comparing and contrasting the inlet distribution

with inlet feed contents the feed composition at every stage of the procedure is specified. The sensor design is described elsewhere [8, 9]. The material distribution image is created after registering the sensor signals. The image quality influences separation parameters in the control system.

4. Experimental setup for distribution measurement.

The separation chamber is cylinder-shaped (Fig.3, a). Superconducting magnets generate axially symmetric field. Considering the mixing process that takes place in the separation zone material distribution at the inlet is uniform (level y_i). That has been shown in Fig. 3, where x denotes an axis parallel to the diameter of the cylinder.

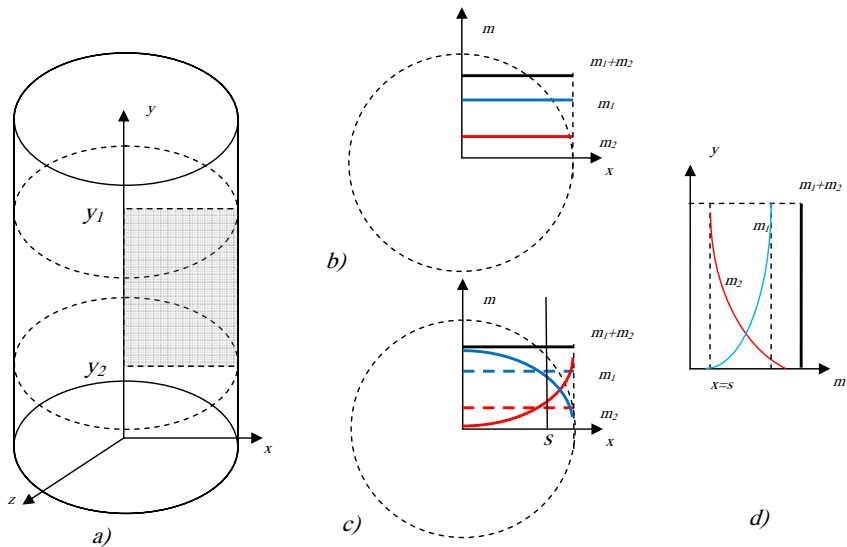


Fig. 3 Feed content distribution.

- a) Geometry of separation chamber;
- b) Feed content distribution at the inlet level;
- c) Feed content distribution at the outlet level;
- d) Feed content distribution as a function of separation distance.

The components of the mixture can be two substances that masses are denoted as m_1 and m_2 (blue and red colored). The distribution of flowing substance is described by the function along the radius at the outlet level (level y_2). The function needs to be a good approximation of experimental data. The model parameters are identified for specific application. One can write:

$$m_i = f_i(x; a_1, \dots, a_N; b_1, \dots, b_M; c_1, \dots, c_K; d_1, \dots, d_L) \quad (2)$$

where:

a_1, \dots, a_N – scalar components of identified model parameters;

b_1, \dots, b_M – scalar components of control system setting;

c_1, \dots, c_K - scalar components of incoming quantities ;

d_1, \dots, d_L – scalar components of confounders;

An analytical form of function is fitted arbitrarily and the parameters are determined as a result of parametric identification of the model for a given model structure. Next, the parameters are calculated by optimization method as a sufficiently close approximation of data measured by EIT method.

5. Control system.

Tomographic measurements are taken sequentially on input and output of the chamber. Next, the input data taken at the input are processed to get the boundary parameters of the control system determined by the average feed content determines. Then, processing of the data taken at the output results in some particular functions (2). The decision on the system setting is made after integration of:

$$D_1(x, s, V) = \int_0^s f_1(x; a_1, \dots, a_N; V; c_1, \dots, c_K; d_1, \dots, d_L) dx \quad (3)$$

The following conditions are met:

$$(D_1 > D_L) \cap (D_1 < D_H) = 1 \rightarrow V := V, s := s$$

$$(D_1 > D_H) \cap (V < V_b) = 1 \rightarrow V := V + \Delta V, s := s$$

$$(D_1 < D_L) \cap (V > 0) = 1 \rightarrow V := V - \Delta V, s := s \quad (4)$$

$$(D_1 > D_H) \cap (V = V_b) = 1 \rightarrow V := V, s := s - \Delta s$$

$$(D_1 < D_L) \cap (V = 0) = 1 \rightarrow V := V, s := s + \Delta s$$

where:

s – position of separation compartment ;

V – initial speed of feed movement;

D_1 - integral's value of distribution function of material A over the interval s (0, s);

D_L - minimal value of integral ;

D_H - maximal value of integral;

V_b - maximal speed of feed movement;

ΔV - minimal change of feed transfer speed;

Δs - minimal change in compartment's position.

The control process is determined by given experimental data, separator's setup and a priori characteristics of the separator and feed. The conditions (4) constitute noncomplicated schema of controlling that needs to be specified in laboratory or industrial conditions. First of all the arguments of function (2) are considered; i.e. parameter accuracy of component distribution function, initial quantities, confounders and their mutual interaction. The accuracy, precision of the system settings, relations between the respective control system blocks need to be specified.

6. Conclusions

Electrical Impedance Tomography is a powerful tool to noninvasively study distribution of mixture components. In order to achieve reliable distribution one selects an appropriate information carrier, electrical parameter related to specific material that assure detecting of separating components. Additionally, magnetic separation performed in high gradient field requires separated components have various magnetic characteristics. The key problem here is to properly design the multielectrode sensors. If the separated components are weakly conductive capacitive sensors should be used. In case of high conductance resistive sensors are employed. Application of eddy current sensors is considered if one cannot have any direct contact with feed. In practice the use of all the sensors are limited by many others factors, not mentioned here, that depends on the process. The distribution image of substances inside the chamber is a result of data processing by numerical algorithms based on the registered signals. The estimation of the distribution greatly influences separation parameters in control system. The paper present the schema

of control system dedicated to magnetic separators, outline of separator device utilizing superconductive magnets and tomographic unit.

In the process of magnetic separation controlled by EIT the time factor plays an important role. It is a dynamic process that implies simultaneous measurements and analysis that result in images. The employed algorithm takes into account the dynamic character of evaluated images [11] that imposes the detailed study of conditions present during separation. The described algorithm enables the time adaptive processing. The characterized system and related solutions are the subject of laboratory investigation of Measurement and Diagnostics Department of Electrotechnical Institute in Warsaw [12].

7. References

1. C. T. Yavuz, A. Prakash, J. T. Mayo, V. L. Colvin.: Magnetic Separations: From steel plants to biotechnology, *Chemical Engineering Science* 64 (2009) 2510 – 2521.
2. S. Ergun and E.H. Bean: Magnetic Separation of Pyrite from Coals. Raport of Investigation no. 7181, U.S. Bureau of Mines, Pittsburg, September 1968.
3. E. Maxwell, D.R. Kelland: High Gradient Magnetic Separation in Coal Desulfurization. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-14, No. 5, September 1978.
4. M. Brożek, A. Cieśla, W. Pilch: Preliminary Investigation on Application of Superconducting Separator to Upgrading of Kaolin. *Physical Problems of Mineral Processing*, 1991, 24, 203-209.
5. T. Ohara, H. Kumakura, H. Wada: Magnetic separation using superconducting magnets. *Elsevier, Physica C* 357-360 (2001)1272-1280.
6. A. Cieśla: Practical aspects of high gradient magnetic separation using superconducting magnets. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 37 (2003), 169-181]
7. A. Stanci, C. D. Buioca, V. Iusan: The improvement of quality of coal using magnetic separation. *Applied physics – electromechanics methods*, Rom. Journ. Phys., Vol. 51, Nos. 1–2, P. 97–100, Bucharest, 2006.
8. B. Matusiak, A. Romanowski, K. Grudzień: Designing an electrical capacitance tomography sensor for the purpose of investigating liquid flows. *Proceedings of the Electrotechnical Institute*, vol. 239, 2008.
9. M. G. Rasteiro, R. Silva¹, F. A. P. Garcia, P. Faia: *Electrical Tomography: a review of Configurations and Applications to Particulate Processes*. *KONA Powder and Particle Journal* No.29 (2011) s. 67-80.
10. D. Holder: *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications*, IOP Publishing, Bristol, UK, 2005.
11. A. Idziaszek-Gonzalez, S. Wójtowicz: Sequential measurement in optical tomography system integrated with magnetic separator. *Proceedings of the Electrotechnical Institute*, vol. 255, 2012.
12. A. Idziaszek-Gonzalez, S. Wójtowicz: Analysis of material separation process performed in wet drum magnetic separators. *Proceedings of the VII Conference in Jamrozowa Polana* 19-21. IX .2012.



VÝZNAM A NENAHRADITELNOST VIZUÁLNÍ KONTROLY PŘI KVALIFIKACI PROCESU SVAŘOVÁNÍ

VISUAL TESTING IMPORTANCE AND IRREPLACEABILITY IN THE PROCESS OF WELDING PROCEDURE QUALIFICATION

Jan KOLÁŘ

ČEZ, a.s.

Contact e-mail: jan@kolar.cz

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky nedestruktivních zkoušek provedených v rámci kvalifikace procesu svařování obvodového tupého svaru austenitického potrubí ϕ 114 x 12 mm. V případě použití úzké svarové mezery byly zjištěny problémy s detekcí krátkých neprůvarů při kontrole prozářením. I když byla při prozařování použita různá geometrická uspořádání a dále provedena ultrazvuková kontrola, krátké defekty nebyly jednoznačně detekovány. Spolehlivá detekce krátkých neprůvarů byla možná pouze nepřímou vizuální kontrolou.

Klíčová slova: vizuální kontrola, prozařování, neprovařený kořen

Abstract

In the contribution results of non-destructive testing are being presented for the welding procedure qualification of circumferential butt weld on the austenitical pipe ϕ 114 x 12 mm. In such the case very narrow gap between welded pipes is used were indentified detection of lack of penetration difficulties by the radiographic testing method. Although different types of radiographic geometry were used and the ultrasonic examination was performed too, short and small defects were not unambiguously detected. Reliable detection of short lack of penetration was able only by remote visual testing method.

Key words: visual testing, radiography, lack of penetration

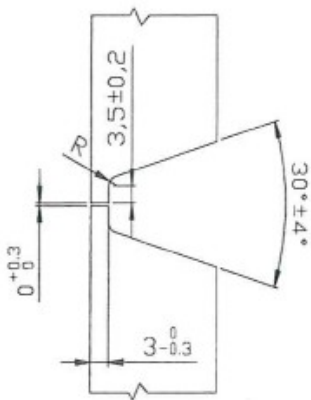
1. Úvod

Nedestruktivní zkoušky zkušebních svarových spojů jsou prováděny v souladu s požadavky ČSN EN ISO 15614-1. V případě tupých svarů na potrubí jsou standardně prováděny vizuální a kapilární zkoušky a kontrola prozářením. Pokud rozměry zkušebního kusu neumožňují provedení přímé vizuální kontroly dle parametrů definovaných normou ČSN EN ISO 17637, měla by být provedena vizuální zkouška pomocí dalších prostředků a pomůcek nebo nepřímá vizuální kontrola. Účelem tohoto příspěvku je především upozornit na skutečnost, že pro vyloučení nepřípustných vad typu neprovařený kořen nelze spoléhat na výsledky zkoušky prozářením

2. Zkušební svarový spoj

Předmětem zkoušky byl austenitický obvodový svar potrubí $\phi 114$ mm s tloušťkou stěny 12 mm. Příprava svarového spoje byla provedena dle původní projektové dokumentace, která vyžaduje sestavení s maximální vzdáleností 0,3 mm dle obr. 2.1. Vlastní svařování bylo provedeno v poloze PF dle ČSN EN ISO 6947 metodou 141 dle ČSN EN ISO 4063.

Po provedení zkoušek povrchovými metodami nedestruktivního zkoušení byl zkušební svarový spoj podroben zkoušce prozářením.



Obr.2.1 Profil svarového spoje
Fig.2.1 Welded joint profile

3. Zkouška prozářením

Prvotní zkouška prozářením byla provedena dle ČSN EN 1435 v třídě B s níže uvedenými parametry:

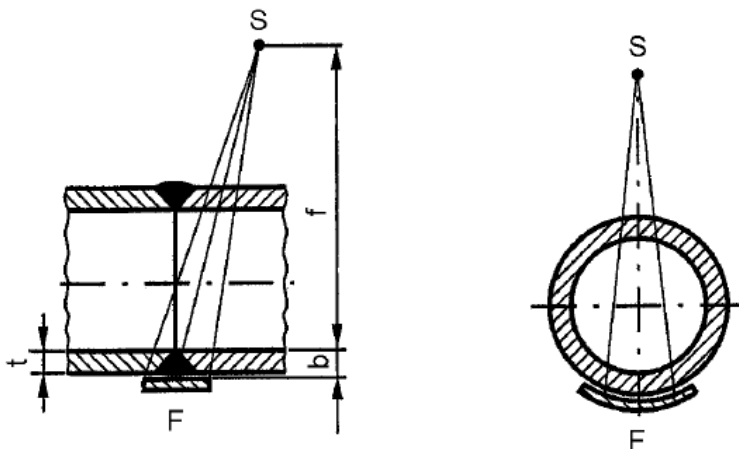
Vzdálenost zdroj-film 250 mm

Napětí 210 kV

Proud 5 mA

Uspořádání zkoušky dle čl. 6.1.8 ČSN EN 1435 (viz obr. 3.1)“

Měrka na straně filmu, filmový systém C4 dle ČSN EN ISO 11699-1



Obr.3.1 Expoziční uspořádání

Fig.3.1 Exposure arrangement

Zkouškou bylo dosaženo předepsané kvality radiogramu a nebyly registrovány jakékoliv nevyhovující necelistvosti.

4. Opakovaná vizuální kontrola

V rámci inspekce odběratelem provedené před destruktivními zkouškami bylo důkladnou vizuální prohlídkou zjištěno podezření na výskyt necelistvosti v kořenové části svaru.

Za účelem potvrzení nálezu byla provedena opakovaná vizuální kontrola. Protože nebylo možné dodržet parametry zkoušky požadované normou ČSN EN ISO 17637, byla zkouška provedena pomocí fibroskopu. Touto zkouškou byly zjištěny dva neprůvary délky 4 a 3 mm. Zobrazení defektů uvedeno v tab. 4.1

Tab. 4.1 Zobrazení defektů / Tab. 4.1 Defects visualization

Defekt 1 – neprovařený kořen v délce 4 mm



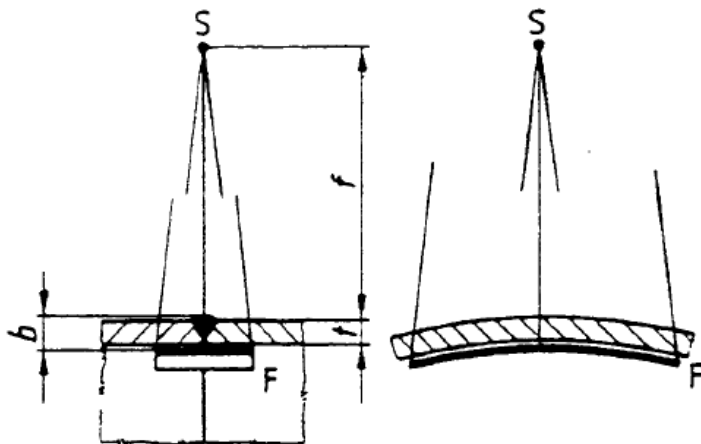
Defekt 2 – Neprovařený kořen v délce 3 mm



5. Opakovaná zkouška prozářením

Na základě nálezů z opakované vizuální kontroly byla provedena znovu zkouška prozářením za níže uvedených parametrů, které podstatně zlepšují možnost detekce nepřipustných vad:

Vzdálenost zdroj-film	340 mm
Napětí	220 kV
Proud	6 mA
Uspořádání zkoušky	dle čl. 6.1.3 ČSN EN 1435 (viz obr. 5.1)
Měrka na straně zdroje, filmový systém C4 dle ČSN EN ISO 11699-1	



Obr.5.1 Expoziční uspořádání – opakovaná zkouška
Fig.5.1 Exposure arrangement – repeated examination

Přestože opakovaná zkouška prozářením byla provedena dle parametrů pro třídu B a bylo dosaženo předepsané kvality radiogramů, neprůvary nebyly detekovány. Zobrazení svaru bylo podstatně lepší, ale postižená místa vykazovala indikace spíše podobné hubenému kořeni bez zřetelné indikace nenatavené hrany.

Pro získání dalších informací byla provedena ultrazvuková zkouška. Touto zkouškou sice byly indikovány nesrovnalosti v oblasti kořene, ale tyto indikace byly poměrně snadno zaměnitelné s geometrickými indikacemi od lokálního převýšení kořene s náhradní velikostí odpovídající FBH $\phi 1,2$ mm, což je hodnota pod hranicí registrace dle projektu.

6. Závěry a doporučení

V případě kontroly dohotovených tupých svarů s úzkou nebo úplně nulovou mezerou mezi spojovanými polotovary potrubí nelze, za účelem detekce neprůvarů, spoléhat na výsledky zkoušky prozářením. Pokud není možné z důvodu malého vnitřního průměru potrubí provést přímou vizuální kontrolu vnitřního povrchu, je nutné pro kvalifikaci procesu svařování aplikovat endoskopické prostředky.

Vzhledem k následné aplikaci svařování při montáži technologických celků, kdy jsou používány izotopové zdroje a není možné provedení nepřímé vizuální kontroly je doporučeno provádět kontrolu prozářením po zhotovení kořene i v případě tloušťky základního materiálu od 10 mm.

Literatura

ČSN EN ISO 15614-1 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu

ČSN EN ISO 6947 Svařování a příbuzné procesy - Polohy svařování

ČSN EN ISO 4063 Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování

ČSN EN ISO 17637 Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů

ČSN EN 1435 Nedestruktivní zkoušení svarů –Radiografické zkoušení svarových spojů



ETIKA v NDT ETHICS in NDT

Bernard KOPEC

Contact e-mail: b.kopec@email.cz

Abstrakt

Příspěvek je nekritizujícím zamyšlením nad posledním vývojem vztahů v české defektoskopii, které před sametovou revolucí byly na dobré etické úrovni, i když doba byla těžká. K poznání pravdy nestačí přečíst si pár dokumentů a mailů a publikovat jejich útržky. Často je tomu tak, že vysvětlování je výsledkem určitého dialogu, osobních setkání nebo také obrácení srdce. To všechno jsou věci, které nelze jednoduše vyčíst z papíru nebo z počítače a odmítat dialog. Dokumenty jsou důležité, ale mezilidské vztahy jsou daleko důležitější.

Klíčová slova : etika, nedestruktivní zkoušení, dekalog

Abstract

The paper is non-critical reflection on recent developments in the Czech relations defectoscopy, which before the velvet revolution were a good ethical level, even when times were hard. The knowledge of the truth is not enough to read a couple of emails and documents and publish their scraps. It is often the case, the explanation is the result of a dialogue, personal meetings, or conversion of heart. These are all things that cannot be easily read from paper or computer and rejecting dialogue. Documents are important, but interpersonal relationships are far more important.

Key words: ethics, non destructive testing, decalogue

V diskusi je vždycky třeba vycházet od zásadního, aksiomatického předpokladu, že každý z nás má na každé téma určitě nanejvýš částku pravdy a ta částka je pravděpodobně částečně mylná. To by mělo vést k pokornému předkládání vlastního stanoviska i seriózního naslouchání argumentů partnerů či odpůrců. Takto se nejlépe můžeme vzájemně obohatit svými částkami vědění a také je korigovat. Zůstávají tak sice vždycky jenom částkami, ale mohou se trochu zvětšit a očistit od pochybení. V tom spočívá požehnání poctivého dialogu a v tomto duchu bychom si jak v životě, tak i ve společenství nedestruktivního zkoušení počínat.

Procesy, systémy, náklady, techniky, metodiky jsou jen technickými nástroji. Pomáhají nám dosahovat výsledků a cílů, říkají, kdy jsme, užiteční, kvalitní apod. V celém procesu je jeden společný jmenovatel a to je člověk. Člověk vytváří procesy, systémy, pravidla, hodnoty. Je jediným aktivním, tvůrčím činitelem spolu s přírodou. Jedině on sám může garantovat úspěch a funkčnost vytvořených procesů. Funkčnost procesu je a bude postavena

na vzájemné důvěře a odpovědnosti pracovníků, pokud budou lidé existovat. Jedině odpovědnost člověka může zajistit, že proces, systém nebude obcházen. Systémy sice nastavují zpětné vazby pro kontrolu, ale vždy při selhání odpovědnosti člověka je pozdě. Zpětná vazba jej objeví až je po všem. Následně se dá jen připravit preventivní opatření pro stejnou nebo podobnou situaci. Ta již nemusí nastat. S časem se změní mnoho okolních podmínek. Jedině osobní odpovědnost člověka může zabránit ztrátám. Vizitkou osobní odpovědnosti je jméno člověka. Za ním stojí celoživotní práce, kterou je možné kdykoliv zohlednit. Se jménem není většinou spojena jen jediná osoba, ale celý tým, rodina, generace. Pro jméno, osobní odpovědnost, stojí už něco udělat. Třeba jen dodržet společná pravidla.

Odpovědnost je jedna z vnitřních hodnot člověka. Je tedy čas se zabývat otázkou vnitřních hodnot nás samotných „defektoskopců“, jak nás kdysi pojmenoval jeden z našich „guru“ české defektoskopie pan Mojmir Věchet. Je čas zabývat se etikou, etickým chováním. Etika jsou vlastně principy a hodnoty, které usměrňují naše chování v situacích, kdy je možný výběr. Výběr máme vždy a všichni. Vždy si můžeme vybrat, jak se zachováme, pro jaké hodnoty se rozhodneme. Pod pojmem hodnoty si můžeme představit čestnost, poctivost, důvěra, odpovědnost, pravdomluvnost, zdvořilost, úcta, respekt, šlechetnost. To vše jsou hodnoty, které jsou základem etického chování. Zároveň se jedná o naše lidské vlastnosti, naše vnitřní hodnoty, které máme všichni, ale v různém poměru zastoupené.

Máme-li říci, co považujeme za morální v kladném smyslu, je tedy to, co je „v souladu dobrými mravy tak, jak je chápe společnost“. Není to tedy vše to, co je v souladu se zákonem (ten neřeší zdaleka vše a nemusí být „v souladu s dobrými mravy“ – viz např. norimberské rasové zákony nebo uzákonění vedoucí úlohy jedné strany). Protože žijeme v Evropě, můžeme se snad odvolat na její helénsko – židovsko – křesťanské kořeny, z nichž také vyrostla „morálka“ jako soubor všeobecně uznávaných pravidel chování (z nichž některá dnešní společnost stále drží, některá zpochybňuje a některým se raději vyhýbá, žádná z nich však dosud nezavrhuje).

Lidé, společnosti, organizace, auditorské a poradenské orgány, profesní komory vymýšlejí a zveřejňují tzv. etické kodexy. Chovají se však podle těchto proklamovaných idejí? A přesto již celou věčnost existuje starozákonní morální kodex – boží desatero. Desatero je etickým kodexem dovolujícím budovat společnost, ve které se stává světlem a průvodcem mezilidských vztahů.

Jaký smysl má těch deset rádků pro nás v dnešním kulturním kontextu, v němž hrozí, že sekularismus a relativismus budou kritériem každé volby. Příkázání nás vychovávají ke skutečné svobodě a autentické lásce, abychom mohli být opravdu šťastní. Příkázání jsou znamením touhy učit nás správnému rozlišování dobra od zla, pravdy od lži, spravedlnosti od nespravedlnosti. Jsou srozumitelné pro všechny. A právě proto, že shrnují základní hodnoty do konkrétních norem a zásad, jejich uvádění do života může přivádět člověka na cestu pravé svobody, která jej upevňuje ve směru vedoucímu k životu a ke štěstí. Když naopak člověk dekalog ignoruje, vzdaluje se životu a trvalému štěstí. Člověk ponechaný sobě samému, hrdý pouze na vlastní absolutní autonomii, se nakonec uchyluje k následování model egoismu, moci, vlády, pošpiňuje vztahy k sobě samému i k druhým a vydává se nikoli na cesty života, nýbrž smrti.



ON THE USE OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD TO DIAGNOSING A BRIDGE ELEMENT STRUCTURE

Marta KORENSKA¹, Lubos PAZDERA¹, Monika MANYCHOVA¹, Josef STRYK²

¹Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering

²Transport Research Centre

e-mail: korenska.m@fce.vutbr.cz

Abstract

The present paper deals with the application of the acoustic emission method to evaluating the condition of a particular bridge structure before and after its reconstruction. The reconstruction consisted in hoisting the bridge by 70 cm and replacing the original steel saddles by new, elastomer ones. The existing bridge beams were left unchanged. The objective of our measurements consisted in comparing the response of the different beams and evaluating the response differences resulting from the bridge reconstruction. In the first stage, the bridge structure was tested just before the reconstruction start (after the traffic interruption). The second test stage took place after the reconstruction completion, just before the traffic resumption. To produce the acoustic emission signal, a fully loaded truck travelled repeatedly over the bridge. Frequency spectra of the different beam response were analysed. We tried to find out whether or not there were frequency components in the frequency spectra correlating with the consequences of the steel armature corrosion. No frequency components characteristic for the steel armature corrosion and its consequences have been disclosed in the respective frequency spectra in either measurement stages. The only changes to appear in the frequency spectra took place in the frequency range from 100 to 300 kHz. The frequency components which were present in the above mentioned frequency interval prior to the bridge reconstruction, disappeared after the steel saddles had been replaced (in the reconstruction) by the elastomer ones.

Key words: bridge structure, truck crossing, wood chock, AE signals, frequency spectrum

1. INTRODUCTION

After many decades' realization of concrete and reinforced concrete structures the diagnostics problems of these objects condition have become more actual. Otherwise most constructions and structures from reinforced concrete show their considerable stability, but on the other side it is known, that in certain circumstances the serious defects of some construction parts occur or it may lead to their total deterioration. The embedded steel armature corrosion, especially in case of bridge structures, is the most frequent cause of these defects. The reasons for the corrosion to occur are various: failures occurring during the bridge construction, consequences of traffic load or ageing of the structures [1]. This is why non-destructive diagnostic methods (NDT are acquiring growing importance, helping the researchers to evaluate properly the condition of the bridge and decide upon the most convenient methods of maintenance, repair or refurbishment of the bridge in question or its parts and schedule them accordingly. One of the methods, which are recognized worldwide as the most promising for the mentioned purposes, is the acoustic emission (AE) method [2, 3]. By contrast to most other NDT methods, AE is a comprehensive

method, allowing both one-shot examination and long-term monitoring of the condition of the structure under investigation or its selected parts [4-8].

2. EXPERIMENTAL OBJECT

The acoustic emission method was applied to a bridge structure which was intended to be reconstructed. The bridge in question was a three-compartment one, see Figs 1 and 2. The bridge was erected in 1968. Its supporting structure is formed by eleven pre-stressed L-formed beams, supported by steel saddles. The bridge skewness is 60° . The bridge was lifted by 70 cm and its steel saddles were replaced by new ones, made of elastomer. The existing bridge beams were left unchanged. Our measurements were carried out in the extreme bridge compartment, whose span amounted to 16.18 m. The beams were 1 m high and 1 m wide, being interconnected at the upper and lower booms by a concrete slab of a width of 0.4 m. The bridge load-bearing capacity amounted to 25 tons at the time of our measurements.



Fig. 1 The bridge

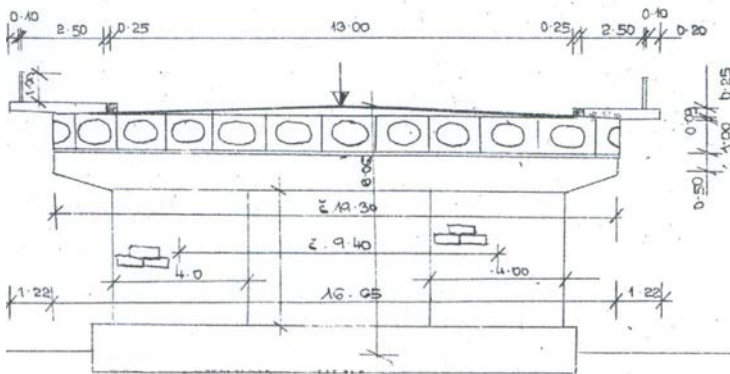


Fig. 2 The bridge cross section

3. MEASUREMENT PROCEDURE

The measurement was carried out in two stages - before the reconstruction and after the reconstruction completion. The objective of our measurements consisted in comparing the response of the different beams and evaluating the response differences resulting from the bridge reconstruction (the bridge hoisting and the saddle exchange). Ten beams were measured during the first stage. In the second stage, only 5 beams located in the bridge middle were measured, because the bridge carriageway wearing course was not completed at the time. The extreme span measurement were carried out at a distance of 3.5 m from the support (because of on-the-ladder accessibility). The acoustic emission signals were brought about by a 17 ton Liaz truck traversing a timber sleeper placed across the bridge carriageway. The areas at which the sensors were to be placed were mechanically cleaned of dust and other foreign matter. Two acoustic emission sensors were placed on each beam at a distance of 30 cm from each other, see Fig. 3. Each beam has been measured individually. The bridge structure loading procedure is shown in Fig. 4.



Fig. 3 Sensors position



Fig. 4 Bridge structure loading

4. MEASUREMENT RESULTS

The frequency spectra shown in Figs 5 through 9 represent the measurements of beams No. 4 through 8 before and after the bridge reconstruction. When analysing the frequency spectra, attention was focused particularly on the frequency components correlating with the steel armature corrosion and the consequences thereof [9]:

- The impairment of the surface oxide layers gives rise to acoustic emission signals of a maximum frequency of about 275 kHz.
- Frequencies in the vicinity of 300 kHz were observed in the signals which resulted from the corrosion-layer-compressive-force. induced plastic deformation of concrete.
- The impulses resulting from the corrosion layer structure damage feature frequencies from 225 to 250 kHz
- Acoustic emission impulses of a maximum frequency of about 60 kHz were observed to accompany the concrete damage (oxide layer ruptures)

- The signals which are due to the binder chipping- off, ruptures occurring along the armature and formation of shear cracks, contain mean frequencies of around 120 kHz
- Continuous formation of micro-cracks and local separation of the armature from the concrete are generating signals with means frequencies of about 150 kHz.
- The formation I of local cracks is characterized by signals of a mean frequency of 180 kHz.
- The signals which accompany the formation of micro-cracks, feature frequencies around 350 kHz.

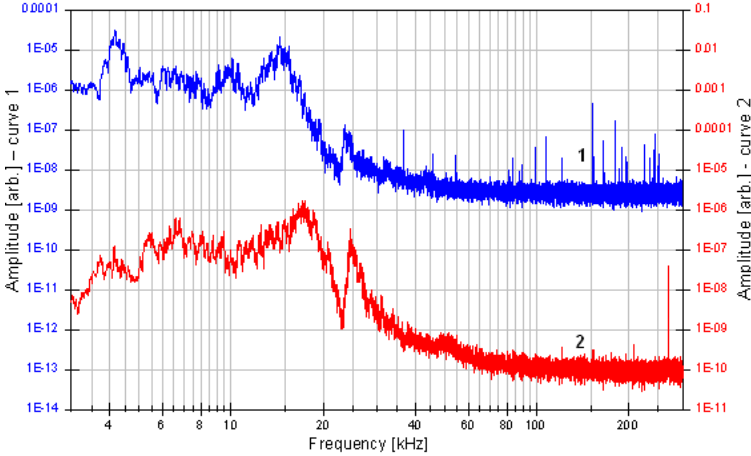


Fig. 5 Comparison of frequency spectra of beam No. 4: (before - curve1 and after the reconstruction - curve2)

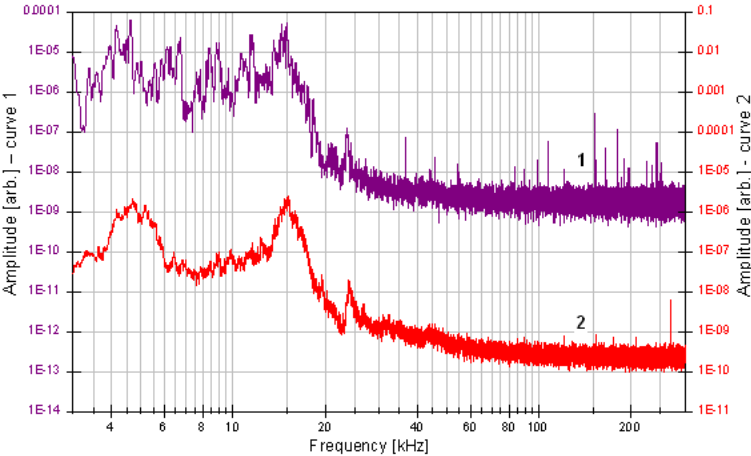


Fig. 6 Comparison of frequency spectra of beam No. 5: (before - curve1 and after the reconstruction - curve2)

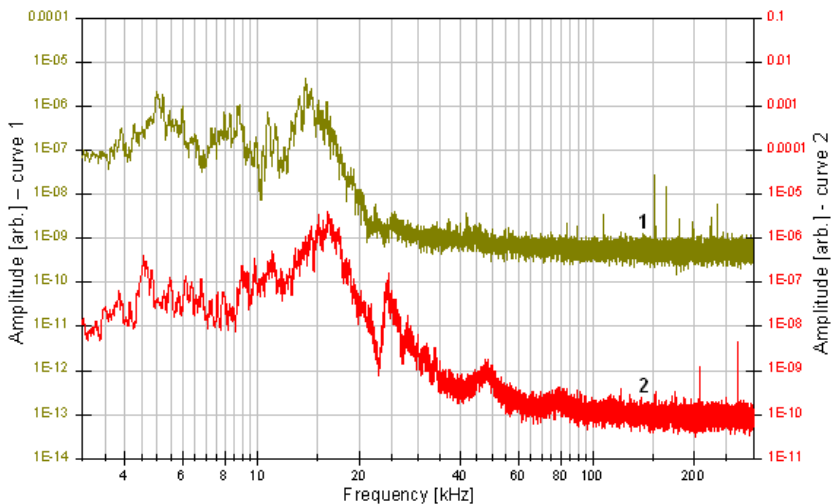


Fig. 7 Comparison of frequency spectra of beam No. 6: (before – curve1 and after the reconstruction – curve2)

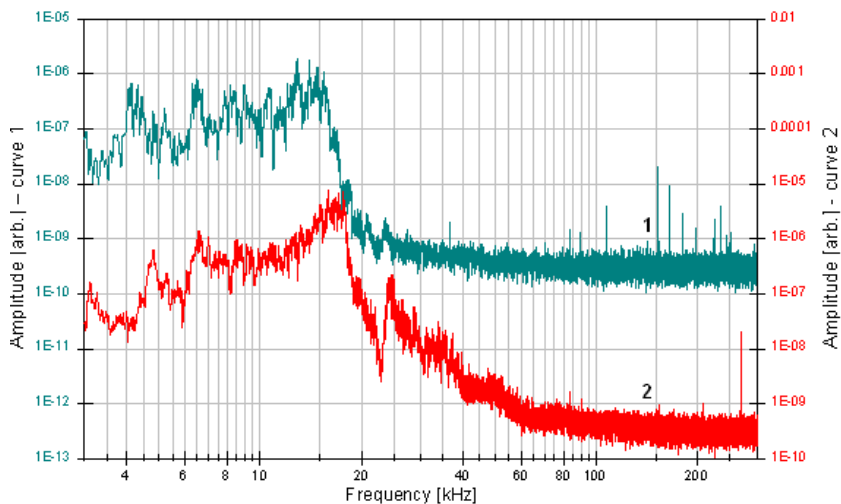


Fig. 8 Comparison of frequency spectra of beam No. 7: (before and after the reconstruction)

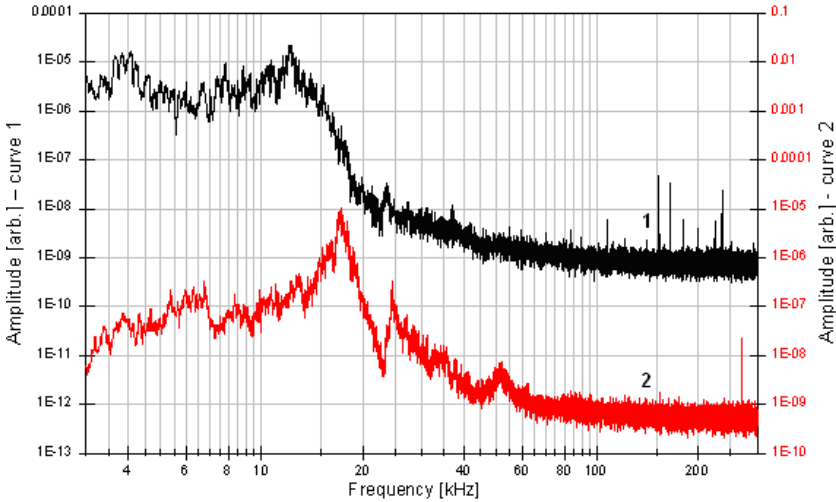


Fig. 9 Comparison of frequency spectra of beam No. 8: (before – curve1 and after the reconstruction – curve2)

In the first measurement stage, i.e., before the reconstruction, all beams feature elevated reading in the region of lower frequencies of up to 30 kHz. This frequency interval is obviously due to the bridge geometry and the load truck travel induced bridge deflection. In the case of beam No 4 (Fig. 5) a and beam No. 5 (Fig. 6), elevated amplitudes are observed in the frequency interval from 40 to 60 kHz, corresponding concrete cracks. All above mentioned beams feature also emphasized components at frequencies of above 100 kHz, which appear to be due to the friction between sliding parts of the bridge (beams and saddles) [9].

In the second measurement stage, almost all beams featured a slight predominant frequency shift from 15 to 17 kHz and a more marked emphasis of the 25 kHz frequency component. An exception is observed in the case of beam No. 5 (Fig. 6), where both components are identical, with comparable absolute values. No appreciable value components are observed in the higher-frequency region (above 100 kHz) as was the case in the first measurement stage, furnishing evidence of the fact that the replacement of the original steel saddles by new, elastomer ones, eliminated the contact surface friction.

As the original pre-stressed beams remained unchanged, they were not destroyed for the purpose of determining the actual condition of the steel armatures. No signs of the embedded armature corrosion were visually observed on the beam surface.

4. CONCLUSION

Following conclusions can be drawn up from our measurement results:

One of the problems affecting the bridge testing procedure and results is the traffic-induced mechanical noise in the frequency range from 20 kHz to 60 kHz, which can be suppressed by means of frequency filters. However, these filters eliminate also any information on concrete damage (60 kHz) and reduce any higher frequency signal amplitudes. However, the main problem consists in the friction between the sliding parts of the bridge structure and surface impairment of these sliding parts. These processes can generate - in the case of the surface damaging - higher frequency noise whose frequency spectrum is similar to that of the crack-propagation induced acoustic emission signals, as was the case of this bridge structure. No higher-frequency components occurred in the frequency spectra obtained after the bridge reconstruction, particularly the replacement of the steel saddles by the elastomer ones.

The steel armature condition, or better said, the degree of its corrosion, can be determined by more frequent monitoring of the bridge structure and analyzing selected parameter changes observed. Frequency of acoustic emission events and, particularly, frequency analysis of these counts appear to make convenient tools for this purpose.

Acknowledgement

The research described in this paper was supported by the research project MSM 0021630519.

References

- [1] P. H. Emmons, R. Drochytka, Z. Jeřábek: *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1999.
- [2] Scott I. G.: *Basic acoustic emission*, Gordon and Breach Science Publishers, 1991.
- [3] Pollock, A.A.: *Practical guide to acoustic emission*, Physical Acoustic Corporation, USA, 1988.
- [4] Suzuki, T., Ohtsu, M. and Shigeishi, M.: *Relative damage evaluation of concrete in a road bridge by AE rat-process analysis*, Material and Structures, Vol. 40, No.2 (2007), pp. 221-227, ISSN 1359-5997.
- [5] M. Korenska, L. Pazdera, K. Pospíšil, J. Stryk, P. Vyroubal: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3 September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5.
- [6] M. Korenska, L. Pazdera, L. Ritickova: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184, ISBN 961–90610-1-3.

- [7] Colombo S., Forde M.C., Main I.G., Shigeishi M. 2005. *Predicting the Ultimate Bending Capacity of Concrete Beams from the "Relaxation Ratio" Analysis of AE Signals*. Construction and Building Materials. 19, 2005, pp. 746 - 754.
- [8] Schechinger B., Vogel T.: *A deeper understanding of acoustic emission wave propagation in reinforced concrete*. Nondestructive testing in civil engineering, DGZfP: BAM, 2003, CD.
- [9] Muravin G., Lezvinsky L., Muravin B. (Izrael): *Acoustic Emission Diagnostic of Reinforced Concrete Bridges Condition*. In: Progress in Acoustic Emission IX, Proceedings of the 14th International Acoustic Emission Symposium, Big Island, Hawaii, USA, August 9-14, 1998, pp. II/89-II/98.



EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE INTEGRITY AFTER TEMPERATURE DEGRADATION VIA NONLINEAR ULTRASONIC MEASUREMENTS

Marta KORENSKA¹, Monika MANYCHOVA², Michal MATYSIK¹

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, ¹Department of Physics,

²Department of Building Structures

e-mail: korenska.m@fce.vutbr.cz

Abstract

The paper deals with nonlinear interaction between elastic wave and structural defects in concrete specimens. Our research has addressed three groups of specimens which differed from each other in the structure quality. Non-standard concrete hardening conditions resulted in the development of micro-cracks in the specimen structure. In the first stage of the experiment we aimed at identifying the effect of non-standard conditions of the concrete mix hardening on the structure integrity. A single harmonic ultrasonic signal method was applied to the specimens and evaluating of the second and third harmonic components as a quantity of nonlinearity was reviewed. After the first measurements the specimens were undergone freeze-thaw cycles. In the second stage of the experiment our objective consisted of determining how the freeze-thaw cycle application induced degradation that depends on the input structure initial quality. Verification measurements which have been carried out in parallel with the nonlinear ultrasonic ones, give evidence of the specimen structure integrity deteriorations and confirm the correlation between the non-linear effects on the transfer characteristics with the existence of defects in the specimen internal structure.

Key words: nonlinear spectroscopy, ultrasound, concrete samples, structure damage

1. INTRODUCTION

Nonlinear ultrasonic spectroscopy represents new possibilities in acoustic non-destructive testing of material damage [1-3]. One of the fields in which a wide application range of nonlinear ultrasonic spectroscopy methods may be expected is civil engineering [4]. Poor material homogeneity and, in some cases, shape complexity of some elements used in the building industry, are heavily restricting the applicability of "classical" ultrasonic methods. Therefore, development of new and simple defectoscopic methods, capable of determining the integrity of these problematic structures or building elements is of sign importance. Our experimental and theoretical research work was focused first on ceramic elements [5, 6]. Having gained first results and experience, we switched our focus on concrete structures, showing higher degree of inhomogeneity and roughness as compared with ceramic materials [7].

2. EXPERIMENTS

The three groups of the specimens of dimensions 4cmx4cmx16cm were prepared from a fine concrete mix, mixed cement and fine-grained aggregates were used. The first specimen group (denoted V) was kept, in accordance with standard conditions,

in water for the entire hardening period (28 days). In this case no water content reduction took place. The second specimen group was kept in air in laboratory environment conditions (denotation L). In consequence of water content reduction after setting, the specimens shrank and microcracks arose in the specimen structures. The third specimen group (denoted S) was placed for twelve days of the hardening process into a dryer (60°C) in order to increase the specimen load and get heavier structure deterioration. All three sample groups were subjected to the degradation. The goal of the experiment consisted in determining how the freeze-thaw cycle application (50 cycles) induced degradation depends on the structure initial quality.

Single-harmonic-signal nonlinear ultrasonic spectroscopy method was applied to the tests of concrete specimens. An ultrasonic generator with a frequency $f_1 = 30$ kHz was used as an exciter to generate a harmonic ultrasonic waves in the specimen. The measurement results were represented in the form of transfer function frequency spectra. It was investigated whether in case of structure damage specimens, the transfer function showed a nonlinear effects, which were due to the specimen structure defect.

3. MEASUREMENT RESULTS

The Figures which follow show the measurement results, namely, the higher harmonic frequency amplitudes as a percentage of the 1st harmonic (exciting frequency H_1) amplitude. Fig. 1 shows the results obtained from V2 specimen and represents the results obtained from the group of V specimens. During the hardening period, these specimens were kept – according to standard conditions – in water. Curve No 1 belongs to the measurements being carried out prior to the thermal degradation. The amplitudes are seen to fall with the growing harmonic frequency order.

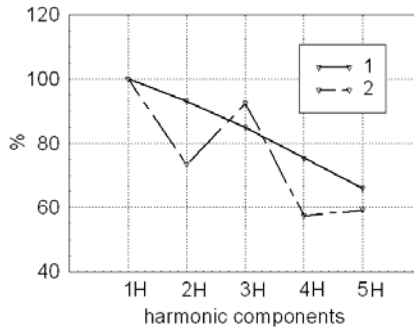


Fig. 1 Higher harmonic frequency amplitudes expressed as a percentage of the first harmonic amplitude, V2 specimen.

Curve No 2 shows the measurement results obtained after the application of 50 freeze-thaw cycles. The third harmonic H3 is predominating in the curve in amplitude, whereas the amplitudes of the second H2, fourth H4 and fifth harmonics H5 are seen to have decreased, the amplitude of the fifth harmonic H5 exceeding slightly that of the fourth H4 one.

Fig. 2(a) illustrates similarly the results obtained from specimen L1, representing the specimens hardened in laboratory condition environment, i.e., in open air, without water. In this case, curve No. 1 (measurement results prior to degradation) shows some symptoms of non-linearity. The magnitude of the fifth harmonic H5 exceeds that of the fourth harmonic H4. Curve No 2 demonstrates a drop in the second harmonic H2 and the predominating value of the third harmonic H3.

Fig. 2(b) shows the measurement results for S2 specimen, representing the group of specimens, which were exposed to 60°C while hardening. This specimen group also exhibits non-linearity symptoms, which are similar to those obtained prior to the freeze-thaw cycle application (curve 1). Higher harmonics are attenuated heavily. The amplitudes of the odd-numbered harmonic H3 and H5 exceed those of the even-numbered ones, H2 and H4. After 50 freeze-thaw cycles have been applied, the shape of curve No 2 appears to be similar, however, the higher harmonic amplitudes are not as much attenuated as in the first measurement, reaching higher values than formerly. It is supposed that the specimen structure integrity has improved as a consequence of the thermal stress. The specimens are soaked in water in the course of the degradation cycles, which has probably caused additional hydration of cement grains [8, 9].

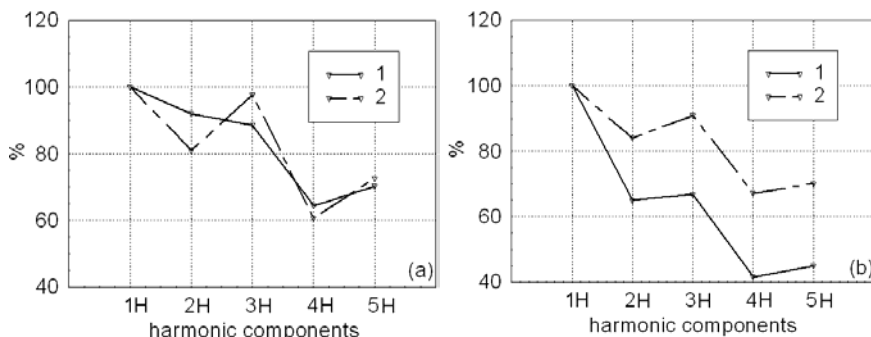


Fig.2 Higher harmonic frequency amplitudes expressed as a percentage of the first harmonic amplitude: (a) L1 specimen, (b) S2 specimen.

4. CONCLUSION

Our experiments focused on monitoring the structural integrity of concrete specimens by means of the single-harmonic ultrasonic signal method. Specimens manufactured from fine concrete mixes and differing from each other in the concrete structure integrity were studied in our experiments. In two specimen groups micro-cracks were generated in the structure due to the lack of humidity. Degradation of the specimens of all three groups was caused by applying 50 freeze-thaw cycles.

We investigated whether the specimen structure integrity was impaired due shrinking-induced stressing as a source of non-linear effects in the propagation of elastic waves. In the case of stressed specimen groups (L and S), there appeared microcracks-induced nonlinear effects in the frequency spectra. They took effect in emphasizing odd-numbered harmonics (particularly, the third one H3) and, in the case of more heavily damaged specimens (group S), in a high attenuation of higher harmonics.

In the second experiment stage, we studied the consequences of the freeze-thaw cycle application on the transfer characteristics of the specimens belonging to the different groups. The shape of the transfer characteristics of the three group specimens was similar. The curves gave evidence of non-linear effects: odd-numbered harmonics, particularly, the third harmonic H3, are prevailing the frequency spectra. The frequency spectra of the V group specimens (intact structure integrity prior to degradation) showed the greatest structural changes resulting from the freeze-thaw cycle application. Group L specimens (lower amount of hardening-induced damage) showed an enhanced demonstration of non-linear effects, thus indicating a growth of micro-cracks. Odd-numbered harmonics H3 and H5 are emphasized in both frequency spectra of the V group (with pre-degradation structure integrity damage of larger extent). However, a lower post degradation attenuation of higher harmonics in comparison with the first measurement is observed, probably due to additional hydration of cement grains in the course of the degradation process.

Acknowledgement

The research described in this paper was supported by the Grant Agency of the Czech Republic under project No. P104/10/1430.

References

- [1] K. Van Den Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet, P. A. Johnson: *Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)*, NDT&E International, Vol. 34, No. 4, pp. 239-248 (2001)
- [2] G. Shuiba, J. Y. Kim, J. Qu, Y. S. Wang, L. J. Jacobs: *A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using of Rayleigh waves*, NDT&E International, Vol. 41, No. 5, pp. 326-329 (2008).
- [3] I. Solodov, G. Busse: *Listening for Nonlinear Defects: A New Methodology for Nonlinear NDE*, Nonlinear Acoustics- Fundamentals and Applications-2008, AIP Conference Proceedings 1022, American Institute of Physics, Melville, NY, 2008, pp. 569-572.
- [4] J. Lacouture, P. A. Johnson, F. Cohen-Tenoudji: *Study of critical behavior in concrete during curing by application of dynamic linear and nonlinear means*, *J. Acoust. Soc. Am.*; Vol. 113 (3), (2002), pp. 1325-1332.
- [5] M. Korenska and M. Manychova: *Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Used to Detection of Ceramic Structure Damage*, Nonlinear Acoustics- Fundamentals and Applications-2008, AIP Conference Proceedings 1022, American Institute of Physics, Melville, NY, 2008, pp. 541-544.
- [6] Korenska, M., Manychova: M.: *Study of New Possibilities of Non-destructive Testing of Ceramics Specimens Integrity*, *Ceramics-Silikaty*, Vol. 54, No. 1, pp. 72-77 (2010).
- [7] M. Korenska and M. Matysik: *Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy as an Assessment Tool for the Structure Integrity of Concrete Specimens*, *Transactions on Transport Sciences*, Vol. 3, No. 1, pp. 17-21 (2010).
- [8] B. M. Johnson, A. H. Wilson: *Terminology of the Building Conservation Industry*, Division of Building Research, NRC Canada, (1982).
- [9] ACI 116R-90, Concrete Technology.



DIAGNOSTIKA POREZITY LEHKÝCH SLITIN VÍŘIVÝMI PROUDY NA OBROBENÝCH PLOCHÁCH DIAGNOSTICS POROSITY LIGHT ALLOYS EDDY CURRENTS ON MACHINED SURFACES

Ondřej KOVACS*, Břetislav SKRBEK*, Andrzej ZYSKA**,

*TU v Liberci, **Polytechnika Czestochowa

Contact e-mail: bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá zkoumáním porezity vzorků ze slévárenské slitiny typu Al-Si, tzv. siluminů, prostřednictvím nedestruktivní metody zkoušení. Práce vyhodnocuje míru porezity s použitím nedestruktivní metody vířivých proudů a mikroskopickou kvantifikaci

Klíčová slova: Slévárenské slitiny, porózy, vířivé proudy, mikroskopická kvantifikace

Abstract

This paper work examines porosity of samples from casting alloys like Al-Si, the so called silumin, through non-destructive testing method. The work evaluates the degree of porosity a non-destructive method using eddy currents and microscopic quantification of porosity.

Key words: *anglický překlad klíčových slov casting alloys, orosity, eddy currents, microscopic quantification*

1. Úvod

Ve většině případů je poróza nežádoucí jev, který se snažíme eliminovat. Póry bývají iniciačním místem pro vznik únavových lomů, snižují pevnost a tažnost materiálu, kvalitu obrobených ploch a jejich následnou povrchovou úpravu.

Póry mají vliv také na těsnost odlitků. Prosakování media skrz odlitek je ve většině případů značně nežádoucí jev. Nicméně právě propustnosti či nasákavosti porézního materiálu bývá s výhodou využíváno například při výrobě samomazných ložisek či filtrů. Technický význam má proto nedestruktivní diagnostika porózy. Tento příspěvek se zabývá výsledky zkoušení porózy slitiny AlSi10 vířivými proudy. Metodiku lze uplatnit i u ostatních slévárenských slitin Al, Cu a Mg. Zde prezentovaný dílčí výsledek studentské práce O. Kovacse logicky navazuje na [1].

2. Rozsah řešení

2.1. Zkoušení vířivými proudy [2]

Tato metoda spočívá v tom, že zkoušený objekt, jenž má určitou elektrickou vodivost, magnetickou permeabilitu a určité rozměry, se vystaví působení střídavého magnetického pole, které je vytvářeno budící cívkou, napájenou střídavým proudem. V zkoušeném objektu se v elektromagnetickém poli indukují vířivé proudy, které svým magnetickým účinkem působí podle Lenzova zákona zpětně na magnetické pole budící cívky a zeslabují ho. Tato dvě magnetická pole (primární od budící cívky a reakční od vířivých proudů) se vektorově skládají ve výsledné pole, které závisí na elektrické vodivosti a magnetické permeabilitě zkoušeného objektu. Toto výsledné pole se snímá buď přímo v cívce, která budí střídavé magnetické pole, kdy cívkový systém má jedno vinutí a vyhodnocuje se změna impedance cívky (tj. její odpor, který klade střídavému proudu) nebo sekundární cívkou (cívkový systém má dvě vinutí – budící a snímací), kde se indukuje výsledné indukované napětí, které je závislé především na frekvenci budícího proudu (s rostoucí frekvencí se zvyšuje velikost vířivých proudů) ale také na tvaru, struktuře a elektricko-magnetických vlastností objektu. Vyhodnocuje se amplituda a fáze napětí na snímacím vinutí.

Defekty snižují elektrickou vodivost zkoušeného materiálu a vířivé proudy defekty obtékají, tím se prodlužují dráhy vířivých proudů a rovněž se snižuje i jejich hustota.

Následně se snižuje intenzita zeslabení budícího pole, takže intenzita výsledného pole a s ní i indukované napětí na snímací cívce stoupne. Zvýšená amplituda napětí svědčí o výskytu defektu.

Metodu vířivých proudů lze použít u všech druhů elektricky vodivých materiálů

(feromagnetických i neferomagnetických). Mezi výhody by se dala řadit relativně levná

kontrola oproti jiným technologiím NDT, možnost automatizace kontrolního provozu, před kontrolou není nutno upravovat povrch zkušebního tělesa, poměrně vysoká rychlost plynulého zkoušení a ta je pro správnou diagnostiku vad přímo nutností, protože k vyvolání vadového signálu je potřeba, aby sonda a zkoušený objekt byly navzájem v pohybu. Čím více je tento pohyb rychlejší, tím vyšší a snadněji rozpoznatelný impuls dostaneme na stínítku obrazovky. Hustota vířivého proudu se snižuje exponenciálně s hloubkou. A tento úkaz je známý jako povrchový jev.

K vyjádření povrchového jevu se udává tzv. hloubka vniku. Je to vzdálenost pod povrchem, kde hodnota pole je e -krát menší než na povrchu vzorku ($e = 2,718$). To znamená, že je snížena na poměrnou úroveň $1/e = 0,368$ oproti hodnotě 1,0 na povrchu. Rozdělení hustoty vířivých proudů po průřezu zkoušeného materiálu je velmi nerovnoměrné. V ose tyče je hustota vířivých proudů nulová, největší je na povrchu.

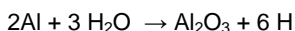
Metoda ET ztrácí indikace vad hluboko pod povrchem. Na druhé straně vhodným pracovním nastavením umožňuje měřit tloušťky vrstev, třídít stavy materiálu [2].

Přístroje typu SIGMATEST slouží k rychlému a spolehlivému měření elektrické vodivosti metodou vířivých proudů všech neželezných kovů na základě komplexní impedance měřící sondy; přístroj převede hodnotu komplexní impedance na hodnotu elektrické vodivosti. Hodnota elektrické vodivosti je indikována na LCD displeji při pěti volitelných frekvencích (60/120/240/480/960 kHz).

2.2. Poróznost [3]

Významný podíl na vzniku poróznosti ve slitinách hliníku má vodík, který má dostatečnou rozpustnost v tekutém hliníku na to, aby odlitky tímto způsobem ovlivnil.

Hlavním zdrojem vodíku bývá vlhkost v pecní atmosféře. Reakci popisuje rovnice



kdy při styku roztaveného kovu s vlhkostí v atmosféře dochází k disociaci vody, kyslík reaguje s hliníkem za vzniku oxidu hlinitého a právě vodíku.

Dalším zdrojem vodíku je vlhkost v nedokonale vysušených rafinačních solích, které jsou hygroskopické, proto musejí být skladovány v suchu a před použitím se vysouší zhruba při teplotě 200°C.

Podstatný vliv na přítomnost vodíku mají také nedokonale vysušené tavící kelímky, pecní vyzdívky a používané kovové nářadí.

Samotná vsázka může být také podstatným zdrojem vlhkosti. Vodík je zde vázán v pórech na povrchu materiálu a také v hydroxidech, které se vyskytují na zoxidovaném povrchu vsázkového materiálu.

Ze spalných plynů v tavicích a udržovacích pecích vznikají uhlovodíky a vodní pára, tedy další zdroje vodíku, stejně tak jako zamaštěná či jinak znečištěná vsázka apod.

Příčinou vzniku bublin ve slitinách hliníku je snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí taveniny.

3. Experiment

Pro přípravu vzorků byla použita normalizovaná slitina AlSi11. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tabulce 1.

Slitina	chemické složení [%], zbytek je Al						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi11	10,0–11,8	0,15	0,03	0,10	0,45	0,07	0,15

*Tab. 1 Chemické složení.
Tab. 1. Chemical composition.*

Tavení materiálu probíhalo v kelímkové indukční peci PIT 50s/400. Materiál byl roztaven a přehřán na teplotu 700°C, následně byl vléván pomocí lžíce do spodní poloviny formy o rozměrech 200x100x50 mm. Forma byla připevněna na hydraulickém lisu PHM – 250C, byla temperována na 150°C a na její povrch byla nanesena ochranná vrstva z koloidního grafitu, která měla za úkol zabránit přichycení taveniny k formě. Následně byl spuštěn lisovací razník, forma se uzavřela a probíhalo lisování. Vznikly tedy odlitky o rozměrech 200x100x25 mm. Tlak na odlitek působil 50 sekund. Po této době razník přestal vyvíjet tlak na formu a odlitek byl vyhozen pomocí čtyř vyhazovačů umístěných v rozích formy. Odlitky byly připravené dvojím způsobem, pod tlakem 60 MPa a metodou gravitační, vždy při teplotě formy kolem 150°C.

Další odlitky byly připravené ze slitiny modifikované stronciem, AlSr10 s množstvím 0,05% Sr. Modifikující prvek byl přidán do slitiny po jejím přehřátí na 730°C, následně byla připravena lázeň o stejné teplotě, do které se slitina na 10 minut ponořila s cílem homogenizace chemického složení. Z takto zpracovaného kovu byly připravované vzorky při stejných podmínkách jako při přípravě vzorků z nemodifikované slitiny.

V tabulce č. 2 je uvedeno označení vzorků a způsob jejich přípravy. Pro měření byly vybrány vzorky ze střední části odlité desky (s označením W) a z okrajové části odlité desky (označení Z).

označení vzorku	místo odebrání vzorku	stav slitiny AlSi11	obsah modifikátoru [%]
1W	střed	nemodifikovaný, odlévaný gravitačně	–
1Z	okraj		
2W	Střed	Nemodifikovaný, odlévaný pod tlakem 60MPa	–
2Z	Okraj		
3W	střed	modifikovaný, odlévaný gravitačně	0,05
3Z	okraj		
4W	střed	modifikovaný, odlévaný pod tlakem 60MPa	0,05
4Z	okraj		

*Tab. 2 Přehled vzorků.
Tab.2. Sample summary*

3.1. Měření porózy

Poróza byla měřena u každého vzorku vždy na dvou místech a to u povrchu vzorku a ve středu vzorku, tedy v místě, kudy prochází tepelná osa vzorků. Měření probíhalo na ploše o rozměrech 3x3 milimetry.

Povrch vzorků byl snímán na optickém mikroskopu NEOPHOT 32 jenž byl opatřený digitálním fotoaparátem NIKON COOLPIX 4500. Při snímání povrchu vzorků bylo použito padesátinásobné zvětšení.

Nasnímané fotografie byly následně zpracovány pomocí systému analýzy obrazu NIS - Elements, přičemž bylo nutné rozlišit reálné póry ve slitině od vad povrchu, které vznikly při přípravě vzorků. Slitina AlSi11 má nízkou tvrdost (50 - 60HV) a proto byly vzorky při leštění velice náchylné na tvorbu škrábanců. Nicméně právě tyto povrchové vady se podařilo v nastavení programu eliminovat tak, že byla měřena právě jen reálná poróznost slitiny. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 3.

označení vzorku	zjištěná poróznost [%]	
	střed vzorku	okraj vzorku
1W	1,3	1,2
1Z	0,2	0,2
2W	0,02	0,02
2Z	0,1	0,02
3W	1,1	1,2
3Z	1,1	0,5
4W	0,006	0,02
4Z	0,03	0,2

Tab. 3 Poróznost metalograficky

Tab.3. Porosity metalography

3.2. Mikrostruktura vybraných vzorků

Pro popis struktur byly vybrány vzorky odlévané různými technologiemi. Vybrané mikro-skopické struktury byly ze středu odlité desky.

Struktura vzorku 1W obsahuje primární dendritické krystaly (Al) a eutektikum (Al) + Si, kde je křemík vyloučen ve formě hrubých jehlic s výraznými negativními vlivy na mechanické vlastnosti, protože tvar eutektického křemíku Si výrazně ovlivňuje hlavně pevnost v tahu a tažnost.



Obr. 1 Tvar poróznosti, 100xzv.

Fig. 1 Form porosity, 100xinc.

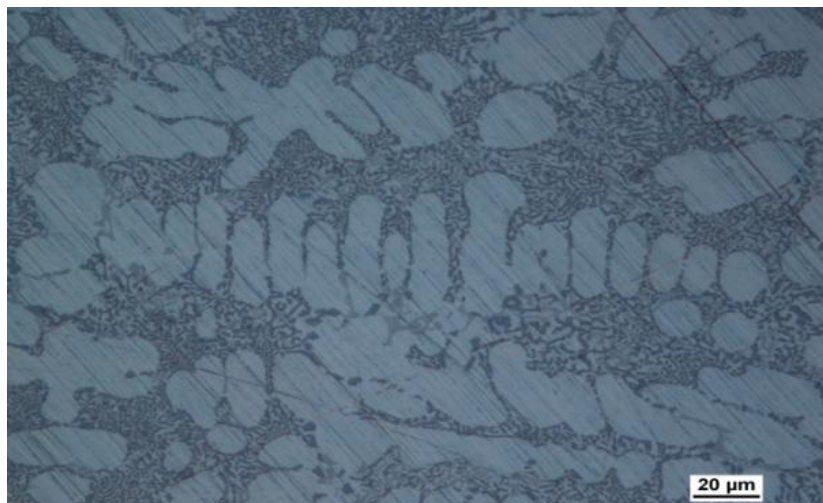


Obr. 2. Vzorek 1W (nemodifikovaný stav) – zv. 500x
 Fig. 2. Sample 1W (no-modification) – inc. 500x



Obr. 4. Vzorek s místy měření.
 Fig. 4. Sample and site measurement

Struktura vzorku 4W je tvořena primárními dendritickými krystaly (Al) + eutektika (Al + Si), které má zrnitý tvar. Eutektikum vzorku 4W je nejjemnější ze všech pozorovaných struktur, proto tento vzorek bude dosahovat lepších mechanických hodnot, než předešlé struktury vzorků a opět je toho docíleno vlivem modifikací slitiny stronciem.



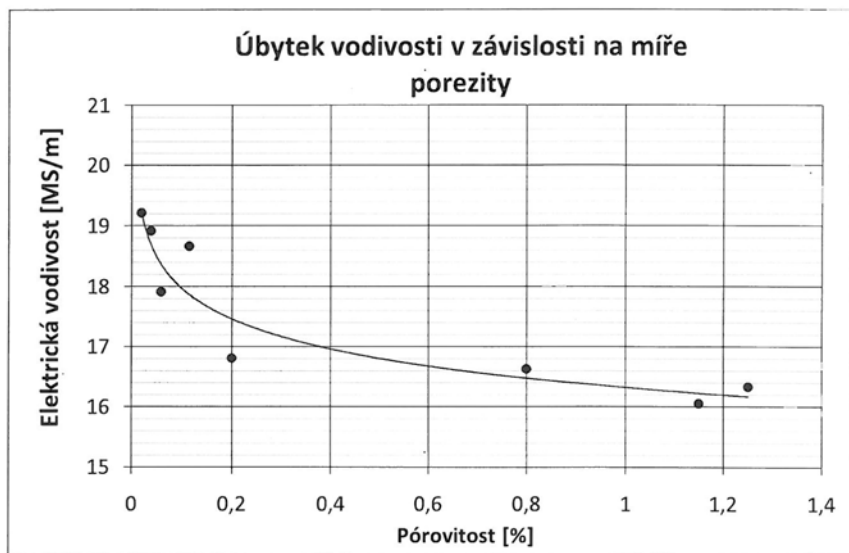
Obr. 3. Vzorek 4W (modifikovaný stav) – zv. 500x
 Fig. 3. Sample 4W (modification) – inc. 500x

3.3. Elektrická vodivost

Naměřené hodnoty vodivosti jednotlivých vzorků přístrojem SIGMATEST 2.069 jsou vyjádřeny v grafu 5, číselné hodnoty – průměrné z 5-ti měření v tab. 4. Měřeno na řezné („obráběné“) ploše.

vzorek	Střední poróznost %	vodivost[MS/m]
2W	0,02	19,2
4W	0,04	18,9
2Z	0,06	16,91
4Z	0,115	18,6
1Z	0,2	16,8
3Z	0,8	16,7
3W	1,15	16,04
1W	1,25	16,3

Tab. 4. Poróznost a σ [MS/m].
 Tab.4. Porosity and σ [MS/m.]



Obr. 5. σ [MS/m] vzorků z míst 1 (obr.4) a porózita
Fig. 5. σ [MS/m] sample in site 1 (fig.4) and porosity.

Graf ukazuje, že vzorky 2W, 2Z a 4W, 4Z – tj. vzorky

odlévané pod tlakem (2 – nemodifikované, 4 – modifikované) vykazují poměrně odlišné hodnoty naměřené vodivosti. Naopak vzorky 1W, 1Z a 3W, 3Z odlévané gravitačně (1 – nemodifikované, 3 – modifikované) téměř žádný rozdíl vodivosti nevykazují. Z tabulky 4 lze pozorovat, že jde pouze o desetiny.

U měřených vzorků, které byly odlévány pod tlakem, je tedy viditelné, že v místech B (tepelné ose) je větší pokles vodivosti vzorků. Toto snížení vodivosti mohlo být způsobeno větším množstvím necelistvostí (pórů), které se především nejvíce vyskytují v tepelných osách odlitků, nebo to mohlo být způsobeno následkem jemnější struktury vzorků, které byly odlévány pod tlakem. Průměrná hloubka průniku vířivých proudů do materiálu byla pouze 0,34 mm.

Naměřené body v grafu lze nejlépe proložit mocninnou křivkou pórovitosti (koeficient korelace činí $K = 0,9370$). Jednotlivé body předpokládané (spočítané) pórovitosti se od průměrné skutečné pórovitosti vzorků liší v případě použitého matematického modelu v průměru o 0,150 %.

Vyhodnocená porezita u všech vzorků prokázala jejich přípustné procento pórovitosti. Přípustná procenta pórů v odlitcích jsou maximálně 2 %.

Největší procenta pórovitosti prokázali vzorky odlévané gravitačně – 1W a 3W. Tyto hodnoty pohybovaly okolo 0,8 - 1, 25 % pórů na měřené ploše výbrusu, ostatní vzorky se pohybovaly v 0,02 - 0,2 % pórů. Takovéto odlišky jsou považovány za zdravé bez výrazných vnitřních nečistostí.

7. Závěr

Veškerá měření probíhala na vzorcích z materiálu AlSi11, které byly odlity katedrou slévárenství na polské Politechnice Czestochowské. Tyto vzorky byly speciálně připraveny a odlévány tak, aby měli v celém jejich objemu konstantní porózitu v podkritickém objemu do 2%.

Porozita byla stanovena metalografickou kvantifikací elektronickým odečítáním programem analýzy obrazu NIS-Elements 2.30 na ploše řezu středem vzorků.

Z hodnot elektrické vodivosti vzorků, který byl měřen na též ploše, se stanovil mocninný

matematický model s přijatelným koeficientem korelace $K 0,937$. Tento model je použitelný pro měření s příložnou sondou D8mm s frekvencí 120 kHz. na rovinných plochách.

Všechny vzorky obsahovaly ve svém objemu v průměru jen od 0,02 do 1,25 % pórů. Přesto metoda ET prokázala praktickou využitelnost a navázala na práci [1], která vyřešila nedestruktivní diagnostiku pórovitosti v nadkritickém rozsahu 2 až 20% kovových soustav.

Příspěvek podpořil Výzkumný záměr - č. 4674788501 MŠT.

Použitá literatura

[1] Švec, M.: Výzkum porózity kovových soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování. KMT – B141, bakalářská práce, TU v Liberci, 2009.

[2] Kopec, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2008, ISBN-978-80-7204-591-4.

[3] Michna, Lukáč, Očenášek, Kořený, Drápala, Schneider, Miškuřová a kol.: Slitiny hliníku. Adin, Prešov, 2005, ISBN 80-89041-88-4.



CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI BUILDING MATERIALS PROPERTIES CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Ivo KUSÁK*, Miroslav LUŇÁK*

*Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 95, 60200 Brno, Czech Republic

Contact e-mail: kusak@dp.fce.vutbr.cz, lunak@dp.fce.vutbr.cz

Abstrakt

Sledování procesu hydratace betonu v odlišných okolních podmínkách metodou impedanční spektroskopie se v literatuře vyskytuje zřídka. Méně často jsou prováděna sledování zrání betonu uvedenou metodou, kdy měrný odpor směsi přesahuje hodnoty 500 kΩ. Na základě Debyeovy teorie vznikly modely dielektrika, jejich aplikací a obdrženými parametry dielektrika je charakterizován měřený materiál a diskutována jednoznačnost určení hodnot parametrů modelu.

Klíčová slova: impedanční spektroskopie, dielektrické ztráty, ztrátový činitel, vodivostní ztráty, polarizační ztráty

Abstract

The concrete hydration by miscellaneous ambient conditions monitoring by impedance spectroscopy occurs rarely in papers. When specific resistance of mixture exceeds 500 kΩ, the impedance measurements of concrete maturing are used less commonly. The Debye theory of dielectric relaxation is the basis of many models of dielectric materials. The measured samples are described by characteristics of models obtain by using them. The uniqueness of solution and pertinency of characterisation are involved.

Key words: impedance spectroscopy, dielectric losses, loss factor, conductivity losses, polarization losses

1. Úvod

Analýza impedančních spekter nehomogenních materiálů ve stavebnictví je doposud nerozvinutá část metody impedanční spektroskopie. V současnosti nelze jednoznačně určit příspěvky jednotlivých složek materiálu k celkové vodivosti a polarizaci při různých frekvencích budícího elektrického pole. Materiál o vyšších hodnotách měrného odporu (>500kΩ) lze pojímat při vhodném zjednodušení jako dielektrikum. Pro homogenní materiály vybudoval teorii polarizace dielektrika Debye [12, 13]. Experimenty a závěry na reálných látkách však vykazovaly odlišnosti

od základních teorií. K. S. Cole a R. H. Cole, dále Fuoss a Kirkwood odvodili z Debyeovy teorie modely dielektrika, více se blížíci experimentálním závěrům [6]. Chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli je vhodné popisovat pomocí komplexní relativní permitivity. Debye odvodil pro slabě polární kapalná dielektrika vztah pro komplexní relativní permitivitu, ozn. ε^* :

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

Kde τ je relaxační doba, nezávislá na čase, ale závislá na teplotě, ε_s – statická permitivita (frekvence $\rightarrow 0$ Hz), ε_∞ - optická permitivita (frekvence $\rightarrow \infty$ Hz), úhlová frekvence $\omega=2\pi f$, f - frekvence budícího elektrického signálu [6, 7]

Pro ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ platí:

$$\text{tg}\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = -\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2} \quad (2)$$

V reálném dielektriku se vyskytuje více relaxačních dob. Jejich rozdělení je dáno distribuční funkcí. Pro obtížnost určení vhodné distribuční funkce se zavádí aproximace zvolenou analytickou funkcí. Podle Coleových vyjádříme komplexní relativní permitivitu následovně:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha}} \quad (3)$$

Kde τ_1 je nejpravděpodobnější relaxační doba, kolem níž jsou relaxační doby rozloženy podle distribuční funkce $f(\tau)$, α je distribuční parametr ($0 < \alpha < 1$).

J. R. Macdonald [13] nastínil ekvivalenci mezi tvarem výrazů pro komplexní relativní permitivitu ve smyslu (1), (3) a rovnic pro komplexní impedanci Z . Matematicky byly odvozeny vztahy pro reálnou a imaginární složku komplexní relativní permitivity a podle zmíněné ekvivalence vyjádřeny vztahy pro komplexní složky měrné impedance. Za použití matematického softwaru byly hledány hodnoty parametrů těchto dvou typů modelů pro testovaný materiál. Míru lineární závislosti modelové a experimentální závislosti vyjadřuje Pearsonův korelační koeficient r .

2. Popis měřeného materiálu

Vzorky betonu 100 mm x 100 mm x 400 mm byly pro měření impedanční spektroskopii rozděleny na tloušťku 10 mm tj. 100 mm x 100 mm x 10 mm. Složení vzorků je uvedeno v tab. 1:

Na stěny vzorků byly přiloženy mosazné kontaktní elektrody o rozměru 40 x 23 mm.

Tab. 1 Složení použitých vzorků betonu (množství v kilogramech)
 Tab. 1 Composition of the specimens measured (quantities in kg)

C 30/37 XF4, S4, plocha NH	
	1 m ³
CEM I 42,5R	320
Struska 420	100
Voda	210
Spolostan 7L	4
Chrysoair	0,15
Halámky D5 0/4	800
Rejta 4/8	280
Rejta 8/16	500

3. Experiment

Metodou impedanční spektroskopie a s použitím generátoru sinusového signálu Agilent 33220A a osciloskopu Agilent 54645A byly charakterizovány vzorky betonu po 15 dnech zrání. Zrání každého vzorku proběhlo v odlišném prostředí. Pomocí softwaru pro obsluhu uvedených přístrojů a zpracování dat byla získána spektra ztrátového činitele v závislosti na frekvenci, závislosti imaginární složky měrné impedance na reálné složce měrné impedance. Hodnoty složek měrné impedance každého vzorku byly vypočteny z experimentálně zjištěných hodnot reálné a imaginární složky impedance, podělením dané složky impedance tloušťkou vzorku a vynásobením plochou elektrod.

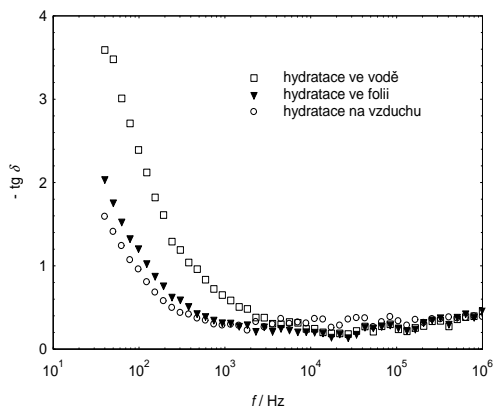
Z modelů byly určeny hodnoty koeficientů, uvedených v tabulce 2 a diskutovaných dále.

4. Výsledky měření a modelové parametry

Obrázek 1 znázorňuje experimentální spektra ztrátového činitele pro uvedenou škálu frekvencí. Nejvyšších hodnot nabývá ztrátový činitel při nejnižších aplikovaných frekvencích elektrického pole budícího signálu.

Hodnoty ztrátového činitele sledovaném čase pro vzorky hydratované ve vodě zůstávají vyšší než u vzorků hydratovaných ve folii a na vzduchu až po frekvenci přibližně 4 kHz, kdy spektra nabývají navzájem blízkých hodnot. Vyšší hodnoty ztrátového činitele v levé části spektra indukují vyšší četnost relaxačních dob než v pravé části spektra, maximum by pak určovalo nejpravděpodobnější relaxační dobu pro daný vzorek v aktuálním stavu (složení, míra hydratace, vlhkost). Z odlišnosti spekter usuzujeme na vyšší hodnotu nejpravděpodobnější relaxační doby u vzorku, hydratujícím na vzduchu. Nejbliže k nejpravděpodobnější relaxační době uvedeného vzorku se nachází nejpravděpodobnější relaxační doba pro vzorek zrající ve folii, s rozložením relaxačních dob, podobným vzorku hydratujícím na vzduchu. Od frekvence 4 kHz vykazují všechny průběhy ztrátového činitele kolísání hodnot, je však přítomný trend. U vzorku, který hydratoval na vzduchu jsou patrné v intervalu frekvencí 9 kHz až 100 kHz odlišné hodnoty ztrátového činitele, než u zbylých vzorků. Všechna spektra vykazují v oblasti vyšších frekvencí mírný nárůst hodnot ztrátového činitele. Vysvětlení lze hledat v přítomnosti vody v kamenivu nebo druhu použitého kameniva (kámen Halámky - frakce 0/4 – druh žuly). Druhý argument více koresponduje se závěry charakterizace druhů žuly v suchém

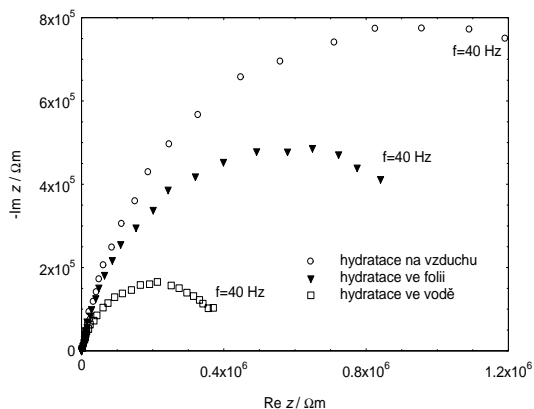
a navhlém stavu metodou impedanční spektroskopie [1]. Na konci článku bude srovnání uvedených rozborů spektra se závěry na základě modelů.



Obr. 1 Frekvenční spektra ztrátového činitele betonu, hydratujícího v odlišných prostředích

Fig. 1 Specific impedance values for the specimen under investigation at the time of the impedance spectroscopy method application

Změřená spektra hodnot měrné impedance pro sledovaný materiál jsou v souladu s teorií (Coleovi, Macdonald) půlkružnice [12, 13], jejichž střed je stlačen pod vodorovnou osu. Obrázek 2.



Obr. 2 Hodnoty měrné impedance použitých vzorků v době charakterizace metodou impedanční spektroskopie

Fig. 2 Specific impedance values for the specimen under investigation at the time of the impedance spectroscopy method application

Nejnižší hodnoty měrné impedance v celém spektru hodnot frekvence budícího elektrického signálu (nárůst frekvence zprava doleva, obrázek 2) byly pozorovány u vzorku, zrajícím ve vodě. Vzorek byl v době experimentu vodivější, ale imaginární složka měrné impedance nabývala v poměru k reálné složce vyšších hodnot, než u ostatních vzorků. To koresponduje s popsányými závislostmi ztrátového činitele. Křivky ve spektru měrné impedance nabývají maxima při odlišných frekvencích. Křivka vzorku, který hydratoval na vzduchu, má maximum už při frekvencích 50 Hz - 60 Hz, křivka uprostřed dosahuje maxima při 80 Hz - 120 Hz, poslední křivka má maximum kolem frekvence 250 Hz .

Uvedená spektra byla modelována fyzikálním a matematickým modelem. Výsledky fitování shrnuje následující tabulka.

Tab. 2 Hodnoty parametrů modelů spekter ztrátového činitele a měrné impedance vzorků betonu, hydratujících v různých prostředích

Tab. 2 Loss factor and specific impedance spectra values for specimens of concrete that have hydrated in various environments

Prostředí hydratace	voda	folie	vzduch
ε_n	72,3	91,6	99,8
ε_s	$5,3 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$
τ [s]	6,4	0,964	0,473
α	0,114	0,176	0,268
r	0,9924	0,9621	0,8837
N	46	46	46

Ze spektra ztrátového činitele byly získány hodnoty komplexní relativní permitivity pro limitní případy frekvence budícího signálu, nejpravděpodobnější doba relaxace τ a distribuční parametr α . Hodnoty dynamické permitivity pro hydrataci v různých prostředích mají vzestupnou tendenci, naopak hodnoty statické permitivity mají klesající charakter. Nejpravděpodobnější doba relaxace potvrzuje odhady z diskuse spekter ztrátového činitele. Hodnoty distribučního parametru α jsou vyšší s klesajícím obsahem vody v prostředí hydratace betonu. Korelační koeficient byl nejnižší pro fitování spektra ztrátového činitele betonu, zrajícího na vzduchu.

4. Závěr

Metodou impedanční spektroskopie byl charakterizován beton, hydratující v různých prostředích. Odlíšnosti ve spektrech ztrátového činitele svědčili o nejpravděpodobnějších relaxačních dobách, umístěných mimo využitě spektrum frekvencí. Model spektra to potvrdil a určil tyto hodnoty. Obtížným a méně přesným označujeme fitování spektra ztrátového činitele pro beton tuhnoucí na vzduchu, na základě nízké hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu.

Poděkování

Tento výzkum byl proveden jako součást projektu GAČR **P104/10/P012** "Impedanční spektroskopie betonu s různými stupni kapilárních pórů" a **P104/11/0734** "Využití elektromagnetické emise ve výzkumu moderních kompozitních materiálů pro konstrukční aplikace". Autoři článku děkují za tuto podporu.

Příspěvek vznikl za podpory projektu „SUPMAT – Podpora pracovníků center pokročilých stavebních materiálů“. Registrační číslo projektu **CZ.1.07/2.3.00/20.0111**. Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Literatura

- [1] Kusák, I.; Luňák, M., *Tracking of concrete by means of impedance spectroscopy - electrical properties and porosity*, contribution at Proceedings of the 5th International Conference on dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, ISBN 978-80-554-0354-0, University of Žilina, 2011
- [2] Plšková, I.; Chobola, Z.; Matysík, M., *Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method*, Ceramics-Silikáty 55 [2] 2011, 176-182, ISSN 0862-5468, 2011
- [3] Luňák, M.; Kusák, I., *An application for the impedance spectroscopy method and building material testing*, Ministry of transport, ISSN 1802-971X, Brno, 2010
- [4] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Determination of the performance factor of a heat pump* (in Czech), paper in Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [5] Pazdera, L.; Topolář, L.; Bilek, V.; Smutný, J.; Kusák, I.; Luňák, M., *Measuring of Concrete Properties during Hardening*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7, 2010
- [6] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera L.; Topolář, L., Bilek V., *Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 233-240. ISBN: 978-80-244-2533-7, 2010
- [7] Kusák, I.; Luňák, M., *Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles*, paper in I. International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist InterTech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [8] Luňák, M.; Kusák, I., *Debye's model of impedance spectroscopy*, presented in the 2nd International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorząd Doktorantów Politechniki Poznanskiej, Poznan, 2009
- [9] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera, L., *Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy*, presented at the 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Desructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [10] Kusák, I.; Luňák, M.; Pazdera, L., *Impedance spectroscopy of self-compactible concrete during the setting process* in: NDT Welding Bulletin 2/2008, Volume 18, 22-25, issued in 10/2008, ISSN 1213-3825, 2008
- [11] Luňák, M.; Kusák, I.: *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, ISBN 978-83-926896-0-7, 2008
- [12] Mentlík, V: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-189-6.
- [13] Macdonald, J., R.: *Impedance spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*, bibliography, Canada 1987.



THE METHOD AND DEVICE FOR MEASURING OF MECHANICAL STRESSES IN COMPONENTS

V. MAKAROV, C. DEMIN

UVZ International S.à r.l. à Moscou

viam@yandex.ru

Abstract

*We offer a brand-new device to measure mechanical stress in constructional materials and metal and alloy materials. European patent for invention **EP 1251343** "Method and device for mechanical stresses measurement" was obtained for this device. It measures uniaxial and biaxial stresses on the basis of speed change effect of hardness tester ball springback. This device is absolutely safe in comparison with other ones based on other physical principles, for example, on X-ray method. Measurements provide reliable information about stress state of material surface coating with thickness form 0.15 till 0.5 mm depending on the type of metal and alloy.*

This device is especially important for use in the aircraft industry. Many assembly parts and elements are shotpeened and peenformed in the process of manufacture of underframe, hull, foil, fins.

The offered device can be redesigned or adjusted specifically to control some finishing process, for example, to strengthen an aircraft engine vane with glass shot or a device version to control the stress field directly in the wing panel cover during its strengthening or peenforming. It is completely safe and flexible in use.

The principle and essence of measurements will be the same in both the cases, but the devices differ in the program adjustment of the finishing of different materials and different depth of deformation.

Nowadays the welding stress is not controlled in any way in production of bodies and shells. Such control, undoubtedly, would increase safety of staying on space platforms. Not only aircraft companies show interest in our invention, but also the companies, which build oil- and gas pipelines to control welding stress. The data on distribution of stress fields inside an element enables evaluation of this element service life. In total it will result in the increase of fatigue resistance and reliability of aviation equipment.

It can be used for measurements of mechanical stress in products made of the following materials: construction steel, alloyed steel, aluminum alloy, cuprum alloy, titanium alloy.

UVZ International S.à r.l. à Moscou offers a brand-new method to measure mechanical stress in constructional materials and metal and alloy materials. This method is founded on the following effect: the velocity rebound of metal globule from surface of component with mechanical stresses and this component, but without stresses, will be very different. (Pic.1). And this different of velocity can be used for calculation of symbol and quantity of mechanical stresses on the surface of metallic components. European patent for invention **EP 1251343** "Method and device for mechanical stresses measurement" was obtained in 2006. This device is absolutely safe in comparison with other ones based on other physical principles, for example, on X-ray method. Measurements provide reliable information about stress state of material surface coating with thickness from 0.15 till 0.7 mm depending on the type of metal and alloy. (Photo.1, Photo.2)

This device is especially important for use in the aircraft industry. Many assembly parts and elements are shotpeened and peenformed in the process of manufacture of underframe, hull, foil, fins, panels and covers. The Almen method was normally used to control these finishing processes and their stability – use of witness samples. However, nowadays, it is necessary not only to know and be sure about the process stability, but also about the element processing quality.

In fact, its measurement limits for the depth of stress are actually the same as the recommended depth of the surface plastic deformation and the depth of beneficial compression strain created by this deformation during strengthening and peenforming (0.25-0.7 mm). When X-rays are used, no such concurrency is found and it creates additional problems. As nothing is known about the mechanical stress created in the entire thickness/depth of the processed surface layer inside the part. And this layer may ten times exceed the depth reached by X-rays. Besides, portable x-ray devices are not flexible enough for measurements, their functions are limited and their use requires taking special measures to protect the personnel and the operator.

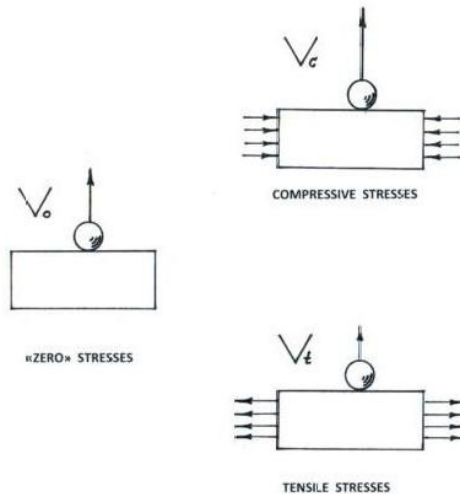
The offered device can be redesigned or adjusted specifically to control some finishing process, for example, to strengthen an aircraft engine vane with glass microballoons or a device version to control the stress field directly in the wing panel cover during its strengthening or peenforming.(Pic.3). It is completely safe and flexible in use.

The principle and essence of measurements will be the same in both the cases, but the devices differ in the program adjustment of the finishing of different materials and different depth of deformation.

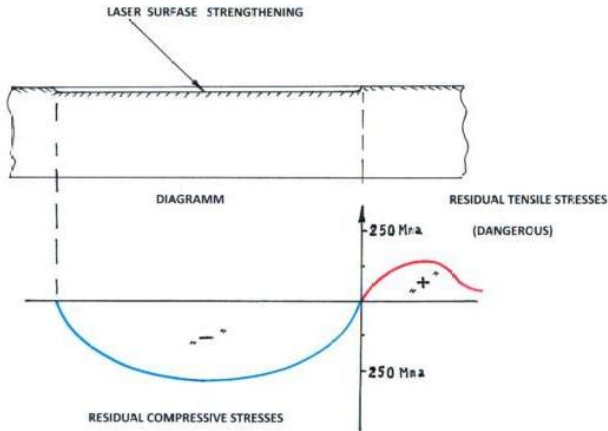
We believe that the device may be extremely useful for control of mechanical stress for manufacturing of modules and divisions of space platforms and satellites as welding is the main technological process in production of space station bodies and shells. The unfavorable conditions in the open space, the cyclic processes of heating-cooling and great radiation require a high quality of manufacture. Nowadays the welding stress is not controlled in any way in production of bodies and shells. Such

control, undoubtedly, would increase safety of staying on space platforms. Not only aircraft companies show interest in our invention, but also the companies, which build oil- and gas pipelines to control welding stress. The data on distribution of stress fields inside an element enables evaluation of this element service life. In total it will result in the increase of fatigue resistance and reliability of aviation equipment.

But, using of obtained results of investigations during in the past few years, we can to show, for example, the process of laser surface strengthening is not very reliability for aluminum alloys, because this process can to fabricate of dangerous tensile stresses on the surface components. (Pic.2)



Pic.1



Pic.2

The purpose of the device is:

- to measure, assembly and operating tension in important structures and junction points of aircrafts and watercrafts;
- to monitor stress in materials used in the near welding areas of important structures and, first of all, pipe installations under pressure and gasholders;
- to detect places where structural elements are most likely to break because of fatigue due to continuous cyclic use;
- to correct and adjust fatigue design by means of finite elements method (FEM) for aircrafts.

Basic characteristics:

Measurement range: till 0.8 of material yield limit

Measurement error: till 3% of material yield limit

Operating temperature range: from -15 °C till +30 °C

The device consists of mechatronic sensor having diameter 32 mm and length 164 mm and computer. The sensor is connected with the computer with cable. Its weight may vary from 320 till 410 gram depending on its completing units.

Computer may be in the form of notebook which is for portable usage or in the form of stationary computer for laboratory research. Amount of measurements is not limited. Time of one measurement is not more than 5 seconds. Computer contains programs for calculations of data from sensor and programs for graphing and construction of stress diagrams.

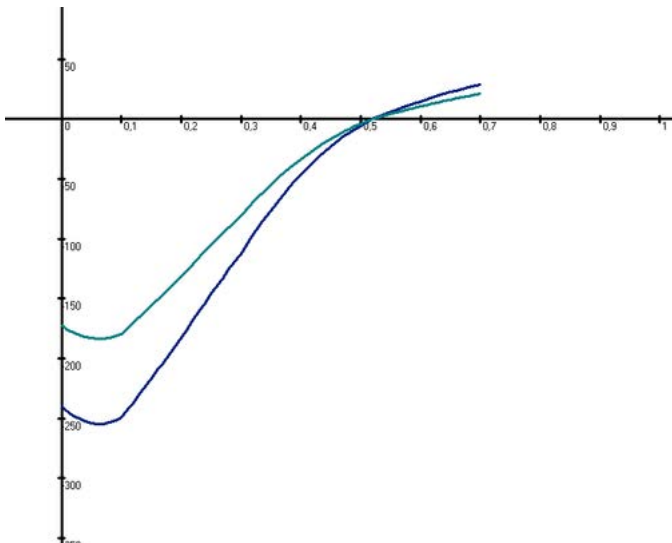
It can be used for measurements of mechanical stress in products made of the following materials: construction steel, alloyed steel, aluminum alloy, cuprum alloy, titanium alloy.



Photo1. The device for measuring of mechanical stresses



Photo2: Device for present measurement



Pic. 3 The diagram of measurement of residual stresses for alloy Д16Т after shotpining

Also, the offered device can be used for control of process of wear and process of age, for example, chemical reactors, are manufactured from titanium, what is very good of absorption of hydrogen with very dangerous process of fragile of chemical vessels. We can to reflection of this dangerous process in the time and to get of prevention against sudden destructions



PROBLEMATIKA ZKOUŠENÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ NA JE TYPU VVER DISSIMILAR METAL WELDS EXAMINATION ISSUES ON NPP TYPE WWER

Pavel MAREŠ, Ondřej HOUFEK, Ivan BULDRA

ÚJV Řež a.s.

Contact e-mail: mpa@ujv.cz, hfk@ujv.cz, bul@ujv.cz

Abstrakt

Zkoušení heterogenních svarů je velmi důležitou oblastí provozních kontrol, zejména z důvodu jejich náchylnosti ke koroznímu praskání. Proto je velmi důležité nalézt metodu, která zaručí detekci všech necelistvostí, které se mohou v těchto svarových spojích nacházet, a zároveň bude schopna určit jejich rozměry s velmi vysokou přesností.

Z pohledu ultrazukového zkoušení patří heterogenní svarové spoje k nejsložitějším aplikacím. Je to dáno tím, že tyto svarové spoje a zejména austenitický materiál jsou charakteristické hrubozrnou strukturou s výrazně orientovanými dendrity. Dále obsahují austenitický návar na rozhraní feritického materiálu a austenitického svaru. Tento návar je charakteristický velkým rozptylem UZ vlnění na zrnech struktury, lomem na rozhraní a ohybem ultrazukového svazku. Proto by měl být u těchto svarů kladen veliký důraz na prováděné kontroly.

Jedním z nejvíce problematických svarů, z hlediska UZ kontrol, je svar kolektoru parogenerátoru, který se nachází na JE Dukovany. U tohoto svaru je kontrola zkomplikována jednostranným přístupem, kdy je přístup umožněn pouze ze strany hlavního cirkulačního potrubí. Byly zde rovněž nalezeny indikace a to jak v ČR, tak i v zahraničí, proto je nutné se tomuto typu svarového spoje velmi podrobně věnovat.

Důležitým krokem pro získání co nejpřesnějších výsledků měření je vybrání optimální metody a zařízení. Mezi hlavní kontroly svaru kolektoru parogenerátoru patří v současné době impulsní odrazová metoda a jako dodatková je metoda phased array.

Tento příspěvek se zabývá prováděním UZ kontrol na zkušebních tělesech a jejich aplikaci na svarových spojích na JE.

Klíčová slova: heterogenní svary, phased array, ruční kontrola, automatizovaná kontrola

Abstract

Dissimilar metal welds examination is very important part of in-service examinations, primarily because of their susceptibility to stress corrosion cracking. Therefore it is very important to find a method that ensures the detection of any discontinuities that may be located in this weld joints and also will be able to determine their dimensions with very high accuracy.

In terms of ultrasonic examination dissimilar metal welds belong to the most complex applications. This is due to the fact that the welded joints and especially austenitic material is characterized by coarse-grained structure with strongly oriented dendrites. It also contains the austenitic buttering on interface between ferritic material and austenitic weld. This buttering is characterized by a large scatter of ultrasonic waves on the grains structure, refraction at the interface and bending of ultrasonic beam. Therefore, it should be placed in these welds great importance to the examinations.

One of the most problematic welds, in terms of ultrasound examinations, is steam generator collector weld, which is located on NPP Dukovany. Examination on this weld is complicated by one-sided access, where access can be done only from side of main circulation pipeline. There were also indications found in both the Czech Republic and abroad, so it is necessary devote to this type of weld in detail.

An important step for getting the most accurate examination results is to select optimal methods and equipment. Pulse echo method currently belongs to the main examination of steam generator collector weld and as supplementary method is phased array.

This paper deals with the implementation of ultrasonic examinations on the test blocks and on weld joints in NPP.

Key words: dissimilar metal welds, phased array, manual inspection, mechanized inspection

1. Úvod

Zkoušení heterogenních svarových spojů je velmi důležité z hlediska jejich náchylnosti ke koroznímu praskání. V současné době se u nás pro kontrolu svarů na JE ve většině případů využívá impulzní odrazová metoda. Pokud je ale ke svarovému spoji jednostranný přístup nebo je omezen pohyb sondy, tak mohou být schopnosti těchto jednoduchých sond silně omezeny. Oproti tomu phased array sondy díky využití sektorového skenování nejsou příliš náročné na skenovací prostor.

2. Svar kolektoru parogenerátoru

Daný svarový spoj patří k jednomu z nejvíce problematických heterogenních svarových spojů, se kterým jsme měli možnost se setkat na českých JE. V této kapitole bude vysvětlena celá problematika tohoto svarového spoje.

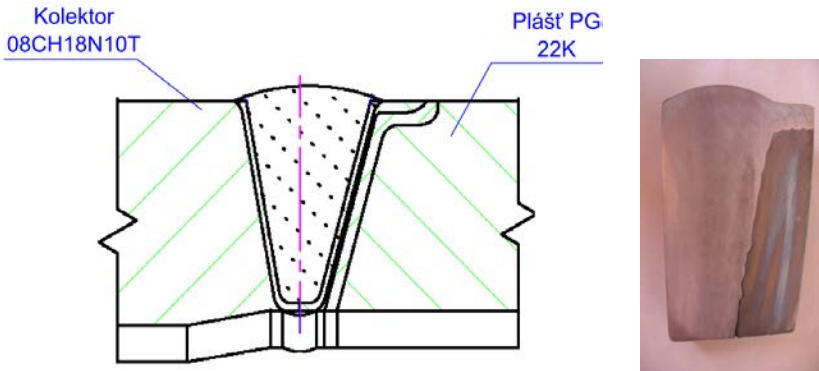
V průběhu prvních mechanizovaných UZ kontrol na EDU byly nalezeny dvě indikace na rozhraní austenitického svarového materiálu a feritického materiálu horkého kolektoru u parogenerátoru 2YB11W01 v roce 2000. Další jedna taková indikace (stejně polohy a celkového tvaru) byla nalezena v materiálu horkého kolektoru u parogenerátoru 4YB16W01 v roce 2001.

Po posouzení výsledků těchto UZ kontrol byly tyto indikace označeny jako geometrické indikace, resp. indikace od rozdílné struktury materiálu svarového kovu. Jelikož bylo stanoveno, že se jedná o indikace geometrické, tedy takové, které nemají svůj původ v přítomnosti makroskopických defektů (v těchto případech hlavně neprůvarů), byly rozměry těchto indikací vyhodnoceny pouze orientačně metodou poklesu maxima amplitudy indikace o 6 dB (na polovinu maximální hodnoty). Jako

ke geometrickým indikacím bylo k těmto přístupováno i při opakovaných UZ kontrolách, které v případě parogenerátoru 2YB11W01 proběhly v letech 2004 a 2010 a v případě parogenerátoru 4YB16W01 v letech 2002 a 2007.

Na počátku roku 2011 byly uveřejněny závažné skutečnosti, které změnilý náhled na možnost výskytu a hlavně hodnocení nálezů makroskopických defektů v heterogenních svarových spojích kolektorů parogenerátorů.

Jednalo se zde o skutečnost, že v těchto svarových spojích v provozech jaderných elektráren v Ruské federaci (konkrétně JE Novovoronežská a JE Kolská) bylo nalezeno celkem 5 defektů typu obvodových trhlin na rozhraní prvního austenitického návaru a základního materiálu v tepelně ovlivněné oblasti. Tyto trhliny jsou iniciovány (komunikují) od vnitřního povrchu (viz obr. 1) a je vážné podezření na jejich růst během provozu jaderného zařízení vlivem nebezpečné mezikrystalické koroze.



Obr.1 Schéma svaru (vlevo) a trhlina na rozhraní (vpravo)
Fig.1 Scheme of the weld (left side) and crack on interface (right side)

Dalším vstupem pro celkové zlepšení kvality provádění mechanizovaných UZ kontrol bylo dokončení výroby nového zkušebního tělesa. V tomto zkušebním tělese byly vyrobeny (mimo mnoho dalších) i defekty (celkem 4), které svoji polohou a ve třech případech i sklonem simulují s dobrou přesností výše popsané obvodové trhliny. Na tomto tělese byly provedeny praktické zkoušky, které obsahovaly nejenom kontrolu sondami, které jsou předepsány pro provádění provozních kontrol v EDU, ale i dalšími s rozdílnými úhly výstupů a frekvencemi UZ vlnění. Bylo provedeno zkoušení jak odrazovou metodou, tak i metodou phased array. Byly též prováděny kontroly z feritické části kolektoru. Možnost takových UZ kontrol je ovšem v reálném prostředí JE velmi omezena.



Obr.2 Zkušební těleso svaru kolektoru parogenerátoru (vlevo) a provádění praktické zkoušky (vpravo)

Fig.2 Test block of steam generator collector weld (left side) and performing of practical trials (right side)

Po uvážení všech těchto výše popsaných skutečností bylo rozhodnuto o provedení revize všech záznamů v kolektorech obou dotčených parogenerátorů a indikace se vyhodnotí znovu a to ve vylepšené verzi vyhodnocovacího SW (MASERA-NT) a s přístupem jako k indikacím od možných makroskopických nečistot na rozdíl od praxe s přístupem k indikacím geometrického charakteru.

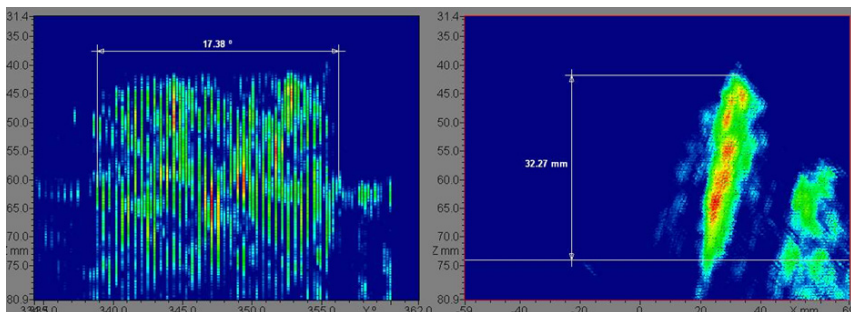
Toto nové vyhodnocení vedlo k revizi jak rozměrů nalezených indikací, tak i ke znepokojivému zjištění jejich růstu a tím pádem i k revizi popisů a závěrů plynoucích z nalezených výsledků.

Při posledních odstavkách bloků č.2 (2012) a 4 (2011) JE Dukovany byly provedeny detailní opakované UZ kontroly úseků heterogenních svarových spojů kolektorů parogenerátorů, ve kterých byly detekovány popisované indikace.

V místě indikace označované jako N1 na 4 .bloku bylo v úseku jejího výskytu provedeno odstranění převýšení koruny svarového spoje zbrúšením povrchu. Toto opatření umožnilo skenování UZ sondami přes materiál svarového spoje (kolmo na jeho osu) a ve svém výsledku umožnilo podstatně zpřesnit vyhodnocení hlavně výšky indikace. Výsledky kontrol dané indikace jsou uvedeny v následující tabulce

Rok	N1			
	L (mm)	H (mm)	ΔL (mm)	ΔH (mm)
2001	83,73	29,98	X	X
2002	92,74	30,00	+9,01	+0,02
2007	106,08	28,30	+22,35	-1,68
2011	166,83	32,27	+83,73	+2,29

Tab. 1 Výsledky kontrol indikace N1
Tab. 1 Results of examination of indication N1



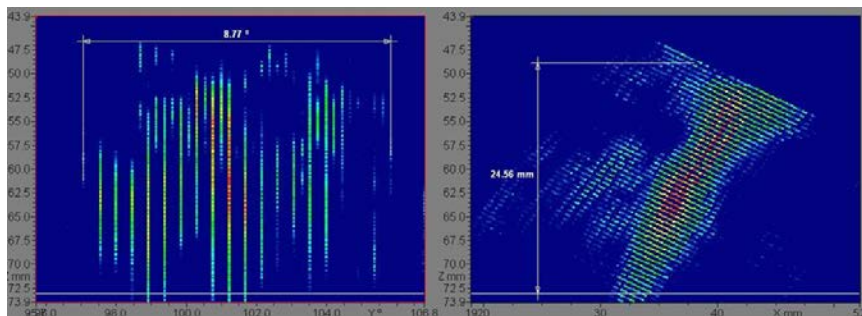
Obr.3 D a B zobrazení necelistvosti N1
Fig.3 D and C-scan of defect N1

Získané výsledky sloužili rovněž jako podklady pro simulaci pravděpodobného tvaru necelistvosti. Tyto simulace byly prováděny v softwaru CIVA.

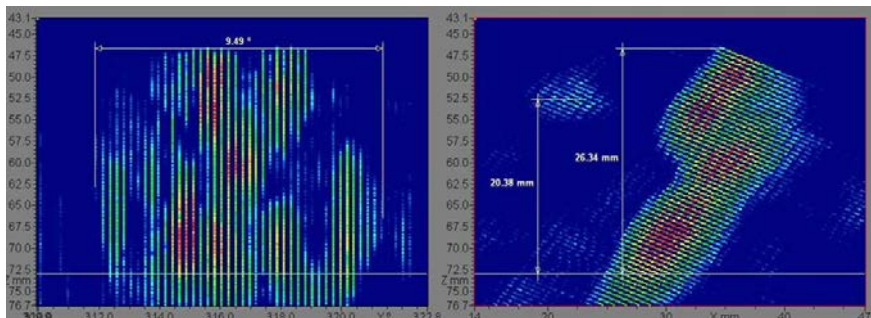
I přes doporučení nebyl provozovatelem, akceptován požadavek na odstranění převýšení koruny svarového spoje na kolektoru parogenerátoru na 2.bloku v místě výskytu indikací označených jako N1 a N2. Tato skutečnost se na neštěstí negativně projevila při vyhodnocování rozměrů indikace N2. U této indikace došlo k jejímu růstu nejenom ve smyslu její délky podél osy svarového spoje (stejně jako u všech vyhodnocovaných indikací), ale i ve smyslu její výšky od vnitřního povrchu.

Rok	N1				Rok	N2			
	L (mm)	H (mm)	ΔL (mm)	ΔH (mm)		L (mm)	H (mm)	ΔL (mm)	ΔH (mm)
2000	63,40	22,75	X	X	2000	63,11	19,54	X	X
2004	70,49	22,25	+7,09	-0,50	2004	70,49	20,51	+7,38	+0,97
2010	79,22	22,56	+15,82	+0,21	2010	---	---	---	---
2012	84,18	24,56	+20,78	+1,81	2012	91,09	min. 26,34	+27,98	min +6,80

Tab. 2 Výsledky kontrol indikací N1 a N2
Tab. 2 Results of examination of indications N1 and N2



Obr.4 D a B zobrazení necelistvosti N1
Fig.4 D and C-scan of defect N1

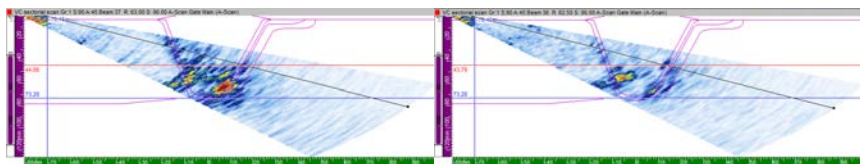


Obr.5 D a B zobrazení necelistvosti N2
Fig.5 D and C-scan of defect N2

Na daném svarovém spoji byly rovněž provedeny pracovníky ÚJV Řež a.s. kontroly metodou phased array. Díky sektorovému skenování v rozpětí úhlů 45° - 70° bylo možné zaznamenat celou necelistvost N2, která měla u odrazové metody oříznutý signál. Výsledky hodnocení rozměrů jsou uvedeny v následující tabulce.

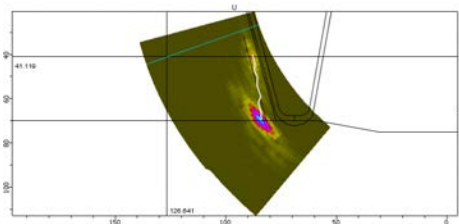
	Výška	Délka	Pozice (°)	Pozice (mm)	Metoda
N1	28,8	76	98,6 (96,4)	1032 (1009)	Crack Tip
N2	31,2	108	303 (311,1)	-599 (-522)	Crack Tip

Tab. 3 Výsledky kontrol metodou phased array indikací N1 a N2
Tab. 3 Results of examination of indications N1 and N2 by phased array method



Obr.5 Sektorové zobrazení necelistvosti N1(vlevo) a N2 (vpravo)
Fig.5 Sectorial scan of defects N1(right side) and N2(left side)

Získané výsledky sloužili rovněž jako podklady pro simulaci pravděpodobného tvaru necelistvosti. Tyto simulace byly prováděny v softwaru CIVA.



Obr. 6 Simulace tvaru necelistvosti N2
Fig. 6 Modeling of defect shape

3. Svarový spoj pod kompenzátořem objemu

Na tomto svarovém spoji bude předveden přínos metody phased array a simulací pro zkušeni heterogenních svarových spojů. Pro srovnání byly použity výsledky kvalifikace odrazovou metodou HSS pod KO VVER440. Výsledky jsou porovnány s PAUT kontrolou téhož svaru. Porovnání proběhlo pomocí kvalifikačního zkušebního tělesa s 11 defekty, z nichž je část v poloze, kde se obvykle nachází i PWSCC/SCC, jak je tomu na kolektorech parogenerátorů viz předchozí kapitola.

Defekt	Skutečná velikost	Odrazová metoda					Metoda phased array					OM -PAUT ΔH
		Odstraněná koruna svaru	Použité sondy	Metoda vyhodnocení	Naměřená výška		Použité sondy	Metoda vyhodnocení	Naměřená výška			
					[mm]	[Y/N]			[mm]	[mm]	[mm]	
P1	6,5	N	70° TRL2 (RTD 02-82)	Tip Diffraction	8,59	2,09	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	7,4	0,9	1,2	
P2	4	Y	60° T1.5 (RTD 05-1323)	6dB Drop	5,71	1,71	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	3,5	-0,5	1,2	
P3	13	N	70° TRL2 (RTD 02-82)	Tip Diffraction	11,7	-1,3	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	14,1	1,1	0,2	
P4	12,5	Y	60° TRL2 (RTD 02-79)	DRM	13,74	1,24	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	11,2	-1,3	0,0	
P5	16,5	N	70° TRL2 (RTD 02-82)	DRM	15,08	-1,42	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	15,7	-0,8	0,6	
P6	13	N	65° T1.5 (RTD 05-1323)	Tip Diffraction	13,68	0,68	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	14,0	1,0	0,3	
P7	18,5	N	65° T1.5 (RTD 05-1323)	Tip Diffraction	16,87	-1,63	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	18,4	-0,1	1,5	
P8	9,5	N	70° TRL2 (RTD 02-82)	6dB Drop	9,46	-0,04	3.5L16-A3_SA3-N60S	6dB drop	6,9	-2,6	-2,6	
P9	6	N	65° T1.5 (RTD 05-1323)	Tip Diffraction	7,95	1,95	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	6,6	0,6	1,4	
P10	4	N	65° T1.5 (RTD 05-1323)	6dB Drop	7,43	3,43	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	4,4	0,4	3,0	
P11	12	N	65° T1.5 (RTD 05-1323)	DRM	10,61	-1,39	3.5L16-A3_SA3-N60S	Tip Diffraction	10,9	-1,1	0,3	

Tab. 4 Porovnání výsledků klasické metody a metody phased
Tab. 4 Comparison of results of pulse echo and phased array method

Závěry plynoucí z tabulky jsou následující:

- Oproti odrazové metodě u využití PAUT není třeba odstraňovat převýšení svaru – hodnocení výšky defektů P2 a P4 lze provést ve výborné kvalitě (odchylka od skutečné výšky 0,5 a 1,3 mm), přičemž odrazovou metodou je výsledek PAUT s korunou svaru přesnější o 1,2 mm než hodnocení rozměrů s odstraněnou korunou svaru odrazovou metodou.
- Výsledky na detekci jsou srovnatelné, ale je velký rozdíl ve stanovení výšky indikací ve prospěch PAUT.
- U 5 defektů je hodnocení pomocí difrakce u metody PAUT navíc oproti odrazové metodě (porovnáním sloupců 5 a 9, ve sloupci 9 tučně). Maximální rozdíl je u indikace defektu P10, kde je rozdíl ve stanovení výšky indikací 3 mm ve prospěch PAUT (sloupec 12).
- Zatímco odrazovou metodou je odchylka stanovení výšky indikací defektů od skutečného rozměru větší než 1 mm pro odrazovou metodu u 9 indikací defektů z 12 (sloupec 7) u PAUT měření pouze jen u 4 indikací defektů (sloupec 11).

Během přípravy, provádění a vyhodnocování výsledků mechanizovaných UZ kontrol heterogenního svarového spoje hrdla kompenzátoru objemu na 2. bloku JE Dukovany byly zjištěny podstatné rozměrové odchylky mezi skutečnými rozměry a tvary hrdel na ostatních blocích jaderné elektrárny.

Bylo zjištěno, že se jedná o kus vyrobený v bývalé PLR dodaný do EDU náhradou za původně projektovaný výrobek tehdejšího n.p. NHKG Vítkovice. Zásadním rozdílem mezi tělesy KO dodávanými do EDU a projektovanými pro ostatní JE tohoto typu (zejména potom dodávanými do SSSR) je tloušťka stěny základního materiálu. Zatímco byl inspekční postup navržen pro tloušťku materiálu 30 mm, skutečná tloušťka materiálu KO na 2. bloku EDU je dle získané projektové dokumentace 52,5 mm. Zkušební těleso, které bylo vyrobeno, kopíruje svarový spoj na 1., 3. a 4. bloku. Pro svar, který se nachází na 2. bloku, zkušební těleso vyrobeno nebylo. Proto bylo nutné ověřit pomocí simulací v softwaru CIVA možnosti zkoušení na tomto svarovém spoji.

4. Závěr

Z výše uvedených výsledků je patrné, že kontroly heterogenních svarových spojů jsou nezbytné pro včasné zjištění korozního praskání a získávání údajů o jejich celkovém stavu. Pokud je konfigurace svaru složitá je nutné využít i další metody, které zajistí, jak proskenování celého objemu svaru, tak přesného hodnocení rozměrů případných necelistvostí. Mezi takovéto metody patří např. metoda phased array. Tato metoda dokáže v některých případech rovněž zkrátit čas potřebný pro kontrolu a tím pádem snížit radiační dávky personálu a zařízení (pokud se měření provádí v prostředí s ionizujícím zářením).

Doporučení nahrazení nebo doplnění odrazové metody metodou phased array nesnižuje kvalitu kvalifikovaných kontrol odrazovou metodou HSS, ale zdůrazňuje existenci modernější UT metody, kterou lze použít ke zvýšení bezpečnosti a především spolehlivosti výsledků PPK, což lze prokázat přísnějšími kvalifikačními kritérii, kterým PAUT vyhovuje. Zcela jednoznačným faktem zůstává doporučení PAUT kontroly v případě omezené přístupnosti nebo nutnosti využít jen ruční odrazovou kontrolu.



ALGORITMY ANALÝZY IMPACT-ECHO SIGNÁLŮ PRO STANOVENÍ DEFEKTŮ ALGORITHMS FOR ANALYSIS OF IMPACT-ECHO SIGNALS FOR DETERMINATION OF DEFECT

Valeria NENAKHOVA, Karel HÁJEK

University of Defence Brno, Dpt. of Electrical Engineering

Contact e-mail: valeriy.nenakhova@unob.cz

Abstrakt

NDT metoda, založená na prosté spektrální analýze celého záznamu I-E signálu, nevyužívá všechny informace v něm obsažené a zbytečně tak omezuje svou citlivost. Proto byly publikovány různé detailní analýzy I-E signálu se snahou o zdokonalení této metody. Článek ukazuje konkrétní postupy, které vedou přímému stanovení defektu na základě jeho nelineárního projevu, kdy dochází k časově závislé kmitočtové odchylce některých rezonančních složek. Je ukázáno praktické ověření algoritmů na vzorku s defektem.

Klíčová slova: Impact echo, analýza signálu, nelineární spektroskopie

Abstract

One NDT method use simple analysis of all I-E signal. It doesn't make use of all information from this signal. Therefore it limits their sensitivity. Therefore there were published various detailed analysis of I-E signal with effort to improve of this method. This paper shows concrete procedures which lead to direct determination of bad sample with defect. It is based on its nonlinear effect when it causes the time dependent frequency shift of some resonance components. It is shown the practical verification of these algorithms.

Key words: Impact echo, signal analysis, nonlinear spectroscopy

1. Úvod

NDT metoda využívající frekvenční analýzu I-E signálu začíná být využívána v běžné praxi a je výhodná pro levnou a rychlou kontrolu menších a levnějších dílů s výraznými akustickými vlastnostmi (kovy, keramika atp.). Využívá historicky nejstarší NDT princip, kdy „spektrální analýzu“ prováděnu sluchem používali hrnčíři, zvonáři a mnoho dalších profesí. S rozvojem technologií a především počítačů přešlo na diskrétní furierovskou spektrální analýzu (rychlá Fourierova transformace - FFT), která odstranila subjektivitu a zvýšila kmitočtovou rozlišitelnost a tím i teoretickou citlivost. Dosažení dostatečné praktické citlivosti vyžaduje vytvoření co nestabilnějšího způsobu testování (stabilita budícího úderu, stabilita umístění testovaného tělesa) a naslímání co největšího počtu referenčních signálů z nepoškozených těles. Důležité je pak následně vytvořit správná testovací kritéria na povolené odchylky vypočítaného kmitočtového spektra. Je zřejmé, že nastavení testovací aparatury je trochu pracné a vyžaduje určité znalosti a zkušenosti. Z toho

vyplývá, že se takovéto testování vyplatí pro sériovou výrobu s velkou produkcí. V tom případě se tato metoda stává provozně velmi levnou, protože vlastní provozní náklady jsou minimální, zařízení pracuje naprosto automaticky a s velkou rychlostí cca 1 test/sec. Příklad aplikace této metody je uveden v [6], [7].

Na druhou stranu má tato metoda některé nedostatky. Jednak je její citlivost na malé defekty také omezená a dále neumí rozeznat např. rozdíly spektra způsobené povolenými tolerancemi rozměrů a defekty. Hlavní důvod vyplývá ze samotného principu FFT spektrální analýzy. Ten spočívá v počítání průměrného spektra z celé doby záznamu I-E signálu. Nedokáže tak zjistit informace vyplývající z časové a intenzitně proměnného působení tohoto signálu na testované těleso (viz obr. 1). Určitou nevýhodou je v případě širokospektrálního vyhodnocování i lineární osa FFT s malým relativním rozlišením pro nízké kmitočty a vysokým rozlišením pro vysoké kmitočty. Zde je kupodivu na tom lépe „spektrální analýza“ prováděná lidským sluchem. To totiž neprovádí klasickou fourierovskou analýzu ale frekvenčně-časovou analýzu v logaritmické ose kmitočtu. Navíc je „zpracování v mozku“ zvýšeně citlivé na intermodulační složky (zní disharmonicky) oproti vyšším harmonickým složkám (zní harmonicky). Proto dokáže rozlišit špatný vzorek i bez „vytvoření statistického referenčního modelu“ poslechem velkého množství dobrých vzorků.

Proto je snahou provádět podrobnější časově spektrální analýzu I-E signálu s cílem získat ze změřeného signálu co nejvíce informací a zvýšit tak praktickou citlivost metody a snížit její citlivost na nestabilitu testování a na potřebu přesné reference. V tomto směru byly publikovány různé úvodní studie a analýzy [3], [4], [5] vycházejí z různých předpokládaných aspektů projevu defektů v I-E signálu i z různých technik analýzy těchto signálů. Proto je cílem tohoto příspěvku uvést ověřené prakticky aplikovatelné algoritmy pro automatizované měření.

2. Metoda vyhodnocující odchylky rezonančních kmitočtů v časově frekvenčním obrazu I-E signálu

Základní časový průběh I-E signálu s typickým exponenciálním tlumením jeho amplitudy (obr. 1a) je velmi dobře znám a publikován v mnoha pramenech. Detekce poruch a defektů testovaných těles se provádí vesměs ve spektrální oblasti a je sledováno více vlastností snímaných I-E signálů založených na různých fyzikálních projevech.

Příklad nasnímaného I-E signálu je ukázán na obr. 1. Je zaznamenán se vzorkovacím kmitočtem $T_S = 5.12 \mu\text{s}$. Celá délka záznamu vyplývá z počtu zaznamenaných vzorků ($N = 65536$) a je dána vztahem $T_A = NT_S = 335 \text{ ms}$ (obr. 1 a). Náš zájem se soustřeďuje na vyjádření tohoto signálu v kmitočtové oblasti (obr. 1 b), získané pomocí FFT. Frekvenční osa tohoto spektrálního zobrazení je omezena dvěma hodnotami. Maximální kmitočet odpovídá podle vzorkovacího teoremů polovině vzorkovacího kmitočtu F_S , který plyne ze vzorkovací periody.

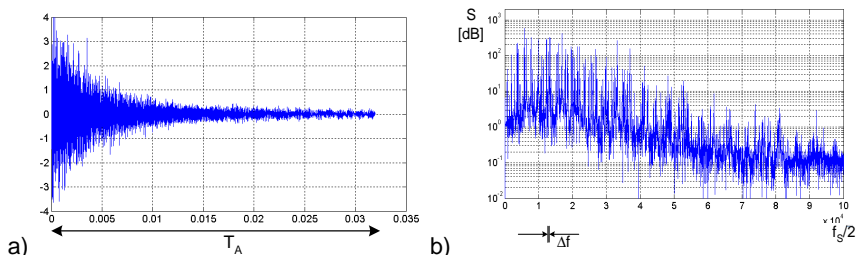
$$F_S = 1/T_S \quad (1)$$

V našem případě je to $F_S/2 = 97653 \text{ Hz}$. Druhý důležitý parametr vyjadřuje minimální frekvenční rozlišení Δf kmitočtové osy

$$\Delta f = 1/T_A \quad (2)$$

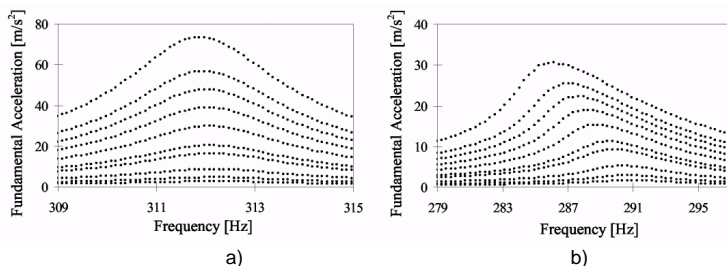
jako formální 1. harmonická složka klasické Fourierovy řady, jak to odpovídá FFT. V našem případě je $\Delta f = 2,98 \text{ Hz}$ výsledné spektrum má 32 768 složek (jako $N/2$).

Zásadní otázkou je, zda toto kmitočtové rozlišení je dostačující pro dostatečně přesné zobrazení dominantních rezonančních složek signálu. Tento problém bude diskutován později.



Obr. 1: I-E signál v časové (a) a kmitočtové (b) rovině.

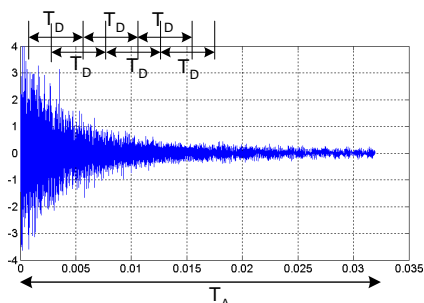
Kmitočtový obraz IE signálu podle obr. 1b odpovídá dosud používané metodě analýzy se zprůměrovaným spektrem celého časově proměnného signálu. Jak již bylo výše naznačeno, časová změna intenzity působení I-E signálu se v případě defektů může projevovat změnou hodnot dominantních rezonančních kmitočtů jeho spektra. To vyplývá ze známého nelineárního projevu defektu, způsobujícího posuv rezonančního kmitočtu tělesa [1]. Jak je z obr. 2 zřejmé, při monochromatickém harmonickém vybuzení (poměrně pracná a nákladná metoda SIMONRAS) získáme pro různou intenzitu buzení rezonanční charakteristiky s měřitelným posuvem rezonančního kmitočtu (obr. 2b).



Obr. 2. Příklad závislosti rezonančního kmitočtu testovaného tělesa na intenzitě vybuzení pro a) nepoškozený a b) poškozený vzorek (viz [1])

Tento efekt se projevuje nejen při harmonickém, ale i při obecném vybuzení a proto se nabízí využít těchto poznatků i při analýze I-E signálu, protože testování jednorázovým úderem je značně jednodušší, rychlejší a levnější, než harmonické buzení s nastavovanou amplitudou budícího signálu v metodě SIMONRAS. V případě buzení úderem je zřejmé, že intenzita mechanického kmitání v tělese je nejvyšší v počátku odezvy a pak exponenciálně klesá. Proto lze sledovat tento jev nejen jako závislost na intenzitě, ale i závislost na čase. Na druhou stranu je zřejmé, že s ohledem na exponenciální průběh je doba intenzivního působení signálu relativně krátká, působí jen v počátku odezvy. Jak z tohoto rozboru vyplývá, potřebujeme vyhodnotit časovou změnu spektra a tím i změnu spektra jako funkci vybuzení a konkrétně časovou závislost kmitočtů dominantních rezonančních složek.

Pro získání časově-frekvenčních charakteristik signálu existuje více přístupů a typickou obecnou metodou je tzv. vlnková transformace (WT). Na druhou stranu limitujícím faktorem všech těchto přístupů je kmitočtová rozlišitelnost, protože zde platí také princip neurčitosti: čím přesněji určíme časovou osu charakteristiky, tím méně přesně rozlišíme kmitočet a naopak. Vzhledem k tomu, že přesnost rozlišení kmitočtu je zásadním parametrem citlivosti této metody, je zřejmé, že volba metody analýzy může hrát rozhodující roli. V tomto případě nepotřebujeme získávat obecnou časovou závislost kmitočtů dominantních složek, ale víme, že jde o závislost do značné míry monotónní. Nám jde o zjištění maximální odchylky kmitočtu při nejintenzivnějším působení oproti slabému signálu, proto jsme použili tzv. krátkou DFT (STFT), počítanou pro kratší segmenty záznamu signálu, jak jsou naznačeny na obr. 3.

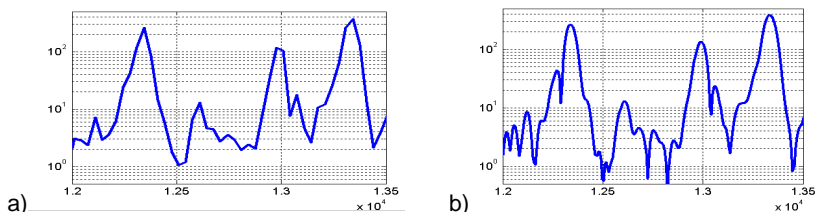


Obr. 3 Dělení I-E signálu na segmenty

Jako přijatelný kompromis jsme vybrali ze záznamu 6 stejně dlouhých přes sebe překládaných úseků o délce 20% celého záznamu. Je zde ale možnost optimalizace s ohledem na vlastnosti snímaného signálu. Jak již bylo uvedeno, zásadním problémem je snížení rozlišitelnosti kmitočtového spektra. Ve zvoleném případě dojde ke snížení délky úseku pro FFT z T_A na T_D pětkrát a tudíž i ke snížení rozlišitelnosti

$$\Delta f = 1 / T_D = 5 / T_A \quad (3)$$

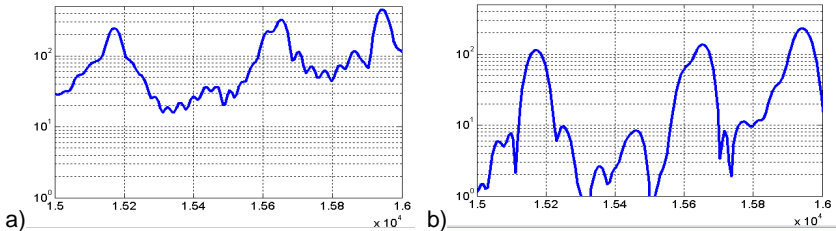
V našem případě rozlišitelnost klesla pětkrát na $\Delta f = 14,9$ Hz. Proto jsme se snažili zvýšit rozlišení kmitočtového spektra pro tyto dílčí úseky záznamu. Použili jsme nejjednodušší známou metodu, tzv. doplnění nulami. Jako optimální se jeví prodloužení úseku T_D 8x, další prodloužování rozlišení složek nezvyšovalo (viz obr. 4).



Obr. 4. Rozlišení spektra v závislosti na délce časového intervalu: a) $T_D = T_A/5$, c) T_D je prodloužena nulami 8x.

Další cestou pro zdokonalení analýzy I-E signálu je zvýšení dynamického rozsahu měření použitím okénkové funkce, která minimalizuje efekt „rozmazání“ spektrálních složek. Pro základní pravouhlé okénko lze dosáhnout velmi malý dynamický rozsah cca 20-30 dB (obr. 5.a), kdy ale nedojde k rozšíření „šířky pásma“ maxim rezonančních složek a ty jsou detekovány nejpřesněji. Ovšem menší dynamický rozsah může vést snadněji k detekci nesprávných harmonických složek. Oproti tomu vhodná okénková funkce (např. Hamming) zvýší podstatně potlačení efektu rozmazání a tím i dynamický rozsah na cca 50 dB, ale na druhou stranu asi 1,6x rozšíří pásmo maxim a zhorší tak možnost kmitočtového rozlišení (obr. 5.b).

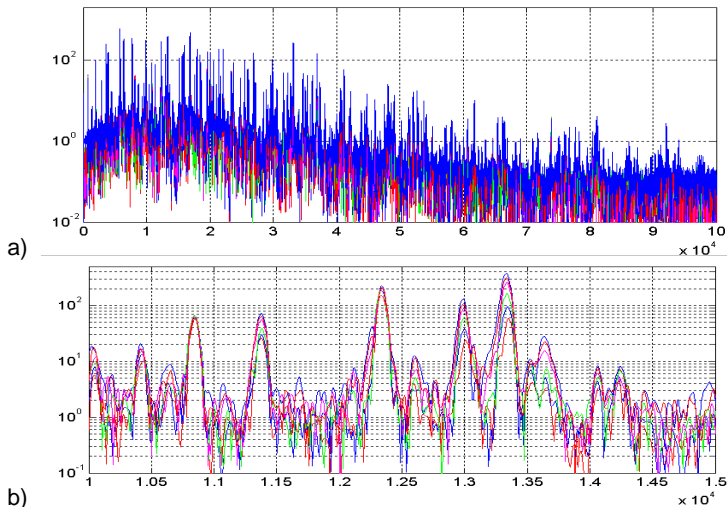
Další typy často používaných okénkových funkcí (Hann, Bartlet atd.) mají efekt snížení rozlišení obvykle ještě vyšší. Proto je vhodné využívat tyto funkce obezřetně popř. v kombinaci podle cíle daného kroku analýzy a typických vlastností signálu.



Obr. 5. Detail spektra a) s pravoúhlym okénkem, b) s okénkem typu Hamming (není kompenzován pokles úrovně cca 2,1x vlivem okénka).

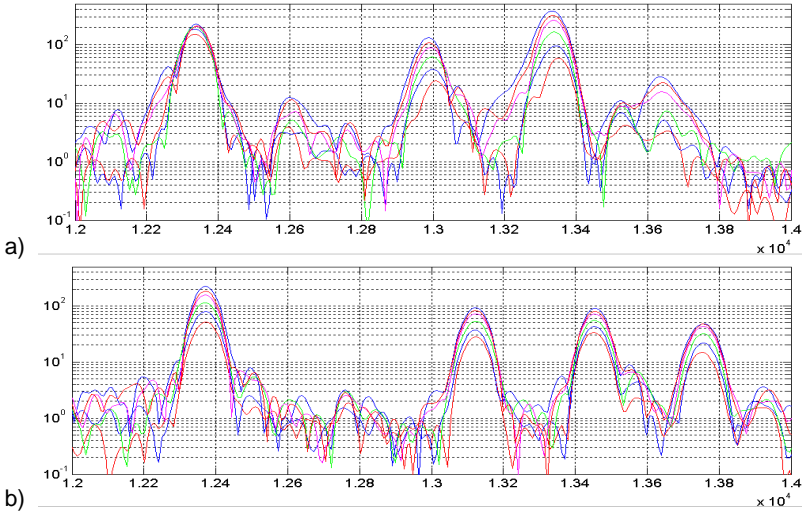
3. Postupy analýzy kmitočtových odchylek

Výše uvedeným postupem získáváme sadu šesti spekter pro jeden záznam I-E. Příklad sady šesti spekter vadného vzorku je ukázán na obr. 6 a. Vzhledem k velké hustotě složek a malé přehlednosti je na obr 6 b) ukázán výřez spektra pro pásmo 10-15 kHz. Na tomto obrázku a ještě názorněji na obr. 7 s detaily spekter je zřejmý pokles hodnot spekter v závislosti na intenzitě I-E signálu vybraných úseků.



Obr. 6. Sada šesti spekter odpovídajících šesti vybraným úsekům záznamu: a) pro celé kmitočtové pásmo, b) výřez pro pásmo 10-15 kHz.

Protože ani výřez spektra z obr. 6b) není dostatečně podrobný pro posouzení vzniku kmitočtového posuvu dominantních rezonančních složek, jsou na obr. 7 ukázány detaily spekter pro vzorek s defektem a bez defektu. Z tohoto obrázku je zřejmé, že u defektního vzorku je evidentní vyšší nestabilita kmitočtu dominantních rezonančních složek v závislosti na vybuzení (12 990 Hz, 13330 Hz). Dále je zřejmé, že se hodnoty rezonančních složek obou vzorků částečně liší.



Obr. 7. Detaily spekter šesti vybraných úseků záznamu: a) vzorek s defektem, b) pro vzorek bez defektu.

Realizace počítačových algoritmů pro spolehlivé rozpoznání vadných a dobrých vzorků ale vyžaduje řešení více otázek, z nichž jsou důležité především tyto:

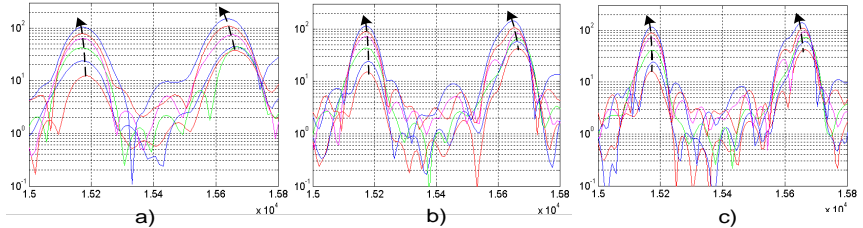
- nalezení kmitočtů maxim a volba těch složek, u kterých bude posuzována jejich nestabilita
- vyloučení jevů, které se projevují jako nestabilita ale nestabilitou nejsou
- posouzení míry mezi přijatelnou a nepřijatelnou nestabilitou

Při řešení prvního problému (a) je nutno v první fázi algoritmicky nalézt kmitočty a hodnoty všech maxim spektra pro první úsek, což je relativně jednoduchá úloha. Následně je nutno z tohoto souboru s několika tisíci složkami vybrat dominantní složky podle kritéria jejich dostatečné velikosti. Zde jsou v zásadě dva možné přístupy, a to buď s konstantním prahem anebo s mezí, která kopíruje kmitočtovou závislost střední hodnoty spektra. Pro jednoduchost jsme zvolili první případ, kdy byl práh stanoven jako 3% hodnoty maximální složky. Tímto postupem získáváme zúžený soubor s počtem cca stovek dominantních kmitočtových složek pro první úsek. Dále je potřebné najít kmitočty odpovídajících si maxim pro další úseky signálu a přiřadit je do odpovídajících šestic k maximům z prvního úseku. To přináší problémy a nejednoznačnosti se stanovením přijatelné odchylky především pro nižší úrovně signálů.

Řešení bodů (b) a (c) spolu do značné míry souvisí, cílem je algoritmicky stanovit, které složky vykazují kmitočtový posun odpovídající projevu defektu typu prasklina. Vzhledem k tomu, že zde nejsou jednoznačné projevy a meze, bude úspěšnost tohoto postupu určovat citlivost celého testu.

Problém nejednoznačnosti tohoto testu spočívá v poměrně vysoké hustotě různých rezonančních složek s různými velikostmi a různými časovými závislostmi. Proto např. dvě velmi blízké složky, kdy jedna je dominantní a druhá relativně malá

s rychlým poklesem amplitudy je vzhledem k nedostatečnému rozlišení vyhodnocována analýzou FFT vyhodnocena jako jedna složka s výslednou závislostí ekvivalentního kmitočtu vypočteného maxima na čase. Pak může být falešně vyhodnocována jako projev či silnější míra projevu defektu. Proto je vhodné dále optimalizovat délku vyhodnocovaného úseku T_D . Příklad souborů spekter pro délky 15, 25 a 30% z délky T_A je uveden na obr. 8. Zde je zřejmě pozorovatelná nesprávně vyhodnocená hodnota posuvu vlivem nedostatečného rozlišení na obr. 8. a) pro obě maxima, délka úseků 25% se jeví jako již dostačující.



Obr. 8. Vliv volby délky úseku T_D na kmitočtovou rozlišitelnost: a) $T_D=0.15T_A$, b) $T_D=0.25T_A$, c) $T_D=0.3T_A$.

V algoritickém postupu je vhodné nejprve podle nastaveného prahu ze souboru dominantních maxim vydělit soubor složek, které překračují stanovenou kmitočtovou odchylku v časové závislosti. Následně je pak možné podle zvolených kritérií dále eliminovat ty složky, jejichž kmitočtový posuv není způsoben defektem. Jedno z takových kritérií je např. směr časové závislosti odchylky (jestli kmitočty roste či klesá), další je změna velikosti odchylky v závislosti na čase, kdy hodnota odchylky by měla klesat adekvátně poklesu amplitudy apod. Jako možný testovaný výsledek lze použít průměrnou odchylku či součet odchylek.

4. Experimentální ověření postupu analýzy

Pro ověřování jsme použili 5 záznamů IE signálu z dobrého vzorku a dvakrát 5 záznamů ze špatného vzorku naprasklé lopatky turbíny leteckého motoru (obr. 9), získané pro úderu do dvou různých míst tělesa. Prasklina byla cca 15 mm dlouhá, uzavřená, ve středu lopatky (obr. 9 b). Získané hodnoty kmitočtových odchylek jsou uvedeny v Tab. 1. Jsou zde uvedeny jak průměrné odchylky jednotlivých měření, tak i počty vyhodnocených rezonančních složek a součty odchylek pro každé měření. Ve všech těchto parametrech je jednoznačně vidět podstatný rozdíl mezi hodnotami získanými pro dobrý a pro špatný vzorek, přičemž druhé měření pro špatný vzorek s odlišným místem úderu vykazovalo poněkud vyšší hodnoty než první měření špatného vzorku.

Tab. 1. Naměřené hodnoty kmitočtových odchylek u dobrého a špatného vzorku

Čís. měř.	Dobrý			Špatný 1. měření			Špatný 2. měření		
	Ø odch.	Pocet	Σ odch.	Ø odch.	Pocet	Σ odch.	Ø odch.	Pocet	Σ odch.
1	5,9	21	123	13,8	53	734	16,7	54	901
2	8,8	23	201	15,1	39	588	19,0	54	1026
3	6,2	36	224	18,1	35	633	19,0	54	1026
Ø	7,0	27	183	15,7	42	652	18,2	54	984



Obr. 9. Testovaná lopatka s defektem: a) celkový záběr, b) detail s defektem (zvětšeno 20x).

5. Závěr

Příspěvek ukazuje možnosti algoritmizace pro automatizované testování defektů těles s rezonančními vlastnostmi pomocí časové spektrální analýzy I-E signálu. Tato metoda vyhodnocuje časový vývoj kmitočtových odchylek jednotlivých dominantních rezonančních složek, z něhož lze usuzovat na existenci praskliny. Dále rozebírá možnosti vzniku a eliminace nesprávných detekcí kmitočtových posuvů, které nejsou způsobeny defektem. Praktické ověření této metody ukázalo její použitelnost i pro relativně malý a málo se projevující defekt navíc bez potřeby vytvoření statistické sady vzorků. Oproti v současnosti používané metodě [6], [7] má prezentovaná metoda tři základní výhody:

- 1) vyšší citlivost (schopnost detekce menších defektů),
- 2) menší citlivost na přesnost testovacích podmínek,
- 3) schopnost odlišit defekty typu prasklina od rozměrových nepřesností.

Tato práce byla podpořena prostředky grantové agentury ČR pro grant 102/09/H074.

Literatura

- [1] Van Den Abeele K. A., Carmeliet, J., TenCate, J. A. Johnson P. A. "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage. Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy". *Res. Nondestr. Eval.* 12/1, 31-42, 2000.
- [2] Jaeger, B.J., Sansalone, M.J., and Poston, R.W. "Using Impact-Echo to Assess Tendon Ducts," *Concrete International*, Vol. 19, No.2, February 1997, pp. 42-46.
- [3] Hájek K, Šikula, J. A Resonance Frequency Shift in Spectral Analysis of the Impact Echo. Proceedings of the International Symposium 18th ISNA 2008, Stockholm. S. 525-528. ISBN: 978-0-7354-0544-8 (ISSN 0094-243X).
- [4] Hájek K. Šikula, J. Analysis of Impact-Echo Signal of Nonlinear Damaged Elements in Frequency-Time Domain. Proceedings of the International Workshop NDT in Progress. Praha, 2009, pp., 93 – 100, ISBN 978-80-214-3968-9
- [5] Hájek K. Šikula, J. Bajer, J. Detailed Analysis of Impact-Echo Signals of Specimens with Nonlinear Effects. ECCTD 2010, Moskva
- [6] Hertlin, I. Acoustic resonance analysis. Castell Verlag Wuppertal. http://www.rte.de/en/Downloads_en/PROSP_en/AM/rte_prosp_am_order_form_book_acoustic_resonance_analysis.pdf?id=674
- [7] Stultz, R.G., Bono, R.W., Schiefer, M.I Fundamentals of Resonant Acoustic Method NDT. <http://www.processvibration.com/filelibrary/White%20Paper%20NDT-RAM.pdf>



COMPARATIVE ANALYSIS OF NONDESTRUCTIVE BRICK WALL DAMPNESS ASSESSMENTS BASED ON HYPOTHETICAL DEPENDENCE AND CORRELATIONAL DEPENDENCE

Adelajda PALA

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Contact e-mail: adelajda.pala@pwr.wroc.pl

Abstract

This paper presents a comparative analysis of nondestructive assessments of the moisture content in the brick walls of a building structure, made on the basis of respectively a hypothetical dependence and a correlational dependence. The dielectric technique and a Uni moisture meter with the B50 probe were used for the nondestructive tests. The dielectric technique is a popular nondestructive technique enabling one to correctly determine wall dampness, provided the moisture meter is previously calibrated. It is recommended to do calibration through a correlation analysis of at least 30 pairs of results obtained destructively and nondestructively. If it is not possible to destructively obtain such a large number of results (e.g. because the required number of samples cannot be taken from the masonry), one can select a hypothetical (approximate) dependence between moisture meter indication X and the real value of mass moisture content U_m . In such a case, there are usually no more than six pairs of results. If the mass moisture content in masonry is determined using a hypothetical dependence then the question arises: how close are the obtained results to the ones which would be obtained using a precise correlational dependence? This paper provides the answer to this question.

Key words: dampness, moisture meter, hypothetical and correlational dependences

1. Introduction

Many old masonry building structures have ineffective or no horizontal or vertical wall dampproofing. This is the main cause of their excessive dampness resulting from the capillary ascent of water from the ground. Specialist moisture tests need to be carried out in order to eliminate the causes and consequences of moisture accumulation.

Moisture content measuring techniques are divided into destructive (disturbing the structure of masonry) and nondestructive (noninvasive) methods. The latter are more popular since they can be used in any number of places as well as repeatedly at different times in the same places.

The dielectric technique is a popular noninvasive technique which after the moisture meter is calibrated enables one to accurately assess the moisture content in masonry. It is recommended to do calibration through a correlation analysis of at

least 30 pairs of results obtained destructively and nondestructively. If it is not possible to destructively obtain such a large number of results (e.g. because the required number of samples cannot be taken from the masonry), one can select a hypothetical (approximate) dependence between moisture meter indication X and the real value of mass moisture content U_m . In such a case, there are no more than six pairs of results. As far as possible, one should then try to use dependencies previously determined for similar, age- and materialwise, building structures [1].

If the mass moisture content in masonry is determined using a hypothetical dependence, then the question arises: how close are the obtained results to the ones which would be obtained using a precise correlational dependence? As part of this research an attempt was made to find the answer to this question through a two-stage evaluation of the moisture content in the walls of a building structure, using first a hypothetical dependence and then a precise dependence determined on the basis of a correlation analysis.

2. Tests and their results

The brick walls of the cellars in a building dating back to 1850 located in Wrocław were subjected to moisture tests. The walls are 50-100 cm thick. The moisture content in the walls was measured at a height of 20-200 cm from the floor, as shown in fig. 1, by the nondestructive dielectric method using a UNI moisture meter with a ball probe and by the destructive drier-balance method using a drier-balance (fig. 2).

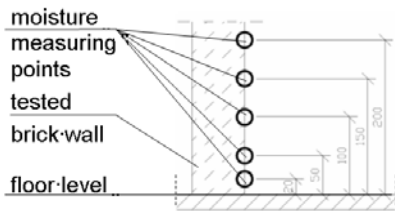


Fig.1. Measuring place (each measuring place consisted of five measuring points along wall height). Fig. 2. Moisture meter Uni with probe B50 (left) and drier-balance (right).

A dependence between moisture meter indication X and wall mass moisture U_m was selected in two stages. In the first stage, only six $X-U_m$ pairs of results were available, as compared to thirty pairs in the second stage.

First using the test results shown in columns 2 and 3 in table 1 a hypothetical dependence $X-U_{mh}$ described by equation (1)

$$U_{mh}=0.13X-2.35 \tag{1}$$

was selected from the database of the Institute of Building Engineering at Wrocław University of Technology. Variation coefficient v_k calculated for this dependence

amounted to 15% > 12%, indicating that the hypothetical dependence was incorrect and according to [2] it had to be corrected through coefficient C. Ultimately, after the correction the hypothetical dependence assumed the form of a linear function described by equation (2)

$$U_{mhs} = C \cdot U_{mh} = 1.08 (0.13X - 2.35) = 0.14X - 2.53. \quad (2)$$

After the correction, the variation coefficient amounted to 10% < 12%. The above dependence, shown graphically in fig. 3, was used to determine the mass moisture content in the walls of the tested building (tab. 1, column 5).

Tab. 1. Comparison of moisture meter indications X and mass moisture content determined by drier-balance method and mass moisture content determined using hypothetical dependence (1) and corrected hypothetical dependence (2).

Number of test i in measuring place j . [i / j]	Moisture meter indication X [-]	Mass moisture content determined by drier-balance method U_m [%]	Mass moisture content U_{mh} determined from dependence (1) [%]	Mass moisture content U_{mhs} determined from corrected dependence (2) [%]
1	2	3	4	5
1 / 2	40	2.80	2.85	3.07
2 / 3	55	6.20	4.80	5.17
3 / 8	70	7.00	6.75	7.27
4 / 9	100	12.00	10.65	11.47
5 / 13	125	15.00	13.90	14.97
6 / 14	140	16.00	15.85	17.07
	<u>Σ</u>	<u>59.00</u>	<u>54.80</u>	<u>59.02</u>

In the second stage, when permission was obtained to carry out destructive tests in the next 24 measuring places, a correlational dependence was determined on the basis of thirty $X-U_m$ pairs of results (tab. 2). This dependence, shown graphically in fig. 3, is described by linear function (3)

$$U_{mk} = 0.12X - 1.11. \quad (3)$$

The obtained correlational dependence U_{mk} was subjected to verification consisting in checking the scatter around the average and proving that the correlation met correlation accuracy according to [2]. The above dependence was used to determine the mass moisture content in the walls in all the measuring places (tab. 2).

Tab. 2. Comparison of cellar mass moisture content measurement results obtained by nondestructive dielectric method and by destructive drier-balance method [3].

Measuring place			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Moisture meter indication X and moisture content U_m [%] determined by destructive drier-balance method on different levels above floor, [cm]	20	X	103	87	93	BD	58	48	BD	70	130	117	
		U_m [%]	12							7			
	50	X	99	82	55	BD	42	39	BD	61	100	89	
		U_m [%]		10	6.2						12		
	100	X	90	77	51	BD	40	37	76	50	50	82	
		U_m [%]	11	8									
	150	X	87	40	32	BD	34	32	70	44	37	78	
		U_m [%]	10.5	2.8									
	200	X	79	21	27	64	28	30	38	38	32	52	
		U_m [%]	9	1.5								3	
	Measuring place			11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Moisture meter indication X and moisture content U_m [%] determined by destructive drier-balance method on different levels above floor, [cm]	20	X	128	72	125	140	120	72	78	74	97	53
U_m [%]					15	16							
50		X	104	29	70	95	92	55	66	63	52	35	
		U_m [%]								7			
100		X	95	25	54	92	85	47	58	61	49	25	
		U_m [%]							6.5	6.5			
150		X	77	25	50	90	80	42	54	53	36	24	
		U_m [%]						4			3.5		
200		X	44	24	44	29	73	38	39	51	22	23	
		U_m [%]									1.5		
Measuring place			21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Moisture meter indication X and moisture content U_m [%] determined by destructive drier-balance method on different levels above floor, [cm]		20	X	51	72	51	130	121	91	128	114	82	134
	U_m [%]		5.5				14						
	50	X	32	34	46	30	120	89	77	108	80	84	
		U_m [%]								13	9.5		
	100	X	27	27	37	29	120	65	73	87	66	59	
		U_m [%]		2.5			13.5						
	150	X	24	26	31	29	118	57	70	69	55	52	
		U_m [%]										6	
	200	X	24	25	29	29	117	37	44	55	48	49	
		U_m [%]		2			13.5				5		

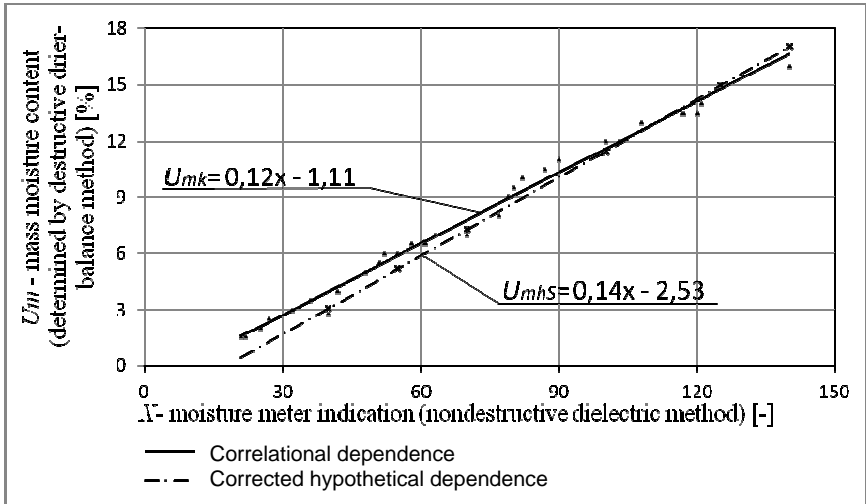


Fig.3. Graphical representations of corrected hypothetical dependence and correlational dependence.

3. Comparative analysis of test results obtained using hypothetical dependence and correlational dependence

Table 3 shows mass moisture content values determined in the particular measuring places, using corrected hypothetical dependence U_{mhs} and correlational (based on a correlation analysis) dependence U_{mk} .

For a comparative analysis four measuring places were randomly selected from the thirty measuring places. Diagrams plotted for the four measuring places (1, 5, 19 and 22) are shown in figs 4-7.

The diagrams show the mass moisture content along the wall height in a given measuring place, nondestructively determined using the hypothetical dependence and the correlational dependence. Figure 4 shows that in the case of the highly damp walls ($U_m > 8\%$) the moisture content values determined using the hypothetical dependence differ from the ones determined using the correlational dependence by about 5%, which is not a large difference. The same was found for the medium damp walls ($U_m = 5-8\%$), as shown in figs 6 and 7. Whereas for the walls with little dampness ($U_m < 5\%$) the moisture content values determined using the hypothetical dependence differ by as much as over 25% from the ones obtained using the correlational dependence (figs 5 and 6).

Tab. 3. Comparison of moisture content values U_{mhs} and U_{mk} determined using respectively hypothetical dependence and correlational dependence.

Measuring place	Height [cm]	Dependence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
			Mass moisture content U_m [%] obtained from hypothetical dependence U_{mhs} [%] and correlational dependence U_{mk} [%]	20	U_{mhs}	11.9	9.7	10.5	BD	5.6	4.2	BD	7.3
U_{mk}	11.3	9.3			10.1	BD	5.9	4.7	BD	7.3	14.5	12.9	
50	U_{mhs}	11.3		9.0	5.2	BD	3.4	2.9	BD	6.0	11.5	9.9	
	U_{mk}	10.8		8.7	5.5	BD	3.9	3.6	BD	6.2	10.9	9.6	
100	U_{mhs}	10.1		8.3	4.6	BD	3.1	2.7	8.1	4.5	4.5	9.0	
	U_{mk}	9.7		8.1	5.0	BD	3.7	3.3	8.0	4.9	4.9	8.7	
150	U_{mhs}	9.7		3.1	2.0	BD	2.2	2.0	7.3	3.6	2.7	8.4	
	U_{mk}	9.3		3.7	2.7	BD	3.0	2.7	7.3	4.2	3.3	8.3	
200	U_{mhs}	8.5		0.4	1.3	6.4	1.4	1.7	2.8	2.8	2.0	4.8	
	U_{mk}	8.4		1.4	2.1	6.6	2.3	2.5	3.5	3.5	2.7	5.1	
Measuring place	Height [cm]	Dependence		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Mass moisture content U_m [%] obtained from hypothetical dependence U_{mhs} [%] and correlational dependence U_{mk} [%]	20	U_{mhs}		15.4	7.6	15.0	17.1	14.3	7.6	8.4	7.8	11.1	4.9
		U_{mk}	14.3	7.5	13.9	15.7	13.3	7.5	8.3	7.8	10.5	5.3	
	50	U_{mhs}	12.0	1.5	7.3	10.8	10.4	5.2	6.7	6.3	4.8	2.4	
		U_{mk}	11.4	2.4	7.3	10.3	9.9	5.5	6.8	6.5	5.1	3.1	
	100	U_{mhs}	10.8	1.0	5.0	10.4	9.4	4.1	5.6	6.0	4.3	1.0	
		U_{mk}	10.3	1.9	5.4	9.9	9.1	4.5	5.9	6.2	4.8	1.9	
	150	U_{mhs}	8.3	1.0	4.5	10.1	8.7	3.4	5.0	4.9	2.5	0.8	
		U_{mk}	8.1	1.9	4.9	9.7	8.5	3.9	5.4	5.3	3.2	1.8	
	200	U_{mhs}	3.6	0.8	3.6	1.5	7.7	2.8	2.9	4.6	0.6	0.7	
		U_{mk}	4.2	1.8	4.2	2.4	7.7	3.5	3.6	5.0	1.5	1.7	
	Measuring place	Height [cm]	Dependence	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	Mass moisture content U_m [%] obtained from hypothetical dependence U_{mhs} [%] and correlational dependence U_{mk} [%]	20	U_{mhs}	4.6	7.6	4.6	15.7	14.4	10.2	15.4	13.4	9.0	16.2
U_{mk}			5.0	7.5	5.0	14.5	13.4	9.8	14.3	12.6	8.7	15.0	
50		U_{mhs}	2.0	2.2	3.9	1.7	14.3	9.9	8.3	12.6	8.7	9.2	
		U_{mk}	2.7	3.0	4.4	2.5	13.3	9.6	8.1	11.9	8.5	9.0	
100		U_{mhs}	1.3	1.3	2.7	1.5	14.3	6.6	7.7	9.7	6.7	5.7	
		U_{mk}	2.1	2.1	3.3	2.4	13.3	6.7	7.7	9.3	6.8	6.0	
150		U_{mhs}	0.8	1.1	1.8	1.5	14.0	5.5	7.3	7.1	5.2	4.8	
		U_{mk}	1.8	2.0	2.6	2.4	13.1	5.7	7.3	7.2	5.5	5.1	
200		U_{mhs}	0.8	1.0	1.5	1.5	13.9	2.7	3.6	5.2	4.2	4.3	
		U_{mk}	1.8	1.9	2.4	2.4	12.9	3.3	4.2	5.5	4.7	4.8	

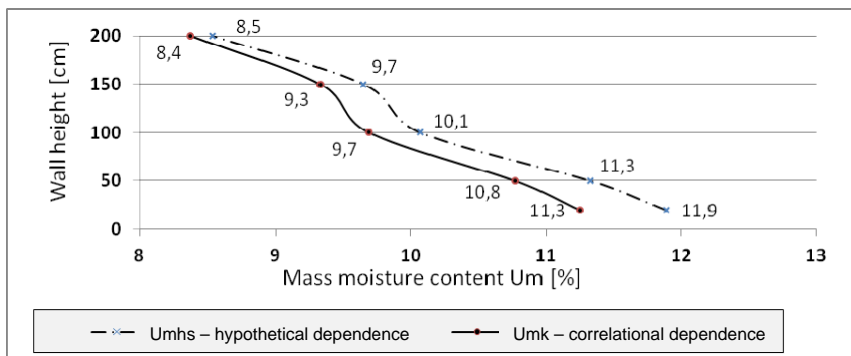


Fig. 4. Comparison of mass moisture content along wall height in measuring place no. 1, determined using hypothetical dependence and correlational dependence.

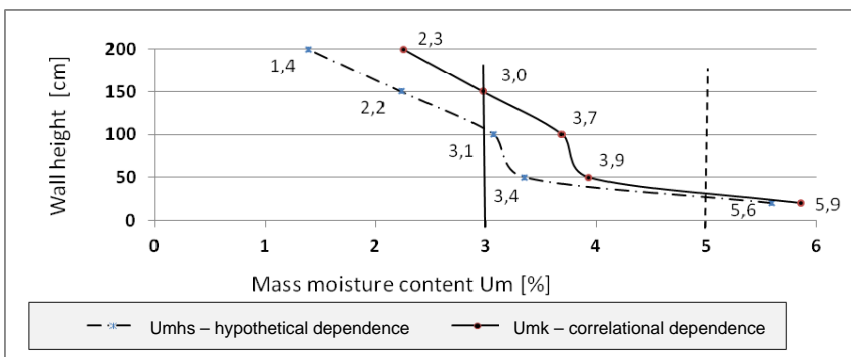


Fig. 5. Comparison of mass moisture content along wall height in measuring place no. 5, determined using hypothetical dependence and correlational dependence.

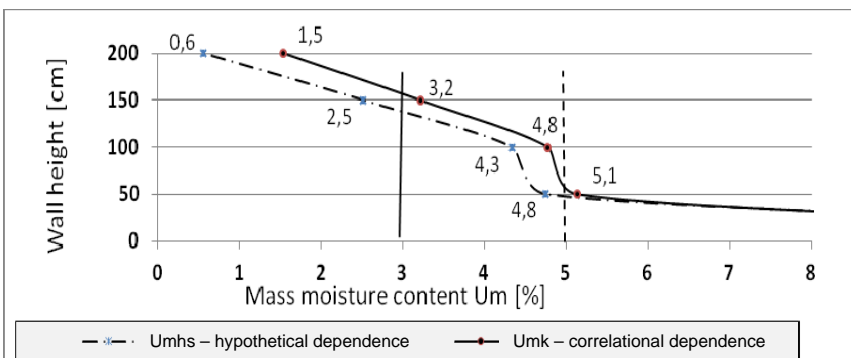


Fig. 6. Comparison of mass moisture content along wall height in measuring place no. 19, determined using hypothetical dependence and correlational dependence.

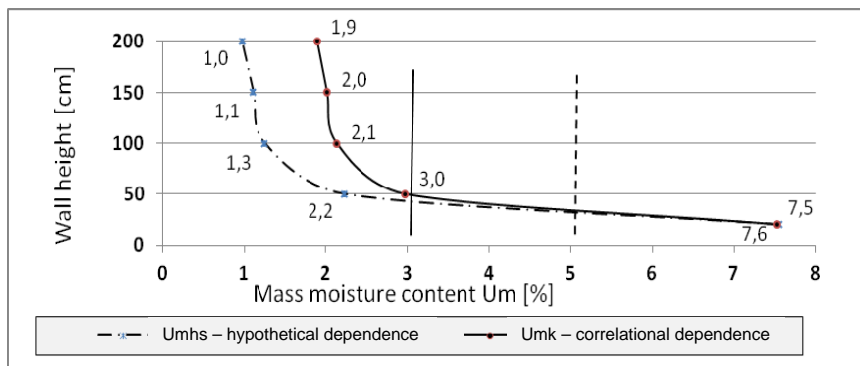


Fig. 7. Comparison of mass moisture content along wall height in measuring place no. 22, determined using hypothetical dependence and correlational dependence.

4. Conclusion

A hypothetical dependence and a correlational dependence were selected on the basis of nondestructive and destructive tests of moisture content in the brick walls of a building structure. The comparative analysis of the nondestructive wall dampness assessments made using the two dependencies showed that:

- 1) a correctly selected hypothetical dependence can be successfully used to assess the moisture content in highly and medium damp walls;
- 2) the mass moisture content values determined using the carefully selected hypothetical dependence are little different from the ones determined using the dependence selected through a correlation analysis; the differences amount to about 5%;
- 3) when walls are little damp, the difference between the mass moisture content values determined by respectively the hypothetical dependence and the correlational dependence is considerable, amounting to 25-30%; in such a case it is recommended to use the correlational dependence.

References:

- [1] Hoła J., Matkowski Z., *Selected problems relating to dampproofing of walls in existing masonry structures (in Polish)*. 24th Scientific-Technical Conference "Building Failures", Szczecin- Międzyzdroje 2009.
- [2] Brunarski L., Runkiewicz L., *Fundamentals and examples of use of nondestructive methods in testing of concrete structures (in Polish)*. Scientific Papers of the Institute of Building Technology. The Institute of Building Technology Publishing House, Warsaw 1983.
- [3] Pała A., *Study of nondestructive methods useful in general construction (in Polish)*. MSc thesis. Wrocław University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Wrocław 2009.



APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD DURING SETTING AND HARDENING CONCRETE IN TIMBER AND METAL MOULD

Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Jaroslav SMUTNÝ

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Contact e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz

Abstract

Concrete is a composite materials consisting of five basic components – cement (usually), water, additions, admixtures and aggregates different fractions. Hydration process starts after mixing cement and water. Chemical, mechanical and electrical properties are continuously changed during the process. Application of the Acoustic Emission Method at setting and hardening concrete samples are described in this article. The samples setting have made solidification in the wood and metal mould, for the assessment of the effect of material moulds on the number and nature of acoustic events.

Key words: concrete, acoustic emission, mould, timber, metal

1. Introduction

The setting and hardening process of concrete can be considered as the most critical time period during the life of a concrete structure. To assure high quality and avoid problems in performance throughout the life of the material, it is essential to have reliable information about the early age properties of the concrete. [Popovics, 1971] The properties of concrete are solely determined by the composition of its ingredients and the conditions during the setting and hardening process. [Ozturk et al, 1999] There are many techniques to determine concrete properties. Therefore their application during early age is very complicated or impossible. [Struble et al, 2000] Sonic or ultrasonic method can be interesting for following concrete structure during lifetime. [Rapoport et al, 2000]

2. Theory of measurement

The hydration of cement is exothermic process. During hydration concrete obtain strength and other mechanical properties but it also shrinks. The shrinkage affects creation of micro-cracks which lower durability of the concrete. Course of total volume exchange is affected by temperature development, see Fig. 1. On the basis of the temperature course is possible to select the best way of concrete curing for avoiding of micro-cracking. During the early stages of curing the autogenously shrinkage decreases thermal expansion. After the peak temperature is reached, however, autogenously shrinkage and thermal contraction act together in reduction volume creating micro-cracks. [Morin et al, 2002]

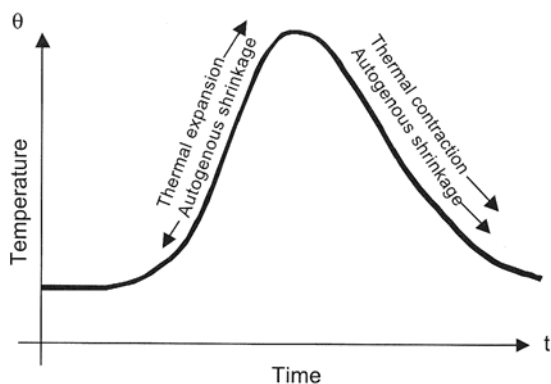


Fig. 1. Why is important to know heat development course of concrete [Aitcin, 1998]

To follow the tension changes and/or the crack generation, the Acoustic Emission Method is used. This method allows us to follow up active (dynamic) processes inside the structure. In consequence of local tension cumulation inside the material, there arise focuses of tension and, consequently, potential sources of acoustic emission. If the tension reaches or even exceeds the critical value at a certain point the accumulated energy will be released resulting in an acoustic event. This event is supposed to be accompanied by the formation of a micro-crack. The tension propagates through the material. The point at which the tension has arisen is called the acoustic emission source (Fig. 2). For simplicity, let us assume the propagation medium to be homogeneous and isotropic. In this case, a spherical wave propagates from the source, its energy decreasing with the distance from the source. Once the wave reaches the specimen surface it can be recorded by means of an acoustic emission sensor. It means that the position of the crack can be determined in the case of homogeneous isotropic materials and appropriate sensor positioning. [Kek et al, 2004], [Mazal, 2000], [Mazal et al, 2005], [Pazdera et al, 2005], [Uchida et al, 2000]

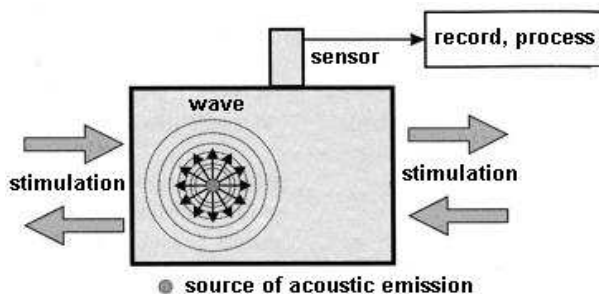


Fig. 2. Rise and propagation undulation at matters acoustic emission [Kreidl et al, 2006]

3. Experimental setup

Two samples of length, 400 mm, height, 100 mm, and width, 100 mm, were measured simultaneously. Four acoustic emission sensors were placed on the surface of both samples. (see Fig. 3) Two sensors were placed on the sample from metal and the other two ones on the sample from wood. Each sensor was kept by specially made holder, so that the contact between sensor and sample surface was easy to achieve.



Fig. 3. Mounting acoustic emission sensors
(on the left side sample from wood, on the right side sample from metal)

4. Results

Four different mixtures are in graphs in Fig. 4. Each mixture was hardening in wood (solid line) and metal (dashed line) mould simultaneously. In all cases, the mixtures in metal mould are showing higher activity of acoustic emission. This higher activity is particularly evident in the early stage (several hours after mixing). Curve of cumulative counts of events has a larger slope the metal mould than the wood mould.

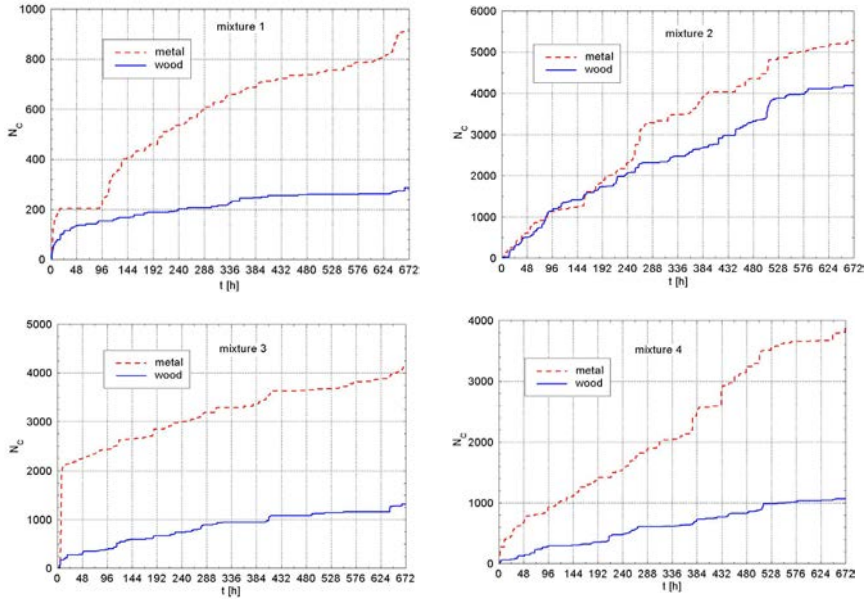


Fig. 4. Dependence of acoustic emission activity N_C on time t

5. Conclusion

Thus the metal mould has got better thermal conductivity than the wooden mould, because heat was faster transferred outward, which has given rise to more cracks. Method of acoustic emission again demonstrated the benefits of its use in the hardening of concrete particularly in its initial stage, which forms the final properties.

Acknowledgement

This research has been supported by projects of **GACR No. P104/10/0535 and MSM 0021630519**.

References

- Aïtcin, P.C., (1998), High Performance Concrete, *E&FN Spon, London*, 1998, 683 p
- Morin, R., Haddad, G. and Aïtcin, P.C.: (2002), Crack-Free High Performance Concrete Structures, *Concrete International*, V.24, No.9, Sep.2002, pp. 43-48

Ozturk, T., Rapoport, J., Popovics, J.S. and Shah, S.P. (1999). Monitoring the setting and hardening of cement-based materials with ultrasound, *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 83-91

Popovics, S. (1971). Physical aspects of the setting of Portland cement concrete, *Journal of Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 150-162

Rapoport, J., Popovics, J.S., Subramaniam, K.V., Shah, S.P. (2000). "The use of ultrasound to monitor the stiffening process of portland cement concrete with admixtures" *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 6, pp. 675-683

Struble, L.J., Zhang, H., Sun, G.-K., and Lei., W.-G. (2000). "Oscillatory shear behavior of Portland cement paste during early hydration," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 2, No. 9, pp. 141-149

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika - 4. díl*. BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6

Kek T and Grum J, "AE Signals as Laser Cutting Quality Indicators", *INSIGHT*, 51(3), pp. 124-128, 2004, ISSN: 1354-2575

Mazal P, "Acoustic emission method using in evaluation of fatigue properties of materials", in *Proceedings of European Conference on Advances in Mechanical Behaviour, Plasticity and Damage (EUROMAT 2000)*, eds Miannay D; Costa P; Francois D; Pineau A, Tours, France, November, 2000, pp. 1137-1142, ISBN 0-08-042815-0

Mazal P, Pazdera L and Kolar L, "Advanced Acoustic Emission Signal Treatment In The Area Of Mechanical Cyclic Loading", in *Proceedings of 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing (Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering)*, eds. Grum J., Portoroz, Slovenia, September, 2005, pp. 283-292, ISBN 961-90610-5-5

Pazdera L, Smutny J, Janostik D, Korenska M, and Prouzova P, "Study of metal timber join by acoustic emission method", in *Proceedings of 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing (Application Of Contemporary Non-Destructive Testing In Engineering)*, eds. Grum J., Portoroz, Slovenia, September, 2005, pp. 299-307, ISBN 961-90610-5-5

Uchida M, Ohtsu M and Okamoto T, "Advanced NDT of Reinforced Concrete Members by Ultrasonics and Acoustic Emission", in *Proceedings of 26th Seiken Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000*, Tokyo, Japan, Apr 25-27, 2000, pp. 161-170, ISBN: 0-08-043717-6



EXPERIMENTÁLNÍ POUŽITÍ LASEROVÉ TRIANGULAČNÍ METODY V TŘINECKÝCH ŽELEZÁRNÁCH, A.S.

EXPERIMENTAL USING OF THE LASER TRIANGULATION METHOD IN TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, A.S.

Lukáš PINDOR^{*}, Lubomír GRMELA^{**}, Pavel TOFEL^{**},
Petr SEDLAK^{**}, Jiri MAJZNER^{**}, Gabriel CSEFALVAY^{**}, Štěpán HEFNER^{*}

^{*}Třinecké železářny, a.s., Průmyslová 1000, 739 70 Třinec

E-mail: lukas.pindor@trz.cz stepan.hefner@trz.cz

^{**}VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav fyziky,
Technická 8, 616 00 Brno

E-mail: tofel@feec.vutbr.cz, sedlakp@feec.vutbr.cz,

majzner@feec.vutbr.cz, xcsefa00@stud.feec.vutbr.cz

Abstrakt

V souvislosti s rostoucími požadavky zákazníků v oblasti povrchové kvality vývalků je v současné době v Třineckých železárnách, a.s. hledána metoda detekce povrchových nehomogenit litých sochorů. Během vývoje systému detekce nehomogenit bylo odzkoušeno mnoho metod a jako optimální se ukázala být laserová triangulační metoda. V této technice je k detekci povrchu používán optický profiloměr a naměřená data jsou zpracovávána softwarem vyvinutým v prostředí MATLAB. V rámci experimentu došlo ke snímání povrchu několika sochorů touto metodou přímo v provozu a naměřené data byly pak porovnávány s výsledky z defektoskopie příslušných vývalků.

Klíčové slova: *lité sochory, optický profiloměr, metoda laserové triangulace, povrchová kvalita*

Abstract

Nowadays, in the connection with increasing demands for the surface quality of hot rolled products evoked by customers is searching a detection method of surface defects of casted billets in Třinecké železářny, a.s.. There have been tested many methods of surface detection during the development and as useful was choose the laser triangulation method. This technique includes the optical surface scanner for detection and the measured data are processed by algorithm developed in MATLAB. As part of the experiment, there has been scanning the surface of several billets in the operating conditions and the measured data were compared with the results of the non-destructive defection of rolled products.

Key words: *casted billets, optical surface scanner, Laser triangulation method, surface quality*

Úvod

V současné době je automobilový průmysl jeden z hlavních odběratelů oceli z Třineckých železáren, a.s. Jedná se o odběratele, který má své striktní požadavky nejen na mechanické vlastnosti oceli, ale také na povrchovou kvalitu vývalků. Právě poptávka po povrchově „bezvadné“ oceli je hybnou silou, která nutí výrobce oceli hledat příčiny vzniku povrchových anomálií v technologickém toku materiálu.

Hlavním odrazovým můstkem se v této souvislosti ukazuje být kontrola povrchové kvality litých sochorů, tedy materiálů, které jsou hutním polotovarem a zároveň vstupním materiálem pro následnou výrobu tyčí a drátů. V současné době se takovéto kontroly provádějí pouze opticky, přičemž výsledky této kontroly jsou silně závislé na detekční schopnosti pozorovatele.

Z tohoto důvodu bylo experimentálně zkoušeno několik metod pro automatickou detekci a vyhodnocení vad, jako příklad takové metody lze uvést magnetickou práškovou detekci, indukční ohřev s termografií, metodu vířivých proudů aj. Lze říci, že vzhledem k podmínkám povrchu předlitku měla každá z metod určité výhody, zároveň však i omezení, které nedovolovalo jejich provozní použití.

Na základě těchto výsledků započal v Třineckých železárnách, a.s. ve spolupráci s VUT Brno vývoj nového automatického systému detekce anomálií na povrchu litých sochorů, přičemž pro základní detekci povrchu byl využit princip optické triangulace k bezkontaktnímu měření povrchu [1]. Nedílnou součástí detekčního systému je algoritmus vyvinutý v prostředí MATLAB, který zpracovává zaznamenané data a vyhodnocuje je v závislosti na vstupních parametrech pro odpovídající materiál monitorovaného sochoru.

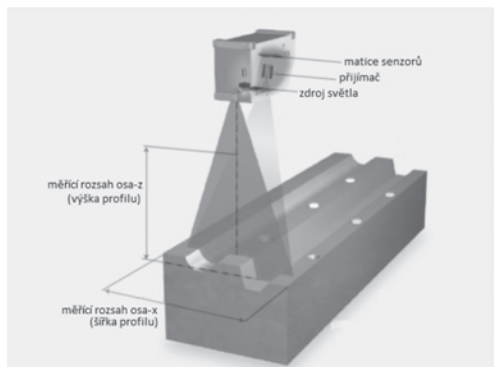
Pro posouzení účinnosti tohoto systému detekce byly experimentálně snímány lité sochory o průřezu 150 x 150 mm a byla hledána korelace mezi nehomogenitami nalezenými na povrchu kontislitku s anomáliemi nalezenými defektoskopií tyčí odválcovaných z daných sochorů.

Metoda laserové triangulace

Snímání povrchu bylo prováděno s využitím laserového profiloměru ScanControl 2750-100 od firmy MICRO-EPSILON, jehož princip činnosti, použití a způsob měření je patrný z blokové schéma uvedeného na **Obr. 1**.

Použitý laserový skener označovaný jako laserový profiloměr využívá principu triangulace pro dvourozměrnou detekci profilů na měřených plochách. Pomocí speciálních čoček se čoprováný laserový paprsek rozšíří na statický liniový laserový paprsek, který dopadá na zkoumaný profil. Difúzně odražené záření z nerovností povrchu je zaznamenáno snímací CMOS-maticí přes kvalitní optický systém. Výstupní signál závisí na frekvenci spouštění laseru a pomocí vnitřního synchronního detektoru je demodulován. Kromě informace o vzdálenosti (osa z), jsou využity parametry z citlivé snímací matice pro určení pozice v ose x. Tyto naměřené hodnoty tvoří výstupní data ve dvoudimenzionálním systému souřadnic, který je stanoven s ohledem na polohu měřeného profilu vůči senzoru [2,3]. V případě pohybu objektu (měřeného vzorku) nebo posuvem senzoru, je proto možné získat 3D obraz naměřených hodnot. Profiloměr disponuje kompenzací podle druhu měnicího

se povrchu, a to v reálném čase. To umožňuje měřit vůči velkému rozsahu materiálů (např. lesklé kovy, černá guma nebo leštěné povrchové úpravy).

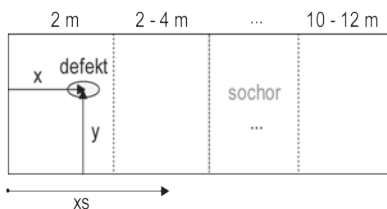


Obr.1 Princip činnosti laserového profiloměru firmy MICRO-EPSILON

Fig1 Operating principle of optical surface scanner MICRO-EPSILON

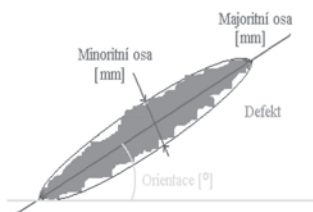
Neméně důležitou operací tohoto detekčního systému je zpracování těchto výstupních dat. V tomto směru byl na VUT Brno vytvořen algoritmus v prostředí MATLAB, který v první řadě odstraní filtrací parazitní efekty vzniklé v průběhu skenování povrchu sochoru, zvýrazní povrchovou strukturu sochoru pomocí metody STA/LTA (short-term average/long-term average) a dále pak podle zadaného prahu odděluje defekty od oscilačních vrásek. Hodnota prahování je založena na úvaze, že defekty se nalézají ve větší hloubce než oscilační vrásky. Metoda STA/LTA se běžně používá pro odhad příchozího času zemětřesení v seismologii [4] a událostí v akustické emisii [5,6].

V konečném důsledku je tak každý defekt označen, jsou vypsány jeho souřadnice od začátku sochoru (**Obr.2**), jeho hloubka a velikost, tvar a orientace (**Obr.3**). Výsledky jsou tedy k dispozici jak v grafické, tak i číselné podobě a lze s nimi dále jednoduše pracovat.



Obr. 2 Sochor – úseky a defekty

Fig.2 Billet – sections and defects



Obr.3 Popis defektu

Fig.3 Description of the defect

Experiment

V rámci experimentu došlo k měření povrchu sochorů optickým profiloměrem přímo v provozu. Byly nasnímány vybrané kusy sochorů ze všech čtyřech stran o průměrné zkušební rychlosti pohybu sochoru 0,36 m/s (**Obr.4**).

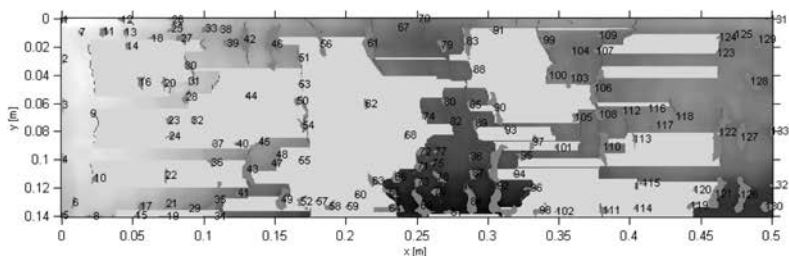


Obr.4 Snímání povrchu sochoru laserovým profiloměrem

Fig. 4 Surface scan of the billet

Získané data byly následně vyhodnoceny algoritmem, který našel oscilační vrásky, defekty a oblasti bez oscilačních vrásek na povrchu sochoru. Na **Obr. 5** lze vidět grafický výstup zpracovaný algoritmem softwaru, kde oscilační vrásky jsou značeny modrou barvou, oblastí bez vrásek zelenou barvou a samotné defekty značeny červenou barvou.

Zpracované výsledky byly podrobeny statistické analýze, která byla zaměřena na zjištění základních odlišností parametrů defektů a anomálií mezi stranami sochoru a po ploše jeho jednotlivých stran (boků). Prakticky šlo o zjištění závislosti mezi defekty a anomáliemi, detekci případné periodicity výskytu, shluků defektů a indikaci odlišnosti výskytu defektů a anomálií na stranách sochoru.

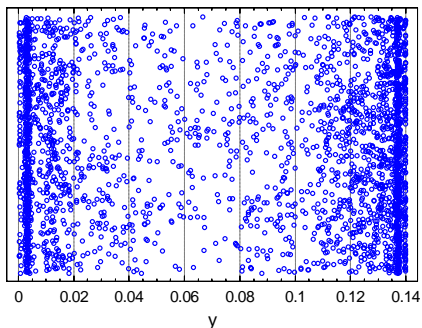


Obr. 5 Nalezené defekty, oscilační vrásky a oblasti bez vrásek na sochoru pomocí algoritmu vyvinutého v prostředí MATLAB

Fig.5 Defects, oscillation marks and areas without oscillation marks found on the billet surface with algorithm developed in MATLAB

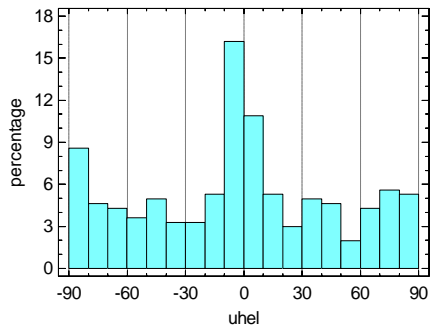
Z analýzy vyplynulo, že nejvíce defektů a anomálií se vyskytovalo v rozích sochorů (**Obr.6**) a jejich nejčtenější úhel natočení byl 0° a 90° (**Obr.7**), tedy, že se jednalo hlavně o nehomogenity podélné a příčné. Výsledky také naznačily, které strany sochoru mohou být náchylnější na výskyt defektů a anomálií.

Scatterplot

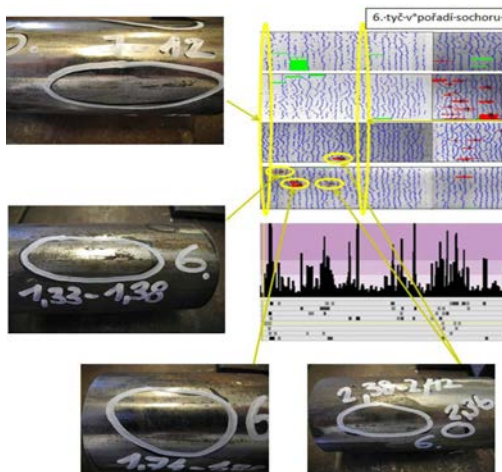


Obr. 6 Místa výskytu anomálií na sochorech
Fig. 6 Occurrence of defects on the billets

Histogram



Obr. 7 Orientace anomálií na sochorech
Fig.7 Orientation of defects on the billets



Obr.8 Korelace výsledků defektoskopie tyčí se skeny povrchu sochoru

Fig.8 Correlation of results of bars defectoscopy with scans of billet surface

Nasnímané sochory byly v další fázi experimentu odválcovány do tyčí pr. 70 mm. Tyče byly defektoskopovány na lince Cirkoflux na hloubku vady 0,52 mm a nalezené defekty na tyčích byly po přepočtu porovnávány s defekty nalezenými na sochorech.

Na **Obr.8** je patrný příklad srovnání výsledků povrchových anomálií zjištěných defektoskopickým zařízením Circoflux na tyčích \varnothing 70 mm (spodní záznam), doloženými fotografiemi příslušných podélných trhlin, s grafickým výstupem zpracovaných dat z laserového profiloměru z příslušného sochoru.

Lze říci, že se v této fázi experimentu podařilo každé anomálii, vyskytující se na tyči, dohledat příslušnou nehomogenitu v odpovídajícím místě na povrchu sochoru. Na druhou stranu však systém zpracování získaných dat ukázal, že pro prokázání relevance daných výsledků je nezbytný další vývoj laserové triangulační metody.

Závěr

V souvislosti s rostoucími požadavky zákazníků v oblasti povrchové kvality byla v Tříneckých železárnách, a.s. zkoušena laserová triangulační metoda detekce povrchových nehomogenit litých sochorů. V rámci experimentu došlo ke snímání povrchu několika sochorů touto metodou přímo v provozu, přičemž naměřené data byly porovnávány s výsledky z defektoskopie odválcovaných tyčí průměru 70 mm.

Výsledky tohoto srovnání poukázaly na vzájemnou spojitost anomálií sochor/tyč, což může být výborné pro další výzkum v této oblasti. Nicméně samotné zpracování dat je vzhledem k celkovému objemu informací a dalším vlivům natolik citlivé, že pro celkové zhodnocení laserové triangulační metody bude potřeba provést další experimenty.

Poděkování

Príspevek vznikl za přispění projektu FR-TI2/536, v rámci programu TIP 2010-MPO ČR.

Literatura

- [1] Kalová I, Horák K, Optické metody měření 3D objektů, *Elektrorevue* **23**, 2005
- [2] Riftek. Laser scanners RF620 series manual guide, 2009.
- [3] MicroEpsilon, manual guide ScanControl 2700/2710, 2008.
- [4] Baer M Kradolfer U, An automatic phase picker for local and teleseismic events *Bulletin of the Seismology Society of America* **77**, 1987, 1437-1445.
- [5] Lokajicek T Klima K A first arrival identification system of acoustic emission signals by means of a high-order statistics approach, *Meas. Sci. Technol.* **17**, 2006, 2461-2466.
- [6] Sedlak P, Hirose Y, Khan S A, Enoki M and Sikula J, New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates, *Ultrasonic* **49**, 2009, 254-262.



NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLY SKLADOVACÍCH NÁDRŽÍ STORAGE TANK NONDESTRUCTIVE INSPECTION

Miloslav PROCHÁZKA

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: info@tediko.cz

Abstrakt

Tento článek je zaměřen na praktickou stránku měření ultrazvukem v elektrárnách, chemických výrobnách a rafinériích metodami Phased Array a TOFD včetně pomocí mechanizovaných prostředků. Praktické příklady praktické stránky uskutečněných měření – kontroly tlakových nádob a potrubí, kontroly svarových spojů, kontrola na přítomnost a rozsah poškození nádob blistry a jinými vadami.

Klíčová slova: zkoušení vizuální, kapilární, magnetické práškové, těsnosti a ultrazvukem, prozařování, MFL kontrola dna, magnetické rozptylové toky, manipulátor, šplhač, phased array, TOFD

Abstract

This article describes the practical examples of ultrasonic measuring in power and chemical plants and refineries by means of Phased Array and TOFD methods using manipulators included. The examples of performed inspections from practice - real measuring of pressurised vessels and piping, welds inspection, HIC blister damage and other flaw identification.

Key words: visual, penetrant, magnetic particle, leak and ultrasonic testing, radiography, floor inspection by means of MFL, magnetic flux leakage, manipulator, crawler, phased array, TOFD

Úvod

Skladovací tanky na ropu a ropné produkty jsou velké nádrže sloužící k uchování jak surovin, tak meziproduktů a výsledných produktů jako je například nafta a benzín. Nejedná se většinou o žádné malé objemy – skladovací nádrže neboli tanky mají průměr až kolem 50 metrů a výšku 20 m. Samozřejmě, že jsou ale běžně i menší občas i větší. Nejmenší jsou pod deset metrů v průměru. Bez ohledu na velikost však obsahují látky, které nejsou pro životní prostředí příznivé a při případné netěsnosti kromě značných materiálních škod také velmi negativně ovlivňují jak blízké tak i vzdálené okolí. Proto se kontrolám stavu těchto nádrží musí věnovat náležitá pozornost. Koneckonců stavu nádrží skladujících tyto produkty se nevěnují pouze normy, ale i Vyhlášky a dokonce Zákony, jako např. Zákon o vodách.

Tento příspěvek má za úkol poskytnout základní informace o reálném provádění inspekcí skladovacích nádrží pomocí metod nedestruktivního zkoušení tak, jak je prováděna pracovníky společnosti TEDIKO, s.r.o.

1. Základní metody

Oblast nádrží řeší různé normy a předpisy – od jejich návrhu, přes výstavbu a provozování, po údržbu a tedy i kontroly. Jedněmi z nejznámějších jsou například předpisy API, např. *API Standard 653 Inspekce, opravy, úpravy a rekonstrukce tanků* nebo *API Recommended Practice 575 Návod a metody inspekce atmosférických a nízkotlakých skladovacích tanků*. Tento článek ale nemá za cíl prezentovat obsah API ani jej nijak zvlášť vysvětlovat, účelem je zaměřit na oblast NDT a jejího vykonávání na skladovacích nádržích s upozorněním na některá specifika.

Zcela základní, přitom nejjednodušší ale zároveň i zcela nejpodceňovanější metodou je zcela běžná kontrola vizuální, tedy v tomto případě přímá vizuální kontrola. Je pozoruhodné, jakou provozní slepotou často trpí personál provozovatelů. I když na druhé straně – kdo není postižen provozní slepotou a bráním věcí za standard, když stále vidí v podstatě totéž ?

Další důležitou kontrolou je ultrazvuková kontrola a to jak měření tloušťek stěn tak kontrola svarových spojů, s tím je spojena i kontrola prozářením, která má ovšem vzhledem k charakteru kontrolovaného zařízení možnosti velmi omezené a to především na hrdla. Magnetická prášková a kapilární kontrola jsou nezastupitelné pro zkoušení svarových spojů, především z vnitřní strany. Speciálními kontrolami jsou kontroly dna – kontrola tzv. „floor-scannery“ příp. kontrola těsnosti, akustická emise apod.

Kontroly se provádějí „on“ nebo „off“. Tzn. provádějí se jak za provozu, tak za odstávky. V případě provozovaného zařízení je samozřejmě kontrola možná pouze z vnějšku nádrže (a to ještě ne ve všech případech). V případě odstávky se předpokládá odčerpání produktu, vyčištění nádrže pro kontroly a provedení kontrol i zevnitř tanku. Kontrola dna není ani jinak možná.

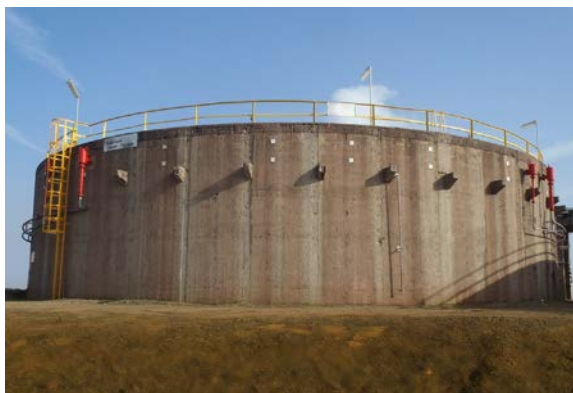
2. Základní specifika kontroly

Kontroly skladovacích nádrží mají jednu charakteristickou a pro provádění kontroly znepríjemňující vlastnost. Jedná se vždy o bezpečnostní riziko. Skladované produkty jsou hořlavé, prostředí i zdraví škodlivé. I samotný pohyb v tankovišti (jak se nazývá místo se skladovacími nádržemi) podléhá přísné regulaci.

Nádrže jsou jak nadzemní tak pod úrovní země, v případě LPG se jedná navíc často i o kulové nadzemní zásobníky. Některé zásobníky/ tanky jsou přímo uloženy v zemi (zасыpané) a to částečně či úplně. U některých zásobníků/tanků je meziprostor mezi stěnou samotné nádrže a vnější bariérou – betonovou stěnou, která je ještě někdy z vnějšku zasypána zeminou.

Pokud se kontrola provádí za provozu v tzv. meziprostoru, mohou nastat problémy s H₂S. Podobně při kontrolách nádrží při odstávce je nutné nádrž považovat za tzv. uzavřenou nádobu, kde je opět nutné brát v úvahu různá rizika atmosférou počínaje a hořlavým či výbušným prostředím konče. A dále 99% zařízení používaného při NDT kontrolách není v provedení do výbušného prostředí, tzn. mohou představovat bezpečnostní riziko. Dále se provádí tzv. dozor, tzn., že pokud inspektor pracuje ve skladovací nádrži, musí někdo jiný na něho z venku dohlížet a v případě problémů zasáhnout. Z toho všeho vyplývá, že ke kontrolám v nádržích nelze přistupovat z bezpečnostního hlediska tak, jako se k NDT kontrolám často přistupuje.

Problém H₂S, dýchacelného prostředí a prostředí nevybušného je vůbec jednou z primárních záležitostí. Proto pracovníci provádějící kontrolu musí mít osobní detektory i analyzátory prostředí. Takže pokud provádějí například RTG, jsou zcela ověšeni různými detektory, měřáky, případně dalšími prostředky BOZP.



3. Vizuální kontrola

Jak bylo řečeno výše – zcela „podřadná“ NDT zkouška, avšak s vysokou vypovídací schopností, pokud se inspektor na zařízení dívá správně a ještě o tom přemýšlí. V nadsázce lze říci jako v letitém vtipu – podíváme-li se na něco pořádně a zblízka, je tam pr.... atd.

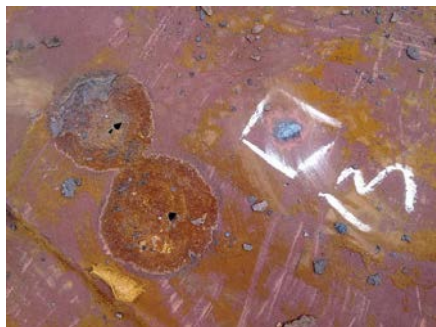
Při zpracování ropy je vždy dostatek suroviny pro pěkný ohniček, proto je potřeba mimo jiné udržovat nádrž a její okolí v takovém stavu, aby se zde nenacházely např. porosty, které kromě toho, že jsou hořlavé, tak také rozrušují betonové základy či vany pro záchyt média. Jistě nelze považovat za vyhovující stav nádrže, kde z betonu základu vyrůstá stromek ve stáří několika let a rozhraní nádoby a podkladu je plně směsí tvořené zbytky hlíny, oloupaných zbytků nátěru, mechu a náletu travin.

Vizuální kontrola prováděná vně nádrže tedy slouží k ohodnocení jak celkového stavu, tak jednotlivých částí, a na jejím základě lze přijímat prvotní nápravná opatření. Kromě obhlídky okolí samozřejmě spočívá v kontrole stavu ochranných nátěrů nádrže případně izolací a to i z pohledu zatékání vody pod izolace. Zatékající voda může být zdrojem koroze pod izolací (teplota skladovaných médií nemusí být totožná s teplotou okolí, nádrže mohou obsahovat i topné hady a míchadla, takže izolace je nutnou záležitostí). Důležitou částí kontroly je střecha a hrdla z nádrže vycházející. Vizuální kontrola samozřejmě ukáže na místa, která zasluhují pozornost z hlediska jiných kontrol. Při odstavení tanku z provozu se provádí vizuální kontrola z vnitřní strany a to nejenom dna a stěn ale i případné vnitřní vestavby – vytápěcích hadů, míchadel atd.

Na níže uvedených obrázcích jsou ukázány základní problémy skladovacích nádrží zjišťované při vizuální kontrole prováděné z vnějšku. Kromě relativně běžných problémů snadno odhalitelných jako je přítomnost vegetace, poškození nátěrů nebo koroze v místech, kde se může zdržovat voda, je problémem také zraku skrytá koroze – v místech zatékání vody pod izolací. Nejedná se jenom o klasickou izolaci pomocí vaty a krycích plechů, kterou lze relativně jednoduše odstranit i obnovit.



Některé nadzemní nádrže s pevnou střechou ale také mají izolaci střechy provedenou pomocí pevně lnuoucí pěny. Tady je situace s odstraněním a obnovou horší. Bez odstranění izolace ale lze jen velmi obtížně diagnostikovat korozi pod izolací. Obrázky níže ukazují stav pod klasickou izolační vatou na stěnách a pod odstraněnou pěnou na střeše tanku. V obou případech jsou velmi dobře vidět místa zatékání vody s výraznou korozí vedoucí až k proděravění plechů



V případě kontroly vnitřku skladovacího tanku, čili za stavu „OFF“, se posuzuje stav všech konstrukčních částí – pláště, podlahy, stropu, případných vestaveb včetně otopných systémů. Ač by se mohlo zdát, že není důvod, aby byl vnitřní povrch nějak zvlášť poškozen, opak je často pravdou. Lze najít poškození důlkovou korozí, důlky a trhliny v tepelně ovlivněné zóně svarových spojů, pozůstatky tzv. přichytných svarových spojů, plošnou korozi.

Kontroly prováděné uvnitř tanku mají ještě tu specifiku, že některé nádrže nemají pevnou střechu, ale jsou vybaveny tzv. střechou plovoucí, to znamená, že pokud je nádrž vyprázdněná, tak je střecha ve spodní poloze a vzdálenost podlahy a stropu není zrovna velká. Dalším specifikem je nedostatek světla, protože nádrže mají omezené množství nízkých vlezů. Vnitřek nádrže je také pro kontrolu nutné vyčistit, tzn. odstranit zbytky skladovacích látek a vyloučených úsad. Pokud má být prováděna detailní kontrola dna (především dalšími metodami NDT), je nutné dno dokonce připravit pískováním. Na následujících obrázcích jsou uvedeny dva základní příklady – poškození důlkovou korozí a poškození jak svarového spoje tak tepelně ovlivněné zóny. Ilustračních příkladů je k dispozici tolik, že je lze ukázat pouze v prezentaci



4. Kontrola ultrazvukem

Druhou nejdůležitější kontrolou, a to jak ve stavu „off“ nebo „on“, je kontrola ultrazvukem, především měření tloušťky stěn. Kontrola tloušťky dává základní představu o stavu jednotlivých lubů (to jsou ta mezikruží, z nichž je sestaven plášť tanku). Tloušťka plechů, z nichž jsou jednotlivé luby svařeny, se mění s výškou – tedy vyšší luby mají z konstrukčního hlediska menší tloušťku stěny. Vnitřní koroze není stejnoměrná a v různé výšce může být různá, za provozu samozřejmě zrakem nezjistitelná. Poškození vnější korozí, pokud není tank izolován, je samozřejmě identifikovatelné vizuální kontrolou.

Ke kontrole se používají v podstatě běžné ultrazvukové tloušťkoměry. My ovšem zásadně používáme tloušťkoměry s grafickým displejem a s ukládáním dat v síti. Zároveň tyto tloušťkoměry umožňují měřit tloušťku stěny přes barvu. To je velmi důležité, protože ne vždy je možné očistit povrch na holý kov a při „vzdáleném“ (remote) měření bez stavby lešení to není ani technicky možné. V zásadě se provádí měření bodově. Toto měření tlouštěk dna, stěn, stropů, hrdel a dalších částí skladovacích nádrží patří k základním metodám, jak z hlediska zjišťování okamžitého stavu nádrže, tak z pohledu dlouhodobého sledování. Rozložení jednotlivých měřících bodů je v souladu s inspekčními plány provozovatele nádrže, případně je provozovateli navrženo na základě praxe a v souladu s jeho požadavky .

Součástí měření tlouštěk však může být i pořizování B-scanů kolmých na dno tanku a to především ve spodních partiích pláště u dna, protože tato oblast je z pohledu korozního a zároveň i z hlediska pevnostních parametrů ta nejchoulostivější. Očekává se zde zvýšený ale přitom z hlediska poškození proměnlivý rozsah koroze – např. ve spodní části stěn tanku u koutových svarů se dnem, v místech kolísání hladin apod. Výsledkem je profil tloušťky v choulostivé části tanku. V tomto případě je ale nutné doporučit přípravu plochy pro B-Scan, pokud má být provedeno relevantní měření.

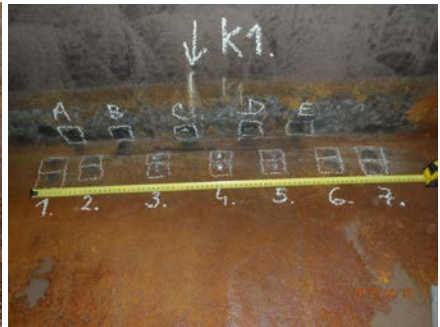
Zcela zvláštní kapitolou je měření tloušťky ve vyšších částech tanku. Pro tato měření je nutné běžně postavit lešení, což přináší velmi vysoké náklady na kontrolu, větší bezpečnostní riziko pádu a stejně zůstávají prostory, do kterých za provozu nelze jen tak vstoupit – např. již zmiňovaný prostor mezi stěnou tanku a betonovým mezikružím, kde za provozu hrozí nebezpečí nedýchatelné atmosféry s případným zvýšeným obsahem H_2S .

V těchto případech se provádí bodové měření ultrazvukem pomocí šplhače vybaveného ultrazvukovou sondou pro měření tloušťky stěn. V současnosti máme

k dispozici vyvinuté dva typy šplhače. Čtyřkolový šplhač je úspěšně používán intenzivně již třetí rok. Jedná se o robustní dálkově ovládaný podvozek vybavený ultrazvukovou sondou s dostatečnými stupni volnosti pro kopírování povrchu a zařízením pro tvorbu akustické vazby, které je propojeno s měřicím přístrojem – ultrazvukovým tloušťkoměrem. Zařízení je ovládáno dálkově operátorem, který stojí na zemi a na dálku ovládá a řídí pohyb šplhače a zároveň odečítá změnu tloušťku.

Tříkolový šplhač je ve stádiu testů a a kromě tříkolového podvozku je hlavním znakem snížená váha a vyšší rychlost i ovladatelnost zařízení. Tato měření lze samozřejmě provádět jen v případě neizolovaných tanků a tanků z uhlíkových konstrukčních ocelí.





Kromě měření tloušťek je součástí i kontrola svarových, kde se používají postupy jak klasického ultrazukového zkoušení tak TOFD a Phased Array. Použití PA je v některých případech zcela nezastupitelné, protože řešení mnoha svarových spojů je s konstrukčním neprůvarem případně se jedná o T- spoje či koutové svary.

5. Kontrola svarových spojů

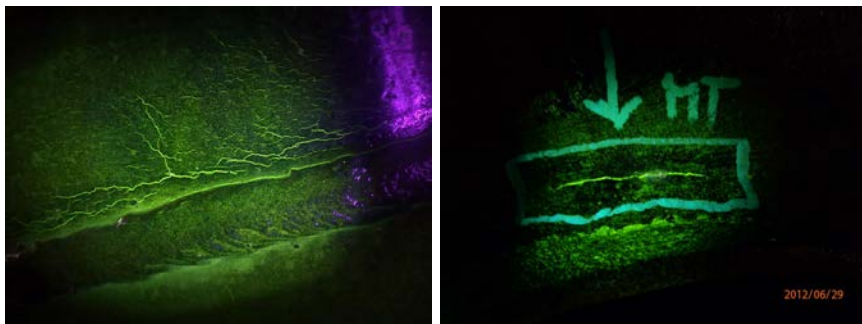
Ke kontrole svarových spojů se kromě ultrazukové kontroly ještě používají metody kapilární a magnetická metodou prášková a také se provádí kontrola těsnosti metodou vakuovou.

Oba typy uvedených povrchových metod zkoušení se používají především ke kontrole svarových spojů dna. Základní podmínkou pro provedení je příprava povrchu a to bývá v některých případech problém, především pokud se týká metody kapilární. Také z důvodu rychlosti zkoušky a jednoduššího řešení se preferuje především magnetická kontrola prášková fluorescencní. Povrch se ke kontrole připravuje broušením nebo opískováním.

Kontrola svarových spojů dna na přítomnost trhlin je obecně velmi důležitá, protože dno se sice dá zkontrolovat téměř celé pomocí floor-scannerů, ovšem právě s jedinou výjimkou a tou je kontrola svarových spojů. Protože povrchové metody

neříkají nic o tom, zda trhlina komunikuje s oběma povrchy, provádí se často kontrola těsnosti bublinkovou metodou s použitím vakuových komůrek.

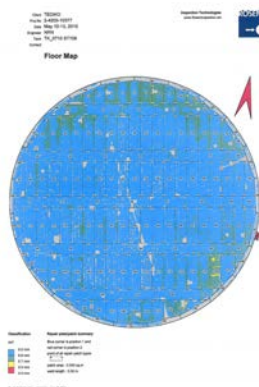
Hloubka trhlin se určuje buď potenciometrickou metodou, pomocí phased array nebo se též provádí (dovolují-li to podmínky – geometrie a rozměr) pomocí TOFD.



6. Kontrola plechů dna

Kontrola dna se dá provádět třemi způsoby a všechny tři jsme nějakým způsobem během téměř desetileté zkušenosti z kontrolami realizovali buď vlastními silami nebo v kooperaci. Ve všech případech je nutná minimální příprava dna. Kontrola magnetickou metodou práškovou je asi z uvedených kontrol nejméně často používaná, vzhledem k tomu, že touto metodou se hledají především trhliny a ty se nacházejí v oblasti svarů. Častěji je používaná kontrola těsnosti pomocí vakuových komůrek. Je prováděna v návaznosti na kontrolu dna pomocí takzvaných floor-scannerů, tedy zařízení určené ke kontrolám dna („podlahy“)

Ve spolupráci se zahraničním partnerem provádíme kontrolu zařízením pracujícím na bázi MFL/ET. Zařízení obsahuje desítky měřících sond/senzorů pomocí kterých je možné zjišťovat vnější i vnitřní vady charakteru důlků a provádět profilometrii metrů – tedy kontinuálně zjišťovat tloušťku plechů. Vzhledem k tomu, že zařízení je vybaveno systémem sledování polohy, je výsledkem mapa dna s vyobrazenými polohami vad rozdělenými barevně podle hloubky poškození a mapa tloušťek ve formě vrstevnic. Měření je relativně rychlé a s téměř okamžitým vyhodnocením.

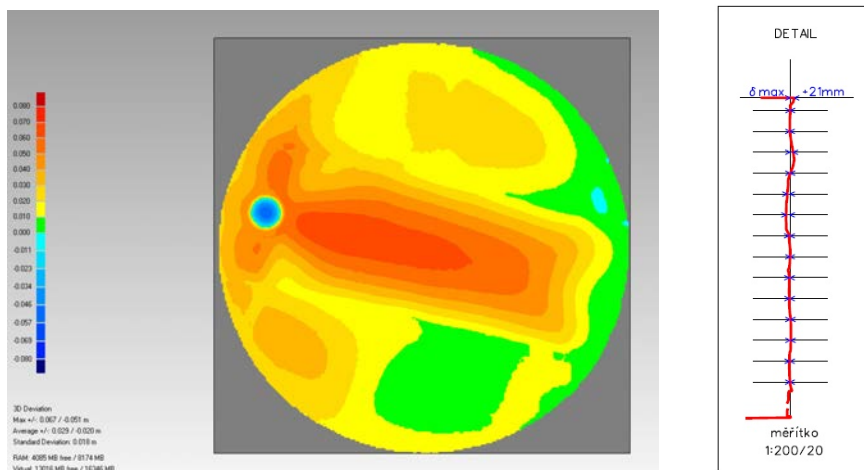


7. Ostatní metody

Kromě všech výše uvedených metod se používá též prozařování. Ovšem vzhledem k charakteru kontrolovaného zařízení lze provádět většinou jen kontrolu hrdel – tzn. nátrubků vycházejících ze skladovacích nádrží – kontrola se provádí především na zeslabování.

Kromě klasických NDT kontrol lze použít také novější metodu magnetické paměti na vytipování míst, která se následně zkontrolují jinými metodami.

Protože skladovací nádrž/tank je velmi velké zařízení obsahující běžně tisíce tun ropy, ropných produktů, chemikálií, je celá konstrukce namáhána značnými silami. Ty se ještě mění s tím, jak se mění plnost tanku. Navíc jsou zde také vlivy konstrukční a vlivy dané výrobou. Díky tomu takováto nádrž stále „pracuje“. Například si sedá, na dno působí veliké tlaky atd. Proto jsou důležitá i jiná - geometrická měření, která mapují sedání tanku, odchylky stěn od svislice apod.



Závěr

Smyslem tohoto příspěvku bylo ukázat problematiku diagnostiky skladovacích nádrží. Nejedná se o pouhou defektoskopii ale o multidisciplinární přístup. Každý způsob zkoušení, každá úloha chce „svoje“. Sám jednotlivý výsledek z konkrétní metody přináší pouze dílčí informaci, která slouží k sestavení mozaiky avšak sama o sobě nese pouze malou informaci. Vyhodnocením všech informací je ale možné vyhodnotit nejen okamžitý stav zařízení ale také predikovat vývoj – to znamená i jeho životnost.





NON-DESTRUCTIVE DAMAGE DETECTION USING A SCANNING LASER DOPPLER VIBROMETER AND THE CORRELATION METHOD

P. RAFIEE, M. LEDERER, G. KHATIBI

Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmannngasse 5, A-1090 Vienna, Austria

Peyman.Rafiee@univie.ac.at, Tel: +43 1 4277 51334

Abstract

In this investigation the dynamic response of specimens under vibrational load was monitored to detect possible damages non-destructively. Our objective is to extract modal parameters of both original and defected specimens using non-contacting measurements. The presence of a defect causes an alteration of the specimens mass and stiffness leading to changes of frequency response and damping ratio. The test specimens were thin steel plates. A small amount of additional mass was glued to some of the samples to simulate a defect. An electromagnetic shaker was used as vibration source and the dynamic response was recorded with a scanning laser Doppler vibrometer (SLDV). A periodic chirp signal was applied in order to excite resonant frequencies of the plates. Finite Element Analysis (FEA) was employed to calculate the influence of defects on natural frequencies and mode shapes of the specimens. The experimental results for original and defected specimens were mathematically compared with use of the correlation coefficient method. Thereby, it was found that the values for resonant frequencies are suitable parameters to distinguish original and defected specimens. FEA and experiments are in a close agreement verifying the reliability of the method.

Keywords: laser vibrometer, Finite Element Analysis, correlation coefficient, damping ratio

1. Introduction

Monitoring the presence of damages and realizing causes of possible failure is an important topic of quality control in engineering science. A modern branch of science which is in particular focused on such assessments is called structural health monitoring (SHM). Several non-destructive methods such as X-Ray imaging, ultrasonic methods, thermal - and eddy current

methods are capable of detecting damage without any contact with the structures [1, 2]. However, these methods are sometimes time consuming and costly. Another method to detect the existence of damage is based on measuring the dynamic response of structures under vibrational load. It is the purpose of this method to extract modal parameters such as resonant frequencies, mode shapes and damping ratios of damaged samples and compare them with the modal parameters of undamaged specimens. The change of modal parameters in damaged samples is a consequence of alterations in mass and stiffness in the region of a defect. The vibration analysis is supposed to be an efficient way to discover possible damages because of its easy execution and reliability, and because of its ability of acquiring both local and global information of the structures [3]. In order to implement this method, the structure has to be excited by an external vibration source and the response needs to be gathered utilizing measurement tools. In the present study, we have employed an electromagnetic (EM) shaker to impose the vibration force and a scanning laser Doppler vibrometer (SLDV) provided by Polytec GmbH was used to record the dynamic response of the structure. Thereafter, the modal parameters of damaged and undamaged samples were compared with use of the correlation coefficient (CC) [4]. Thereby, a useful criterion for the detection of damage was established.

2. Experimental Setup

The samples used in the present investigation were thin plates of steel with slits as depicted in figure 1a. The dimensions of the plates were $28.5\text{mm} \times 96.3\text{mm} \times 0.25\text{mm}$. The existence of some damage was simulated by gluing an extra mass onto the surface of the sample as depicted in figure 1b, schematically. The weight of the extra mass was modified as indicated in table 1 in order to investigate its influence on the vibration mode. The samples were mounted on the electromagnetic shaker as can be seen in figure 2a. The vibration direction of the shaker is out of plane. Furthermore, figure 2a shows the measuring head of the scanning laser Doppler vibrometer (SLDV). The SLDV allows non-contacting, high spatial resolution measurements [5]. The measurement principle of the SLDV is the detection of the sample velocity by determining the shift of the laser frequency caused by the Doppler effect. This measurement is repeated for any sample point of interest. The location of the measurement points is defined through a mesh as depicted in figure 2b. The vibrations of the sample were excited by a periodic chirp signal in the frequency range up to 1 kHz. This means that the electromagnetic shaker increased the vibration frequency periodically in small digital steps. A reference signal from the shaker was connected to the analyzing unit of SLDV. This signal was used to correlate the results obtained for the different measurement points. Therefrom, the SLDV can calculate the mode shapes of the vibrating plates.



Fig. 1a: Specimen used in experiments

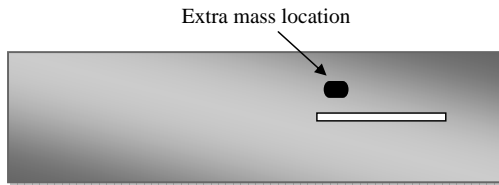


Fig. 1b: Location of the extra mass on the surface of the specimen.

Table 1: Extra masses and the amounts of the total mass modification

	Weight[g]	Modified amount (%)
Original Specimen	5.38	-
Mass 1	0.1145	2.13
Mass 2	0.381	7.08

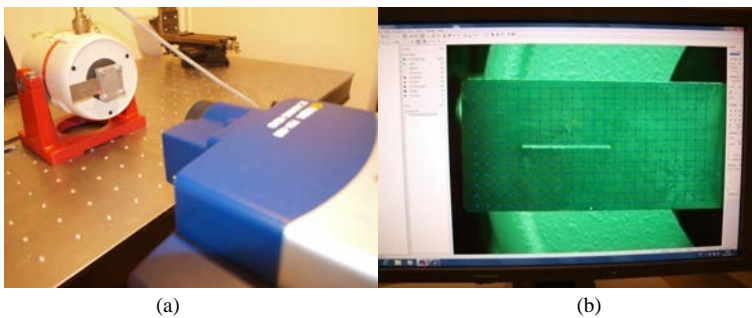


Fig. 2: (a) Experimental setup and (b) measurement points of the SLDV on the specimen

3. Finite Element Simulations

In order to obtain a deeper understanding of the deformation behavior computer simulations were performed. The commercial Finite Element code ANSYS was used to derive natural frequencies and mode shapes through modal analyses. The model depicted in figure 3 is a detailed copy of the experiment. For the steel plates a Young's modulus of 200GPa and a Poisson ratio of 0.3 were assumed. Damaged samples were simulated by introducing an extra mass equivalent to the experimental procedure. The model was meshed with elements of type Solid 186. This is an element using quadratic interpolation functions for the displacements. The total number of nodes in the mesh was between 130941 and 226416, whereby the latter number of nodes was used for the sample with an extra mass of 0.381 g. A frequency range from 0 to 1000 Hz was covered by the simulations, and four different modes were found in this interval. On a qualitative level, the simulation results are in good agreement with the experiments. The simulations are considered as validation of the results obtained with the SLDV, and vice versa.

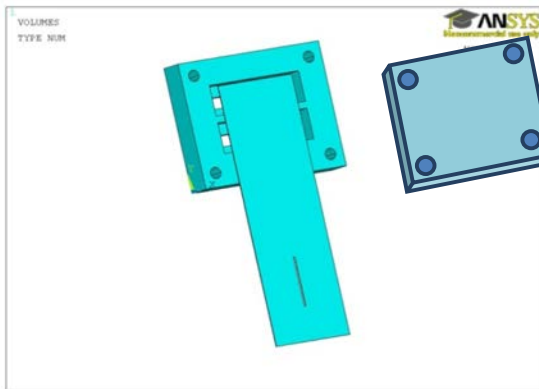


Fig. 3: Sketch of the simulated specimen and specimen holder

4. Results of Experiment and Simulation

A comparison of the experimental and simulation results regarding the resonant frequencies of undamaged samples is depicted in figure 4, and the deviations between experiment and simulation are summarized in table 2. The deviations were in the range of approximately 3 %. Differences in this order of magnitude must be expected when results from two completely different methods are compared. The effect of an extra mass on the resonant frequencies is summarized in figure 5 and tables 3 and 4. Once again satisfactory agreement between experiment and Finite Element Analysis was achieved.

Table 2: Resonant frequencies of experimental and FE analyses of undamaged samples

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
FEA	60	270	381	878
Exp. Analysis	58	267	367	850
Error (%)	3.34	1.12	3.67	3.19

Table 3: Resonant frequencies [Hz] recorded experimentally.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Original	58	267	367	850
Mass 1	58	265	365	845
Mass 2	55	256	345	849

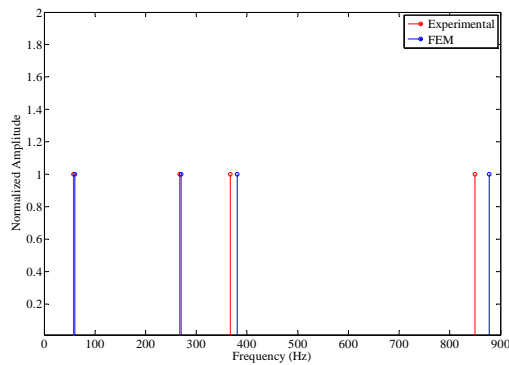


Fig. 4: Resonant frequencies collected from experimental and FE analyses of undamaged samples

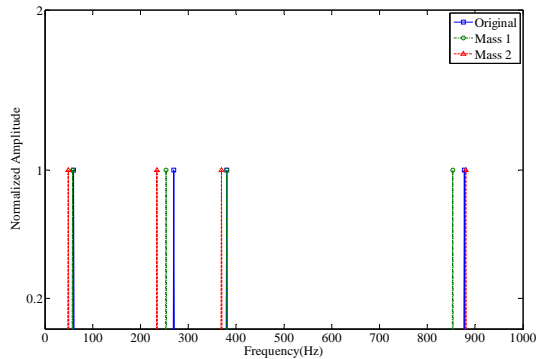


Fig. 5: Simulation results of the specimen before and after adding extra masses

Table 4: Resonant frequencies [Hz] collected from simulations.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Original	60	270	381	878
Mass 1	58	254	381	853
Mass 2	49	234	369	881

Aside from the value of resonant frequencies, the damping ratios related to the different vibration modes provide additional information about the sample. To obtain the damping ratio, one first needs a complete frequency response diagram showing amplitude versus vibration frequency. Since the presence of noise in the measurements is unavoidable, we here sum up the frequency responses of all measurement points belonging to one definite specimen on a logarithmic scale. Thereby, the appearance of noise is reduced. The experimental frequency response diagrams for samples with and without additional mass are depicted in figures 6 and 7.

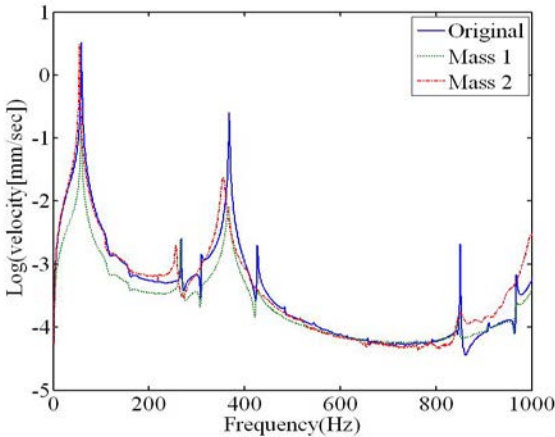


Fig. 6: Comparison of frequency response before and after adding extra masses

From these diagrams one can determine the damping ratio ζ using the bandwidth method. Thus, one obtains [6]

$$\zeta = \frac{\Delta\omega}{2 \cdot \omega_0} \tag{1}$$

where the bandwidth $\Delta\omega$ is defined as the width of the frequency response curve when the amplitude is $1/\sqrt{2}$ times the peak value at ω_0 . The values for the damping ratios of the different vibration modes are given in table 5. One can see that especially the damping ratio of mode 4 is

very sensitive to alterations of mass at the location indicated in figure 1b. Therefore, the value of the damping ratio can be used as criterion whether a sample has been damaged.

Table 5: Damping ratio before and after inserting extra mass

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Original	0.0345	0.0037	0.0068	0.0012
Mass 1	0.0345	0.0038	0.0068	0.0024
Mass 2	0.0370	0.0078	0.0268	0.0088

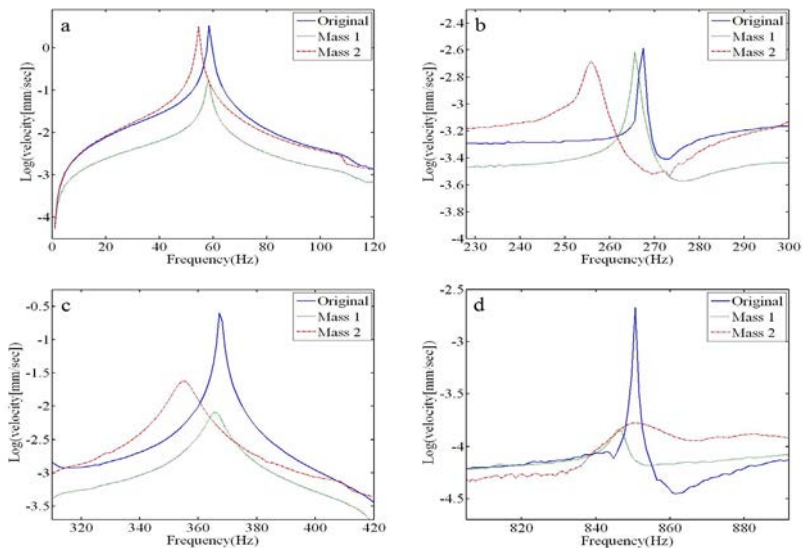


Fig. 7: Indicating modes of the Fig. 6 separately, (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3 and (d) Mode 4

5. Correlation Coefficient Method

Finally, we suggest a criterion which quantifies the damage of the different specimens. For this purpose, we utilize the method of correlation coefficients [4]. This method was originally developed to determine correlations between statistically distributed samples. Nevertheless, it is also very useful when undamaged and damaged specimens are compared. We here compare the values of resonant frequencies of undamaged and damaged samples. The correlation coefficient is defined as

$$CC = \frac{\sum_n (R_n - \bar{R})(A_n - \bar{A})}{\sqrt{\left(\sum_n (R_n - \bar{R})^2\right)\left(\sum_n (A_n - \bar{A})^2\right)}} \quad (2)$$

Where R_n are the reference values, \bar{R} is mean of the R_n , A_n are the values to be compared and \bar{A} is mean of the A_n . CC is a value between -1 and 1. Therefore, $r = 1 - CC^2$ is used to get a value between 0 and 1. For $r = 0$ the two sets of values are perfectly correlated, and $r = 1$ means that they are completely uncorrelated. In our treatment, R_n and A_n are the values of the resonant frequencies of undamaged and damaged specimens, respectively.

Applying this method to the experiments of the present study yields values for r which are summarized in table 6. In fact, these values can be considered as a measure for damage occurring in the specimens.

Table 6: Values for r obtained from experimental analyses (Original specimen is the reference).

	Original	Mass 1 added	Mass 2 added
$r = 1 - CC^2$	0	$9.38 \cdot 10^{-7}$	$7.54 \cdot 10^{-4}$

It is important to notice that the values obtained for r are usually rather small when applied to vibration analyses. This is because the correlation coefficient was originally developed for the interpretation of randomly distributed samples or populations. The correlation coefficient is an appropriate tool to determine even weak correlations of statistical experiments. However, in vibration analyses even damaged samples still show a strong correlation with undamaged ones. But the differences of the signals become more evident when observed on a finer scale. For instance, the experiments for the vibration response of the present investigation look quite similar on the scale of figure 6, but the differences become clear on the scale of figure 7. Therefore, the threshold value for r distinguishing between damaged and undamaged samples is small.

6. Summary and Conclusions

In this study, a scanning laser Doppler vibrometer was used to analyze the vibration response of thin plates of steel, and the results for the resonant frequencies were validated by Finite Element simulations. The damage of a sample was modeled by adding an extra mass to the specimen. The grade of damage was successfully quantified with the help of the correlation coefficient method. An alternative method is the determination of the damping ratio related to the different deformation modes. It has been demonstrated that a scanning laser Doppler vibrometer is a useful tool to detect damages of specimens non-destructively.

Acknowledgments

The authors like to thank the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and the Vienna Technology Agency (ZIT) for financial support through the COMET program.

References

- [1] Y. Zou, L. Tong and G. P. Steven, Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures-a review, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 230, pp. 357-378 (2000)
- [2] S. W. DEBLING, C. R. FARRAR, M. B. PRIME and D. W. SHEVITZ (1995) Report LA-13070-MS, Los Alamos, NM, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review
- [3] Pizhong Qiao, Kan Lu, Wahyu Lestari and Jialai Wang, Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates, *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 409-428, (2007)
- [4] Lizheng Zhang, Development of Microelectronics Solder Joint Inspection System: Modal Analysis, Finite Element Modeling, and Ultrasonic Signal Processing. Dissertation, Georgia Institute of Technology, (2006)
- [5] P. Castellini, M. Martarelli, E.P. Tomasini, Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technology's needs. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1265-1285
- [6] Manuel Martinez Rodriguez, Analysis of Structural Damping, master dissertation, Lulea University of Technology, (2006)



STANDARD SIGNALS RECORDED BY ULTRASONIC TOMOGRAPH, FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CONCRETE ELEMENT THICKNESS

Krzysztof SCHABOWICZ*

* Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

k.schabowicz@pwr.wroc.pl

Abstract

To assess the thickness of the concrete structures may be useful non-destructive method. Most are acoustic methods. One such method, that belongs to the modern method is ultrasonic tomography. Using this method, however, requires great skill and experience of the user, in particular, the analysis of the results. Useful in this respect may be the reference signals to non-destructive evaluation of concrete structures thickness using ultrasonic tomography. Such signals for concrete samples made in the laboratory were prepared by the author, and examples of signals to evaluate the thickness is given in this paper.

Key words: concrete, nondestructive tests, ultrasonic tomography

1. Introduction

Building structures made of concrete need to be monitored and diagnosed during both their construction and service life. For this purpose nondestructive techniques can be used. Today they are increasingly commonly used in the diagnostics of various concrete structures [2, 4-7]. From among nondestructive techniques, acoustic techniques are most often used. One of them is ultrasonic tomography [2]. But it requires considerable skills and much experience on the part of the user, especially in the analysis of the obtained results. Standard (reference) signals for the nondestructive evaluation of the thickness of concrete structures by means of an ultrasonic tomograph can be helpful in this regard. Such standard signals for concrete specimens made in a laboratory have been determined by the author. This paper presents exemplary standard signals for evaluating concrete thickness.bottom.

2. Description of tests

Nondestructive equipment in the form of an ultrasonic tomograph (fig. 1) was used to determine the standard signals. The tomograph includes a special multihead ultrasonic antenna and a laptop with dedicated software for recording graphic images. The antenna has 48 independent dry contact point heads (probes). It is used to excite, receive and process ultrasonic signals. The tomograph can be used to determine the thickness of concrete elements accessible only from one side and to detect cracks, air voids and other spaces which may be either empty or filled with

liquid or a material whose density and other physical and mechanical properties differ from those of the surrounding concrete [1, 3, 4].

The diagrams in figure 2 show the directions of propagation of the tomograph ultrasonic wave when dry contact point heads are used [3, 4]. The diagram for the longitudinal wave, represented by open blue circles, is shown in fig. 2 a) while the diagrams for the transverse wave, represented by closed red circles and a red curve, are shown in figs 2 b) and 2 c). The double arrow and the circle with a dot in its centre show the orientation of the ultrasonic wave movement transducer vibration vector.

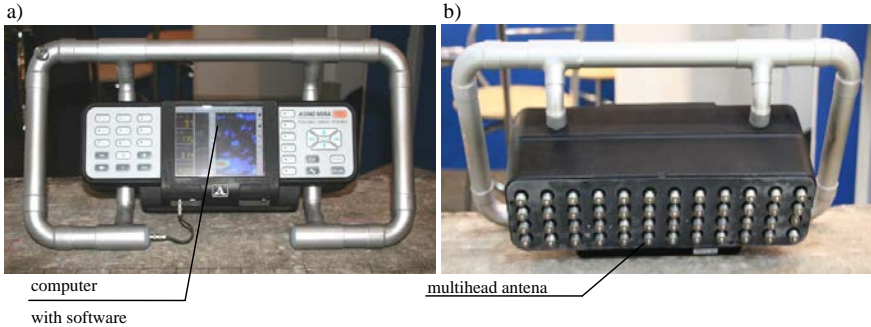


Fig.1 Ultrasonic tomograph: a) top view, b) bottom view

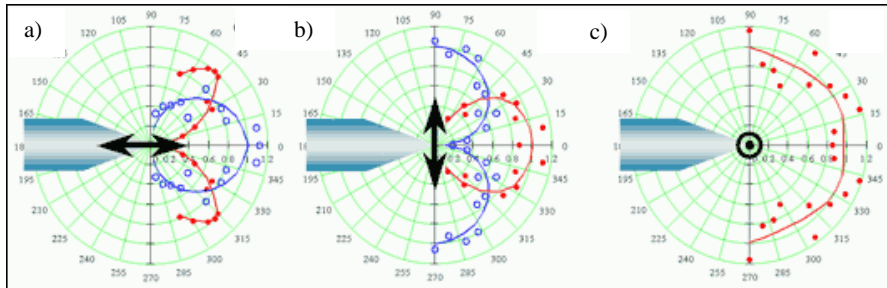


Fig. 2. Diagrams showing directions of ultrasonic wave propagation when dry contact point heads are used: a) longitudinal wave (open blue circles, blue curve), b) and c) transverse wave (closed red circles, red curve) [3, 4]

The ultrasonic tomograph (fig. 1) was used to test 1000×1000×1000 mm cube-shaped concrete specimens shown in fig. 3. The exemplary concrete specimens presented below: specimen A without inclusions and specimen B with an inclusion in the form of a lightweight expanded clay aggregate (LECA) layer situated as shown in fig. 3B, were made of concrete C25/30 with aggregate of up to 8 mm grading. Six measuring places were marked on each specimen. The axes of the places are shown in fig. 3. One measuring band was marked in each of the measuring places. Eight measuring points, in which the velocity of the ultrasonic wave was measured and recorded, were marked in each of the measuring bands. As a result, flat images

of the inside of the investigated concrete element in three mutually perpendicular directions, shown as three images: B, C and D, were obtained. The images with the measuring antenna in a coordinate system are illustrated in fig. 4.

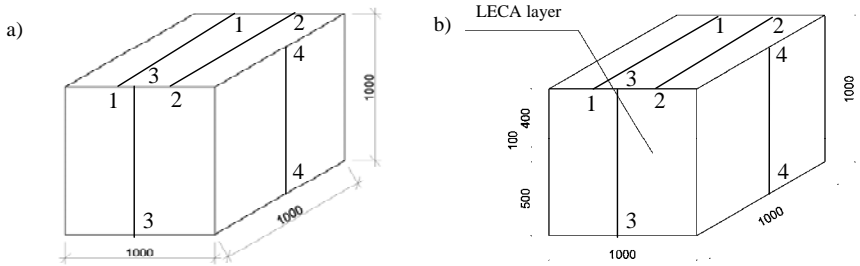


Fig. 3. Schematic of exemplary test specimens with marked measuring places: a) specimen A without inclusions, b) specimen B with inclusion in form of LECA layer

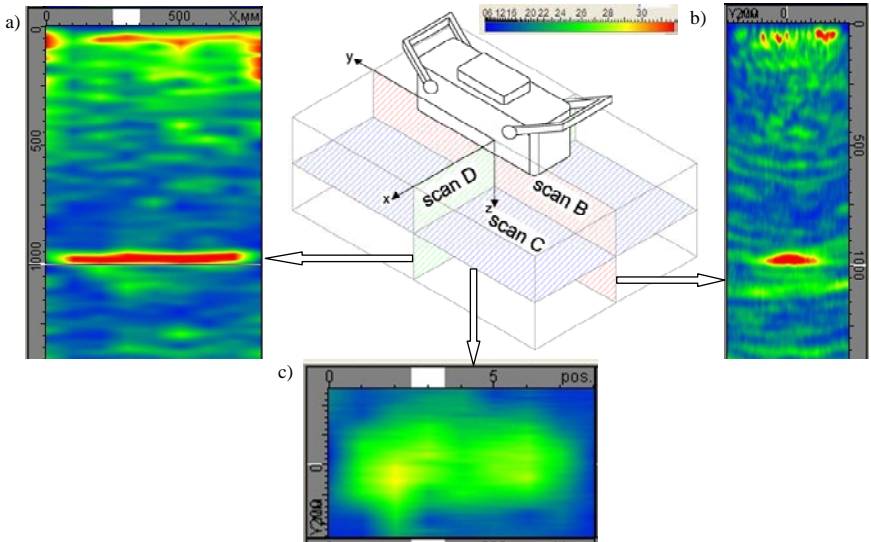


Fig. 4. Measuring antenna in coordinate system and obtainable images: a) image type D, b) image type B, c) image type C

3. Standard signals

Exemplary results of the nondestructive testing by means of the ultrasonic tomograph, in the form of images B, C and D, are presented in figs 5-10.

Figure 5 shows the images for specimen A (without inclusions) and measuring point 1. The arrows indicate the concrete specimen's thickness (amounting to 1000 mm).

Figures 6 and 7 show the images obtained for specimen A and respectively measuring places 2 and 3. The arrows indicate the concrete specimen thickness

(amounting to 1000 mm). Figure 8 shows the images obtained for specimen B and measuring place 1. The specimen contained an inclusion in the form of a LECA layer, as shown in fig. 3 b). In this case the ultrasonic wave reflected off the LECA layer, revealing its thickness, as indicated by the arrows.

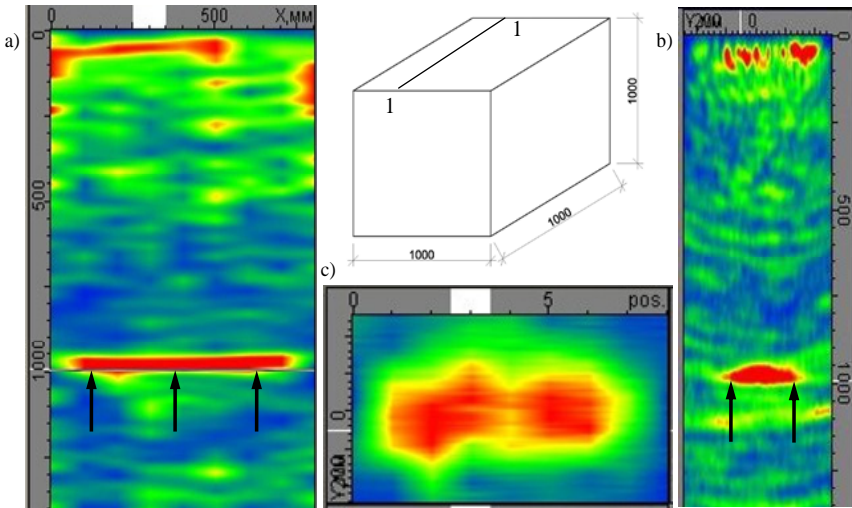


Fig. 5. Images obtained for specimen A and measuring place 1: a) image D, b) image B, c) image C.

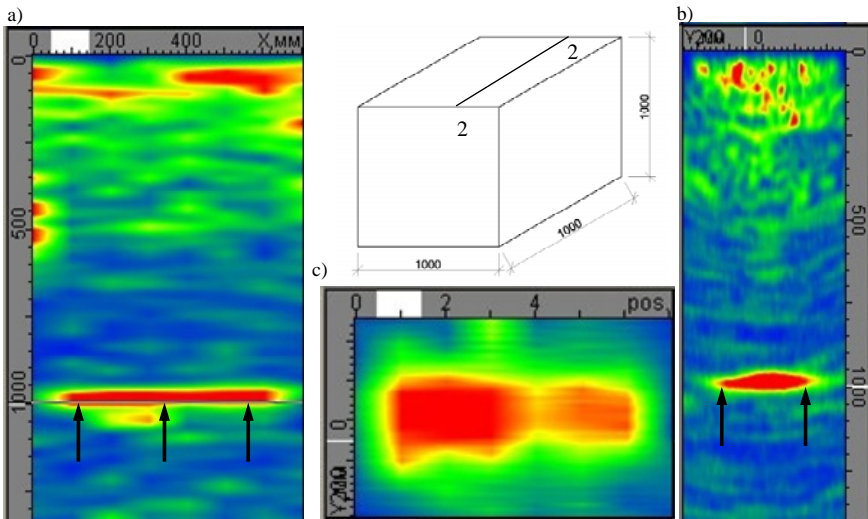


Fig. 6. Images for specimen A and measuring place 2: a) image D, b) image B, c) image C.

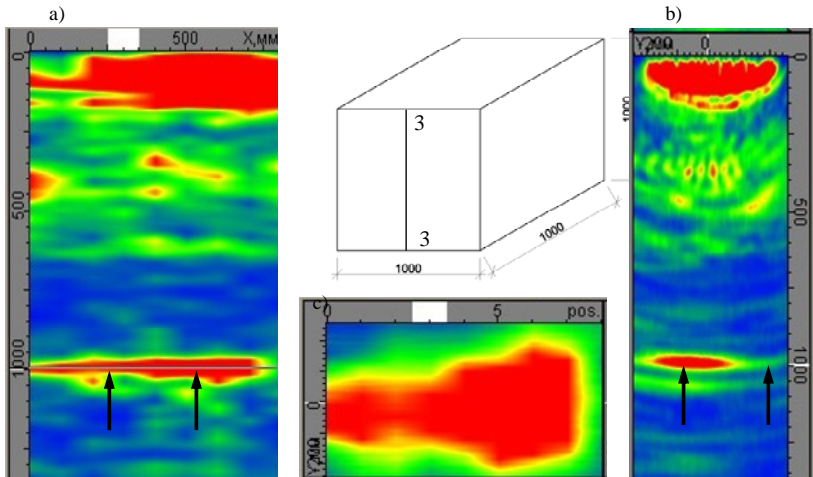


Fig. 7. Images obtained for specimen A and measuring place 3: a) image D, b) image B, c) image C.

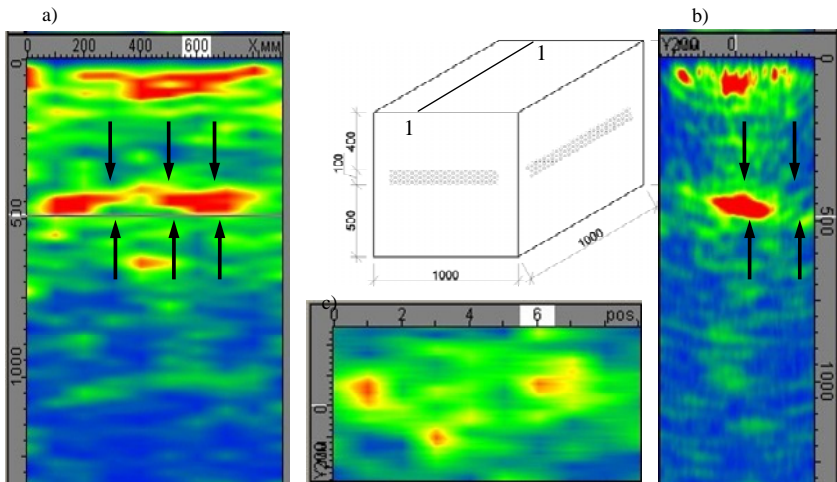


Fig. 8. Images obtained for specimen B and measuring place 1: a) image D, b) image B, c) image C.

Figures 9 and 10 show the images obtained for specimen B and measuring places 2 and 3, respectively. The arrows indicate LECA layer thickness (amounting to 100 mm).

Figure 10 also shows (arrows) the specimen's thickness in the place where there was no LECA layer (measuring place 3 on the concrete specimen's side).

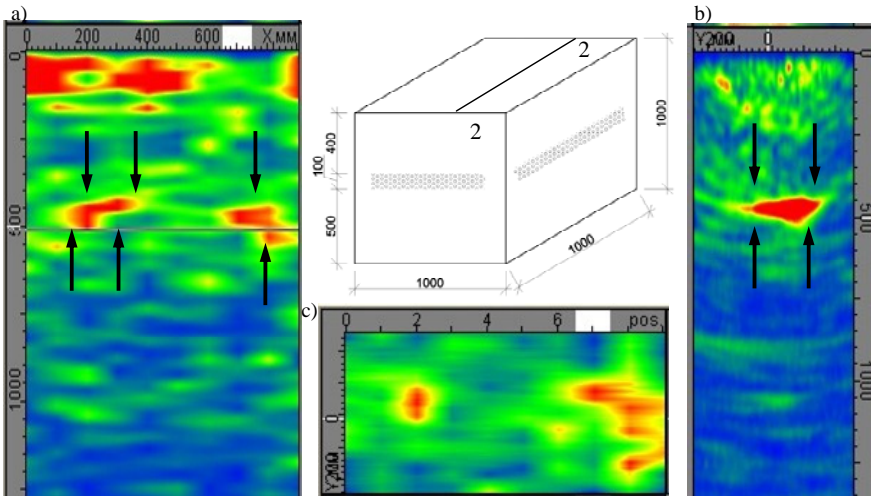


Fig. 9. Images obtained for specimen B and measuring place 2: a) image D, b) image B, c) image C.

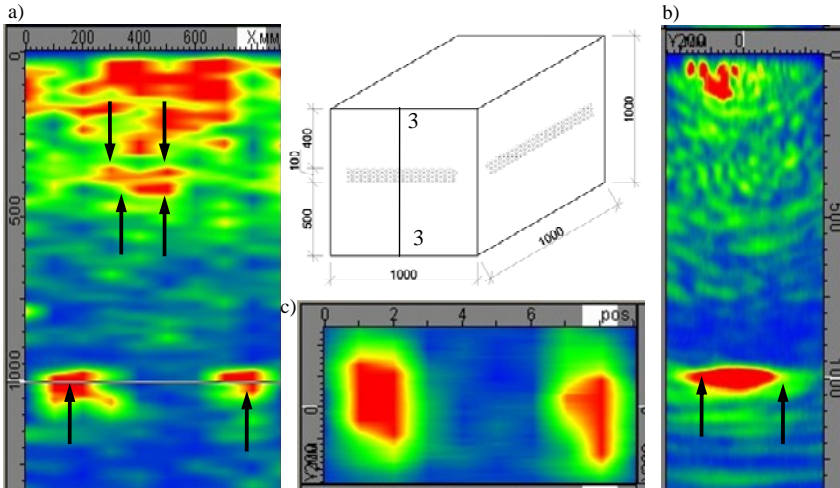


Fig. 10. Images obtained for specimen B and measuring place 3: a) image D, b) image B, c) image C.

4. Conclusion

Standard (reference) signals for two concrete specimens: one without inclusions and the other with an inclusion in the form of a lightweight expanded clay aggregate (LECA) layer, have been determined on the basis of the ultrasonic tomography tests. The analysis of the test results showed that it is possible to determine the thickness

of a concrete specimen and that of an inclusion in the form of a LECA layer by means of the ultrasonic tomography technique. It should be noted that more such standard signals need to be determined for the monitoring and diagnostics of concrete structures.

Bibliography

1. Bishko A. V., Samokrutov A. A, Shevaldykin V. G.: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. *e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*. vol. 13, 2008.
2. Hoła J., Schabowicz K., State-of-the-art nondestructive methods for diagnostics testing of building structures – anticipated development trends, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11, 2010.
3. Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Thickness Measurements and Flaw Detection in Concrete Using Ultrasonic Echo Method. *J. Nondestructive Testing and Evaluation*. – 1997, Vol. 13, pp. 73 - 84.
4. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities. The 5th International Conference “Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry”. *Mashinostroenie*, 2006, p.152.
5. Schabowicz K., Hoła J.: Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, Yokohama, Japan, 2009.
6. Schabowicz K., Hoła J., Styś D.: Nondestructive elastic-wave tests of concrete in foundation slab, 10th European Conference on Nondestructive Testing, Moscow, Russia, 2010.
7. Schabowicz K., Hoła J., Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, *Materials Transactions*, 53, 2012, p. 296-302.



RENTGENODIFRAKTOMETRICKÉ HODNOCENÍ DOKONALOSTI SUPRAVODIVÉ KERAMIKY RÖNTGENODIFRACTOMETRIC ESTIMATION OF SUPERCONDUCTING CERAMIC PERFECTION

Lubomír SODOMKA

TUL Liberec, ADHESIV Liberec 14 Czech Republik,

lubomir.sodomka@volny.cz

Abstrakt

V příspěvku je řešena problematika nedestruktivního testování zrn vzorku supravodivé keramiky připravených metodou ekologicky a energeticky výhodnou vysokoteplotní samošířící se syntézou, (SVS, SHS) objevenou A.G.Meržanovem a I.P. Borovinskou v roce 1989. Metodou lze připravit jakoukoliv vysokoteplotní keramiku, využívanou zvláště na ochranu družic a přistávacích modulů, případně raketoplánů. Metodou lze vyrábět s velkými úsporami energie proti stávajícím metodám vysokoteplotní keramiku jako jsou karbidy, nitridy, boridy, silicidy, hydridy, chalkogenidy, intermetalidy a oxidy. Poněvadž jejich vlastnosti závisí na dokonalosti krystalových zrn, vzniká otázka, jak jsou zrna dokonalá a jak jednoduše dokonalost popsat. Je navržena jednoduchá metoda hodnocení dokonalosti zrn keramiky rentgenovou difrakcí a určena dokonalost supravodivé keramiky oxidu yttriumbariumměďnatého ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$).

Abstract

In the contribution the problematic of nondestructive testing of the ceramic grains is being solved, prepared in using the new energetic and ecological advantageous self-propagated high temperature synthesis (SHS). This technology is capable to produce high temperature ceramics as carbides, nitrides, borides, oxides and others are. The new diagnostic nondestructive röntgenodiffractometric simple method has been proposed to the estimation of the superconducting ceramics grain using the diffraction of X-rays of the yttriumbariumcopperoxide ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$).

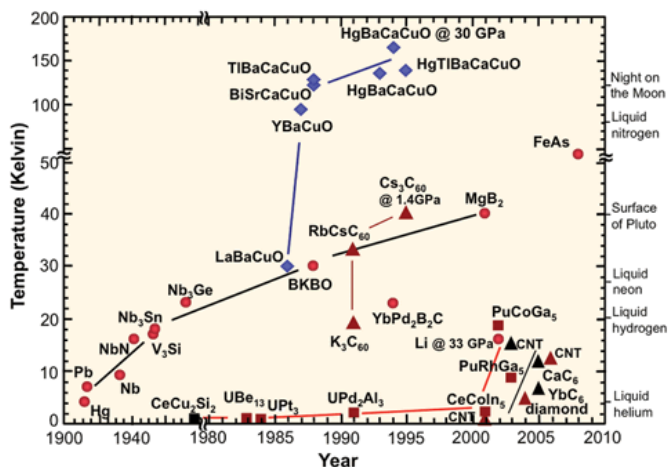
1. Úvod

Supravodivost je jev v pevných látkách, při kterém pevná látka ztrácí elektrický odpor při teplotě vyšší než je absolutní nula. Byl objevený v roce 1911 H.Kammerligh-Onnnesem v roce 1911. Objev byl tak významný, že byl ohodnocený Nobelovou cenou za fyziku (NCF) v roce 1913. Chyběla však teorie, kterou navrhli v roce Bardeen, Cooper, Shiefer, za kterou získali NCF v roce 1972. Nevýhodou pro aplikace supravodivosti dosavadních supravodičů (Hg, Pb, Sn, Nb) byly nízké kritické teploty pod 4,2K, při kterých klesla jejich vodivost prudce na absolutní nulu. Zajímavé je, že typické vodivé kovy jako zlato, stříbro a měď supravodivost nejeví. Byly hledané materiály s vyšší kritickou teplotou alespoň nad 70K. V roce 1986 získali J.D.Bednorz a K.A.Müller supravodiče s kritickou teplotou 35K na perovskitové keramice. Tuto teplotu překonal krátce nato Ching-Wu Chu na 92K s keramikou $YBaCuO$ (YBCO). Situace dosahování kritické teploty až po tzv. vysokoteplotní keramiku do současnosti je uvedena na obr.1. Z tabulky je patrné, že jedním z vysokoteplotních supravodivých materiálů je oxid yttriumbariumměďnatý ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$), zkráceně YBCO.

Kromě toho byly hledané technologie výroby tohoto materiálu pro masové využití. Jednou z metod, kterou pro tuto výrobu zajistily, a to velmi energeticky a ekologicky výhodnou technologií v roce 1989 A.G.Meržanov a I.P.Borovinská v Ústavu molekulárních struktur v Moskvě. Nazvali ji Vysokoteplotní samošířící se syntéza., VSS, (SHS selfpropagating high temperature synthesis).

2. Vysokoteplotní samošířící se syntéza

Po objevu vysokoteplotní samošířící se syntézy (VSS) se VSS ukázala jako vhodná pro přípravu vysokoteplotní keramiky jako je SiC, BN, TiC a dalších. Využila se také tato technologie k přípravě supravodivé keramiky YBCO. Do reaktoru byla připravená vsázka v stechiometrickém poměru k reakci do reaktoru. Povrch byl zahřátý na zápalnou teplotu reakce laserem (obr.2). Reakce na povrchu předává energii spodním vrstvám a materiálem se šíří v úzké zóně slučovací reakce (obr.2) a vytváří se sloučenina YBCO. Poněvadž supravodivost keramických materiálů záleží jak na struktuře vytvořeného supravodiče tak i na jeho poruchách je třeba provést nedestruktivní zhodnocení struktury vytvořené touto technologií. Pro takovou zkoušku se jeví jako vhodná metoda rentgenová difrakografie. Poněvadž technologie VSS může připravit materiály jak jako monokrystaly, tak i jako prášky, byl pro další studium zvolený práškový materiál.

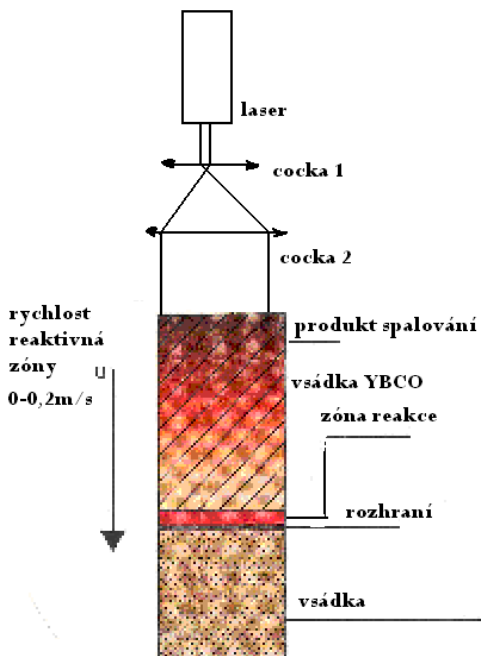


Obr. 1 Stav kritických teplot supravodičů do roku 2010

3. Rentgenová difrakografie materiálu YBCO

Rentgenová difrakční měření byla prováděná na rentgenové difrakční aparatuře rentgenovém difraktometru a spektrometru fy Siemens za využití měděné rentgenky a její vlnové délky CuK α . Práškový materiál YBCO byl slisovaný do tabletek průměru 30mm a umístěný do pracovní polohy difraktometru za použití Debye-Scherrerova-Hullovy práškové difrakografie [2] [3] [4]. Pro určení strukturálních údajů byl proměřený celkový difrakční diagram, tj. pro difrakční Braggův úhel 20 až 90°. Výsledný difrakční záznam pořízený práškovou metodou je na obr.3. Sledovaná supravodivá keramika je typu perovskitu s tetragonální mřížkou s úzkými difrakčními maximy, které se dokonale shodují s teoretickými ideálními difrakčními čarami ve spodní části obrázku, což svědčí v prvním

kvalitativním přiblížení o dokonalosti struktury měřených zrn YBCO. Nyní budeme výsledky měření na obr.3 kvantifikovat.



Obr.2 Podstata metody VSS

Z obr.3 je patrné, že difrakční maxima vycházejí s poměrně vysoké hladiny záření rozptýleného po celém spektru difrakčního záznamu. K hodnocení dokonalosti krystalových zrn prášku YBCO je nutné vzít v úvahu difrakční maxima i vzniklé pozadí záznamu, které od sebe oddělíme. Nejprve využijeme difrakční čárové spektrum. Difrakční maxima budeme měřit od pozadí a omezíme se na nejsilnější difrakční maximum. Krystalovou dokonalost popíšeme poměrem

$$D = v/p \quad (1)$$

v němž v je výška největšího maxima v libovolných jednotkách a p je šířka v poloviční výšce, což pro největší maximum dává $D=114$, což svědčí o dokonalosti zrn YBCO. V ideálním případě je $D=\delta(\theta)$ je D rovné delta funkci $\delta(\theta)$. Nyní obrátíme pozornost na výšku pozadí, které je v celém difrakčním intervalu téměř konstantní, což může být způsobené v podobě nanočástic nezreagované části vzorku a vznikem nanočástic sloučenin základních složek v nanorozměrech. Tuto část odhadneme z difrakčních záznamů. Práškové vzorky budeme považovat za dvojsložkové, a to krystalové části prášku a zbytkové která způsobuje vznik pozadí. Podle zákonů kvantitativní rentgenodifrakční analýzy, je intenzita difrakčního maxima složky

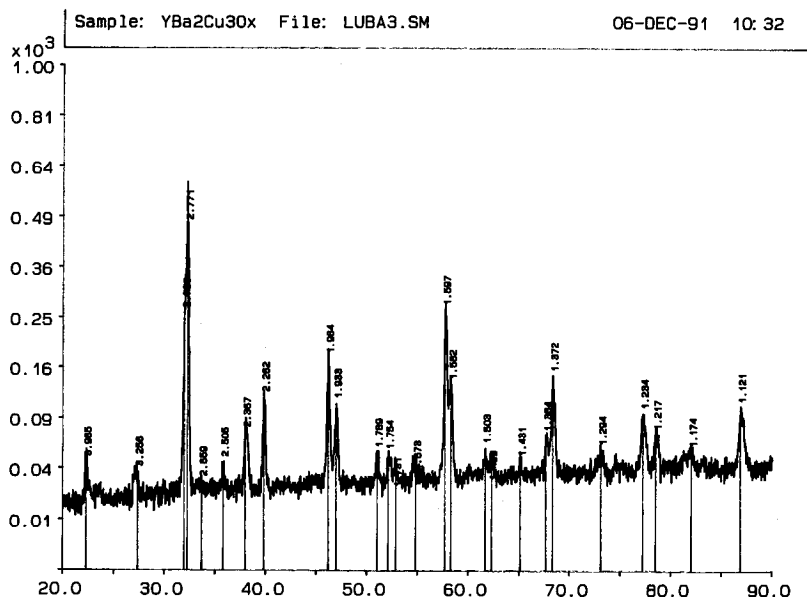
$$I(hkl)=Kx(hkl), \quad (2)$$

kde x je hmotnostní podíl krystalové složky, K je konstanta nezávislá na x ([2] str.149).

Na základě této úvahy odhadneme část vzorku vytvářející pozadí z poměru výšky difrakčního maxima měřeného od osy diagramu

$$U= V(hkl)/P(hkl)=6, \quad (3)$$

což se v našem případě rovná 6 a „nekrystalická část“ tvoří jednu šestinu tj. 16 hmotnostních procent vzorku.



Obr.3 Difrakční záznam YBCO

Tím lze vyložit i značnou velikou hodnotu difraktovaného záření v pozadí, což je pro metodu VSS neobvyklé.

4. Literatura

- [1] Sodomka, L., Fiala, J. Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi 1,2. Adhesiv Liberec 2003,2004 , kap.28
- [2] Sodomka,L.: Rentgenová difraktografie pevných látek. SNTL Praha 1960
- [3] Valvoda,V., Polcarová,M., Lukáč,P.: Základy strukturní analýzy Praha 1992
- [4] Prosser, V., et al.: Experimentální metody biofyziky. Academia Praha 1989

VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD K HODNOCENÍ TECHNOLOGIÍ, STRUKTURY A VLASTNOSTÍ NANOVLÁKEN

THE USE OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR THE EVALUATION OF TECHNOLOGY, STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOFIBRES

Lubomír SODOMKA

Adhesiv, TUL Liberec,

lubomir.sodomka@volny.cz

Motto: R.Feynman (parafráze) : Je velký prostor pro studium fyziky v rozměrech od 1 nm do 100 nm..Originál: R.P.Feynman „ There ´s plenty room at the bottom“.

Abstrakt

V příspěvku je uvedený přehled technologií zvláknování nanovláken , náznaky teorie a použití akustické emise k testování monofilů. Jsou uvedené některé stávající technologie přípravy polymerových nanovláken a zvláště pak nedestruktivní diagnostika technologie, struktury a vlastnosti nanovláken z nanotrubiček a jejich diagnostické nedestruktivní testování. Při přípravě protahováním a dloužením je možné využít akustické emise k hodnocení kvality těchto vláken.

Abstract

In the paper the review of nanofiber technology are being presented, elemental theories are being suggested and properties testing method of drawn and enlarged monofils using acoustic emission are being proposed. The paper is being also contained the review of all nanofiber technologies used for their production. The principles of preparing the polymer nanofiber technologies: gravitational, melt blowing, electrostatic, drawing, enlarging and centrifugal are being reviewed. The nondestructive methods for diagnostic of nanofibers are being presented.

1. Úvod

Od roku 1970 se objevily pro výrobu nové technologie materiálů v nanorozměrech. Ukázaly se jejich využitelné a univerzální vlastnosti ve všech oborech techniky také v biologii a medicíně. Zvláštní a zásadní význam mají pak nanovlákná. Nanovlákná jsou významným konstrukčním prvkem přírodních podpurných pletiv v listech stoncích, ve svalech a kostech [1] kap.26. Jde o nový druh materiálu sestávající ze dvou fází pevné fáze v jádru nanovlákná a povrchovou fází, spojených v jeden celek. Nanovlákná se vyskytují ve dvou druzích jako vlákna polymerová a vlákna nanotrubičková. V prvním případě jde o dvojfázovou strukturu sestávající z povrchu vláken a objemu. Jde tedy o spojení dvojrozměrové ,2D a trojrozměrové, 3D struktury. Polymerové struktury jsou již podle jejich technologie jen částečně krystalické. Chtějí-li se zaručit reprodukovatelné vlastnosti polymerových nanovláken, je třeba diagnostikovat jejich strukturu. K tomu je nutné využívat všechny dostupné diagnostické nedestruktivní metody, a to metody přímé i nepřímé jako jsou metody elektronové mikroskopie a rentgenové, elektronové a neutronové difrakční metody, metody optické jako jsou laserové difrakční metody, holografie, spektroskopické metody, interferenční metody,

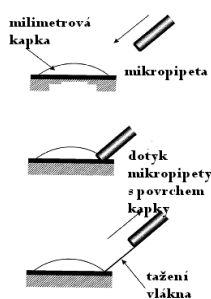
metoda snižování úplného odrazu (ATR metoda), rezonanční metody [1], kap.3 . Průběžnou kvalitu výroby nanovláken je možné zajišťovat laserovými difrakčními a interferenčními metodami a akustickou emisí. Daleko složitější je diagnostika uhlíkových tubulenových vláken. Poněvadž jde o strukturu v nanorozměrech, jevící i vlastnosti kvantové, je třeba využívat i všech diagnostických metod zasahujících do nanorozměrů jako jsou ramanovská, rayleighovská spektroskopie, metoda zeslabování úplného odrazu, laserové difrakční metody a skvrková interferometre, rentgenové difrakční a interferenční metody [1] kap.3. Jistě se uplatní i rezonanční metody [1] díl1. Ukazuje se, že nanovláčna přináší do materiálových věd nové materiály s novými vlastnostmi, které vyžadují k hodnocení jejich technologie a vlastností, téměř všechny známe nedestruktivní metody, navíc pak ještě takové, které vyžadují hodnocení kvantových projevů materiálů, neboť nanovláčkové uhlíkové nanotrubičky a jejich agregáty svými rozměry zapadají do rozměrů kvantové fyziky. Nanovláčna ožíví podstatně nedestruktivní diagnostické metody a možná, že budou vyžadovat i metody nové.

2. Technologie nanovláken

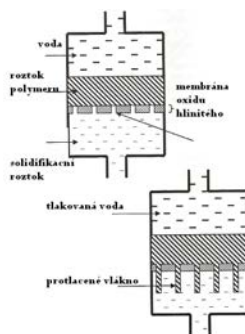
I když stopy nanovláken mohou vést až do Starého Egypta, kdy pro ozdobné účely textilií byla tažená vlákna ze zlata a stříbra a mohou pro vědecké účely dosahovat i rozměrů nanovláken. Uhlíkovým nanovláčným předcházela v 90 letech 19.století, také uhlíková vlákna T.A.Edisona pro žárovky. Za nanovláčna se považují délkové útvary, jejichž příčné rozměry dosahují hodnoty daleko menší než 1000nm. Dnes existuje již přesnější definice. Nanovláčna mají příčné rozměry v mezích 1nm až 100nm. Zatímco se tyto hodnoty u polymerových vláken dosahují obtížně, u uhlíkových trubiček to již tak obtížně není.

2.1 Přehled technologií polymerových vláken

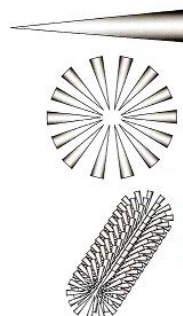
Zařízení na tvorbu nanovláken jsou založená na několika principech , a to: 1. tažení z roztoku či taveniny (obr.1), 2. protlačováním mikrootvory v masce (obr.2), 3. sdrůzováním molekul (obr.3) [2], 4. rozfukáváním roztoku či taveniny (obr.7.4 a 7.6), 5. metoda elektrostatického zvlákňování a 6. metoda odstředivého zvlákňování. Zda se najdou ještě další metody ukáže budoucnost. Začneme zatím nejrozšířenější metodou elektrostatického zvlákňování (elektrozvlákňování).



Obr.1 Tažení nanovláken



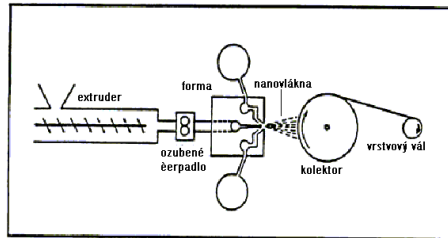
Obr.2 Protlačování nanovláken



Obr.3 Sdrůzování

Zatím nejrozšířenější jsou technologie elektrostatického zvlákňování, technologie rozfukování a v poslední době technologie neproduktivnějšího odstředivého zvlákňování.

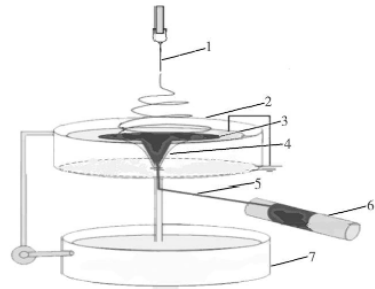
Zvlákňování se provádí jednak z roztoků a jednak z taveniny polymerů. Jako příklady elektrostatického zvlákňování je uvedené ještě jejich několik příkladů elektrostatického zvlákňování. Podstata prvního z nich je na obr.5A: Podle něho se vlákno ukládá na rovinový kolektor jako pavučinka případně jako rouno.



Obr.4 Technologie rozfukáním

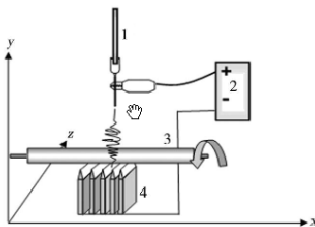


A

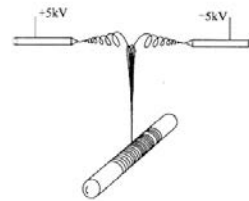


B

Obr.5 A Základní uspořádání k tvorbě nanovláčna B Modifikace uspořádání



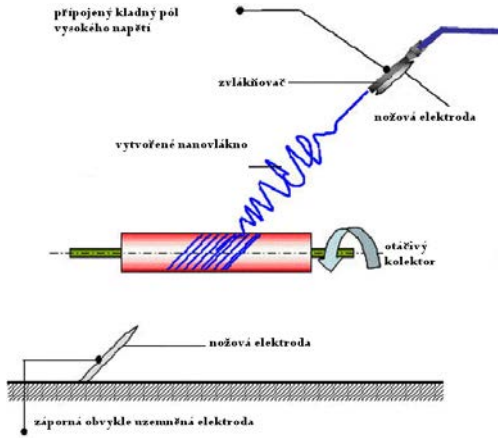
Obr.6 1 tryska, 2 zdroj napětí
3 otočný kolektor, nožové elektrody



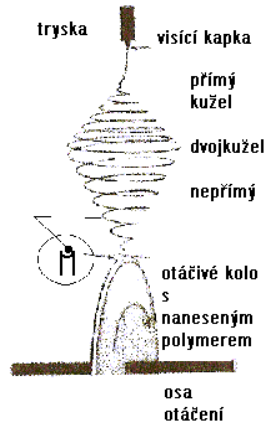
Obr.7 Zdvojení tvorby nanovláčna

Modifikace elektrostatického zvlákňovací technologie na obr.5 A, B umožňuje vytvářet z vytvořených vláken elektrostatickým zvlákňováním kabelky případně přízi tj. lineárního útvaru pro další textilní zpracování. Kolektorem je pak otáčející se deska s nálevkovitým otvorem.

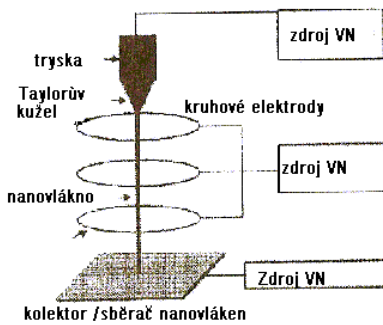
Nejproduktivnější a nejmladší metodou zvlákňování nanovláken je odstředivé zvlákňování, jehož princip je na obr.11.



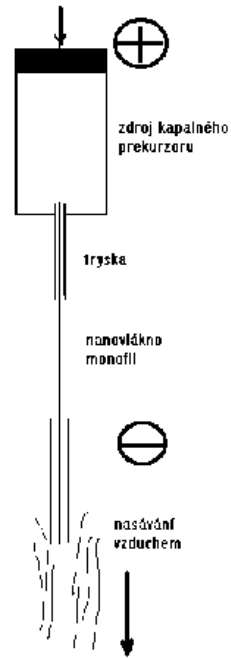
Obr.8 Šikmé navíjení nanovláknna na kolektor



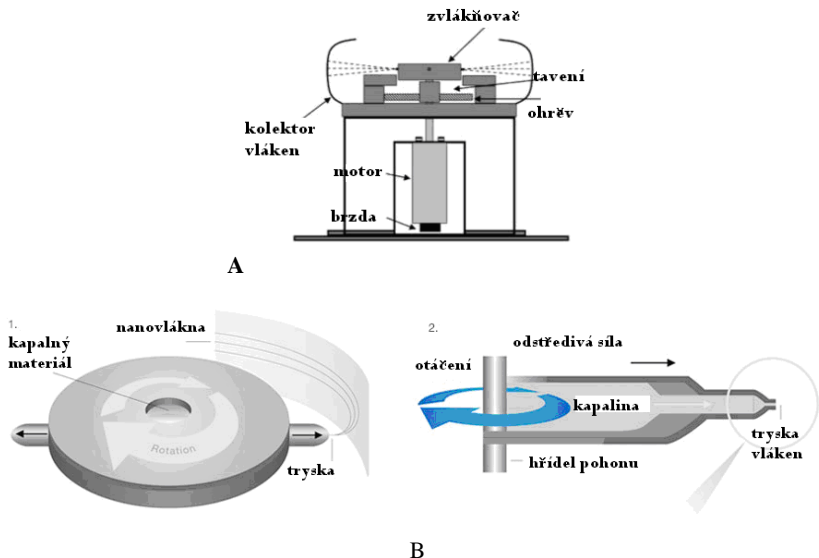
Obr.9 Nožový otáčivý kolektor



Obr.9 Víceelektrová soustava zajišťuje vlákno, v ose.

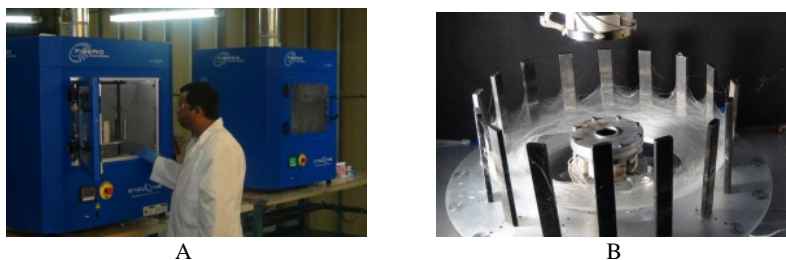


Obr.10 Vlákenný útvar zajišťuje nasávání do trubičky.



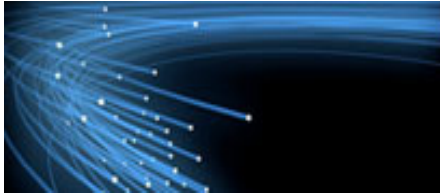
Obr.11 A: Celkové funkční schéma odstředivé zvlákňovací nanovláken, B: Detaily rotoru a celkový pohled na nanovláknovou odstředivku

Podstatou OZ(ZO) je zvlákňovací komora se dvěma tryskami. Tekutý materiál nanovláken je vytlačovaný odstředivou silou dvěma tryskami do okolí OZ, po výstupu strhávaný, proudícím vzduchem a ukládaný na okolní válcový kolektor v podobě vláken. Rozdělení proudu v nanovlákně je zajištěné prouděním vzduchu a elektrostatickým odpuzováním. Elektrostatické pole vzniká triboelektrickým nábojem vytvořeném třením v trysce a s okolním vzduchem. Provedení takové OZ linky pro malokapacitní výrobu je uvedené na obr.11A. Jak se ukládají vlákna na kolektoru OZ, tvořících vřeteno, je na obr. 11 B.



Obr.12. A: Zařízení OZ pro středně kapacitní výrobu. B: Ukládání vláken do vřetena.

Vznik svazku téměř rovnoběžných vláken při OZ je vidět na snímku pořízeného rychlostní kamerou na obr.13. Z obr.13 jsou patrné dráhy jednotlivých nanovláken a jejich přibližná rovnoběžnost i jejich průměr. Je možné určovat i průměr vláken, který je na první pohled rovnoměrný a „nekonečnost“ vláken při jejich ukládání na kruhový kolektor v podobě kruhových přáden, jak naznačuje i obr.12B. Výrobní zařízení na základě OZ vyvinula a vyrábí firma Fiberio typu cyklone L-1000 s různou výrobní kapacitou [16,17,18,19,20,21]



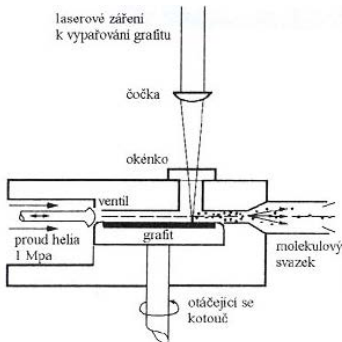
Obr. 13 Tvorba a ukládání svazku vláken



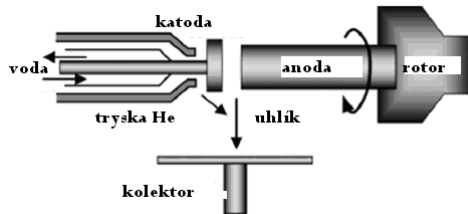
Obr.14. Chomáč připravený odstředivým zvlákněním

Odstředivá technologie vyřešila problém výroby většího množství vláken, které lze zpracovávat již běžnými textilními technologiemi, neboť poskytuje neomezené množství vláken ve vytvořeném rounu (obr.14). Dalším krokem je měřit řízení technologií k dosahování reprodukovatelnosti a jakosti vyráběných vláken a jejich vlastností např. stejnoměrnosti. K tomu je třeba využívat současných nedestruktivních metod zkoušení materiálů a případně vyvinout nové pro nanovlákná a aplikovat nedestruktivní metody testování na nanovlákná.

2.2 Přehled technologií uhlíkových nanotrubiček (nanotubulenů)



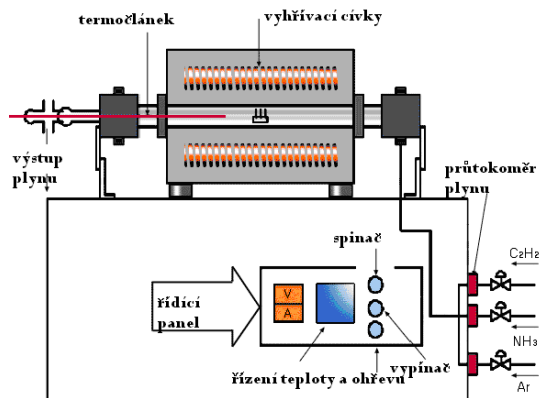
Obr.15 Podstata laserové technologie



Obr.16. Plazmová technologie přípravy nanotrubiček

Technologie nanotrubiček je mnohem mladší než technologie polymerových nanovláken. Navazuje na technologii fullerenu objevených Curleem, Krotoem a Smalleyem v roce 1985. Za objev získali Nobelovu cenu za chemii v roce 1996. Objevem fullerenu nastala také doba uhlíkových nanotrubiček. Bylo třeba vypracovat technologii pro získávání většího množství tohoto materiálu. K tomu byly vypracované v podstatě tři různé technologie založené na převedení grafitu v páry uhlíku a ty pak chlazením v nanotrubičky. První je založená na technologii fullerenu a nazývá se laserová se schématem na obr.15. Druhá technologie je založená na ohřevu grafitových elektrod vysokoteplotní plazmou (obr.16). Páry grafitu chráněné inertní atmosférou se ochlazením převádějí kondenzací na nanotrubičky.

Třetí metoda je chemická. Její podstata je na obr.17. Do třemenné trubice vyhřáté na 600 až 700⁰ C se vhná uhlíkové plyny (C₂H₂, CH₄,...) případně CO za vzniku par uhlíku a jeho srážením vznikají již uhlíkové nanotrubičky.



Obr.17 : Metoda chemického ukládání par k přípravě uhlíkových tubulů.

3. Diagnostické nedestruktivní metody nanovláken

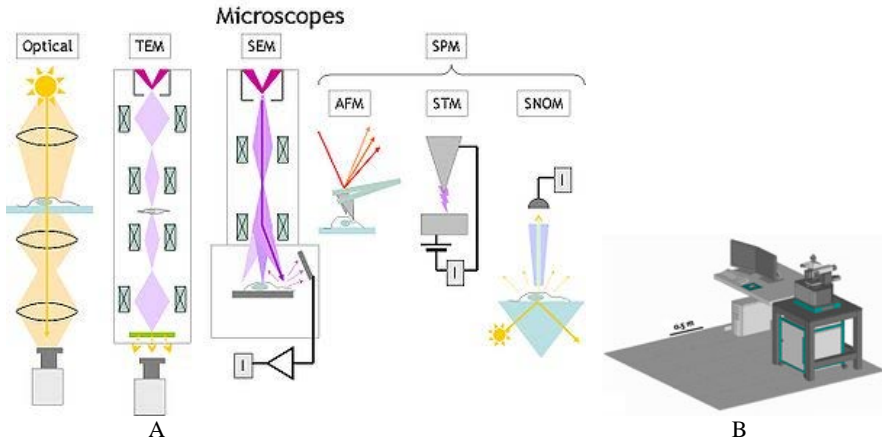
Poněvadž nanovlákná jsou v podstatě dvouřázkové struktury dvojrozměrové (2D) a trojrozměrového (3D) vnitřní části nanovláken, bude třeba užívat k hodnocení jejich technologie a vlastností nedestruktivních metod jak povrchových tak i objemových. Ty rozdělíme na hodnocení technologii a vlastností nanovláken a na metody hodnocení polymerových nanovláken a nanovláken na bázi nanotrubiček.

3.1 Diagnostika polymerových nanovláken

Jak ukázala zjednodušená teorie elektrostvlákňování polymerů z roztoků a taveniny [5], [6], [7] závisí elektrotechnologie nejsilněji (kvadraticky) na intenzitě elektrického pole, dále pak na vlastnostech polymerové suroviny permitivitě ϵ , dynamické viskozitě η a povrchovém napětí σ prekurzorové kapaliny. Poněvadž všechny závislosti obecně na teplotě T a na intenzitě elektrostatického pole E , stačí pro udržování stálých technologických podmínek monitorovat tyto dvě veličiny a veličiny ϵ , η , σ , a to klasickými měřicími technikami [2], aby se dosahovalo reprodukovatelné výroby nanovláken. Pro využívání nanovláken je však třeba měřit jejich vlastnosti, a to nedestruktivními měřicími technikami. Obr.4.1. Porovnání podstaty mikroskopického zobrazování zleva do prava. Světelný mikroskop (optical), transmisní elektronový mikroskop (TEM), řádkovací elektronový mikroskop (SEM). Atomový silový mikroskop (AFM) (google).

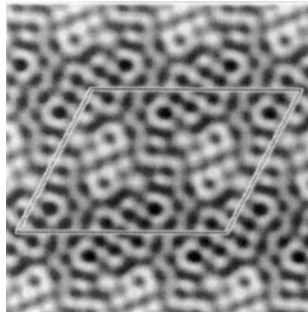
Využívá se zatím převážně zobrazovacích metod ultrarychlých kamery (obr.13), metod elektronové mikroskopie (obr.14), zvláště pak atomového silového mikroskopu a řádkovacích tunelových mikroskopů elektronové a neutronové difrakce, ramanovské a luminiscenční spektroskopie.

I když pro strukturální diagnostiku polymerových vláken je třeba užívat rentgenovou difrakto grafii, zatím nebyla použita. Je třeba získávat krystalový a amorfní podíl vlákna k tomu použít rentgenovou difrakto grafii. Z vlastností čeká prozkoumat mechanické vlastnosti vláken a zjistit i pohyblivé poruchy. K tomu je vhodné používat klasické diagnostiky mechanických vlastností doprovázených spektroskopii akustické emise (AE) a Fourierovy transformace (FT) průběhů pulsů a tak získat informace o deformaci nanovláken. k diagnostice povrchů je třeba používat interferometrických metod a z optických metodu snižování úplného odrazu, tzv. ATP metodu [1].

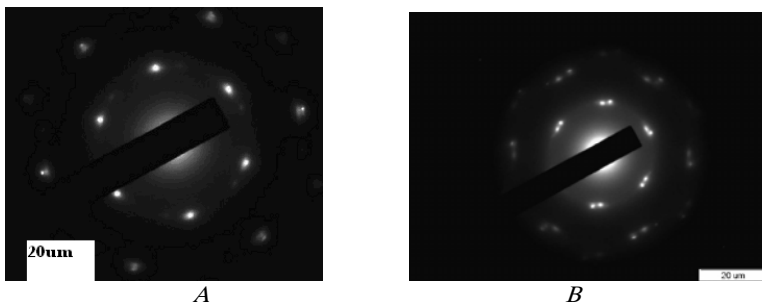


Obr.18 A Zatím nejužívanější zobrazování nanovláken elektronovými mikroskopy s princípy Porovnání podstaty mikroskopického zobrazování zleva do prava. Světelný mikroskop (optical), transmisní elektronový mikroskop (TEM), řádkovací elektronový mikroskop (SEM). Atomový silový mikroskop (AFM), řádkovací tunelový mikroskop, řádkovací blzký optickému v kombinaci s ATM. (google). B technické provedení SNOM.

3.2 Diagnostika uhlíkových nanotubulenů



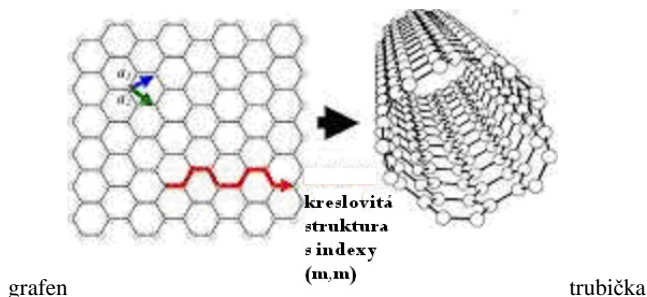
Obr.19. Ze snímku elektronového mikroskopu lze určit typ a mřížky a mřížkové parametry.



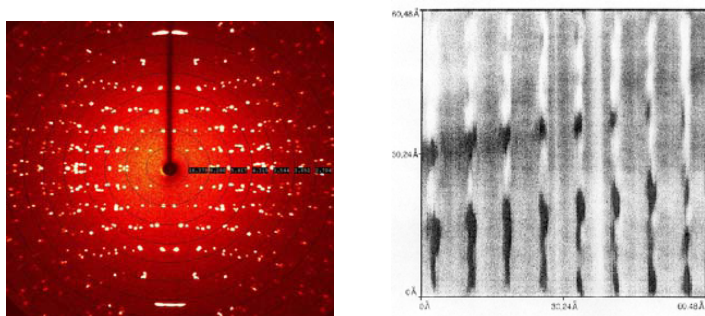
Obr. 20 A Elektronový difraktogram jednotěnovétrubičky, B dvojsměnové trubičky

Pro diagnostiku struktury a vlastností uhlíkových nanotubulenů je třeba diagnostické metody proti metodám polymerových nanovláken podstatně rozšířit. Podobně jako u fullerénů je třeba zkoumat nanotrubičky nejprve hmotovým spektrografem k získání jejich počtu uhlíkových atomů v trubičkách. K určování strukturní morfologie a dokonce i 2D strukturní mřížky lze užívat elektronového mikroskopu s vysokou rozlišovací schopností, jak dokazuje snímek na obr.19. Z jeho je možné určit monoklinickou 2D mřížku spolu sjejími parametry.

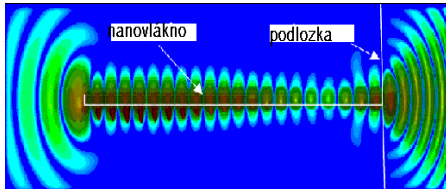
K rozlišení jedno a dvojsměnových tubulenů poslouží i snímky elektronové difraktoografie, jak naznačují obr. 20A a B. Poněvadž nanotrubičky vznikají teoreticky sbalením rovinového grafenu (obr.21), je zřejmé že nanotrubičky jsou téměř dokonalé 2D krystalové struktury [1]. To potvrzuje i snímek rentgenové difraktoografie na obr.21, který potvrzuje využití rentgenové difraktoografie k hodnocení struktury uhlíkových trubiček. Řada většiny vlastností nanotrubiček závisí na indexech (n,m), na průměru trubiček $d_{nm} = (0,246/\pi) \sqrt{(n^2 + nm + m^2)}$. Obě veličiny jsou kvantované celými čísly, n a m , tvarem tubulenů a jejich poruchami. Poruchy v nanotrubičkách podobně jako u pevných látek rozhodují o většině jejich vlastností. U nci však přistupují navíc poruchy ve struktuře nanotrubiček jako jsou jejich vakance, intersticiály deformace trubiček, opásání nanotrubiček a poruchy mezi tubuleny. Např. závislosti na indexech (nm) určují kovovou či polovodičovou vodivost. Poruchy pak určují určité typy polovodičů p či n důležité pro elektronické a optoelektronické vlastnosti. Vedle určování struktury elektronomikroskopickými metodami se užívají k určování elektronických a optoelektronických vlastností nanotrubiček metody optické. Jde především o ramanovskou spektroskopii, fotoluminiscenci a elektroluminiscenci, které umožňují vytvořit v nanovlákních i lasery, jak dokazuje obr.23.



Obr.21 Vznik tubulenu sbalením grafenu



Obr.22. Rentgenový difrakční snímek nanotrubičky Obr.23 Molekulová struktura AFM



Obr.23 Laser v nanovláknecch



Obr.24 Přenosný ramanovský spektrometr

Ramanovská spektroskopie umožňuje získávat údaje o přesunech a reakcích na molekulové úrovni. Soudové přístroje, jejichž představitel je na obr.24, jsou schopné provádět ramanovskou spektroskopii téměř okamžitě a tak sledovat změny v materiálech v závislosti na čase. Důležitými diagnostickými metodami pro nanotubuley jsou také metody luminiscenční, které zkoumají nanotrubičky z hlediska jejich elektronové struktury, tj. v oblasti kvantové fyziky. Zatím nejužívanější je fotoluminiscence a elektroluminiscence, které se zasloužili i na konstrukci nanolaseru, jehož podstata je na obr.23. V budoucnosti se stanou i diagnostickými luminiscenčními metodami fraktoluminiscence, a triboluminiscence vedle triboelektřiny [8], neboť hlavní použití nanotubulenu se předpokládá v optoelektronice. O tom svědčí již dnes vyvinuté obrazovky a displeje na bázi uhlíkových nanotrubiček.



Obr.25 Plošné, foliové obrazovky

Některé významné diagnostické metody jako jsou ultrazvuková, mikrovlnová diagnostika a diagnostika akustické emise čekají ještě na využití. Mikrovlnová spektroskopie se uplatní k hodnocení supravodivého stavu nanotubulenu a akustická emise ke sledování jejich mechanických vlastností a řízení kvality technologie.

Výroba a využívání nanovláken jako nových materiálů přinese využívání ve větší míře současných nedestruktivních diagnostických metod a vypracování nových speciálních pro diagnostiku nanovláken. Vzhledem k silné závislosti vlastností nanotrubiček na nízkých teplotách při studiu supravodivosti a na silné závislosti elektronických vlastností na silných magnetických polích, je třeba připravit pro tyto účely i diagnostické metody.

Literatura

- [1] Sodomka, L., Fiala, J. Fyzika a chemie kondenzovaných látek, Liberec 2003,2004
- [2] Brož, J., et al. Základy fyzikálních měření I,II,III. SPN Praha 1983
- [3] Ramakrishna, S., et al.: Electrospinning and nanofibers. World scientific, Singapore 2005
- [4] Sodomka, L., et al.: Kronika Nobelových cen I,II. Adhesiv, Liberec 2002,2003
- [5] Sodomka, L.: Fundamental ideas for the nanofiber theory. Part I. Strutex Proc. of international conference TUI Liberec 2005, str.199.
- [6] Sodomka, L.: Simple theoretical consideration to nanofiber spinning. Proc. CNN 2009
- [7] Sodomka, L., et al.: TOS00, Prešov 2007
- [8] Sodomka, L.: Mechanoluminiscence a její použití. Academia Praha 1985



ANALÝZA NORMALIZACE ZKOUŠENÍ SVARŮ KAPILÁRNÍ METODOU

ANALYSIS OF PENETRATION TESTS STANDARDIZATION OF WELDED JOINTS

Lesław SOZAŃSKI *, Piotr SULLIK **

*Politechnika Wrocławska, **Morska Stocznia Remontowa S.A.

Abstrakt

Normy pro kapilární zkoušení uvádějí četné požadavky, které musí být při zkoušení splněny. V příspěvku jsou popsány normy, které vymezují pracovní postupy při zkoušení svarů kapilární metodou. Analýza získaných indikací na zkoušeném povrchu svaru vykonaná přesně podle zásad uvedených v normách, výsledně umožňuje stanovení stupně jakosti zkoušeného svaru.

Abstract

The standards, that determine penetration testing conditions, conduct a very wide range of issues. In the paper the important group of standards were discussed. This group of standards describes procedures of penetrating testing of welded joints. Analysis of the penetrating test results, carried out on the tested surface according to the presented standards, allows to determine the quality level of tested joint.

1. Nedestruktivní zkoušení svarů

Svarové spoje kovových konstrukcí často představují kritická místa, která jsou nositelem strukturálních vad. Svarové spoje mohou být též místem výskytu geometrických vrubů, které jsou častým iniciátorem únavových trhlin materiálu. Metody nedestruktivního zkoušení umožňují s vysokou pravděpodobností odhalení výskytu těchto povrchových i vnitřních vad ve svarech.

Základem je norma ISO 17653[6], ve které jsou předepsány zásady zkoušení. Tato norma podává kritéria pro volbu metody zkoušení i hodnocení výsledků, v plné závislosti na použité metodě svařování, svařovaných materiálech, obrobení svaru, druhu svaru a jeho geometrie, požadovaného stupně jakosti svaru i na druhu a poloze eventuálních vad. V této normě je uveden i požadavek kvalifikace pracovníků vykonávajících nedestruktivní zkoušky (EN 473 [7] nebo ISO 9712 [8]).

2. Zkoušení svarů kapilární metodou

Kapilární metoda zkoušení (PT) umožňuje zjišťování povrchových necelistvostí prakticky u všech materiálů, pokud jsou zkušební komponenty (čistič, penetrant a vývojka) netečné k testovanému materiálu a tento materiál není nasáklivý, popřípadě porézni (neglazovaná keramika, odlitky, výkovky, svarové spoje, atd.). U kapilární metody se využívá jevu spočívajícím na vnikání penetrantu do tenkých otevřených strukturálních nespojitostí, kdy

pak následně, s pomocí sacího účinku nanesené vývojky, je získán dobře viditelný defektogram. Použití normalizovaných složek procedury kontroly kapilární metodou umožňuje správné vykonání zkoušky, zajištění její opakovatelnosti i interpretaci získaných výsledků.

Všeobecné požadavky týkající se kapilárního zkoušení použitého ve výrobě i při exploataci uvádí norma PN EN 571-1 [9], která nahradila normu PN-ISO 3452:1997 [10]. Zde jsou uvedeny zásady přípravy zkoušeného povrchu, požadavky na komponenty kapilární zkušební metody, způsobu jejich použití, zápisu o provedení zkoušky i interpretaci výsledků. V této normě jsou uvedena i nařízení týkající se pracovníků vykonávajících zkoušky (EN 473 [7]), požadavků na testování komponent penetračních materiálů (PN-EN ISO 3452-2 [12]), etalonů EN ISO 345-3 [13]), přístrojového vybavení (EN ISO 345-4 [14]), zásad zkoušení při teplotách nad 50⁰ C (ISO 3452-5 [15], při teplotách nižších než 10⁰ C (ISO 3452-6 [16]) i požadavků na vyhodnocování defektogramů (EN ISO 3059 [17]). Doplněna je také speciální technologickou normou PN EN ISO 12706:2003 [21], uvádějících v abecedním seřazení až 38 termínů v angličtině, němčině a francouzštině.

Základní norma ISO 17835 [6] doporučuje kapilární metodu, spolu s vizuální kontrolou i ke zkoušení povrchových vad svarů austenitických ocelí, hliníkových slitin, slitin mědi, titanu a niklu.

V dodatku A-3 je v tabulce 2A uvedena závislost mezi stupněm jakosti podle EN ISO 5817 [18], technikou zkoušení podle EN ISO 3452-1 [11] a stupněm přípustnosti podle EN ISO 23277 [19] (tab. 1).

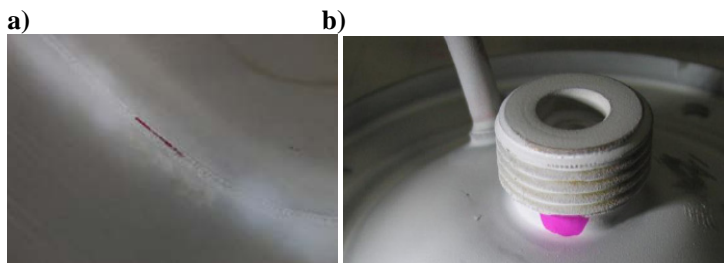
Tabulka 1. Zkoušení kapilární metodou – stupně přípustnosti [6]

Stupeň jakosti ve shodě s normou ISO 5817 nebo ISO 10042 Quality levels in accordance with ISO 5817 or ISO 10042	Zkušební technika a stupeň jakosti ve shodě s ISO 3452-1 Testing techniques and levels in accordance with ISO 3452-1	Stupeň jakosti podle ISO 23277 Acceptance levels in accordance with ISO 23277
B	Stupeň jakosti není specifikován Level not specified	2x
C		2x
D		3x

Stupně přípustnosti 2 a 3 mohou být doplněny znakem „X“, což znamená, že všechny zjištěné lineární indikace musí být hodnoceny ve stupni 1. Avšak pravděpodobnost zjištění menších indikací, než jsou uvedeny v tabulce s určením pro stanovení původního stupně přípustnosti, může být nízká.

Norma prEN ISO 3452-1 [11], vyžaduje velmi důsledné vykonání zkoušky. Odvolává se i na normy, které se týkají komponent zkušebního materiálu (EN ISO 9934-2 [12]) a použitých přístrojů (EN ISO 9934-3 [13]).

Norma EN ISO 23277 [19] uvádí kritéria určování stupňů přípustnosti na podkladě zjištěných povrchových vad vzniklých při svařování. Indikace, zobrazující vady přímo na zkoušeném povrchu, nedovolují však přímé určení velikosti a tvaru vady (obr.1, 2). V normě použitý výraz „indikace“ čili obraz vady, je jen takový, který umožňuje použitá technika zkoušení. V případě „kapilárek“ jde o barevný nebo fluorescenční defektogram získaný na zkoušeném povrchu. Může být stanoven jako indikace dlouhá (délka indikace je větší než trojnásobek šířky) nebo indikace krátká (délka kratší než trojnásobek šířky). Příklady indikací uvádí obr. 1.



Obr. 1. Barevné defektogramy vad

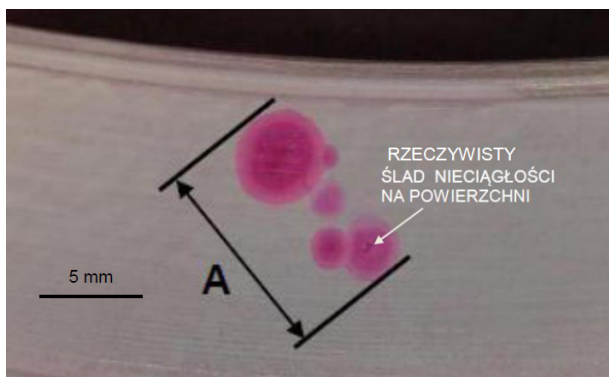
Stupně přípustnosti uvedené v normě EN ISO 23277 [19] byly stanoveny na základě možnosti zjištění vad jednotlivými metodami zkoušení. Tyto stupně přípustnosti jsou určeny především pro zkoušení ve výrobním sektoru (tab. 2).

Tabulka 2. Stupně přípustnosti indikací [19]

Typ indikací <i>Type of indication</i>	Stanovený stupeň ^{a)} viz anglický text <i>Acceptance level^{a)}</i>		
	1	2	3
Lineární indikace l = podélné indikace <i>Linear indication</i> l = length of indication	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Nelineární (sférické) indikace d = hlavní rozměr <i>Non-linear indication</i> d = major axis dimension	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$

^{a)} Acceptance levels 2 and 3 may be specified with a suffix "X" which de notes that all linear indications detected to level 1. However the probability of detection of indications smaller than those denoted by the original acceptance level can be low.

Sousedící indikace, jejichž vzdálenost je menší než hlavní rozměr a nejmenší indikace, se hodnotí jako indikace jediná [19].



Obr. 2. Sousedící indikace, představující jejich skutečný obraz na zkoušeném povrchu, jsou hodnoceny jako jediná dlouhá vada.

V dodatku A (informační) v tabulce A1 jsou uvedeny doporučené parametry zkoušení pro zjišťování malých vad. Zkušební materiály jsou zapsány v pořadí podle jejich použití (tab. 3) [19]. Na obr. 4 jsou uvedeny příklady defektogramů charakteristických vad vyskytujících se při svařování.

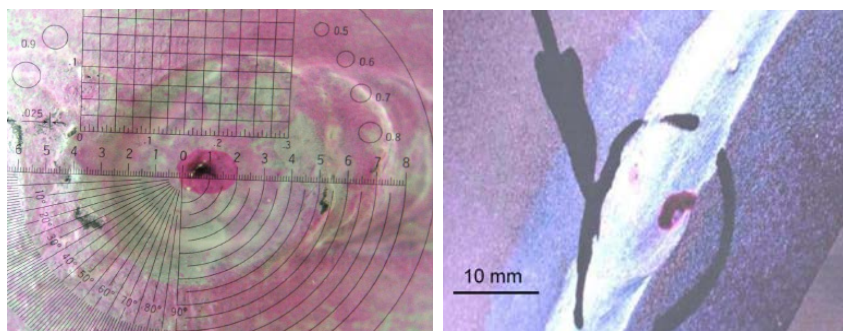
Tabulka 3. Doporučené parametry zkoušení [19]

Přijatý stupeň <i>Acceptance level</i>	Stav povrchu <i>Surface condition</i>	Typ penetračního systému <i>Type of penetrant system</i>
1	Závěrečné obrobení ^{a)} viz angl. text <i>Fine surface</i> ^{a)}	Fluorescenční kapilární zkouška, normální citlivost podle ISO 3452-2. Barevná kapilární zkouška, vysoká citlivost ISO 3452-2 <i>Fluorescent penetrant system, normal sensitivity of high er to ISO 3452-2. Colour contrast penetrant, high sensitivity to ISO 3452-2</i>
2	Hladký povrch ^{b)} viz angl. text <i>Smooth surface</i> ^{b)}	Jakýkoliv <i>Any</i>
3	Běžné obrobení ^{c)} viz angl. text <i>General surface</i> ^{c)}	Jakýkoliv <i>Any</i>

^{a)} *The weld cap and parent material offer smooth clean surfaces with negligible undercut, rippling and spatter. The surface finish is typical of welds made by automatic TIG-welding, submerged arc welding (fully mechanized) and manual metal arc welding process using iron powder electrodes.*

^{b)} *The weld cap and parent material offer reasonably smooth surfaces with minimal undercut, rippling and spatter. The surface finish is typical of welds made by manual metal arc welding vertical downwards and MAG welding using argon rich gas for the capping runs.*

^{c)} *The weld cap and parent material are in the as-welded condition. The surface finish is typical of welds produced by the manual metal arc and MAG welding processes in any position.*



Obr. 4. Defektogramy vad svarů

Závěr

Určování stupňů jakosti vždy způsobovalo technicko-právní problémy [1, 2]. Nové evropské zkušební normy a podobně i normy výrobkové dovolují úpravu procedur a požadavků na výrobní kontrolu. Literární odkaz [3] prezentuje standardní případy zkoušení svarů kovových konstrukcí. Hlavním úkolem kapilárních zkoušek je zjišťování povrchových necelistvostí a jejich polohy [4]. Názvosloví použité v normách, jako např. indikace krátká nebo dlouhá nereprezentují v tomto případě technologické názvy. Některé indikace mohou být nepravé (falešné), což je často vyvoláno subjektivními faktory zkoušejícího. Správná analýza výsledků zkoušky a určení nedokonalosti zkoušení dají konečný obraz o jakosti kontrolovaného svařového spoje [5].

Literatura

- [1] Dudek K., Przystupa F., Sozański L.: Aspekty europejskiej normalizacji metod nieniszczących. *Prob.Masz.Rob.* 2002, z.19.
- [2] Czuchryj J., Sikora S., Staniszewski K.: Problemy oceny jakości złączy spawanych różnymi metodami oraz wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2011, nr 1.
- [3] Pasternak J., Wolański R.: Procedura badań penetracyjnych. *Przegląd Spawalnictwa*, 2002, nr 5.
- [4] Borowiecka – Wilczyńska A.: Badania penetracyjne. *Repetitorium. Biuro Gamma*. 2007.
- [5] Hlebowicz J.: Źródła niepewności badań nieniszczących. *Badania materiałów*, 2001, nr 2.

Normy

- [6] (PN)-EN ISO 17635:2010. Badania nieniszczące złączy spawanych. Zasady ogólne dotyczące metali.
- [7] (PN)-EN 473: 2008. Badania nieniszczące - Kwalifikacja i certyfikacja personelu.
- [8] ISO 9712:2005. Badania nieniszczące - Kwalifikacja i certyfikacja personelu.
- [9] (PN)-EN 571-1:1999. Badania nieniszczące – Badania penetracyjne. Zasady ogólne.
- [10] (PN)-ISO 3452:1997. Badania nieniszczące – Badania penetracyjne. Zasady ogólne.
- [11] EN ISO 3452-1:2011. Draft. Non-destructive testing - Penetrant testing Part 1: General principles (ISO/DIS 3452-1:2011).
- [12] (PN)-EN ISO 3452-2: 2006. Badania nieniszczące – Badania penetracyjne. Część 2: Badanie materiałów do badań metodą PT.
- [13] (PN)-EN ISO 3452-3:2001. Badania nieniszczące – Badania penetracyjne. Część 3: Etalony
- [14] (PN)-EN ISO 3452-4:2001. Badania nieniszczące – Badania penetracyjne. Część 4: Wyposażenie.
- [15] ISO 3452-5:2008. Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 5: Penetrant testing at temperatures higher than 50⁰ C.
- [16] ISO 3452-6:2008. Non-destructive testing – Penetrant testing – Part 6: Penetrant testing at temperatures lower than 10⁰ C.

- [17] (PN)-EN 3059:2005. Badania nieniszczące. Badania penetracyjne i badania magnetyczno-proszkowe. Warunki obserwacji.
- [18] (PN)-EN ISO 5817:2010. Badania nieniszczące złączy spawanych. Zasady ogólne dotyczące metali.
- [19] (PN)-EN ISO 23277:2010 Badanie nieniszczące spoin - Badanie penetracyjne spoin - Poziomy akceptacji.
- [20] (PN) EN 1330-7:2007. Badania nieniszczące. Terminologia. Część 7: Terminy stosowane w badaniach nieniszczących.
- [21] (PN)-EN ISO 12706:2003. Badania nieniszczące - Terminologia - Terminy stosowane w badaniach penetracyjnych.

Příspěvek vznikl pro realizaci projektu nr R 03 0039 06/09



INFRAČERVENÉ TERMOGRAFIKÉ (NEDESTRUKTIVNÍ) TESTOVÁNÍ INFRARED THERMOGRAPHIC (NON-DESTRUCTIVE) TESTING

Jiří SVOBODA

“TMV SS“ s.r.o., jiri.svoboda@tmvss.cz

Abstrakt

Infračervená termografie (dále IČT) je metoda zobrazování teplotních polí/ zdánlivých teplot na objektech v reálném čase. Je to nekontaktní, nedestruktivní metoda zobrazování povrchových i podpovrchových teplot, která se prakticky používá od r. 1965; v tomto roce byl představen první ič termografický systém na světě (AGA 665 Thermovision), který zobrazoval teplotní pole na povrchu objektů v reálném čase. V dalších letech se ič termografická technika dále vyvíjela (obdobně jako například výpočetní technika) a to jak po technické stránce, tak i podle jejího využití a zaměření. V současné době je možné rozdělit ič termografické metody zkoušení /testování na dvě základní skupiny a to na „pasivní“ a „aktivní“. V příspěvku je uveden základní přehled používaných metod v ič termografii, včetně základních informací o používané ič termografické technice - ič termografických systémech.

Klíčová slova: *Infračervená termografie, ič termografický systém, termogram, infračervené nedestruktivní testování*

Abstract

Infrared (hereinafter referred to as IR) thermography is a method of imaging thermal fields and apparent temperatures on the targets in real time. It is a non-contact as well as a non-destructive method of imaging temperatures on and also below the surfaces. This method is used practically since year 1965. In that year was introduced the first IR thermographic equipment on the wide world called AGA 665 Thermovision, which could display a thermal field on the surfaces of targets in real time. The IR thermographic technique has been developing in the following years (in similar way as for example a computer technique) from their technical side and also in application and specialization in use. Currently it's possible to divide the IR thermographic methods / testing into two basic groups – “passive” and “active”. This article introduces a basic overview used methods in IR thermography including basic information about a used IR thermographic technique – IR thermographic equipments.

Keywords: *Infrared thermography, IR thermographic equipment, thermogram, infrared non-destructive testing*

Úvod

Infračervenou termografií (dále IČT) je možné, podle zaměření, rozdělit do několika skupin či oblastí:

- Prediktivní údržba a diagnostika (PM)
- IČ nedestruktivní testování (IČ NDT)
- Výzkum a vývoj (R&D)
- Automatizace a požární bezpečnost
- Speciální měření (v pecích,...)
- Zobrazování plynů

Další dělení může být na kvalitativní nebo kvantitativní IČT a dále zda se jedná o pasivní či aktivní IČT.

Kvalitativní IČT je metoda vyhodnocování odstínů či kontrastů v obrazech-termogramech bez toho, aby byly vypočítávány/kvantifikovány absolutní hodnoty teplot.

Kvantitativní IČT je metoda, kdy jsou vypočítávány/kvantifikovány absolutní hodnoty teplot. Zde jenom krátké připomenutí, že žádný termografický systém (a ani standardní bezkontaktní teploměr) neměří teplotu přímo. Pro výpočet či kvantifikaci teplot musí být uvažovány a co nejpřesněji použity všechny fyzikální zákony a parametry IČT, aby byly získány správné hodnoty absolutních teplot. Těmito parametry IČT jsou: emisivita, odražená zdánlivá teplota, vzdálenost a relativní vlhkost atmosféry (vyhodnocení přenosu atmosférou) a teplota atmosféry. V případě, že je ještě použita tzv. externí optika, tj. optický, v dané spektrální ič oblasti transparentní prvek–okno, které je v optické ose mezi měřeným objektem a měřícím systémem, je nutné znát jeho propustnost a v době měření i jeho teplotu.

Prediktivní údržba a diagnostika (PM)

Tuto oblast je možné charakterizovat jako oblast s největším využitím ič termografických systémů. Základní zaměření je na diagnostiku strojů, rozvodů elektrické energie a stavebnictví. Převážně se používá pasivní, kvantitativní termografie. Nejvíce používané termografické systémy v PM jsou systémy s mozaikovými nechlazenými mikrobolometrickými (tepelnými) detektory.

(Více informací o diagnostice (mechanických) strojů je možné vyhledat např. v ČSN ISO 18434-1 : Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy. Pro diagnostiku rozvodů elektrické energie zatím nebyla zpracována žádná (ČSN, ISO, EN,...) norma, existují ale různé metodiky či předpisy, které jsou používány při diagnostice rozvodů elektrické energie. Pro diagnostiku stavební objektů existuje v současné době revidovaná ČSN EN 13187: Tepelné chování budov – Kvalitativní určení tepelných nepravidelností v pláštích budov – Infračervená metoda.)

IČ nedestruktivní testování (IR/IČ NDT)

obecně patří do základních principů/metod NDT, které podle ISO 9712 jsou:

- Akustická emise/Acoustic emission (AT)
- Vířivé proudy/Eddy current (ET)
- Infračervená termografie/Infrared thermographic (TT)
- Netěsnosti/Leak (LT)
- Magnetická/Magnetic (MT)
- Penetrace/Penetrant (PT)
- Radiografie/Radiographic (RT)
- Tenzometrie/Strain gauge (ST)
- Ultrazvuk/Ultrasonic (UT)

Termíny vztahující se pro IR/IČ NDT:

Anizotropie, dutina; delaminace; emisivita; koroze; napětí; odrazivost; porosita; složení/skladba; spojování; stav vytvrzení; tepelná vodivost; tepelné tvarování; tloušťky pokovení; tloušťka; tepelné zpracování; vlhkost

V IČ NDT se používá pasivní ale hlavně aktivní termografie.

Pasivní termografie má největší využití v PM.

Aktivní termografie je založena na řízené simulaci tepelné vlny v tělese, následném snímání rozložení teplot ič termografických systémem a analýzou signálu. Defekty v podpovrchové vrstvě se projeví rozdíly v rozložení povrchových teplot. Zdrojem tepla může být halogenová lampa, pulzní laser, xenonová výbojka nebo teplý proudící vzduch. Při známých vlastnostech materiálu lze z tepelného obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady a to teoreticky nebo srovnáním s etalonem.

Základní požadavky na ič techniku pro aktivní termografii jsou obdobné jako pro techniku pro Výzkum a vývoj (R&D) tj.:

- Krátký integrační čas (rychlé pohyby)
- Velký rozsah měřených teplot – režim Multi-TI (superframing)
- Rychlé změny teplot
- Vysoká teplotní citlivost
- Lock-in termografie
- Vysoké prostorové rozlišení (malé objekty)
- Multispektrální analýza
- Spektrální filtrace
- Možnost on-line přenosu dat do vyhodnocovacích zařízení (počítačů)
- Speciální vyhodnocovací software

Aktivní termografie může být:

- Pulzní
- Pulzní fázová
- Stupňové/krokové zahřívání
- Lock - in
- Lock – in ztrátového úhlu
- Vibro

Teorie tepelné vlny

Při modulovaném ohřevu povrchu úhlovou frekvencí ω se v podpovrchové oblasti šíří velmi tlumená a rozptýlená tepelná vlna. V rovinných vrstvách tělesa lze pro vyhodnocení teploty ϑ v hloubce z a čase t použít rovnici:

$$\vartheta(z, t) = \vartheta_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (1)$$

kde μ je hloubka vniku tepelné vlny, při které klesne teplota na hodnotu $1/e$ ϑ_0 , kde ϑ_0 je teplota na povrchu tělesa.

Platí vztahy:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega\rho c}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2)$$

$$\lambda = 2\pi\mu ; v = \lambda \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

$$\varphi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (4)$$

kde

κ součinitel tepelné vodivosti (W.m⁻¹.K⁻¹)

ρ hustota materiálu (kg.m⁻³)

c měrná tepelná kapacita (J.kg⁻¹.K⁻¹)

α součinitel teplotní vodivosti (m².s⁻¹)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (5)$$

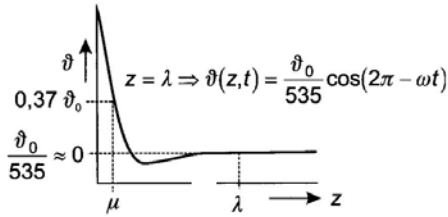
ρ objemová hmotnost

c_p měrná tepelná kapacita při stálém tlaku

λ tepelná vlnová délka (m)

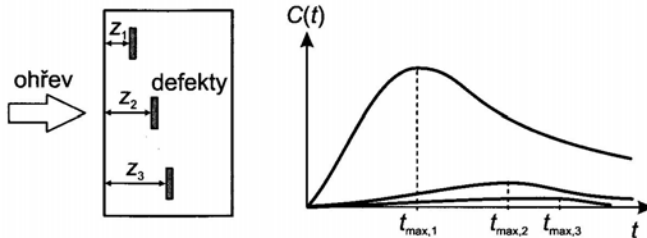
v rychlost šíření tepelné vlny (m.s⁻¹)

φ fáze tepelné vlny



Obr. 1 Příklad hloubky vniku tepelné vlny / An example of penetration depth of heat wave

Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na povrchu tělesa lze pozorovat na teplotním poli podle čela tepelné vlny oblasti s rozdílnými teplotami. V důsledku tohoto jevu se defekty ve větší podpovrchové hloubce projeví/zobrazí později a se sníženým kontrastem (obr. 2)



Obr. 2 Ohřev objektu s defekty tepelnou vlnou, závislost relativní hodnoty tepelného kontrastu C na hloubce z / Heating-up of the object with defects by thermal wave, the dependency of relative values of thermal contrast (C) at a depth z

Pokles kontrastu je úměrný třetí mocnině hloubky z . Pro vyjádření kontrastu se zavádí tepelný kontrast $C(t)$ dle vztahu

$$C(i, j, t) = \frac{\vartheta(i, j, t) - \vartheta(i, j, t=0)}{\vartheta_s(z) - \vartheta_s(z=0)} \quad (6)$$

kde

$\vartheta(i, j, t)$ je časově proměnná teplota na povrchu nad defektem (indexy i, j určují pixel senzoru ič kamery)

$\vartheta_s(t)$ je průměrná hodnota teploty na povrchu objektu bez defektů

$\vartheta(t=0)$ jsou počáteční hodnoty teploty před simulací tepelným pulzem

Matematické vyjádření může být značně složité, záleží na vlastním materiálu, jeho hustotě ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), specifické tepelné kapacitě ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), na součiniteli tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), součiniteli teplotní vodivosti ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), na součiniteli tepelné „effusivity“ ($\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) a dále na tvaru pulzu (Diracův pulz, obdélníkový pulz, Gaussův pulz).

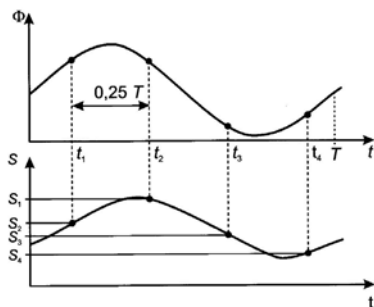
Pulzní termografie

Pulzní termografie spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa a následném vyhodnocení teplotního pole na povrchu tělesa pomocí termokamery. Podle uspořádání zdroje ohřevu, objektu a kamery se pulzní metoda dělí na reflexní a průchodovou. Teplota povrchu se rychle mění po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptylu tepelné vlny, vyzařování a konvekci.

Z materiálu /3 / publikovaném na 18th WCNDT , konaném v dubnu 2012 v Durbanu je uvedena informace, že společnost General Electric používá pro pulzní termografii několik synchronizovaných xenonových lamp o výkonu 4,8 kJ, které mohou vyzařovat (pulzní) výkon až 10 MW !

Lock-in termografie

Lock-in termografie je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícím na diagnostikovaný objekt. Tepelná (obvykle sinusová) tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí, tj. anomálie/odchylky ve struktuře materiálu testovaného objektu se odráží zpět k povrchu. Na povrchu objektu dochází k interferencím objektem vyzařovaného a na objekt dopadajícího zářivého (tepelného) toku, kdy potom termogramy snímané termografickou kamerou jsou modifikovány tepelnou vlnou emitovanou z vnitřku diagnostikovaného objektu. Rozborem signálu z každého pixelu detektoru kamery lze stanovit odděleně jak amplitudu, tak i fázový posuv odezvy. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (emisivita, pohltivost) a nehomogenním rozložením dopadajícím tepelným tokem na povrch objektu. Avšak ve fázové modulaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkreslené informace o „podpovrchové“ teplotě objektu. Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu lze docílit různými způsoby, nejčastěji je používáné zpracování čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.



Obr.3 Princip vyhodnocení amplitudy a fáze u lock-in termografie (nahore dopadající modulovaná vlna, dole vlna vyzařovaná povrchem objektu) / The principle of evaluation of the amplitude and phase for lock-in thermography (top incoming modulated wave, wave emitted by the surface of the object at the bottom)

Po zprůměrování více obrazů/termogramů lze u každého pixelu vyhodnotit amplitudu a fázi podle těchto vztahů:

$$\varphi = \arctg \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_4}$$

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu je možné několika různými, zde zpracováním čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.

Superframing

Použití hlavně u kamer s fotonovými mozaikovými detektory a u kterých je možné měnit integrační čas.

(Kamery s mikrobolometrickými detektory mají fixní integrační čas, je možné měnit pouze rozsah teplot).

Výzkum a vývoj (R&D)

Termografické systémy pro R&D jsou kamery s nechlazenými a chlazenými mozaikovými detektory. Kamery (s chlazenými) detektory se vyznačují tím, že mají vysoké obrazové frekvence, jsou velmi citlivé, mohou být osazovány výměnnými spektrálními filtry, a obecně tyto kamery mají výstupy pro přenos a záznam dat v externích zařízeních (počítačích), mají vstupy pro synchronizaci kamer atd. Spektrální rozsahy kamer pro R&D jsou takové, že prakticky pokrývají všechna ič pásma, tj. od NIR po LW.

Základní směry v oblasti R&D:

- Ič mikroskopie
- Lékařská termografie
- Thermal signatures/„Teplotní značky“ (- superframing)
- Rychlé změny teplot/teplotních polí
- Tracking/Sledování rychle se pohybujících objektů, při up-date změnách polohy a směru objektu
- Detekce paprsků „neviditelných laserů“

Automatizace a požární bezpečnost

Základní požadavky na techniku:

- Radiometrický/měřicí systém včetně nastavování parametrů objektu
- Ethernet (ovládání/řízení a obraz)
- USB (ovládání/řízení a obraz)
- Digitální vstupy a výstupy

Speciální měření (v pecích, ...)

(Termografická radiometrická měření „skrz plameny“).

Měření jsou zaměřena především na kontrolu teplot na povrchu trubek/vlások v pecích. Vlastní měření se provádí tak, že z otevřeného (v době měření) průzoru ve stěně pece jsou pomocí ič kamery, opatřené speciálním tepelným štítem, kontrolovány trubky/vlásky, které je možné zaměřit kamerou. U kruhových pecí jsou zaměřovány trubky umístěné na protější straně pece, kde uprostřed pece jsou umístěny hořáky a hoří plameny (většinou je spalován zemní plyn). V optické ose mezi ič kamerou a kontrolovanými trubkami hoří plameny.

Plamen při spalování zemního plynu je transparentní ($\tau \rightarrow 1$) na vlnové délce 3,9 μm a toho se využívá v této aplikaci použití.

Zobrazování (úniků) plynů

Při této aplikaci je využíváno skutečnosti, že celá řada plynů není na určitých vlnových délkách transparentní ($\tau \rightarrow 0$) a plyny (jejich případné úniky) je potom možné zobrazit jako „obláčky kouře“. Ič kamery musí mít vysokou citlivost a mají zabudovány (kamery FLIR) speciální funkci HSM (High Sensitive Mode). Vlastní měření – zobrazování (úniků plynů) nejsou kvantitativní, ale kvalitativní.

Termografické kamery FLIR řady GF mohou pracovat ve dvou základních režimech: v radiometrickém (kvantitativní měření) a neradiometrickém (kvalitativní zobrazování).

Literatura:

- [1] ICNDT Guide to Qualification and certification of Personnel for Inspection, Testing and Condition Monitoring, 1.4.2012
- [2] Nondestructive Testing, Handbook, Thermal / Infrared Testing, Electrical Testing V.P.Vavilov, MSIA „Spectrum“, 2009
- [3] Ringermacher Thermal Imaging NDT at General Electric Referát na konferenci 18th WCNDT Durban, 2012
- [4] Technická diagnostika Marcel Kreidl, Radislav Šmíd, Technická literatura BEN 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [5] Nondestructive Testing, Handbook, Infrared and Thermal Testing, Xavier X.P., I.Maldague, ASNDT
- [6] Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Application M.Vollmer, K.P. Möllman, Wiley-VCH Verlag



MONITORING OF TEMPERATURE-DEPENDENT ACTIVITY IN A HONEY BEE COLONY

MONITORING TEPELNĚ OVLIVNITELNÉ AKTIVITY VČELSTVA

J. TLAČBABA, M. ČERNÝ, D. VARNER

ÚTAD, Agronomická fakulta, Mendelova univerzita v Brně,
Zemědělská 1, 61300 Brno Česká republika
e-mail: xtlacbab@node.mendelu.cz

Abstract

*Presented paper deals with a continuous monitoring of honey bee colony depending on the activity, hive space and application of medicaments in the hive. Overall colony activity was monitored using acoustic emission (AE) method. Data was recorded to describe development of the bee colony. The information gained will be used to represent a more comprehensive view on the life-cycle and behavior of honey bees (*Apis mellifera*).*

Key words: honey bee, acoustic emission, monitoring

Abstrakt

*Projekt se zabývá výzkumem chování včelstev v průběhu roku v závislosti na pracovních úkonech, úlovém prostoru, aplikaci léčiv a souhrmně na vitalnosti včelstva v daném období. Veškeré aktivity včelstev byly snímány pomocí akustické emise a je zaznamenáván průběh rozvoje včelstev. Získané nové informace budou podkladem k vytvoření komplexnějšího náhledu na problematiku včely medonosné (*Apis mellifera*).*

Klíčová slova: včely, akustická emise, monitorován

Úvod

Včela je velmi teplomilný hmyz. Při ochlazení na +7 až +9°C se přestává pohybovat. Na dotek reaguje ještě slabými pohyby nohou a křídel. Při +4 až +6°C ale upadá do chladové strnulosti, která při ještě nižších teplotách nastupuje velmi rychle. V tomto stavu může včela jako jedinec přežít nejvýše průměrně 1 až 2 dny. Nástup ztuhnutí vlivem nízké teploty silně závisí na teplotě prostředí, v němž se včela zdržovala předtím. [1]

Vyletování včel z úlů, pouze za zvýšené venkovní teploty (nejnižší hranice pro opuštění úlu je 15°C). Pokud některé včely vylétly dříve, tak zemřely zimou. [2]

Přehřátím hyne plod při déle trvajícím zvýšení teploty nad 36°C. Nejčastěji to bývá při nedostatečném přívodu vzduchu např. při ucpání česen. Citlivost plodu na přehřátí stoupá s jeho věkem. Při vysoké teplotě se včely snaží především snížit teplotu v úle odpařováním vody. Při nedostatku vody se včely „vrhají“ na plod a vodu z něj vysávají. Trvá-li přehřátí jen krátce, plod se vylíhne, ale takové včely mají pak deformovaná křídla a nevyvinuté nohy. [3]

Včelstva v březnu pomalu ale jistě rozšiřují plochy plodu. Zimní včely se při tom upracují a hynou. V období kolem konce března mohou některá včelstva zeslábnout tak, že je jejich situace až kritická, mohou i podlehnout nemocem, hlavně noseμόze. Situace v silných včelstvech je v tomto období zřetelně lepší, nemoci se v nich zpravidla neobjevují. Včelstva v tomto období vytápějí už celý úlový prostor. [4]

V průběhu časného jara je docela normální, že teplé dny bývají vystřídány dny chladnými, a někdy dokonce mrzne. V některých letech bývá jaro velmi studené, což viditelně působí na vegetaci a samozřejmě na včelstva. Nezdá se, že včelstvo velkou část plodu odstraní, protože se o něj již nemůže starat. [5]

METODIKA EXPERIMENTU

Výběr měřeného objektu a metodika měření

Pro pilotní měření byl vybrán plemenáč (menší rozměry klasického úlu) s označením Q04/11. Tento plemenáč obsahoval před měřením 5 rámků míry 37x15. Byly zvoleny dva identické snímače, které byly použity k měření vystavěného plemenáče. Jeden snímač byl umístěn na sklo, které bylo uloženo na dno plemenáče. Druhý snímač byl přiložen na plech o rozměrech (30x100), který byl vložen mezi rámky. Kvůli experimentu byl odstraněn jeden rámeček, z důvodu prostoru pro snímač a vložený plech.



Obr. 1 Senzor na skleněné desce. Foto autoři.

Figure 1: Sensor on the glass plate in the inlet port. Photo by authors.

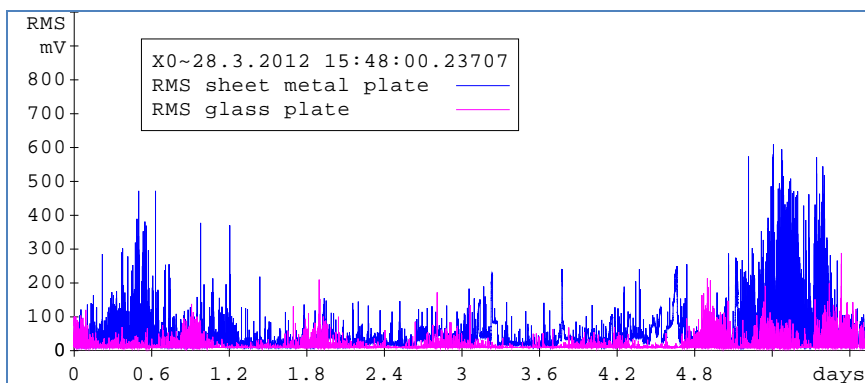
Slot01: tento snímač byl umístěn na plech, který byl vložen do úlu. Snímač byl opatřen předzesilovačem 35 dB. Styková plocha snímače byla natřena akustickou pastou na přenosové prostředí. Snímač byl upevněn gumovou smyčkou kvůli dosažení náležité stykové plochy snímače.

Slot02: snímač byl umístěn na skleněné desce. Tento snímač byl opatřen předzesilovačem 35 dB. Byl umístěn externě z úlu na česně (letáková plocha, která slouží pro vstup včel do úlu). Do celého prostoru byla vložena skleněná deska, která zachycovala jak letovou aktivitu, tak čistící instinkt nebo větrání. Tento snímač byl uchyten svěrkou ke skleněné ploše (Obr. 1).

Signály akustické emise generované aktivitou včelstva byly snímány a vyhodnocovány analyzátozem XEDO od společnosti DAKEL ZD Rpety. Jedná se o výkonný vícekanálový systém pro analýzu signálů akustické emise umožňující vzorkování a ukládání naměřených dat na disk řídicího PC. Deska analyzátoru pokrývá frekvenční rozsah cca 80 – 550 kHz. Data z analyzátoru Dakel XEDO jsou odesílána přes rozhraní Ethernet do řídicího počítače, kde mohou být v softwaru Daemon sledovány měřené parametry a data jsou ukládána na disk pro následné vyhodnocení. [6]

VÝSLEDKY A DISKUSE

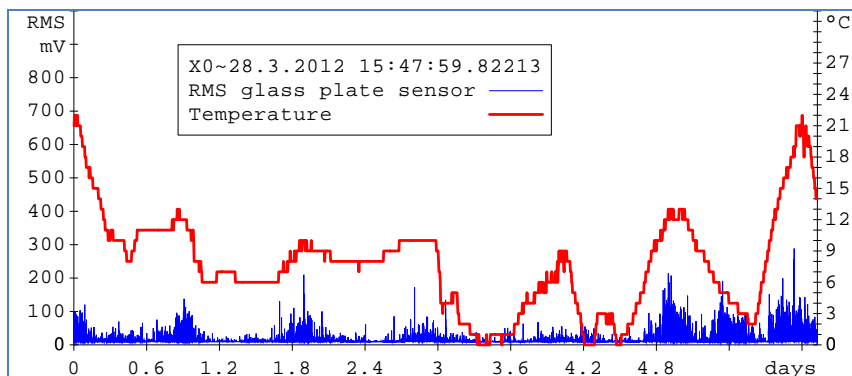
Měření bylo zahájeno v 15:48:00 dne 28. 3. 2012 (viz Obr. 2). Na obrázku vidíme aktivitu včelstva v jednotlivých fázích dne na obou kanálech měřicí soustavy (sklo i plech).



*Obr.2 RMS snímačů (skleněná a ocelová deska).
Figure 2: RMS for both channels (sheet metal plate, glass plate).*

Snímač na skleněné desce

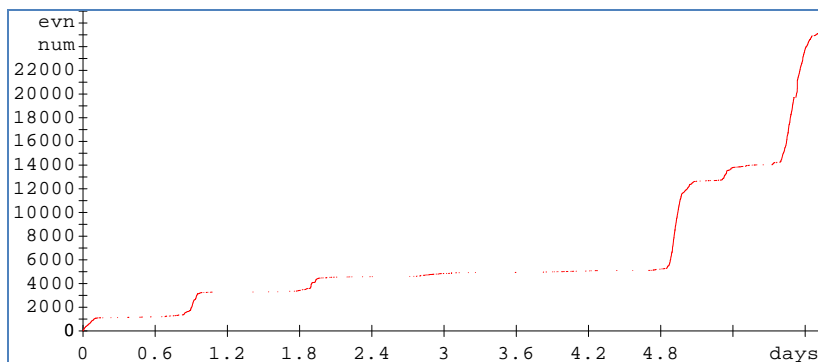
Na Obrázku 3 je znázorněn celý průběh měření na skleněné desce. Do obrázku je zakomponován i průběh okolní teploty, která byla v době měření určující. Jak je patrné, tak RMS koreluje s teplotou, která určuje aktivitu včelstva. Mezi jednotlivými dny, kdy teplota byla nepříznivá pro vývoj včelstva, je patrná nízká aktivita na skleněné podložce. Po oteplení je aktivita zvýšená. Když včelstvo mělo možnost sbírání pylu a nektaru, (5. den) je aktivita i v noci. Včelstvo zpracovávalo přinesený materiál.



Obr. 3 RMS a teplota na skleněné desce.

Figure 3: RMS and temperature curves for glass plate sensor.

Z Obrázku 4 níže je patrné, že události, které byly naměřeny na vzorku, jsou nejvíce výrazné v poslední etapě měření, kdy byla větší teplota oproti předchozím dnům. Množství vstupů, které včely uskutečnily na skleněnou podložku, bylo minimální. Teplota byla v tomto období nízká pro výstup z úlu.



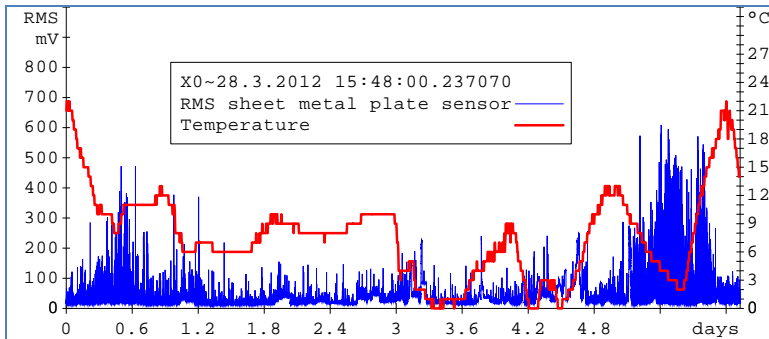
Obr. 4 Události na skleněné desce.

Figure 4: Events for glass plate sensor.

Skleněná podložka nejvíce reagovala při zvýšenější teploty, kdy aktivita létavek (včely vykonávající práce mimo úl) byla nejvyšší. Časový horizont této aktivity byl v rozmezí několika hodin, kdy v daný den byla příznivější teplota. Včely létaly i za nižších teplot, ale tím vzniká vyšší mortalita, kdy včely zkehnou chladem. Aktivita v noci je následkem čistícího pudu, kdy je prostor úlu čistěn a mrtvolky včel jsou vytahovány z prostředí úlu.

Snímač na plechu

Snímač na plechu nebyl ovlivněn venkovní teplotou (viz Obr. 5), protože v úle si včely dokáží vytvořit dostatečné teplo pro svojí tepelnou pohodu. Byl ovlivněn svojí polohou, tak že byl umístěn na předposledním rámmku, kde nedohází k velké kumulaci včel. Při ochlazení venkovní teploty došlo k stáhnutí do sevření a opuštění prostoru, kde byl snímač umístěn.

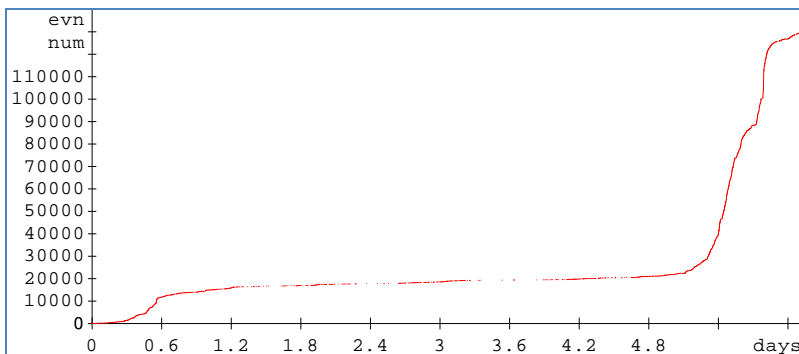


Obr. 5 RMS a teplota na ocelové desce

Figure 5: RMS and temperature curves for sheet metal plate sensor.

V první fázi lze sledovat, že na snímač včely reagovaly kladně, kdy tento cizí předmět akceptovaly ve svém prostoru. V dalších fázích měření se včelstvo stáhlo do těsné formace, aby snížily tepelné ztráty a aktivita, tak poklesla. Při zvýšení venkovní teploty reagovalo včelstvo rozvolněním chumáče do dalších uliček, kde byl umístěn plech se snímačem. Poslední fáze měření je vysoká aktivita včelstva na plechové podložce, když včely vyplnily celý obsah úlového prostoru.

Plech se snímačem byl umístěn v těsné blízkosti včel. Z Obrázku 6 je zřejmé, že množství událostí, které se zaznamenaly snímačem, jsou pracovní činnosti s vysokým množstvím událostí AE. Největší aktivita je na konci měření, kdy teplota byla pro aktivitu včel odpovídající pro jejich pracovní činnost.



Obr. 6 Události na ocelové desce.

Figure 6: Events for sheet metal plate sensor.

Největší a nejsilnější RMS je na plechu, který byl vložen do plemenáče. Na plechu byly včely aktivnější i při chladnějším počasí, protože v úle je teplota vyšší než venkovní. Při nízké teplotě, dochází k opuštění uličky či plástu, pro snížení tepelné ztráty. To vše za předpokladu, že se tam nebude nacházet plod. Pokud by byl rámeček zakladen, včely dělnice by tento prostor neopustily. Měření se snažilo být šetrné, včelstvo nezdecimovat, proto byla vybrána ulička, kde se nenacházel plod, ale pouze zásoby a pyl. Při teplém počasí se včelstvo rozvolnilo do veškerých uliček, které se nacházely v plemenáči a tak docházelo k přenosu významného AE signálu do aparatury.

ZÁVĚR

Metoda AE zjistila bez naší přítomnosti, jak vybrané včelstvo reaguje na podněty. Tato metoda měření online popisuje letovou aktivitu a intenzitu včel létavek, které zajišťují vodu a pyl. Metodu lze využívat, pokud včelstva jsou umístěna na vzdálenějších stanovištích nebo pro včelaře, který je časově zaneprázdněn. Z obrázku je překvapivé, že aktivita neustává ani v noci. Je to z důvodů čištění úlového prostředí nebo větrání včel na skleněné podložce. Na konci měření je možné sledovat, že RMS se téměř překrývají z důvodů vysoké teploty. Včelstvo se aktivně podílí na svém předurčeném rozvoji. Je to dáno faktorem teploty, kdy je příznivá pro sledovaný organismus úlu. Tyto teploty dovolí včelstvu se aktivně podílet na čištění, sbírání vody a prolety z úlu. Poslední fáze měření je aktivita i ve večerních a nočních hodinách. Možnost vyrušení včelstva nebo aktivita při vyšší venkovní teplotě.

Metoda AE nám umožnila sledovat aktivitu včelstva v průběhu týdne, kdy se úl nemusel kvůli sledování včelstva rozebírat. Tím nedocházelo ke stresovým situacím, které působí časté nahlázení do včelstva, ani ztrátám medného výnosu. Měření probíhá on-line, proto nemusí obsluha přítomna u stanoviště.

Poděkování:

Dakel ZD Rpety pro akustickou podporu emise zařízení.

Děkuji Ing. Antonínu Přidalovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky, které mi poskytli při zpracování projektu.

Zpracovaná práce byla finančně podpořena z prostředků specifického vysokoškolského výzkumu prostřednictvím projektu IGA AF MENDELU IP 1/2012.

LITERATURA

[1] JINDRA, Jan. Složky života včel. *Pracovní společnost nadstavkových včelářův* [online]. 2005 [cit. 2012-09-12]. Dostupné z: <http://www.n-vcelari.sk/>

[2] ŠTĀSTNÍKOVÁ, Kristýna. *Včely a včelařství se zaměřením na nemoci včel*. Brno, 2009. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA. Vedoucí práce Mgr. Robert Vlč, Ph.D.

[3] VESELÝ, Vladimír. *Včelařství*. Vyd. 2., upr. a dopl. Praha: Brázda, 2003, 270 s. ISBN 80-209-0320-8.

[4] GRITSCH, Heinrich. *Silná včelstva po celý rok*. Vyd. v češtině 1. Praha: Ve spolupráci s Českým svazem včelařů vydalo nakl. Brázda, 2010, 173 s. ISBN 978-80-209-0381-5.

[5] BENTZIEN, Claudia. *Ekologický chov včel: včelaření podle pravidel přírody*. Praha: Víkend, 2008, 119 s. ISBN 978-80-86891-86-6.

[6] VARNER, David - VARNER, Miroslav.: *Sledování stavu zubového čerpadla měřením akustické emise*, In: Sborník příspěvků z konference: Defektoskopie 2009, Praha, 2009



MONITORING FOUR POINT BENDING OF CONCRETE BEAM BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

Libor TOPOLÁŘ*, Luboš PAZDERA*, Vlastimil BÍLEK**, Lenka DĚDEČKOVÁ***, Jaroslav SMUTNÝ*

*Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, **ŽPSV a.s., *** KAP ATELIER s.r.o.

Contact e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Most buildings date back to the first half of the last century. Concrete proved to be a durable construction material in the recent years. Concrete is a composite construction material composed primarily of aggregate, cement and water. There are many different mixture that have varied properties. Knowledge about basic properties and behaviour especially at loading are important for its lifetime. Mechanical properties and their characteristics in co-ordinance of quantity and loading type enable to dimension significant construction parts and to determine their reliability, which determine so-called limiting state. A limiting state is a condition of a structure beyond which it no longer fulfils the relevant design criteria. One of the major strength properties is obtained by four-point bending load. Acoustic emission method, which is a part of Non-Destructive Testing techniques, records propagated elastic waves generated from the place of an active crack, can be applied. The Acoustic Emission Method is more sensitive than visual observation, because it enables to monitor acoustic emission activity during loading continually. In the article monitoring of concrete blocks made from different mixtures is described. Behaviour of four different groups of mixtures is described in the paper. The first group was sleeper concrete, the second was sleeper fibre-concrete, the third was alkali activated fibre-concrete and last was alkali activated concrete with steel reinforcement.

Key words: Acoustic Emission Method, concrete, four point bending, load

1. Introduction

Because concrete is one of the most popular building materials, it is important to know its basic properties and behaviour especially at loading. Concrete strength and its lifetime are significant mechanical properties of building structures. Mechanical properties and their characteristics in co-ordinance of quantity and loading type enable to dimension significant construction parts and to determine their reliability, which determine so-called limiting state. A limiting state is a condition of a structure beyond which it no longer fulfils the relevant design criteria. One of the major strength properties is obtained by four-point bending load. Recording the force, at which the first surface crack is detected, is the conventional procedure. For location of crazing and crack propagation in loaded concrete structure, which four-point bending load qualified for, the Acoustic Emission Method can be applied.

Acoustic Emission behaviour of a concrete sample under compression is associated with generation of micro-cracks. These micro-cracks are gradually accumulated prior to final failure. The number of AE events, which correspond to the generation of these cracks, increases due to the accumulation of micro-cracks [1].

This method is more sensitive than visual observation, because it enables to monitor acoustic emission activity during loading continually. In the article is described monitoring of concrete blocks made from different mixtures. The first mixture (1N) (meaning in the Table 1) was from self compacted concrete, the second (2N+D) was from self compacted concrete with steel wires, the third (4A+D) was from alkali activated concrete with steel wires and last (5A+D+V) was from alkali activated concrete with steel wires and with steel reinforcement.

Many internal flaws and cracks exist in concrete prior to loading. The mechanical behaviour of concrete subjected to different loading conditions is governed by the initiation and propagation of these internal cracks and flaws during loading. For a concrete structure subjected to tension, the cracks propagate in a direction perpendicular to the applied tensile load. On the other hand, for a concrete structure subjected to purely uniaxial compression, the cracks propagate primarily in the same direction as the applied compressive load. Since different mechanical responses of concrete structures can be explained by fracture processes at different loading conditions, one needs to understand when the internal cracks initiate and how they propagate with increasing load [2].

Table 1: Abbreviations

Abbreviation	Meaning
SCC	Self Compacting Concrete
AAC	Alkali Activated Concrete
1N	Mixture of self compacting concrete
2N+D	Mixture of self compacting concrete with wires
4A+D	Mixture of alkali activated concrete with wires
5A+D+V	Mixture of alkali activated concrete with wires and steel reinforcement

2. Methods

Three mixtures were chosen for the concreting; the composition and labels of mixtures can be found in the Table 2.

In the first stage, different types of mixtures were placed in two wooden forms. In the second stage of the concreting, only the mixture AAC was used and completed with steel reinforcement.

The source of the acoustic emission energy is the elastic stress field in the material. Without stress, there is no acoustic emission. Therefore, an acoustic emission inspection is usually carried out during a controlled loading of the structure. This can be a proof load before service a controlled variation of load while the structure is in service a fatigue test, creep test, or a complex loading program. Often, a structure is going to be loaded anyway and acoustic emission inspection is used because it gives valuable additional information about the performance of the structure under load [3,4].

Table 2: Composition of mixture

Component	CCC [kg]	AAC [kg]
Cement	385	0
Blast furnace slag	250	450
50% dilution KOH	0	37
Water glasses (sodium)	0	65
Water	210	160
Superplasticizer	4,3	0
Sand 0/4	775	840
Rubble 4/8	355	380
Rubble 8/16	360	390

The pure bending shown in the (Fig. 1) can be produced by applying four forces to the beam, two of opposite direction at each end. This configuration is known as 'four point bending' and produces a uniform bending moment over the centre section of the beam [5,6]. Beam flexure represents one of the three most common loading categories for mechanical systems. The maximum stresses are located at the loads. When a 'beam' experiences a bending moment it will change its shape and internal stresses (forces) will be developed. The photograph (Fig. 2) shows the shape change of a beam in bending. Note that the material is in compression on the inside of the curve and tension on the outside of the curve, and that transverse planes in the material remain parallel to the radius during bending.

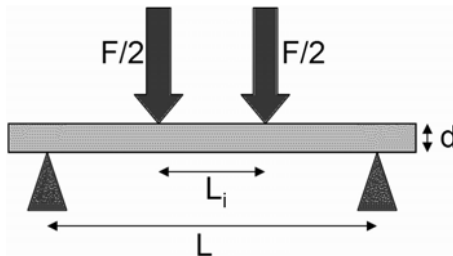


Fig. 1. Four point bending – illustrative picture



Fig. 2. Photography of real experiment

The four-stage fracture model was proposed that can likely be applied to many different types of materials, ranging from brittle (cement, glass), to quasi-brittle (mortar, concrete), to ductile (metals, hybrid fibre concrete). The model is schematically shown in Fig. 3 and basically the following four stages in mechanical behaviour can be distinguished [7]:

- (O) elastic stage,
- (A) microcrack stage (stable),
- (B) macrocrack stage (un-stable if no pre-cautions are taken),
- (C) bridging stage.

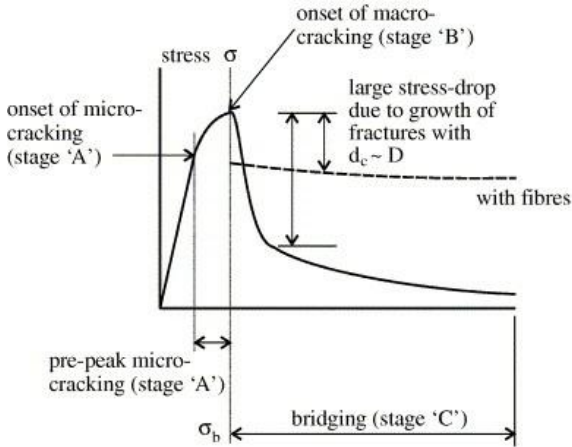


Fig. 3. Four-stage fracture model for cement, plain concrete and fibre concrete [7]

3. Results

The measurement was done on device Dakel XEDO with seven channels. Channels 5 to 8 had filter of frequency set to from 27 kHz to 400 kHz with amplification of 20 dB. The channels 3, 4 and 9 had a frequency filter set to from 500 kHz to 2 MHz with amplification 35 dB. Sensors IDK 09 (channels 3, 4 and 9) and sensors MTPA-15 (channels 5 to 8) were used for measuring. Approximate location of sensors is shown in Figure 4. To evaluate the origin of micro cracks during stress, we focused on the activity of acoustic emission, respectively on the most used parameter which is the number overshoot preset threshold. The all graphs are created from data generated by the sensors which are located the closest to the visible crack.

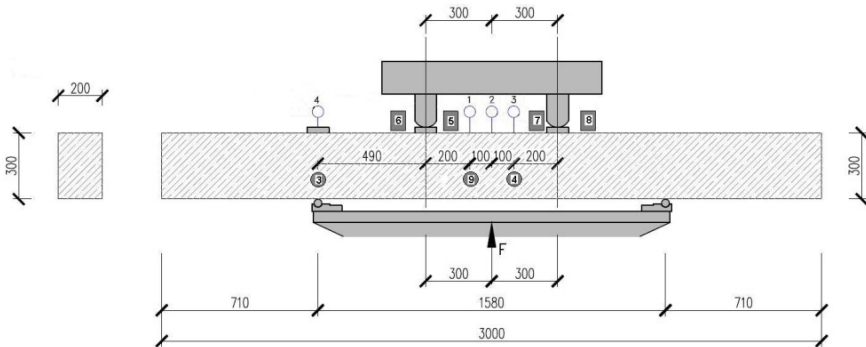


Fig. 4. Approximate location of sensors. (dimensions in mm)

The graph in Figure 5 shows the dependence of force F on deflection y for all mixtures. The increase in deflection together with force is evident for all mixtures to the first maximum. After first maximum is the visible crack appeared. The decrease of force occurs with continued of deflection. At some point comes to rebound until the second maximum of force where there is a total destruction of the specimen. The specimen from mixture marked 1N has got only the first maximum because after this maximum occurs a total destruction of the specimen. The maximum does not occur at the mixture marked 5A+D+V because specimen from this mixture did not break during the measurement.

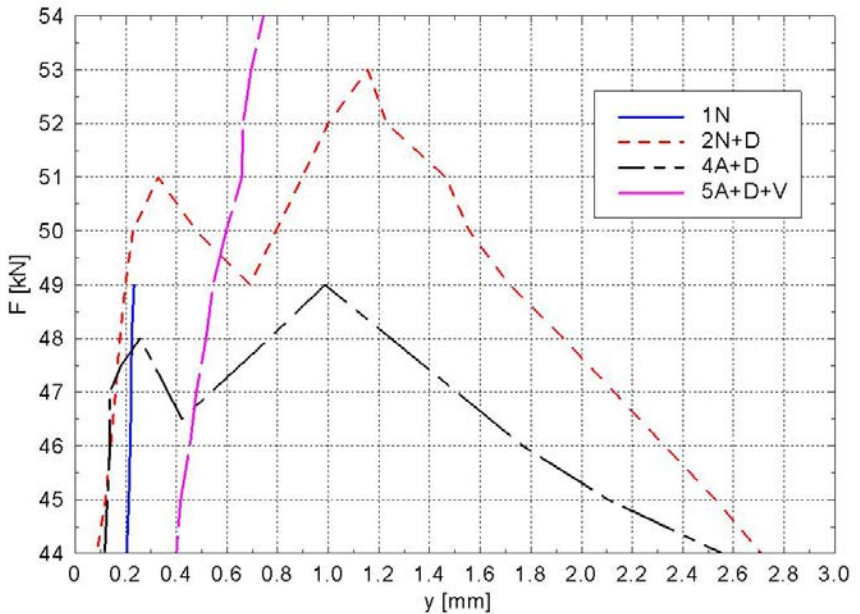


Fig. 5. Dependence of force (F) on deflection (y)

The graphs in Fig. 6 and Fig. 7 are created from data generated by the sensor which are located the closest to the visible crack. Dependence of cumulative count of events acoustic emission on the force (Fig. 6) shows that the mixture 5A+D+V has the greatest increase in counts acoustic emission from 175 kN load. The increase of events of counts of acoustic emission of other mixtures are in the area below 50 kN load.

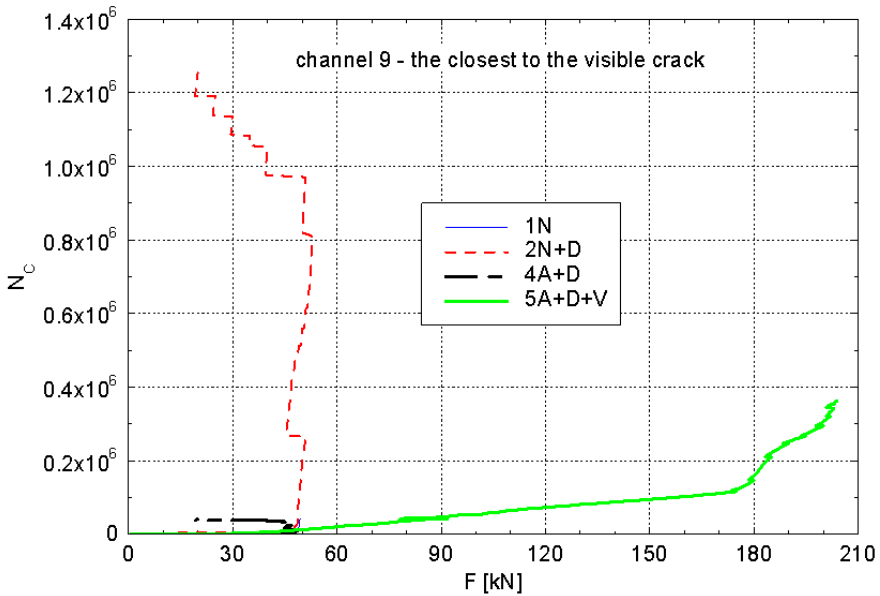


Fig. 6. Approximate location of sensors. (dimensions in mm)

A mixture of SCC with wires (Fig. 7) has the first increase in emission activities on the value of 10 kN load, which is not be significant and may be caused by outside interference. A mixture of 5A+D+V is compared to other mixtures first increase of acoustic emission events has on the value of forces between 20 kN and 30 kN load, but a mixture 5A+D+V continue to resist stress. Other mixtures show a significant increase number of events of acoustic emission from the of 40 kN load and thus the deformation of the whole structure. An increasing number of events of acoustic emission together with a decrease in stress show finite deformation structure.

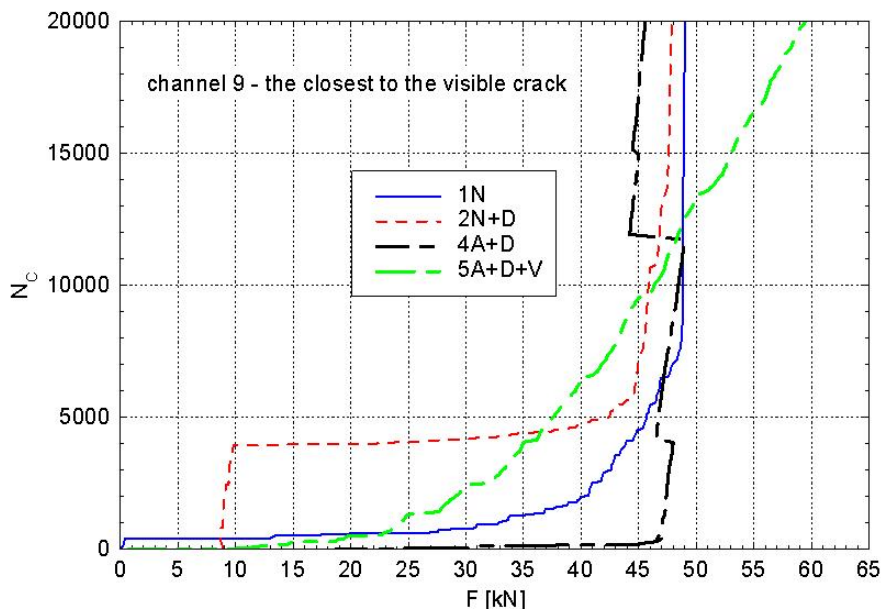


Fig. 7. Dependence of force (F) on deflection (y)

4. Conclusion

By measurements it was found that alkali-activated concrete is more fragile than concrete based on Portland cement. The activity of acoustic emission mixture marked 4A+D is rapidly increasing, while at the mixture marked 2N+D the activity is gradual. The mixture of alkali activated concrete shows lower compressive and flexural strength and a considerably larger contraction. The results obtained from large beams are quite different from the results obtained on small specimens, which is caused by the so-called "size effect". Acoustic emission is a useful tool in determining the time of the crack creation under load. The method of acoustic emission had warned about crack approaching which appeared after a while on the surface of the sample. Combining the standard methods with a non traditional one, in this case Acoustic Emission Method contributes to a more detailed description of material behaviour during its loading.

Acknowledgement

This research has been supported by projects of GACR No. P104/10/0535 and MSM 0021630519.

References

- [1] T. Suzuki and M. Ohtsu and M. Shigeishi, 'Relative damage evaluation of concrete in a road bridge by AE rat-process analysis', *Material and Structures*, Vol 40, No 2 (2007), pp 221-227, July 2006, ISSN 1359-5997.
- [2] L. P. Shah and S. E. Swartz and Ch. Ouyang, 'Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials', John Wiley & Sons, Inc., 588 pages, October 1995, ISBN 0-471-30311-9.
- [3] A. A. Pollock, 'Practical guide to acoustic emission', Physical Acoustic Corporation, USA, 1988.
- [4] P. Mazal and L. Pazdera and L. Kolar, 'Advanced Acoustic Emission Signal Treatment in the Area of Mechanical Cyclic Loading', *Proceedings of the 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering*, pp 283-292, September 2005, ISBN 961-90610-5-5.
- [5] Prassianakis I. N. and Grum J., 'Special Issue: Non-Destructive Testing and Preventive Technology', *International Journal of Materials & Product Technology*, 41(1-4), pp. 1-4 (2011), ISSN 0268-1900.
- [6] Trebuna F., Simcak F., Bocko J., Trebuna P. and Sarga P., 'Experimental and Numerical Analysis of Failure in Press Supporting Structure', *Proceedings of the 48th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, (Velke Losiny, Czech Republic, May 31-June 3, 2010)* pp. 467-474, ISBN: 978-80-244-2533-7.
- [7] Stähli P. and van Mier J. G.M., 'Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete', *Fracture of Concrete Materials and Structures*, Vol. 74, Issues 1-2, pp 223-242, January 2007, ISSN 0013-7944.



APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ APPLICATION OF SOME METHODS FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT

Jaroslav VÁCLAVÍK, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN, Otakar WEINBERG

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň
Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálu
a strojírenské metalurgie, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Abstrakt

V článku jsou popsány některé semidestruktivní a nedestruktivní metody měření zbytkového napětí a jsou uvedeny příklady jejich aplikace se zaměřením na energetické strojírenství.

Klíčová slova

Zbytková napětí, odvrtávací metoda, ultrazvuková metoda

Abstract

Some semi- and non-destructive techniques are described in the article for residual stress measurements and examples of using them especially in power engineering are shown.

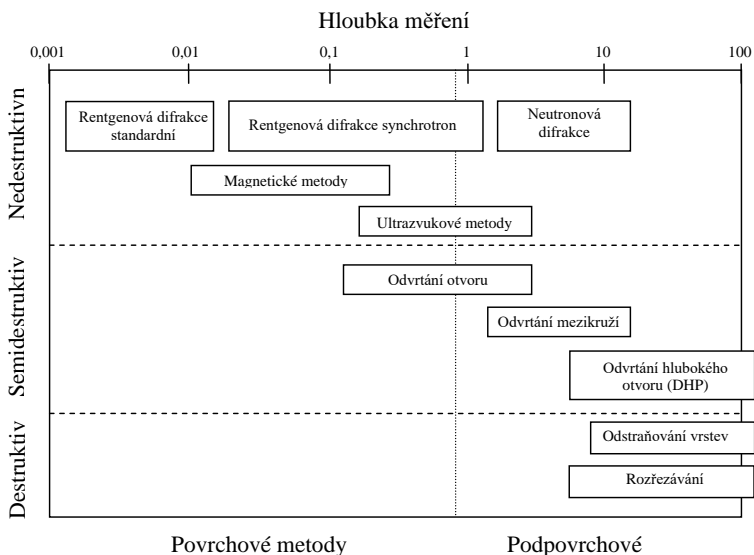
Key words

Residual stress, drilling method, ultrasound method

1. Úvod

Zbytková napětí (ZN) jsou vnášena do součástí během jejich výroby a dále se mohou přerозdělovat během pozdějšího tepelného nebo mechanického zpracování nebo v průběhu provozního zatěžování. Spolehlivé stanovení původu zbytkových napětí v kombinaci s provozním namáháním je nezbytné pro stanovení jejich vlivu na životnost součástí. Přes rozšiřování výpočetních metod pro určování zbytkových napětí bude experiment vždy nezbytný pro jejich verifikaci. Metody pro měření zbytkových napětí je možno obecně rozdělit na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní (obr. 1).

Destruktivní metody určování zbytkových napětí jsou založeny na změně napětového stavu odstraněním části materiálu nebo rozřezáním součásti a měření deformace, odpovídající této změně, zatímco nedestruktivní metody využívají závislosti mezi fyzikální nebo krystalickou vlastností materiálu a zbytkovým napětím.



Obr. 1 Metody pro měření zbytkových napětí

2. Vybrané metody měření zbytkového napětí

2. 1 Metoda odvtání otvoru a mezikruží

Pro měření povrchových napětí jsou nejpoužívanějšími metody semidestruktivní. Relaxace napětí se měří pomocí na povrchu součásti nalepených odporových tenzometrů a dosahuje se odvtáním otvoru (surface hole drilling) [1] nebo mezikruží (ring core) [2]. Speciálním případem je metoda „deep hole drilling“, kdy se do součásti vyvrtá nejdříve otvor a posléze mezikruží a měří se změna kruhovitosti otvoru po jeho celé délce.

Měření zbytkových napětí odvtáním otvoru lze provádět podle standardu ASTM E837-08. Nová revize normy předepisuje postup jak pro měření homogenních napětí metodou mocninných koeficientů (power series), tak proměnlivých po hloubce metodou integrální [3]. Vlivem koncentrace relaxovaných napětí kolem vyvrtaného otvoru je použitelnost metody do 50% meze kluzu.

Při odvtání mezikruží je zbytkové napětí určováno z relaxované poměrné deformace měřené tenzometrickou růžicí uprostřed zbylého sloupku. Výhodou metody je, že po odvtání dostatečné hloubky dojde k úplné relaxaci zbytkového napětí; měří se tedy skutečná napětí neovlivněná koncentrátorem napětí jako v případě metody odvtání otvoru. Metodu lze však využít i pro měření napětí po hloubce nebo v dané vrstvě pod povrchem při znalosti relaxačních koeficientů, stanovených MKP nebo experimentem [2]. Na obr. 2 a je zobrazeno zařízení pro odvtání otvoru, používané ve VZU Plzeň s.r.o. do hloubky otvoru 4 mm, na obr. 2 b zařízení, používané pro odvtání mezikruží pro průměr odvtaného sloupku 14 mm. Na obr. 3 je vykreslen průběh změny relaxované poměrné deformace pro dva typy tenzometrických růžic a tři průměry odvtaného otvoru a rovněž pro metodu ring core a růžici nalepenou kolem otvoru ring core („man“).



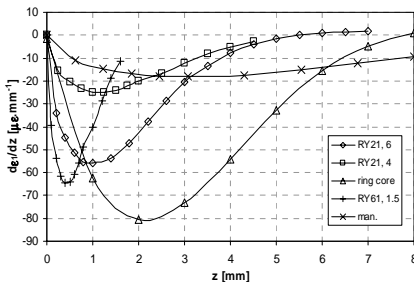
a) Odvrtání otvoru



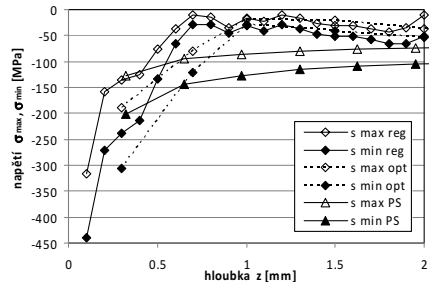
b) Odvrtání mezikruží

Obr. 2 Zařízení pro měření zbytkového napětí, používaná ve VZÚ Plzeň

Maximální citlivost tyto metody dosahují v intervalu 0,5 až 2 mm pod povrchem, napětí v hloubce 8 mm jsou již neměřitelná. Porovnání možných vyhodnocovacích metod je ukázáno na obr. 4. na průběhu zbytkových napětí po hloubce, kde je vidět, že integrální metodou lze separovat povrchová napětí, vzniklá od mechanického opracování od vnitřních napětí, vzniklých tepelným zpracováním (rozhraní je v hloubce cca 1 mm). Naopak metoda „power series“ dává nereálně vysoké hodnoty po celé měřené hloubce. Měření bylo provedeno na normalizačně žíhaném hřídeli turbinového rotoru ($\varnothing 630$ mm) z materiálu 28CrMoNiV59 v krocích po 0,1 mm vrtákem o průměru 4 mm do hloubky 2 mm.

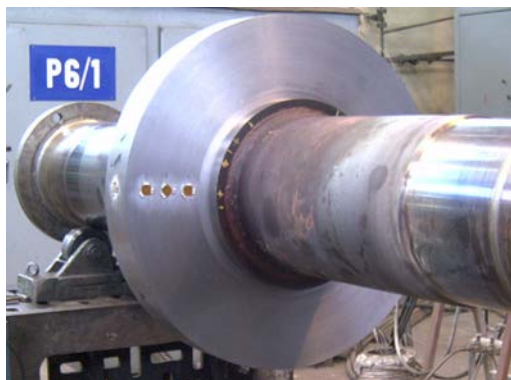


Obr. 3 Porovnání citlivosti metod



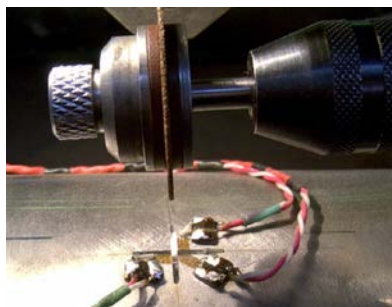
Obr. 4 Průběh napětí po hloubce

Na obr. 5 je na prvním obrázku příklad měření na disku rotoru turbíny s celo - obvodovým návarem (velká růžice HBM RY21, vrtaný otvor), na druhém obrázku je použita malá růžice HBM RY 61 (vrtaný otvor $\varnothing 1,5$ mm) pro určení napětí u paty obvodového svaru malého nátrubku.



Obr. 5 Příklad aplikace metody odvrtání otvoru

Ve VZÚ Plzeň používáme ještě vlastní semidestruktivní metodu pro měření zbytkových napětí, kdy úplné relaxace napětí v materiálu se dosahuje vybrušením dvou pravoúhlých drážek o šířce 1 mm do hloubky 3 mm. Přípravek pro měření je uveden na obr. 6.



Obr. 6 Zařízení pro měření zbytkového napětí rozřezávací metodou

2. 2 Magnetické metody

Magnetické metody využívají pro měření vnitřních napětí odezvu materiálu na působící střídavé magnetické pole [4]. Magnetoelastická metoda detekuje vznikající Barkhausenův šum, jehož úroveň je však funkcí nejen napětí v materiálu, ale rovněž jeho mikrostruktury a tvrdosti. Proto se komerčně vyráběná zařízení používají nejen pro měření zbytkových napětí (Stresscan, fy. AST), ale rovněž pro kontrolu povrchových defektů (Rollscan, fy. AST). Magnetostrikční metoda využívá měření změn magnetické indukce detekční cívkou. Ve VZÚ Plzeň je k dispozici zařízení ION-C (obr. 7), jehož sonda obsahuje dvě magnetizační cívky a dvě snímací cívky. Jeho výstupní signál je citlivý na rozdíl hlavních poměrných deformací. Toto uspořádání bylo zvoleno proto, aby kalibrační křivka byla monotónně stoupající i v tahové oblasti. Zařízení je možno použít pro případ jednoosé napjatosti nebo tam, kde je znám poměr hlavních napětí.

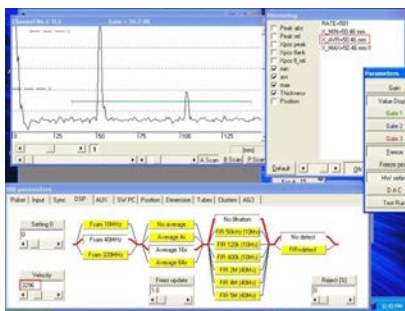


Obr. 7 Zařízení ION-C pro měření ZN a jeho sonda při kalibraci vzorku

2. 3 Ultrazukové metody

Ultrazukové metody jsou založeny na vztahu mezi rychlostí šíření vlny a elastických konstant materiálů. Pro měření se používají podélné nebo příčně polarizované vlny a lze realizovat měření integrální přes celý průřez vzorku nebo měření povrchových napětí povrchovými vlnami. Využitím akustoelastického dvojlomu při měření příčně polarizovanými vlnami ve dvou na sobě kolmých rovinách je možno určit rozdíl hlavních napětí. Při současném měření podélnými a příčnými vlnami je možno eliminovat některé vstupní hodnoty, potřebné pro výpočet, protože obě vlny se šíří různou rychlostí.

Ve VZÚ Plzeň je k dispozici zařízení EMAT s elektromagnetickým akustickým měničem a speciálním softwarem DIO 2000 od fy. Starmans s.r.o., původně určené pro měření tloušťky materiálu. Měření zbytkového napětí je tedy integrální přes celý průřez materiálu. Rychlost šíření vlny se měří na základě měření echa odražené vlny a ze známé tloušťky materiálu.



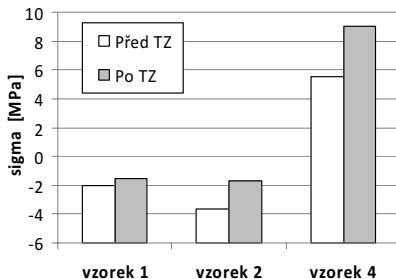
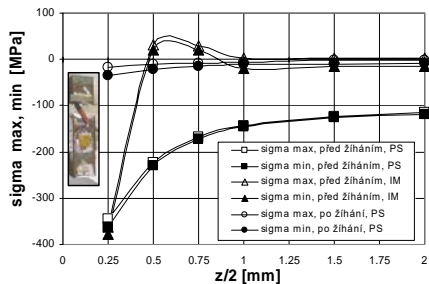
Obr. 8 Zařízení EMAT a obrazovka software DIO 2000 fy. Starmans s.r.o.

3. Příklady aplikace metod pro energetické strojírenství

Jako příklad aplikace je uvedeno měření ZN na polotovaru kované tyče (hranol 45 x 45 x 248) z materiálu X10Cr13 pro výrobu turbinových lopatek metodou odvrtání otvoru a metodou ultrazukovou. Ultrazukovou metodou byla měřena velmi nízká ZN, která neodpovídala odvrtání otvoru, vyhodnocené metodou power series (PS). Teprve použití integrální metody (IM) ukázalo, že ZN jsou v povrchové vrstvě,

takže ultrazvukovou metodou, měřící integrálně přes celou tloušťku materiálu, je nelze zaznamenat. Na obr. 9 a je dále vidět přerozdělení napětí po hloubce – kompenzace tlakového povrchového napětí tahovým. Po vyžhání materiálu ZN podstatně pokleslo.

Na obr. 10 je vidět průběh zbytkového napětí, měřeného podél vzorku č.3 s částečně vyfrézovanou patkou.

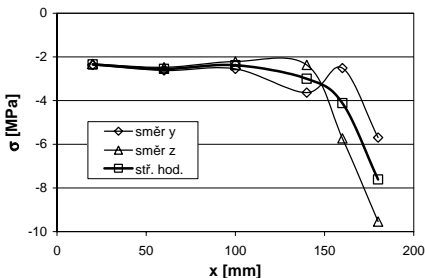


a) Metoda odvrtání otvoru

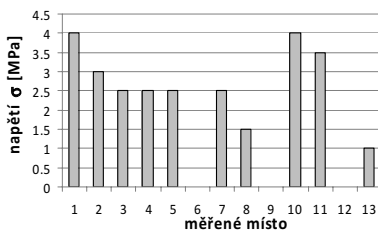
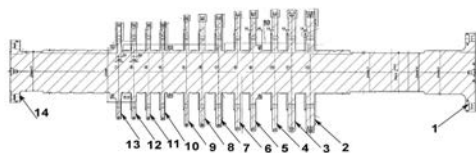
b) ultrazvuková metoda

Obr. 9 Průběh ZN v povrchové vrstvě polotovaru tyče před a po vyžhání

Na obr. 11 je typický příklad aplikace ultrazvukové metody pro ověření úrovně zbytkového napětí v discích hotových turbínových rotorů, kde je nezbytné použití nedestruktivní techniky.



Obr. 10 Průběh zbytkového napětí podél polotovaru s vyfrézovanou patkou



Obr. 11 ST rotor Ledvice a vyhodnocení zbytkových napětí na discích rotoru

3. Závěr

Univerzální technika pro měření zbytkových napětí neexistuje. Optimálním postupem je kombinace několika vhodných metod, volených podle povahy měřené součásti a očekávaného rozložení zbytkového napětí.

V rámci dalšího vývoje metod měření ZN se v budoucnu zaměříme na zdokonalení integrálních metod a měření ultrazvukem, kde bychom rádi zavedli měření povrchovou vlnou za použití tandemových ultrazvukových sond.

Literatura

- [1] ASTM E837-08 *Standard Test Method for Hole-Drilling Strain Gage Method*, Amer. Soc. for Testing and Materials, (2008).
- [2] Bohdan, P., Holý, S., Jankovec, P., Jaroš, P., Václavík, J., Weinberg, O.: Residual stress measurement using ring-core method., *Sb. konference EAN 2008, červen 2008, Horní Bečva*.
- [3] Václavík, J., Bohdan, P., Holý, S., Weinberg, O.: Residual stress evaluation according ASTM E 837-08 revision. *Sb. konference EAN 2009, červen 2009, Sychrov*.
- [4] James, M., Lu, J., Roy, G.: *Handbook of measurement of residual stresses*. SEM, Fairmont Press, INC., 1996, ISBN 0-88173-229-X.
- [5] Štemberk, J., Koc, J.: *Měření vnitřních pnutí ultrazvukem*. Výzkumná zpráva VYZ 0964/06, ŠKODA VÝZKUM s.r.o., Plzeň, 1996.



MONITOROVÁNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE V RANÝCH STÁDIÍCH ÚNAVOVÉHO PROCESU UŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE

ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF PLASTIC DEFORMATION IN INITIAL STAGES OF FATIGUE PROCESS

František VLAŠIC *, Václav KOULA **, Pavel MAZAL *, Pavel GEJDOŠ *

* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

** Zemědělské družstvo Rpety, středisko DAKEL

Contact e-mail: vlasic@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Článek se zabývá výzkumem cyklického poškození zkušebního materiálu v počátečních stádiích únavového procesu za použití metody akustické emise. Cílem práce bylo zrealizovat několik únavových zkoušek do vzniku trhliny a provést podrobnou analýzu signálu akustické emise. Ta byla založena zejména na separaci hitů dle jejich podobnosti a rozdělení do jednotlivých tříd. Během únavových zkoušek také byla na elektrorezonančním pulzátoru RUMUL Cracktronic zaznamenávána rezonanční frekvence, která je funkcí tuhosti zkušebního tělesa. Výsledky ukázaly velkou citlivost signálu akustické emise při přechodu ze stádia tvorby a vývoje povrchového reliéfu do fáze nukleace a šíření trhliny.

Klíčová slova: akustická emise, vysokocyklová únava, trhlina, titanová slitina

Abstract

The paper deals with research of cyclic damage of tested samples in initial stages of fatigue process using acoustic emission method. The goal of the work was to perform fatigue tests to crack initiation and make detailed analysis of acoustic emission signal. This analysis was primarily based on the waveform similarity and division into classes. All measurements have been completed with registrations of resonance frequency changes for the tested sample taken with the fatigue equipment RUMUL Cracktronic. The results showed the high sensitivity of acoustic emission technology in the transition from the stage of surface relief evolution to the stage of crack nucleation and propagation.

Key words: acoustic emission method, high-cycle fatigue, crack, titanium alloy

Úvod

Potřeba nových materiálů zejména v leteckém průmyslu, spojená s požadavky na zvyšování odolnosti proti cyklickému porušování za normálních i zvýšených teplot, vede vědecké pracovníky k dalšímu prohlubování poznatků o jejich mechanických vlastnostech a procesech porušování. Při postupném zvyšování požadavků se po slitinách železa, hliníku nebo hořčíku nejvíce prosazují titanové slitiny, které se

vyznačují především příznivým poměrem meze pevnosti k měrné váze (i při vyšších teplotách), dobrou svařitelností, odolností proti korozi a vyhovují přísným požadavkům na rovnost plechů malé tloušťky [1, 2]. Nejčastěji používanými titanovými materiály v leteckém průmyslu jsou dvoufázové slitiny titanu Ti6Al4V a Ti5Al2,5Sn.

Typickými znaky, které rozhodují o odolnosti titanových slitin proti cyklickému namáhání, jsou citlivost na charakter mikrostruktury a fázové složení, přítomnost nečistot (vodík, kyslík), citlivost na rychlost deformace a povrchové úpravy a změny vlastností s teplotou. Již po poměrně malém počtu cyklů mohou vznikat zřetelné skluzové pásy a únavové mikrotrhliny. Cyklické zatěžování je vždy spojeno s poměrně malou plastickou deformací a hlavním mechanismem vzniku a šíření trhliny je skluz a mezifázové porušení [3, 4].

Největší počet prací byl věnován stádiu šíření únavových trhlin, kdežto vznikem prvních mikrotrhlin u zkušebních těles ze slitiny Ti6Al4V se zabývalo poměrně málo autorů. Proto je tato práce zaměřena na počáteční stádía únavového procesu. Zvláštností titanových slitin je možnost vzniku prvních únavových mikrotrhlin pod povrchovou vrstvou, které se často vyskytují při střídavém ohybu a při tahovém napětí v oblasti vysokocyklové únavy [5, 6].

Jedna z možností, jak monitorovat procesy probíhající v materiálu během únavového zatěžování, je využití nedestruktivních metod. Vzhledem k tomu, že jsou při pozorování podstatné pouze aktivní děje (pohyb dislokací, tvorba skluzových pásem či trhlin a další), nejvhodnější variantou se stává moderní metoda akustická emise (AE). Přestože se tato metoda nejčastěji využívá při tlakových zkouškách a při hodnocení technického stavu objektů, významnou roli hraje také v oblasti základního výzkumu hodnocení fyzikálních procesů v materiálu při statických a únavových zkouškách. Jedná se o objemovou metodu, tzn., že se při měření detekují pouze aktivní defekty (diskontinuity) a to v celém objemu, nikoli na konkrétním místě. Proto se stává silným nástrojem pro včasné varování před nečekaným selháním konstrukce či jiných provozních zařízení. Největší přínos této progresivní metody však spočívá v lokalizaci aktivních (nebezpečných) zdrojů, po které většinou následují ultrazvuková měření míst s nejvyšší četností emisních událostí.

K popisu daného stupně poškození materiálu se při únavových zkouškách nejčastěji využívá kumulativní četnost příchozích signálů (hitů AE). Samozřejmě se využívají i další aspekty hodnocení, které jsou založeny na kvalitativních parametrech detekovaného signálu. Standardně se rozlišují tři stádía únavového procesu, během nichž může být generován signál AE. Jedná se o iniciaci trhlin a pomalé a rychlé šíření trhlin [7]. Přesnou hranici mezi těmito stádii nelze jednoznačně určit, ale většinou se přechodové jevy projevují zvýšeným růstem emisních událostí. Optická měření např. ukazují, že kumulativní četnost událostí přibližně odpovídá rychlosti růstu (již objevené) trhliny. Tyto poznatky pak mohou být využity při predikci konečného selhání měřeného objektu.

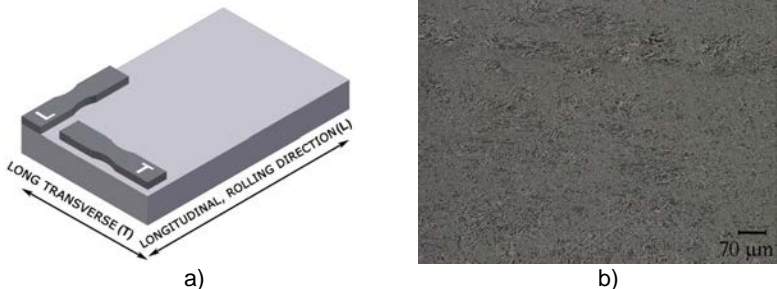
Na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně je činnost výzkumné skupiny "Únavové vlastnosti" zaměřena zejména na aplikaci metody AE v oblasti základního výzkumu hodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálech při cyklickém zatěžování. V této práci je AE využita ke studiu cyklického chování titanové slitiny Ti6Al4V v počátečních fázích únavového procesu.

1. Zkušební materiál a zařízení

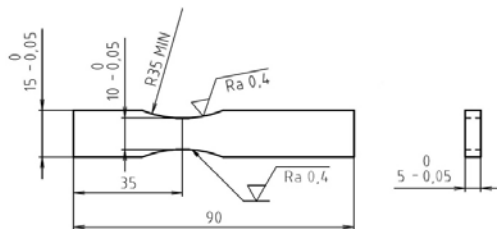
Pro následující experimenty byla použita nejrozšířenější titanová slitina Ti6Al4V (Grade 5) dodaná v žíhaném stavu. Chemické složení je v tab. 1. Z profilu o rozměrech 17 x 80 mm byla vyrobena zkušební plochá tělesa s mělkým vrubem uprostřed pro iniciaci trhliny. Mikrostruktura a geometrie tělesa je na obr. 1 a 2. Únavové zkoušky byly realizovány při pokojové teplotě na univerzálním elektrozvoneném pulzátoru RUMUL Cracktronic 8204/160.

Tab. 1 Chemické složení slitiny Ti6Al4V (hm. %)
Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V alloy (wt. %)

N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
0,008	0,01	0,003	0,04	0,06	6,3	4,3	Bal.



Obr. 1 Značení zkušebních těles (a), mikrostruktura slitiny Ti6Al4V (b)
Fig. 1 Marking of specimens (a), microstructure of Ti6Al4V alloy (b)

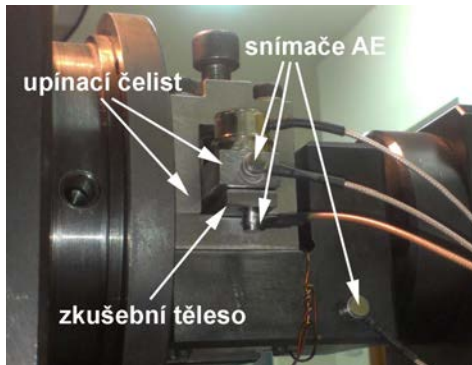


Obr. 2 Tvar a rozměry zkušebního tělesa
Fig. 2 Specimen's geometry

Měření signálu AE bylo provedeno na systémech XEDO od firmy ZD Rpety - středisko DAKEL. Pro detekci napěťových vln na povrchu materiálu byly použity tři pasivní piezokeramické snímače typu MIDI (průměr 6 mm). Jeden byl upevněn přímo na vzorku, druhý na upínací čelisti a třetí přímo na zatěžovacím stroji (viz obr. 3). Rozmístění bylo zvoleno tak, aby bylo možné na základě porovnávací studie přichozících signálů z jednotlivých snímačů eliminovat rušivé zdroje pocházející zejména ze zatěžovacího zařízení RUMUL. Dalším důvodem takto zvolené konfigurace byl fakt, že z důvodu nedostatku místa v okolí měření nebylo možné

upevnit další snímače na vzorek a lokalizovat tak události dle časových zpoždění detekce hitů AE.

Analyzátor XEDO je multi-kanálový systém pro měření, hodnocení signálů AE a lokalizaci zdrojů, který pokrývá frekvenční rozsah 80 až 550 kHz se vzorkovací frekvencí 2 až 8 MHz. Měření parametrů AE není na vzorkování nijak závislé, dojde-li k zastavení vzorkování a přenosu navzorkovaného signálu do PC, neovlivní to žádným způsobem ostatní měření.



Obr. 3 Místa upevnění snímačů AE

Fig. 3 Location of AE sensors

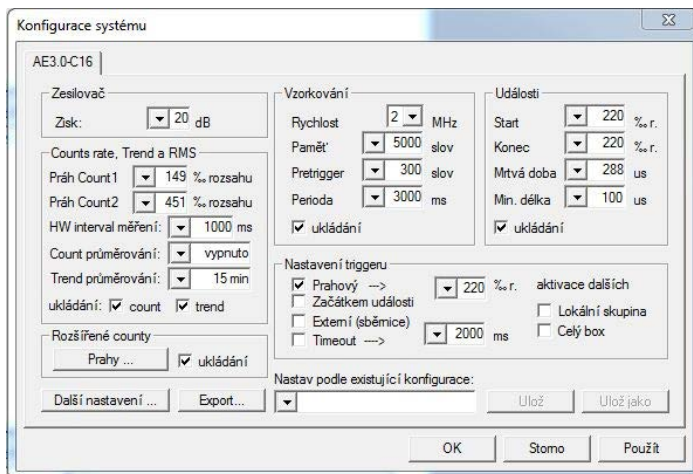
2. Podmínky a metodika měření

Pro hodnocení únavového chování v počátečních stádiích zatěžování byly použity dva vzorky z každého směru (L a T - viz obr. 1a). Cyklické zatěžování probíhalo při konstantní amplitudě ohybového napětí 504 MPa ($R = -1$) až do chvíle, kdy byla objevena trhлина(y). Mikroskopické pozorování bylo provedeno před začátkem měření a pak vždy po 30,000, 60,000, 80,000, 100,000 a 120,000 cyklech. Únavová životnost se při těchto podmínkách pohybovala kolem $1,5 \times 10^5$ cyklů. Po celou dobu zatěžování byl snímán signál AE a zaznamenávána rezonanční frekvence zařízení RUMUL, která je závislá na celkové tuhosti zkušebního vzorku. Průměrná hodnota se pohybovala kolem 70 Hz.

Signál ze snímačů AE byl zesílen předzesilovačem (35 dB) a celkový zisk vč. softwarového zesílení činil u každého snímače 55 dB. V softwarové části měřicího systému *Daemon* se provádí veškerá nastavení prahů pro záznam emisních událostí a countů, kmitočtu vzorkování, triggeru a další. Nastavení konfigurace je na obr. 4. Mezi základní sledované parametry AE patřily:

- RMS - efektivní hodnota charakterizující energii resp. výkon signálu
- časový průběh hitů AE, jejich energie a frekvenční obraz
- vývoj frekvenčního spektra (v jednotlivých fázích zatěžování)

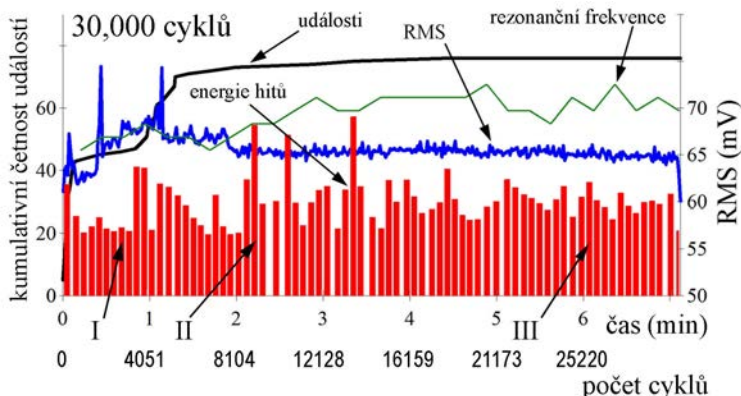
Cílem bylo pomocí vhodných parametrů nalézt změny v signálu AE, které by mohly reflektovat počáteční přechodová stádia únavového procesu, popisovat odpor materiálu proti cyklické deformaci a iniciaci trhlin.



Obr. 4 Nastavení parametrů pro detekci signálu AE
 Fig. 4 Experimental setup for AE signal detection

3. Výsledky a diskuze

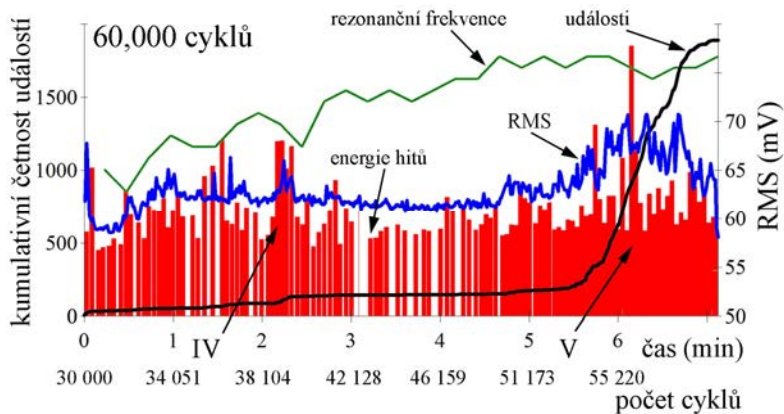
Na obr. 5 je zobrazen časový průběh signálu AE a rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL v první fázi měření (po 30 tis. cyklech). Jsou zde vyneseny tyto AE parametry: kumulativní četnost událostí, RMS a energie hitů (pro zjednodušení a přehlednost zde nejsou zobrazeny všechny osy). Zatímco tuhost zkušební tělesa po celou dobu pozvolna roste, z průběhu RMS a četnosti událostí lze zpozorovat od 8,000 cyklů útlum a konstantní průběh až do konce 1. etapy.



Obr. 5 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 30 tis. cyklech
 (směr L, R = -1, $\sigma_a = 504$ MPa, N = 30,000 cyklů)

Fig. 5 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL
 (direction L, R = -1, $\sigma_a = 504$ MPa, N = 30,000 cycles)

Ve 2. etapě tento trend pokračuje až do cca 50,000 cyklů, kdy se rezonanční frekvence ustaluje a dochází ke zvýšené aktivitě RMS a rapidnímu nárůstu událostí (viz obr. 6). Vzhledem k tomu, že na konci této etapy nebyla zpozorována žádná trhlinka, můžeme toto období považovat za 1. stádium - stádium změn mechanických vlastností, mající u většiny materiálů sytící charakter. Tzn., že jsou výrazné pouze na počátku zatěžování a s přibývajícím cykly jejich intenzita klesá, až zcela ustane. Jedná se vlastně o odpor materiálu proti cyklické deformaci.

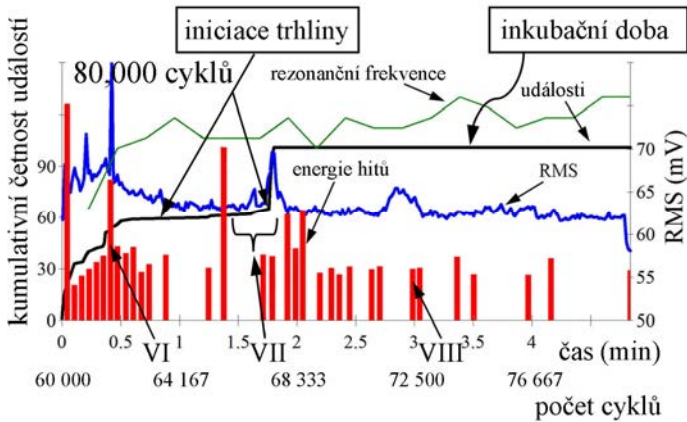


Obr. 6 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 60 tis. cyklech (směr L, $R = -1$, $\sigma_a = 504$ MPa, $N = 60,000$ cyklů)

Fig. 6 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL (direction L, $R = -1$, $\sigma_a = 504$ MPa, $N = 60,000$ cycles)

S ohledem na to, že v této práci nebyla provedena žádná detailní analýza, která by verifikovala a posuzovala fázové složení, podmínky žíhání či přítomnost nečistot studované slitiny, nelze explicitně hodnotit mikrostrukturní chování a mechanismy vzniku trhlin v počátečních stádiích zatěžování. Nicméně z jiných odborných prací vyplývá, že mikroplastická deformace u této žíhané slitiny probíhá u hranic zrn α/β , které působí jako překážky proti pohybu dislokací v rovinách skluzu. Mírný nárůst a kolísání parametru RMS v období od 32,000 do 40,000 cyklů může souviset s generováním nových dislokací a jejich vzájemnou interakcí a s interakcí dislokací se strukturálními nehomogenitami. V důsledku těchto jevů dochází k tvorbě nových stabilních dislokačních struktur - v případě Ti6Al4V se bude zřejmě jednat o únavové skluzové pásy s velmi vysokou hustotou dislokací.

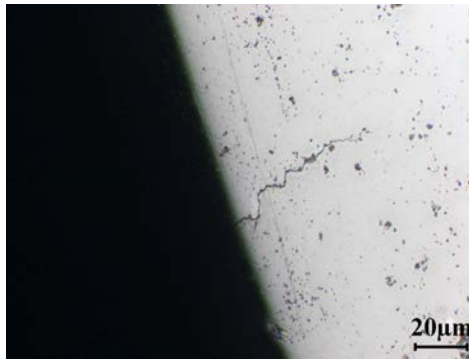
Prudký nárůst četnosti událostí a zvýšená aktivita RMS od 53,000 cyklů mohou odrážet další interakce dislokací např. s vyloučenými křehkými fázemi (TiH_2 , TiC , $TiNi_2$, apod.), které působí jako iniciační centra při vzniku mikrotrhlin při skluzu po hranicích zrn. Na vznik mikrotrhlin může mít také významný vliv i mezifázové rozhraní. V rovinách maximálního smykového napětí dochází ke vzájemnému pokluzu sousedních rovin a vytváření mikroreliéfu na povrchu vzorku. Ten se nám ale nepodařilo (opticky) zaznamenat. Zejména prohlubeniny (intruze) představují mikrokoncentrátory napětí na povrchu součásti a zároveň zárodky budoucích únavových trhlin.



Obr. 7 Průběh signálu AE a rezonanční frekvence zařízení RUMUL po 80 tis. cyklech (směr L, $R = -1$, $\sigma_a = 504$ MPa, $N = 80,000$ cyklů)

Fig. 7 Record of AE signal and resonant frequency of loading device RUMUL (direction L, $R = -1$, $\sigma_a = 504$ MPa, $N = 80,000$ cycles)

Až po 100,000 cyklech byla objevena trhlina o velikosti cca 65 μm (viz obr. 8), iniciující z hrany asi 5 mm od nejužší části tělesa. Vzhledem k její velikosti musela nukleovat v oblasti mezi 60,000 a 80,000 cykly (obr. 7). Později byly zjištěny další trhliny iniciující z hrany, avšak tato se stala hlavní (magistrální) vedoucí k lomu tělesa. Po detailní mikroskopické analýze povrchu byly zjištěny na obou hranách (krajích) vzorku relativně rozsáhlé nerovnosti vzniklé po výrobě a úpravě povrchu. Tyto poznatky vedly k názoru, že veškeré známé mechanismy vzniku únavových trhlin v případě tohoto tělesa nemohly být uplatněny, a to z důvodu negativně poznamenané textury povrchu.

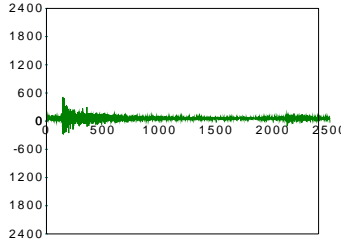
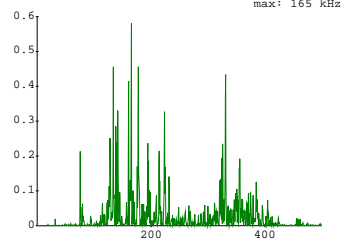
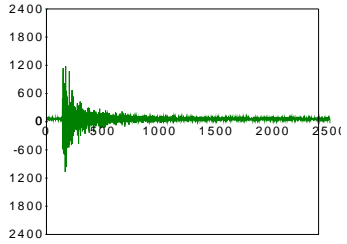
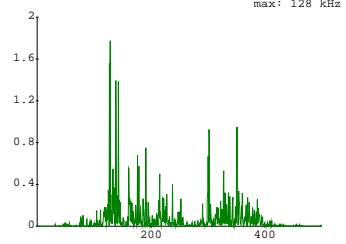
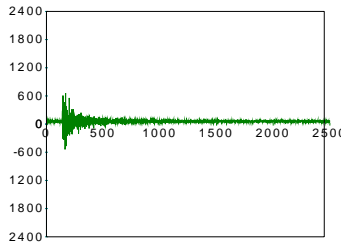
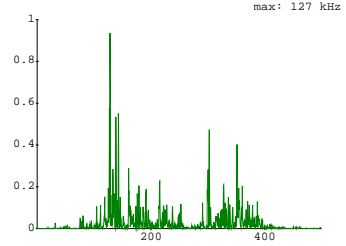
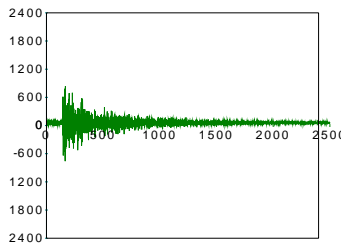
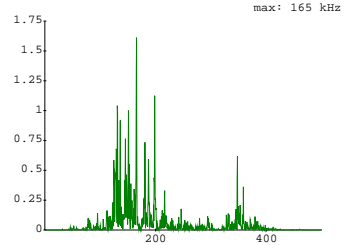


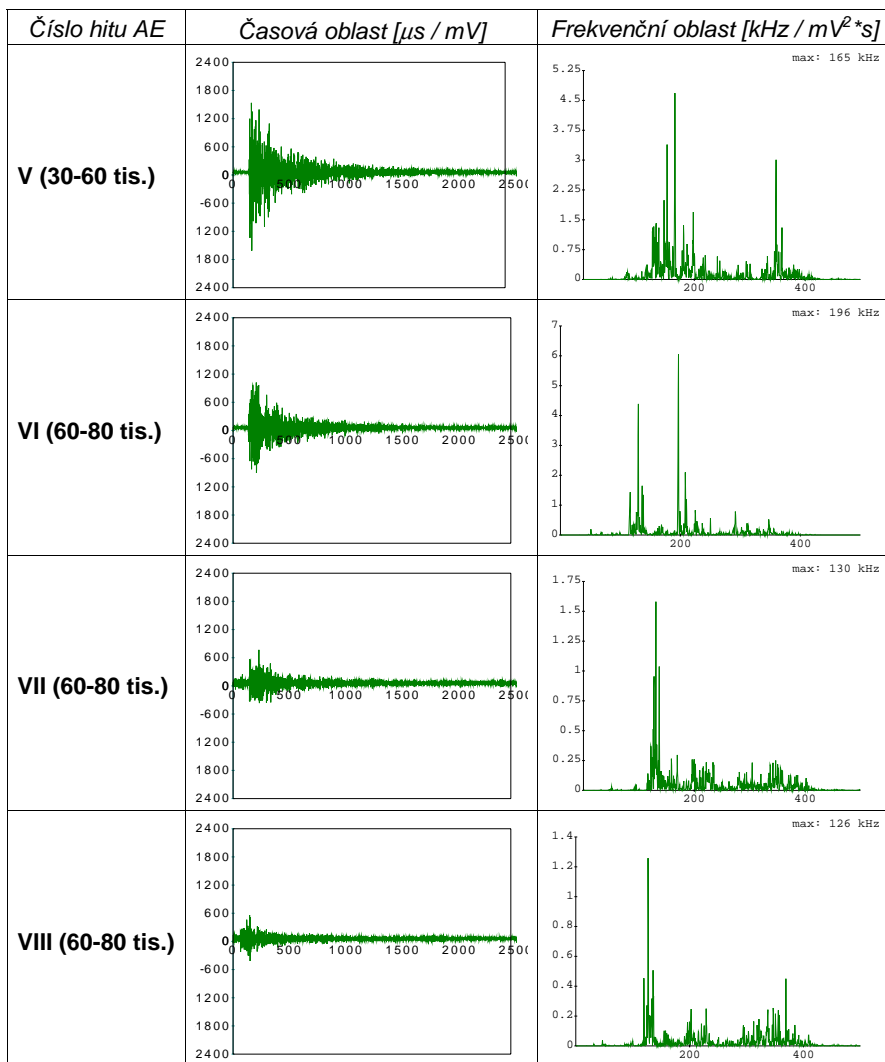
Obr. 8 Šířící se trhlina po 100 tis. cyklech

Fig. 8 Crack propagation after 100,000 cycles

Stejně jako u předchozích výsledků, tak také zde signál AE zaznamenal inkubační dobu trhliny (67,000 až 80,000 cyklů), čili období mezi iniciací a šířením trhliny, kdy dochází k útlumu emisních událostí a mírnému poklesu RMS. Od začátku 4. etapy (80,000 cyklů) se již šíří hlavní trhlina a při 157,100 cyklech nastává lom tělesa. Jednorázové časové nárůsty signálu - hity AE jsou přehledně zobrazeny v tab. 2. Na základě podobnosti časového průběhu byli vybráni nejčastější zástupci pro každou

Tab. 2 Detekované hity AE v počátečních stádiích zatěžování
Table 2 Typical waveform in initial stages of loading

Číslo hitu AE	Časová oblast [μs / mV]	Frekvenční oblast [kHz / $\text{mV}^2 \cdot \text{s}$]
I (0-30 tis.)		
II (0-30 tis.)		
III (0-30 tis.)		
IV (30-60 tis.)		



sledovanou oblast I až VIII. Vzhledem k tomu, kde byly detekovány hity s vyšší amplitudou (600 – 1500 mV) a energií, lze se domnívat, že jejich příčinou byla kumulace dislokací a interakce se strukturálními nehomogenitami a vyloučenými křehkými fázemi. Frekvenční složky, které přenášely maximální výkon signálu, se nejčastěji pohybovaly mezi 165 a 195 kHz. Růst a spojování malých mikrotrhlin, jejich zanikání a interakce s různými překážkami je většinou doprovázeno signály s nižší amplitudou, kratší dobou trvání a frekvencemi kolem 130 kHz (viz VII, VIII). Nejvyšší zastoupení signálů s vyšší amplitudou a delší dobou trvání bylo ve fázi

do 30,000 cyklů. Bohužel se nepodařilo získat dostatečný počet vzorků (zejména v oblasti přechodu ze stádia změn mechanických vlastností a iniciace trhlin) pro vytvoření statistické analýzy změn a vývoje frekvenčních složek signálu. Nicméně časové průběhy vybraných parametrů signálu AE – RMS a četnost událostí a průběh rezonanční frekvence zařízení RUMUL ukazují na velkou citlivost v období kumulace poškození a tvorby povrchového reliéfu. Stádium iniciace trhlin bylo sice AE zachyceno, avšak vlivem výroby a konečné úpravy povrchu tělesa nebylo možné zrealizovat srovnání s mikroskopickým pozorováním.

4. Závěr

Cílem práce bylo využitím metody AE provést podrobnou analýzu únavového chování titanové slitiny Ti6Al4V v raných stádiích zatěžování. Charakter signálu se u všech zkoumaných vzorků zásadně nelišil, a proto směr odběru vzorků z dodaného polotovaru nehrál podstatnou roli. K nukleaci prvních trhlin, které byly v průběhu zatěžování postupně detekovány, docházelo v období $\frac{1}{4}$ až $\frac{1}{2}$ životnosti tělesa. To bylo ovlivněno především kvalitou a stavem hran v oblasti mělkého vrubu. Za stěžejní výsledky však lze považovat zachycení mikrostrukturálních změn, které nejlépe popisoval parametr RMS a kumulativní četnost událostí. Pro zkvalitnění výsledků a úplnou klasifikaci signálů – hitů AE bude dále zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost výrobě a úpravě povrchu vzorků a začlenit do dalších měření také analyzátor IPL, který umožňuje ukládat kontinuální signál a zejména generovat vývojové mapy frekvenčních spekter.

Poděkování

Práce byla vytvořena za podpory projektu TIP MPO ČR FR-TI1/371 „Integrovaný systém průběžného monitorování vybraných strojních uzlů a technologických procesů s využitím akustické emise“.

Literatura

- [1] BOYER, R., WELSCH, G., COLLINGS, E. W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International, 1994. pp. 1176. ISBN: 978-0-87170-481-8.
- [2] LEYENS, C., PETERS, M. *Titanium and Titanium Alloys - Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. pp. 513. ISBN: 3-527-30534-3.
- [3] SEDLÁČEK, V. *Únava hliníkových a titanových slitin*. SNTL, n.p. Praha, 1989, 351 stran, ISBN 80-03-00180-3.
- [4] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [5] BIANCOLINI, M. E., BRUTTI, C., PAPARO, G., ZANINI, A. Fatigue Cracks Nucleation on Steel, Acoustic Emission and Fractal Analysis. *International Journal of Fatigue*. Vol. 28 (2006), pp. 1820 – 1825.
- [6] LEE, CH. K., WILCOX, P. D., DRINKWATER, B. W. Acoustic Emission during Fatigue Crack Growth in Aluminium Plates. In *9th European Conference on Non-destructive Testing 2006. Berlin: DGZfP, 2006*. Mo.2.1.5. ISBN 3-931381-86-2.
- [7] AGGELIS, D. G., KORDATOS, E. Z., MATIKAS, T. E. Monitoring of Metal Fatigue Damage Using Acoustic Emission and Thermography. *Journal of Acoustic Emission*. Vol. 29 (2011), pp. 113-122. ISSN 0730-0050.

**ABSTRACTS AND PAPERS
AFTER DEADLINE**

**ABSTRAKTY A PŘÍSPĚVKY
DODANÉ PO TERMÍNU**



MONITORING THE GMAW PROCESS BY DETECTION OF WELDING CURRENT, LIGHT INTENSITY AND SOUND PRESSURE

Janez GRUM, Zoran BERGANT, Ivan POLAJNAR*

University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering,
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

*Welding Institute, Ptujška 19, 1000 Ljubljana, Slovenia

Abstract:

In addition to variable welding voltage and current, a distinctive characteristic of arc welding processes are also the light and audible phenomena, which reflect the variable conditions in the arc to the highest extent. It follows that it is reasonable to monitor these phenomena and that the results can be used for the implementation of adaptive welding process control.

The paper presents the results of experimental gas metal arc welding. Namely, this welding process is commonly used in the automation and robotization of fusion welding, where adaptive regulation is indispensable.

Keywords: Fusion welding, Arc, Material transfer, Welding parameters, Light radiation, Audible sound

1. INTRODUCTION

A constant increase in the demand for automation and robotization of arc welding and the requirements with regard to the desired quality of welds have led to a logical demand for a reliable on-line monitoring and control of welding processes. The prevailing control systems among the well-established variants are based on continuous measurement of arc voltage and welding current intensity. These control systems may provide reliable information about the material transfer in the arc, but they are considerably less informative with respect to the integral course of the welding process. For a given type and thickness of base material, joined to form a product by using a weld joint of some sort, the quality of welding is not determined only by the material transfer mode. Instead, the quality depends on the size and shape of the welding pool, the level of splashing, and the shape and magnitude of remelting of base material. However, it is impossible to extract all this information only from the recorded signals of welding current and welding voltage. It follows that a comprehensive evaluation of the welding quality must also incorporate some other process parameters, absolutely including the light intensity and the sound pressure level.

Several papers have been published on the topic of using the sound in monitoring the welding process, all of them having something in common – the measurement of sound pressure during the welding and the frequency analysis after the welding [1, 2, 3]. The results of frequency analysis are commonly bound with time windows related to various physical phenomena [4, 5]. Concretely, these include the arc ignition, arc burning, arc extinction and short-circuit filler material transfer. Furthermore, the accessible literature does not deal with the relations between the results of measurement of audible sound and the results of measurement of light intensity and welding current intensity [6, 7].

A mathematical model relating the sound pressure to the welding current would provide a new dimension and added value in identifying various modes of material transfer, and could serve as a foundation for a system using the measured sound pressure for a controlled supply of electrical energy to the arc. In this way, it would be possible to implement reliable control of welding process stability for the GMAW processes, and consequentially to control the quality of such welds.

2. METAL TRANSFER, LIGHT AND SOUND GENERATION DURING ARC WELDING

In GMAW process an electric arc is established between the consumable wire electrode and the melted zone on the welding part. Both are shielded by different gases (inert Ar, active CO₂ or gas mixtures containing Ar, CO₂ etc.), Figure 1 left.

There are many different modes of metal transfer from the electrode to the molten pool. Different modes of metal transfer can be classified into eight basic groups, Figure 1b. The differences in the way the filler material melts are reflected in the shape of the melt pool, and also in the generation of several different sound phenomena. The prevailing mode of filler material melting depends on the current type and intensity, voltage and the shielding atmosphere.

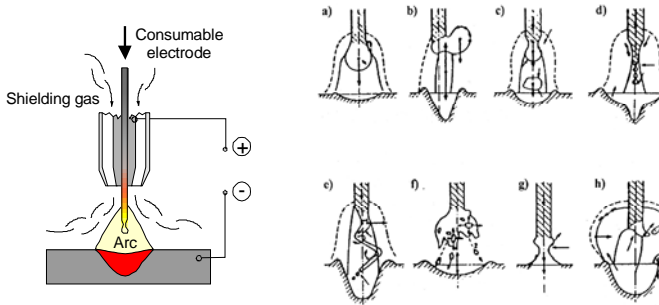


Figure 1: Principal scheme of GMAW (left), 8 characteristic modes of filler material transport in the arc according to IIV (right)

The filler material transfer is reflected to a great extent in the temporal variability of welding voltage, welding current intensity, light intensity and sound pressure generation [10, 11, 12]. The temporal variation of current intensity in short-circuit transfer of filler material is both very illustrative and well defined, Figure 2.

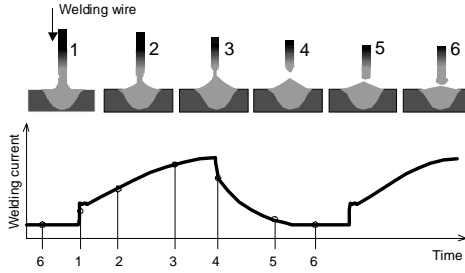


Figure 2: Description of six different phases of material transfer during GMAW in the short-circuit mode

The electrical circuit of the welding system (power supply, cable, consumable wire, arc and welding material) consists only of the basic elements: resistance R in Ohm (Ω), inductance L in Henry (H) and capacitance C in Farad (F). A suitable equation describing the electrical scheme can be obtained by using the second Kirchhoff's law:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} + \frac{R_a I}{1 + j\omega C_a R_a} \quad (1),$$

where I is the electric current in Amperes (A), U is the equivalent open-circuit voltage supply in Volts (V), R_a and C_a are the resistance and capacitance of the arc, and ω is the angular frequency. The capacitance of the arc C_a in Eq. (1) assumes a very small value and may be neglected, and since the arc is responsible for noise generation, we expressed the arc voltage U_a explicitly as

$$U_a = R_a I = U - RI - L \dot{I} = U - U_R + U_L \quad (2).$$

It follows from the interpretation that a fast enough capture of data on the changing electrical quantities during welding makes it possible to identify the type of filler material transfer. The presented research aims to identify the possibilities of making an analytical description of filler material transfer based on the variation of sound pressure and/or light intensity.

3. GMAW AS A CYBERNETIC SYSTEM

GMAW can be treated as an electro-thermo-mechanical system with multiple input and output quantities – signals. There are input signals that can be controlled and those that cannot be influenced, but can be measured. The latter may also be termed as the noise signals. A complete description of GMAW therefore requires a system of differential equations, some of them non-linear, such as the equation describing the sound generation based on the welding current signal. Systems of non-linear differential equations are sensitive with respect to the accuracy of their coefficients. If the coefficients are not determined to a certain precision, they do not describe the welding process well, and the results may even happen to diverge. In addition, the coefficients from the system of equations are sensitive to the noise signals, which cannot be influenced and are also difficult to measure, Figure 3. The mathematical model is therefore complex and not absolutely stable, which means that it is not practical for on-line welding process control.

In real operating conditions, it is therefore only reasonable to treat the GMAW process as a simple system with one input, one output, and one common noise factor. To be able to select the most appropriate input and output quantities, it is reasonable to measure the welding current, welding voltage, sound and light intensity at different welding conditions, and to analyse the results separately.

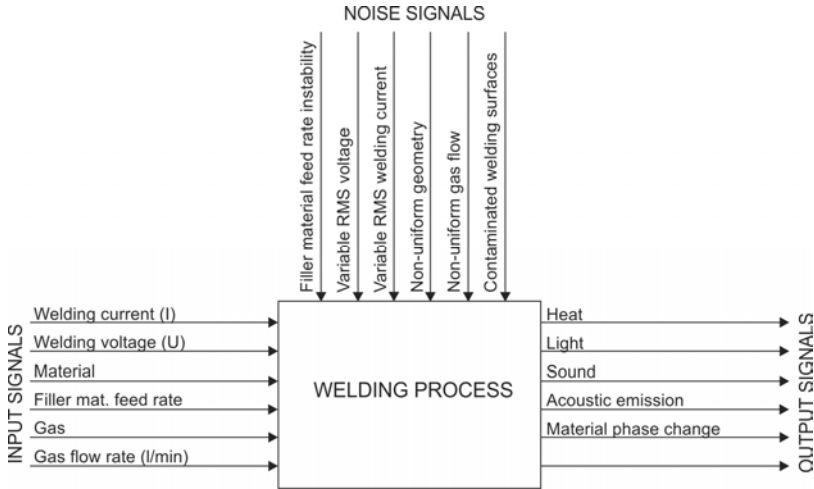


Figure 3: Welding process as a system with multiple inputs and outputs

4. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

The experiments were conducted using St36 structural steel (0.1% C, 0.48% Mn), which is often used in the metalworking industry and is suitable for welding. The geometry of the work piece was selected so that the welds were suitable for the preparation of specimens for the strength tests and metallographic examination of welds. The dimensions of work piece halves were: 10 x 60 x 250 mm.

The experiments were conducted using the experimental setup shown in Fig. 4. Standard industrial welding equipment was used. The Iskra E-450 power source has a horizontal static characteristic. The VAC 60 consumable wire electrode with $\phi = 0.8$ mm was used and the shielding gas was pure CO₂.

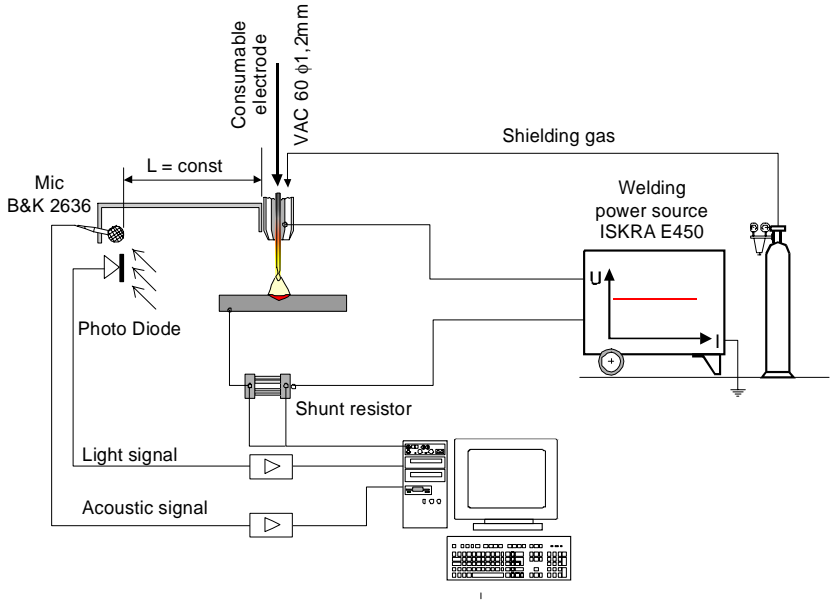


Figure 4: Experimental setup

4.1 Measurement results

The settings on the welding rectifier and the control unit were chosen so that one of the two boundary modes of filler material transfer was obtained: short-circuit or spray. Table 1 presents the rectifier and control unit settings for both materials transfer modes, as well as the mean measured values of welding voltage and current intensity.

Table 1: Welding parameter settings and the measured values

Settings/measured values	Short-circuit transfer	Spray transfer
Rectifier	1-4	1-6
Control unit	5.5	13
Wire feed rate [m/min]	6.3	13.8
Welding voltage [V, rms]	23	38
Welding current [A, rms]	98	178

The data acquisition was performed with an A/D converter, with a sampling rate of 50 kHz per channel and with 8-bit data resolution. 2 sec of welding process was recorded for each setting and stored on the hard drive. The welding current was measured via a shunt resistor. The Bruel&Kjær type 4134 condenser microphone was fixed to the welding head to maintain a constant distance. Since the noise spectra appear in the frequency range above 4 kHz, the

microphone could be attached at a shorter distance. All measurements were conducted using the same 0.35 m distance of photo diode and microphone from the arc. During the welding, the temporal variations of current intensity $I_w = I(t)$, light intensity $i_w = i(t)$ and sound pressure $p_s = p(t)$ were recorded simultaneously. The recorded data for short-circuit filler material transfer in the time 10 ms is shown in Figure 5.

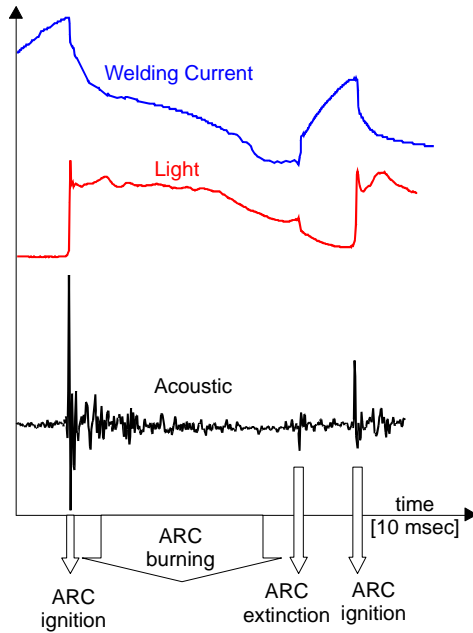
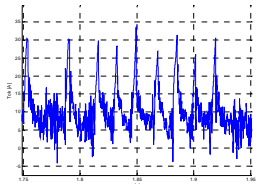
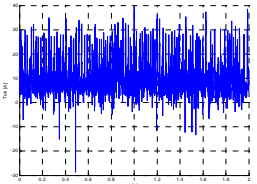
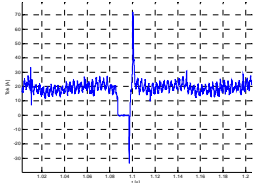
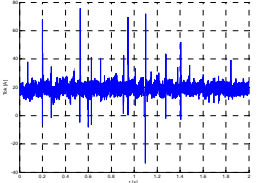
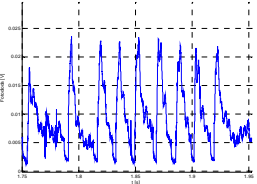
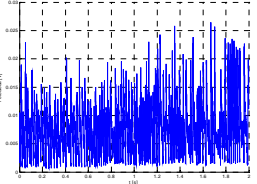
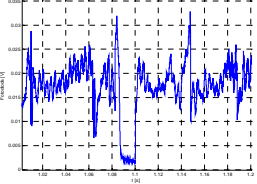
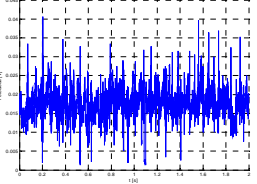
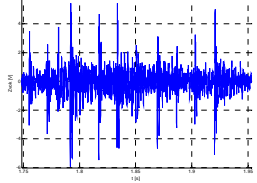
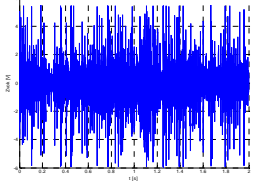
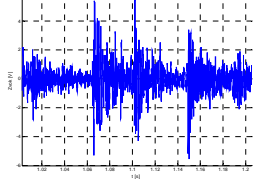
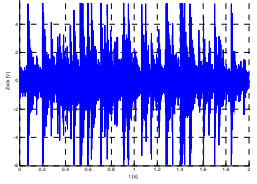


Figure 5: Signals of light intensity, welding current and sound pressure during one short-circuit interval

Table 2 lists a comprehensive overview of measured temporal variation of welding current intensity, light intensity and sound pressure for both boundary filler material modes, recorded in 0.2 and 2 s time intervals.

Table 2: Measurement results (0.2 s and 2 s intervals)

Current short-circuit		
Current spray		
Light short-circuit		
Light spray		
Sound short-circuit		
Sound spray		

4.2 Findings

After reviewing and comparing the results of the conducted measurements, the main findings can be summed up as follows:

The current signals are useful especially for discerning the stability of conditions in the arc. In short-circuit filler material transfer, the current signal also provides information about the number of short circuits and the mean size of molten droplets. These cannot be established with certainty in the case of spray transfer mode.

The light signal indicates the arc radiation intensity. The arc radiation is proportional to the power released in the arc, and is therefore a relevant indicator of the energy supplied into the weld and the related thermal processes.

The sound signal is considerably more sensitive to variable conditions in the arc, the material transfer mode and the disturbances in the welding process. For example: the sound signal indicates high-frequency arc oscillations which may lead to process instability, which cannot be identified from the light signals. The sound signals therefore appear to be considerably more noisy, and a thorough analysis can extract more useful information from them. It follows that the sound pressure technique is suitable for monitoring the welding process.

5. CONCLUSIONS

The quality of arc welding can be evaluated by detecting the audible sound and light intensity, especially in light of the fact that the welders monitor and adaptively control the welding process by using their sight, hearing and sensing the forces in their hands. Modern systems of on-line monitoring and control are generally based on measuring the welding current and voltage. The information about the process obtained in this way may be adequate, but it is often too inaccurate to ensure a first-class repeatability and quality of welds.

In addition to the welding current and welding voltage, the paper analyses the measuring of sound and emitted light that accompany arc welding, and studies their applicability for arc welding process control. Both the sound signal and the light signal have some distinct features. The sound signal is extremely sensitive to the disturbances in the stability of welding process, while the light signal can be used for monitoring the arc intensity. The two signals can be used to detect even the smallest deviations of arc behaviour, as well as large deviations due to the material transfer mode and excessive/inadequate weld penetration.

We estimate that the welding sound and light are high-quality and important sources of information about the welding process, and that the applicability thereof for the online welding process control has not been made known and researched enough. For this reason, we will attempt to upgrade in the future these results with an evaluation of weld quality.

6. REFERENCES

- [1] Jesnitzer et.al.: Apparatus for controlling electric welding process, U.S. Patent No. 3.679.865, 1972
- [2] Arata Y. Inoue K. Futamata M.: Investigation on welding arc sound – report 1, IIW/IIS doc. VIII-1340-86, 1986
- [3] Saini D. Floyd S.: An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-line Quality Control, *Welding Journal*, pp. 172-179, April 1998
- [4] Mansoor A.M., Huissoon J.P.: Acoustic identification of the GMAW process, 9th International conference on computer technology in welding, NIST special publication, Detroit 1999
- [5] Choi J.H., Lee C.D., Yoo C.D.: Simulation of dynamic behaviour in a GMAW system, *Welding Journal*, pp. 293-245, 2001
- [6] Magori V.: Monitoring sensor for the production of welds, U.S. Patent No.: 4,650,958, 1987
- [7] Rostek W.: Investigation on the connection between welding process sound emission and electric short circuit in GMA welding, IIW/IIS doc. 212-725-89, 1989
- [8] A. Fasana and B. A. D. Piombo: IDENTIFICATION OF LINEAR MECHANICAL SYSTEMS BY DECONVOLUTION TECHNIQUES, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 11, Issue 3, 3 May 1997, pp. 351-373
- [9] Grad L., Prezelj J., Polajnar I., Grum J.: Weld quality assessment by analysing on line measured acoustic signals, In: Grum, Janez (ed). 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Portorož, Slovenia, September 13-15, 2001. pp. 185-189, 2001.
- [10] S. M. Kuo: Active Noise Control Systems - Algorithms and DSP implementation, Wiley interscience, New York, 1996
- [11] Xinkai Chen, Guisheng Zhai and Toshio Fukuda: An approximate inverse system for nonminimum-phase systems and its application to disturbance observer, *Systems & Control Letters*, Volume 52, Issues 3-4, July 2004, pp. 193-207
- [12] Prezelj J., Polajnar I.: Slišni zvok kratkostičnega MAG varjenja, *Varilna Tehnika*, 51(3), pp. 80-85, 2003
- [13] Polajnar I., Prezelj J., Grad L., Grum J.: Ocena kakovosti obločnega varjenja z detekcijo slišnega zvoka in svetlobnega sevanja, In: Grum, Janez (ed). 7th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Brnik, Slovenia, November 18, 2004. Conference proceedings. pp. 139-147, 2004.



MONITOROVÁNÍ ROZVOJE POŠKOZENÍ V BETONOVÝCH DÍLCÍCH POMOCÍ METOD NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN

MONITORING OF THE DAMAGE EVOLUTION IN CONCRETE SLABS BY MEANS OF NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY

Jan HETTLER, Jan KOBER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i

Contact e-mail: hettler@it.cas.cz

Abstrakt

Nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) je soubor moderních metod ultrazvukové defektoskopie, které umožňují vysoce citlivě zachytit vznik a rozvoj poškození i v materiálově a geometricky značně komplikovaných tělesech. Tento příspěvek se zabývá hodnocením míry poškození betonových dílců pomocí analýzy vyšších harmonických frekvencí odezvy vzorku na definované buzení. Zkoušené betonové dílce byly ohybově namáhány až do vzniku magistralní trhliny za současného monitorování amplitudově závislých spektrálních změn ultrazvukového signálu procházejícího zkoušeným dílcem. Pro porovnání byly během testů registrovány také signály Akustické Emise (AE). Metoda hodnocení vyšších harmonických složek se ukázala jako vhodná metoda NEWS pro tento typ zkoušek, zejména díky relativní jednoduchosti nezbytného experimentálního vybavení a snadné interpretovatelnosti získaných výsledků. Pozornost je věnována především citlivosti použité metody na rozvoj poškození a dále pak změnám nelineárních parametrů ve stadiích před finálním porušením zkoušených těles v korelaci se signály AE.

Klíčová slova: nelineární ultrazvuková spektroskopie, harmonická analýza, zkoušení betonu

Abstract

Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy is a set of modern and dynamic ultrasonic NDT methods. These methods provide an outstanding sensitivity that can be used to monitor the damage evolution even in very complicated materials and structures. This paper deals with the damage assessment in concrete samples using the harmonic analysis of the sample response on well defined ultrasonic excitation. The amplitude dependent spectral changes of the probing ultrasonic signals were measured during the bending loading of the tested samples. Acoustic Emission (AE) signals were also analyzed and served as a reference data for comparison. The special attention is paid to the sensitivity of the method to the localized damage evolution and to the correlation of the obtained results with monitored AE activity, especially before the final stages of the damage. Results shown that the analysis of amplitude dependent spectral changes is a promising method for the damage assessment in concrete.

Key words: nonlinear ultrasonic spectroscopy, higher harmonics, concrete testing

1. Úvod

Beton se stal během uplynulých dvou století jedním ze základních stavebních materiálů. Mnoho architektonicky významných budov, průmyslových a technických staveb je postaveno z betonu a ten se tak stal jedním z pilířů současné moderní architektury. Jde však o komplikovaný kompozitní materiál a popis jeho mechanického chování a procesů porušování je složitější než u většiny kovových materiálů. Vzhledem k jeho struktuře a vlastnostem je velice obtížné jej zkoušet pomocí konvenčních ultrazvukových defektoskopických metod (pulse-echo, průchodová metoda). Metody nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) [1], [2] dále rozšiřují možnosti ultrazvukového NDT i na strukturně velmi složité materiály jakým je právě beton [3-6]. Tato práce si klade za cíl ukázat přednosti NEWS, zejména pak analýzy vyšších harmonických složek, pro monitorování rozvoje poškození v betonových dílcích.

Beton je díky svému složení silně hysterézní materiál, který vykazuje i v nepoškozeném stavu určitou míru nelinearity [7], [8]. Jsou-li však ve zkoušeném tělese přítomny defektní zóny, stávají se dalším zdrojem nelinearity, která řádově převyšuje vlastní nelinearitu tělesa. Nelineární chování materiálu se pak při ultrazvukovém zkoušení projevuje především deformací ultrazvukových vln procházejících tělesem, což vede ke vzniku nelineárních efektů ve frekvenčním spektru přijatého signálu. Nelineárními efekty jsou v tomto případě především amplitudově závislý výskyt vyšších harmonických složek ($2f$, $3f$, ...) při monofrekvenčním buzení signálem o frekvenci f s převládajícím nárůstem lichých harmonických s rostoucí amplitudou buzení a vznik postranních pásem ($f_1 \pm f_2$, $f_1 \pm 2f_2$, ...) při současném buzení dvěma frekvencemi f_1 a f_2 .

NEWS metoda hodnocení poměru vyšších harmonických složek se pro zkoušení betonu ukázala díky své robustnosti a relativní jednoduchosti jako velmi vhodná. Jelikož jsou všechny jevy využívané v NEWS metodice amplitudově závislé, zaměřili jsme naši pozornost na amplitudové charakteristiky vyšších harmonických ($2f$, $3f$) a jejich poměr $3f/2f$ (viz [7], [9]). Výsledky analýzy vyšších harmonických pak byly korelovány s aktivitou akustické emise (AE) při zatěžování zkoušených vzorků.

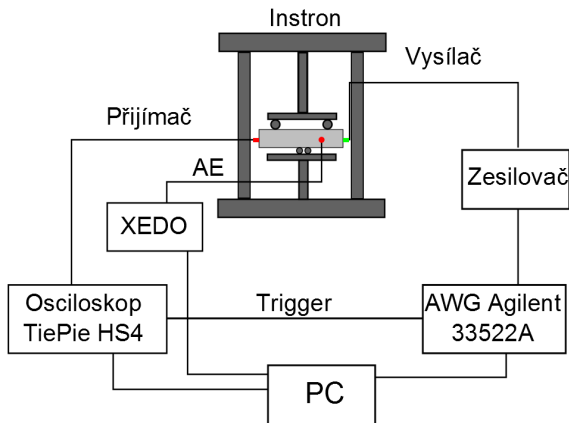
2. Experimentální zařízení

Pro zkoušení byly k dispozici kvádrové betonové vzorky o rozměrech 400x100x100 mm s definovaným složením, které byly dodány z FAST VUT v Brně. Vzorky byly ohybově namáhány v zatěžovacím stroji Instron 1195 (viz Obr. 1) až do porušení spojeného s vytvořením magistralní trhliny v centrální části vzorku. Pro monitorování rozvoje poškození byl vzorek osazen několika ultrazvukovými sondami. Na protilehlých stěnách zkoušeného vzorku byly přes kovové podložky přitmeleny epoxidovým lepidlem jak vysílací nízkofrekvenční sonda (30 kHz) tak snímače typu DAKEL MDK-13. Vysílací sonda byla buzena pulzy sestávajícími z 10 sinusových period o frekvenci 30 kHz generovanými pomocí generátoru Agilent 33522A, které byly dále zesíleny zesilovačem AR 150A. Přijímané signály byly zesíleny předzesilovačem PAC 20-40-60. Pro monitorování AE byl na vzorku umístěn další snímač MDK-13, připojený k modulárnímu analyzátoru DAKEL – XEDO. Na vstupy I/O modulu XEDO byly přivedeny analogové signály síly a posuvu ze zatěžovacího stroje. Zjednodušené schéma celé experimentální aparatury je na Obr. 2. Zatěžování vzorků probíhalo po krocích sestávajících z lineárního nárůstu na cílové zatížení a následné výdrže. Během výdrže bylo prováděno NEWS měření

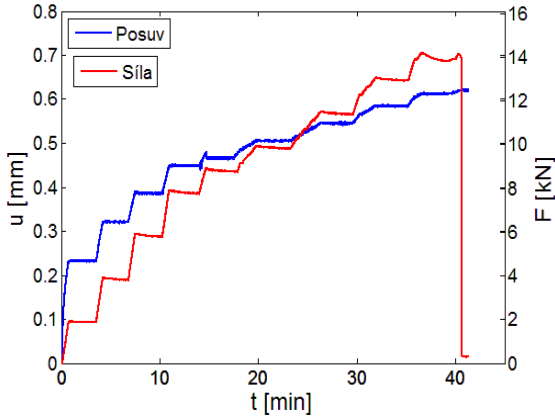
při 25 amplitudách vysílaného signálu (0.01-2 V). Zatěžování vzorku bylo nejprve řízeno silou, při vyšších hodnotách zatížení pak byl řídicí veličinou posuv. Typický průběh zatěžování je na Obr. 3. Celý experiment, s výjimkou měření AE, byl ovládán z řídicího PC pomocí software MATLAB a Instron BlueHill.



Obr. 1: Ohybové namáhání vzorku
 Fig. 1: Flexural loading of the sample



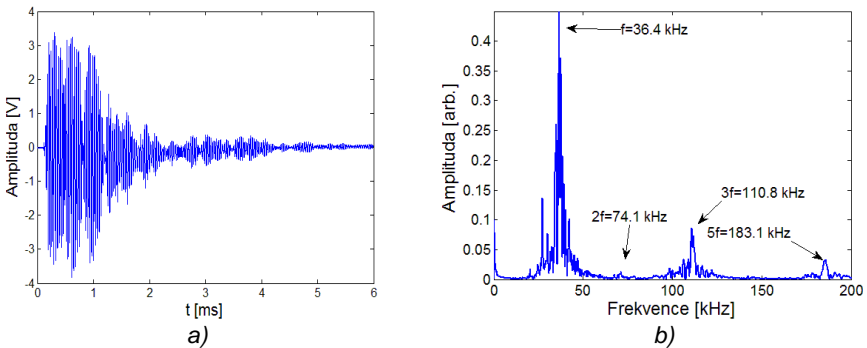
Obr. 2: Schéma experimentální aparatury pro ohybové zatěžování
 Fig. 2: Schematic of the experimental assembly for flexural loading



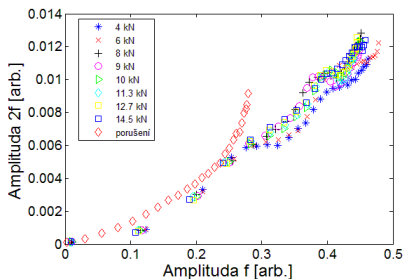
Obr. 3: Záznam průběhu zatěžování betonového vzorku
 Fig. 3: Typical loading diagram of the concrete sample

3. Vyhodnocení spektrálních parametrů

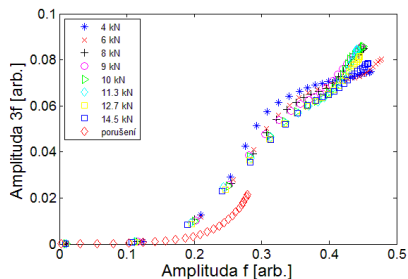
Typický signál získaný při vyšší amplitudě buzení a jeho spektrum jsou vyneseny na Obr. 4. Ve spektru je zřetelně patrná přítomnost vyšších harmonických. Jejich podíl se zvyšující se amplitudou buzení roste (viz Obr. 5). Deformace měřeného signálu, patrná při amplitudách vyšších než 0.35 V, je zřejmě způsobena předzesilovačem, který při vyšších hodnotách vstupního napětí nevykazuje lineární charakteristiku a signál zkresluje. Relevantní oblast pro analýzu je tedy ohraničena výše zmíněnou hodnotou napětí.



Obr. 4: a) Přijatý signál a b) jeho spektrum - zatížení 10 kN, amplituda buzení 2 V
 Fig. 4: a) Received signal and b) its spectrum - load 10 kN, excitation amplitude 2 V



a) 2. harmonická (2f)



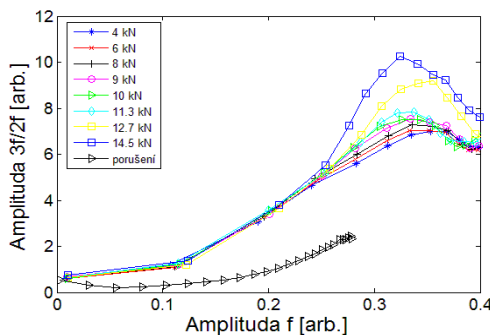
b) 3. harmonická (3f)

Obr. 5: Závislost harmonických na amplitudě budící frekvence f
 Fig. 5: Dependency of harmonics on the amplitude of fundamental f

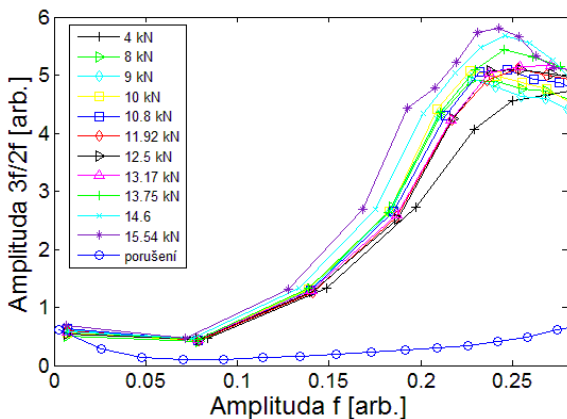
Po analýze amplitudových závislostí výšky jednotlivých spektrálních složek se jako nejvhodnější parametr, který popisuje rostoucí nelinearity a charakterizuje tedy míru poškození, jeví poměr amplitudy spektrálních složek třetí a druhé harmonické $3f/2f$.

4. Charakterizace poškození betonu parametrem nelinearity

U dvou vzorků (vzorky č. 2 a 5) byla provedena detailní analýza vyšších harmonických složek. Získané amplitudové závislosti veličiny $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f jsou pro jednotlivé vzorky a zvolené úrovně zatížení vyneseny na Obr. 6 a 7. Na závislostech u obou vzorků je patrný totožný trend nárůstu veličiny $3f/2f$ spolu s rostoucím zatížením až do bodu lokálního maxima. Při vyšší amplitudě buzení pak již dochází k postupnému poklesu nelineárního parametru. Tento efekt je zřejmě způsoben přesytením vstupu předzesilovače. Dále je patrné, zcela v soulasu s teoretickými předpoklady (viz [1]), že nelinearita se začíná projevovat až od určité amplitudy buzení. Výrazně odděleny od zbytku měření jsou pak průběhy amplitudových závislostí odpovídajících konečnému porušení vzorků (vytvoření trhliny). Tento jev však nelze přisuzovat jakékoliv změně nelinearity vzorku, ale pouze snížení amplitudy procházejícího signálu vlivem porušení soudržnosti vzorku a vytvoření nových rozhraní.

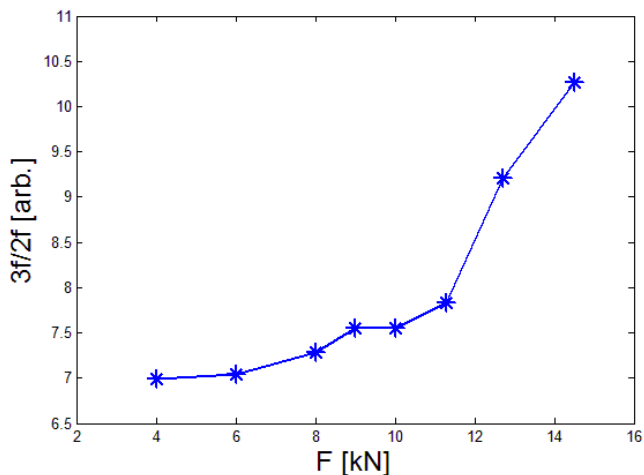


Obr. 6: Závislosti parametru $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f u vzorku č.2
 Fig. 6: Dependency of $3f/2f$ on the amplitude of fundamental f on the sample #2

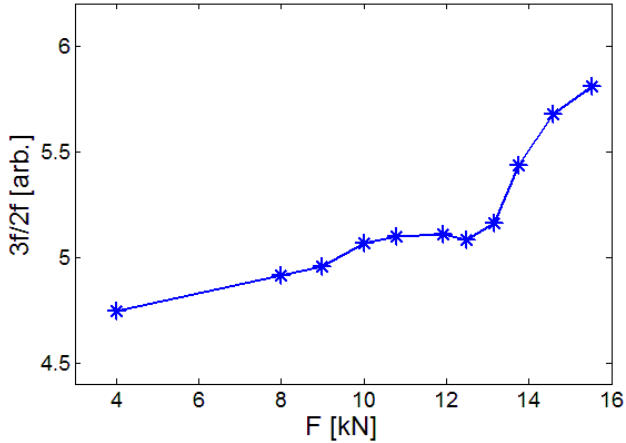


Obr. 7: Závislosti parametru $3f/2f$ na amplitudě spektrální složky f u vz. č.5
 Fig. 7: Dependency of the $3f/2f$ on the amplitude of fundamental f on the sample #5

Vyneseme-li maxima jednotlivých amplitudových závislostí pro odpovídající hodnotu zatížení, dostaneme křivky vynesené na Obr. 8 a 9. Tyto křivky popisují kvalitativně (pomocí jedné hodnoty) míru poškození zkoušeného vzorku pro danou hladinu zatížení. Z Obr. 7 a 8 je patrné, že charakter závislostí je u obou zkoušených vzorků velice podobný. Rozdíl v hodnotách parametru $3f/2f$ je pak zřejmě způsoben rozdílnou kvalitou akustické vazby realizované přes kovové příložky a mírně odlišným složením. Získané závislosti velmi dobře charakterizují vývoj poškození ve zkoušených betonových dílcích při ohybovém namáhání.

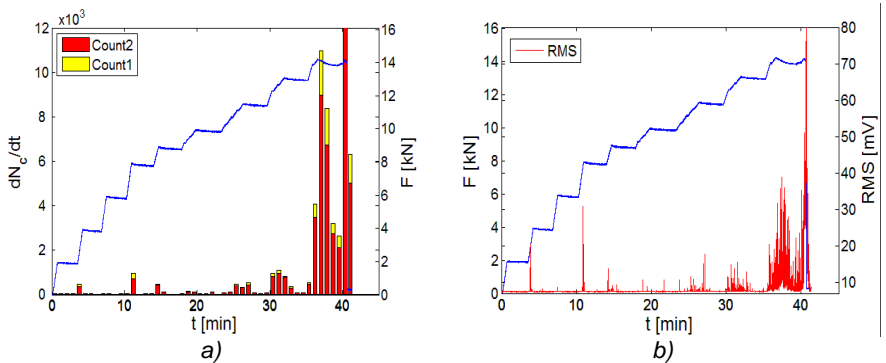


Obr. 8: Hodnota parametru $3f/2f$ v závislosti na zatížení, vzorek č. 2
 Fig. 8: Dependency of the $3f/2f$ parameter on the loading, sample no. 2



Obr. 9: Hodnota parametru $3f/2f$ v závislosti na zatížení, vzorek č. 5
 Fig. 9: Dependency of the $3f/2f$ parameter on the loading, sample no. 5

Ze získaných závislostí vyplývá, že k výraznějšímu rozvoji poškození v betonových vzorcích dochází až v posledních dvou až třech zatěžovacích krocích. Tento závěr je v dobrém souladu s předpoklady, jelikož zkoušené betonové dílce se při tomto typu namáhání porušují křehce. Získané výsledky velmi dobře korelují také s aktivitou AE v průběhu zatěžování. Jak je patrné z Obr. 10, nárůst emisní aktivity, vyjádřený růstem časové četnosti emisních překmitů dN_e/dt resp. hodnotou RMS, je výrazný právě v posledních dvou zatěžovacích krocích. Parametr $3f/2f$ je však schopen postihnout změny signalizující počátky rozvoje trhliny již o jeden zatěžovací cyklus dříve než AE.



Obr. 10: Záznam signálu AE a nárůstu zatížení – a) count rate, b) RMS
 Fig. 10: Record of the AE signal and loading – a) count rate, b) RMS

5. Závěry

Cílem příspěvku bylo dokumentovat citlivost metod nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) pro monitorování stavu betonových dílců. Jako vhodná metoda charakterizace poškození se ukázala jednoduchá analýza vyšších harmonických frekvencí. Výsledky získané touto metodou velice dobře souhlasí s výsledky získanými metodou AE a zároveň odpovídají předpokládanému mechanismu porušování betonových dílců namáhaných ohybem. Z výsledků je možné určit průběh rozvoje poškození a predikovat blížící se mezní stav. V současné době však nelze bez detailní znalosti struktury jednoduše porovnávat úroveň poškození jednotlivých vzorků mezi sebou a kvantifikovat míru poškození na základě porovnání zkušeneho vzorku s etalonem. Další vývoj této metody je zaměřen právě na řešení tohoto problému.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR v rámci grantu číslo GAČR 104/10/1430 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS10/302/OHK4/3T/14.

Literatura

- [1] VAN DEN ABEELE, K.; SUTIN, A.; CARMELIET, J.; JOHNSON, P. A.: Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT & E Int.*, 2001, Vol. 34, No. 4, ISSN: 0963-8695, pp. 239-248.
- [2] PŘEVOROVSKÝ, Z.: Nonlinear acoustic spectroscopy and new methods of flaw detection. In: *Proceedings of 31st Internat. Conf. on NDT/ DEFEKTOSKOPIE 2001*, Prague, ISBN: 80-214-2002-2, pp. 11-16.
- [3] VAN DEN ABEELE, K.; DE VISSCHER, J.: Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, No. 9, ISSN: 00088846, pp. 1453-1464.
- [4] LESNICKI, K. J.; KIM, J.-Y.; KURTIS, K.; JACOBS, L. J.: Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *NDT & E Int.*, 2011, Vol. 44, No. 8, ISSN: 0963-8695, pp. 721-727.
- [5] PŘEVOROVSKÝ, Z., KROFTA, J., CHLADA, M.: Nedestruktivní hodnocení stavu betonových konstrukcí metodami nelineární ultrazvukové spektroskopie. (38. Mezinár. Conf. DEFEKTOSKOPIE 2008, Brno, 4.-6.11.2008)
- [6] BRUNO, C. L. E.; BOCCA, P. G.; ANTONACI, P.; GLIOZZI, A. S.; SCALERANDI, M.: Robustness of the SSM applied to damage assessment in concrete. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2010, Vol. 10, p. 045005.
- [7] NOVAK, A.; BENTAHAR, M.; TOURNAT, V.; EL GUERJOUMA, R.; SIMON, L.: Nonlinear acoustic characterization of micro-damaged materials through higher harmonic resonance analysis. *NDT & E Int.*, 2012, Vol. 45, No. 1, ISSN: 0963-8695, pp. 1-8.
- [8] BENTAHAR, M.; EL AQRA, H.; EL GUERJOUMA, R.; GRIFFA, M.; SCALERANDI, M.: Hysteretic elasticity in damaged concrete: Quantitative analysis of slow and fast dynamics. *Phys. Rev. B*, 2006, Vol. 73, No. 1, pp. 1-10.
- [9] MATYSÍK, M.; PLŠKOVÁ, I.; KORENSKÁ, M.: Detection of cracks in concrete using nonlinear acoustic spectroscopy methods. In: *Proceedings of DEFEKTOSKOPIE 2011 / NDE for safety (Ostrava)*, 2011, ISBN: 978-80-214-4358-7, pp. 93-100.



DIAGNOSTIKA PŘEVODOVKY VRTULNÍKU POMOCÍ SPOJITÉ AKUSTICKÉ EMISE

DIAGNOSTICS OF HELICOPTER GEAR BOX BY CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION

Milan CHLADA¹, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ¹, Jan HEŘMÁNEK²

¹Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Laboratory

²CTU in Prague, FNSPE, Department of Materials

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

Abstrakt

Rozměrná a komplikovaná převodovka vrtulníku, přenářející kroutící moment z turbomotorů na dvě nezávisle rotující vrtule je vedle motorů nejčastějším zdrojem leteckých poruch, které mohou mít katastrofické následky. Dlouholeté výzkumy poruch převodových ústrojí ukázaly, že na základě pouhého monitorování nízkofrekvenčních vibrací a rozboru olejové náplně nelze odhalit některé závady, zejména týkající se velkých ložisek a začátků poškození (trhlin) v zubových soukolích. Proto se v posledních letech upíná pozornost k diagnostice metodou vysokofrekvenční kvazi-spojité akustické emise (AE), která však vyžaduje nové přístupy k analýze emisního signálu, odlišné od nespojitě AE používané v nedestruktivním zkoušení. V příspěvku je diskutována analýza záznamu spojité AE měřené v průběhu záběhové zkoušky renovovaného reduktoru vrtulníku při různých letových režimech. Rozebírány jsou zejména možnosti efektivní parametrizace rozsáhlých souborů emisních dat a následně detekce případných vad v zkoušené součásti. V blízké budoucnosti by se měla spojitá AE spolu s analýzou vibrací stát nedílnou součástí SHM systému vrtulníků za letu.

Klíčová slova: spojité akustické emise, waveletová analýza, počty překmitů.

Abstract

Large and complex gearbox of a helicopter transmits the power of turbo engines onto two independently rotating propellers. The gearbox is beside the engines the most frequent cause of failures, which can have catastrophic consequences. A longtime examinations of breakdowns of gear units showed, that it is impossible to disclose certain imperfections only on the basis of low-frequency vibration monitoring and oil filling analysis. Especially, the defects of large bearings, and the early damage phases (cracks) in gears are not detectable by vibrodiagnostics only. Therefore, in the last years the attention is paid to the high-frequency diagnostic method of continuous acoustic emission (AE). This method requires new signal processing and analysis approaches, which are different from the burst AE. The paper deals with the analysis of continuous AE, recorded during the test of renovated gearbox at different flight modes. The effective parameterization and reduction of huge AE data is suggested and subsequent detection of eventual defects in bearings and gears is discussed. Monitoring of the continuous AE together with vibration analysis should be integral part of helicopter in-flight SHM systems in near future.

Key words: Continuous acoustic emission, wavelet analysis, threshold counting, helicopter gearbox diagnostics.

1. Úvod

Převodová ústrojí jako důležité součásti většiny rotačních strojů včetně pohonných jednotek vrtulníků jsou vystavena velkému dynamickému namáhání, což může, ať již následkem drobných výrobních i montážních nedostatků resp. opotřebení či únavy materiálu apod., vést k neočekávaným závadám, které mohou mít za následek pokles účinnosti a přenášeného výkonu, poruchy správné funkčnosti a v některých případech až leteckou havárii. Značným ekonomickým ztrátám resp. katastrofickým důsledkům lze předcházet včasnou prediktivní diagnostikou začínajících poruch a pravidelnou údržbou a kontrolou. S ohledem na neočekávanost závad i ekonomickou náročnost údržby se v posledních letech začínají stále více uplatňovat přístupy označované jako "Condition Monitoring" (CM) [1], tedy kontinuální monitorování stavu převodového ústrojí bez jeho rozebírání. Způsob a intervaly údržby a oprav jsou pak určovány na základě vybraných charakteristik, odvozených z většinou on-line vyhodnocovaných signálů různých sledovaných veličin, jako jsou celkový hluk a vibrace převodovky, zvláštní akustické až ultrazvukové projevy zahrnuté pod pojem akustická emise (AE), přehřívání, optické a další parametry mazacích olejů apod. Tento přístup k údržbě bývá označován jako "Condition based Maintenance" (CBM) [2]. CM přístupy vyžadují integraci čidel snímaných veličin ať již na povrchu převodové skříně nebo přímo na jednotlivé, nejvíce exponované součástky a napojení výstupů těchto čidel na spolehlivé a robustní měřicí přístroje, vybavené procesory pro online zpracování zaznamenávaných dat.

Převodovky jsou komplexními mechanickými soustavami, kde nejčastějšími zdroji závad bývají ozubená soukolí resp. hřídele a kluzná i valivá ložiska resp. jejich uložení. Různé defekty, jako jsou např. praskání či trhlinkování ("spalling"), se ale mohou vyskytnout i ve vlastním tělese převodové skříně a způsobit nejen úniky maziva, ale také rychlou destrukci převodových zubů.

Nejrozšířenější metodikou sledování stavu a detekce závad převodových ústrojí je snímání a hodnocení vibrací v nízkofrekvenční spektrální oblasti od 10 Hz do 10 kHz, tzv. Vibration based Condition Monitoring (VBCM). Hlavní složky vibračních spekter úzce souvisejí zejména s otáčkami ozubených soukolí a s roztečemi zubů převodových kol. Porovnáním vibračních signálů snímaných akcelerometry na bezdefektní a porouchané převodovce lze celkem jednoduše zjišťovat závady převodových ústrojí, jako jsou nevyváženost hmot, nesouosost hřídelů a poruchy záběrů jednotlivých zubů (jak geometrické, tak vyvolané opotřebením či odlomením částí apod.). Akcelerometry bývají většinou umístěny na povrchu převodové skříně. Analýza vibračních signálů může také odhalit poruchy ložisek jako nesprávný návrh či montáž, korozi, špatné mazání, plastickou deformaci ložiskových elementů, pitting atd. Detekce poruch ložisek je ale obtížnější, což je dáno tím, že defektní rysy vykazují ložiska v širokém frekvenčním rozsahu a mohou tak být maskovány širokospektrálním šumem. Obecně lze říci, že perfektně fungující ložiska vykazují za normálních podmínek méně vibrací, než pokud se vyskytne nějaký defekt.

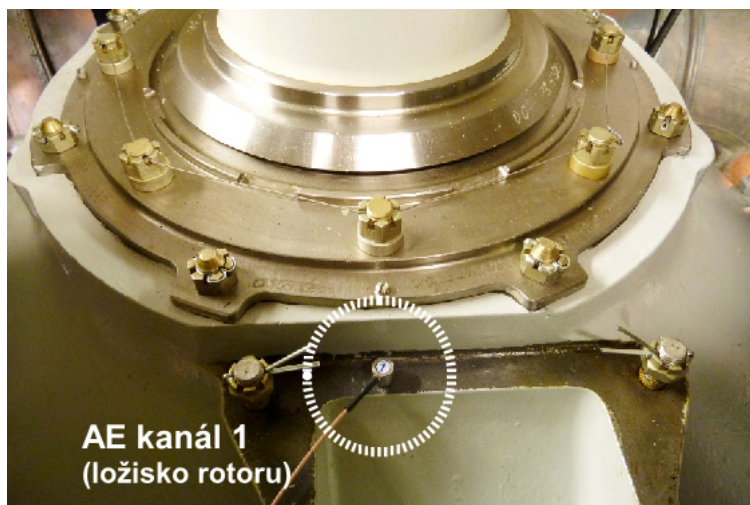
Analýza signálů těchto vibrací však vyžaduje náročnější matematicko statistické postupy, jak v časové, tak frekvenční resp. i časo-frekvenční oblasti. Důležitá je přitom zejména analýza periodicky se opakujících vysokofrekvenčních přechodových dějů. Z tohoto důvodu se jako doplněk ke snímání vibrací používá také analýza vysokofrekvenčních signálů akustické emise (AE) ve frekvenčním rozsahu od 20

do 200 i více kHz. Signály AE jsou snímány jinými, relativně širokopásmovými snímači citlivějšími než akcelerometry.

Důkladná literární rešerše více než 50 zahraničních pramenů z posledních 20 let ukazuje, že k detekci závad na převodovkách, ať již na převodových soukolích či ložiscích, je výhodné kombinovat obě metodiky - jak analýzu vibrací, tak signálů AE v podobě širokospektrálního šumu s vysokofrekvenčními událostmi (transienty). Nejen z výše citovaných publikací vyplývá, že zpracování a hodnocení naměřených diagnostických záznamů vibrací a AE vyžaduje aplikaci pokročilých metod z oblasti analýzy signálů, statistiky a umělé inteligence.

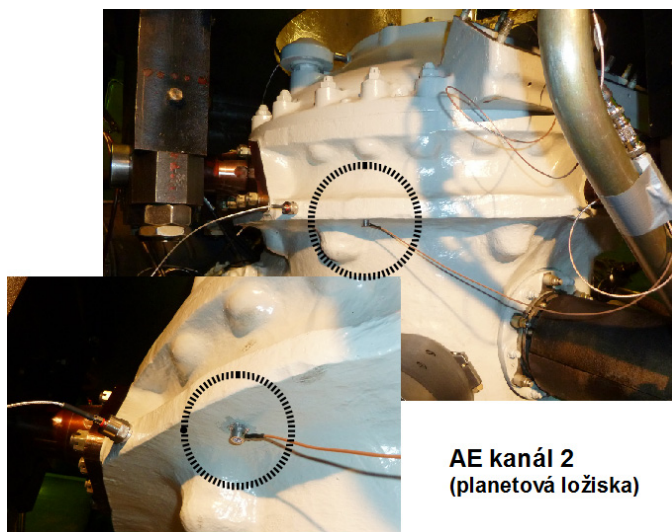
2. Experiment

Při zkoušce renovovaného kusu reduktoru vrtulníku na zkušebně Leteckých oprav Malešice bylo provedeno měření spojitě akustické emise. Nespojitě (impulzní) akustická emise je generována nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu (např. aktivní měnící se trhlinou) v podobě časově oddělených napětových pulzů trvajících od několika nanosekund do jednotek milisekund. V případě reduktoru se složitými mechanickými rozvody je však nutné předpokládat podstatně složitější události, které nejsou časově oddělené. Mohou být generovány řadou fyzikálních jevů, jako jsou např. plastické deformace povrchu kovů při tření, či únik kapaliny trhlinou v potrubí nebo nádobě. Jedná se o tzv. spojitou akustickou emisi. Díky současné nejmodernější měřicí aparatuře je možné tyto akustické signály kontinuálně zaznamenávat i v ultrazvukové části frekvenčního spektra.



Obr.1 Umístění snímače AE pro monitorování hlavního ložiska rotoru.
Fig.1 The location of AE sensor for the monitoring of main rotor bearing.

Analyzátor IPL firmy Dakel je nově vyvinutý systém umožňující 12-bitové synchronní kontinuální vzorkování 4 kanálů frekvencí 2 MSample/s a nepřetržité ukládání navzorkovaných dat do paměti PC. Komunikace s PC a přenos dat jsou zajišťovány rozhraním USB2.0. Data jsou na disk ukládána rychlostí kolem 16 MB/s, což představuje zhruba 56 GB na hodinové měření. Celková doba měření je v podstatě omezena jen kapacitou diskového prostoru, který je schopen pracovat nepřetržitě alespoň s takovou rychlostí ukládání. On-line lze na monitoru současně sledovat obálku maximálních amplitud všech kanálů s nastavitelnou úrovní časové komprese. Po ukončení měření je možné zpracování naměřených dat programem Dakel UI, který pracuje pod operačním systémem Linux. Tento software sice poskytuje různé možnosti zpracování dat, avšak pokročilé matematicko-statistické metody zaměřené na identifikaci emisních zdrojů v něm nejsou implementovány. Proto byl dodávaný software využit pouze pro ovládání měřícího zařízení a konverzi uložených binárních dat do jednoduššího formátu, který lze načítat např. v prostředí Matlab.

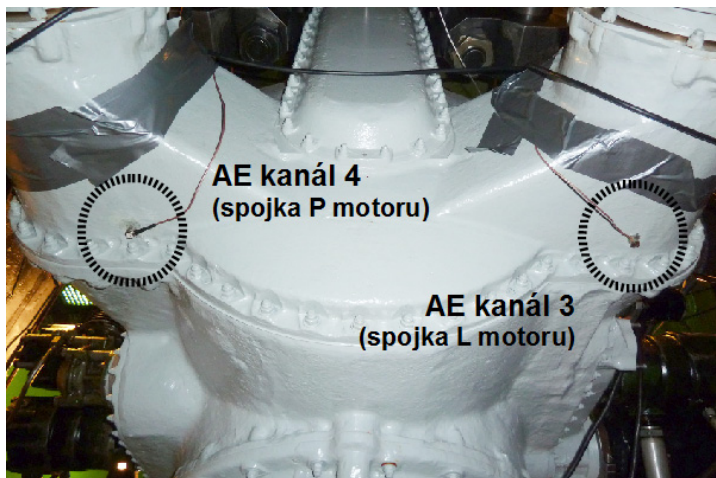


*Obr.2 Umístění snímače AE pro monitorování planetových ložisek.
Fig.2 The location of AE sensor for the monitoring of planet bearings.*

Snímače typu Dakel IDK-09 (s rezonanční frekvencí mezi 200-300kHz) byly rozmístěny podle potřeb monitoringu kritických částí převodovky a možností jejich uchycení na povrch reduktoru, tj. na fyzicky dostupná rovná místa blízko sledovaných součástí. Snímače AE lze po obroušení, nebo odmaštění spojovaných povrchů lepit přímo na převodovku kyanoakrylátovým lepidlem. Po konzultaci s experty provádějícími opravy a údržbu byly zvoleny čtyři kritické součásti:

1. Ložisko hlavního rotoru (viz obr. 1)
2. Planetová ložiska (viz obr. 2)
3. resp. 4. Spojka levého resp. pravého turbomotoru (viz obr. 3)

Na vhodná místa na povrchu reduktoru byly nejbližše výše uvedeným součástem upevněny snímače AE, které jsou opatřeny krátkým cca 1m koaxiálním kabelem o průměru 1.7 mm s BNC konektorem se silikonovou izolací odolávající teplotám - 20°C až +75°C. Snímač vyžaduje externí koaxiálový impedanční převodník s předzesilovačem, umožňující připojení dalšího koaxiálního kabelu pro přenos signálu k cca 30m vzdálenému analyzátoru IPL.



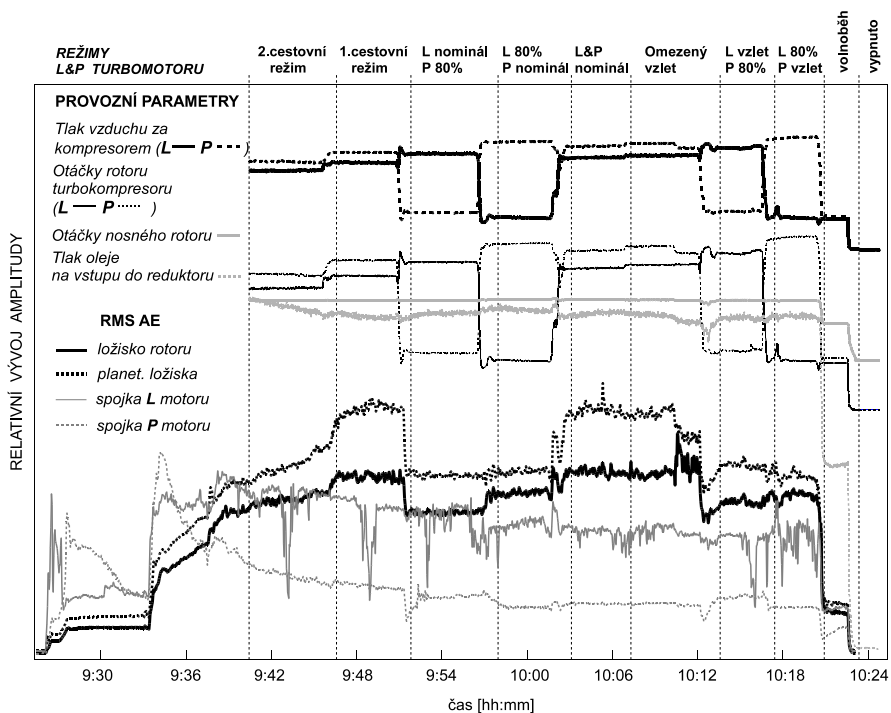
*Obr.3 Umístění snímačů AE pro monitorování spojek motorů.
Fig.3 The location of AE sensors for the monitoring of motor couplings.*

Na uvedených fotografiích (viz obr. 1-3) jsou zobrazena umístění snímačů jednotlivých kanálů. Podrobná analýza naměřených signálů prokázala jejich odlišnost v závislosti na typu sledované součásti. Ložisko hlavního rotoru, planety a spojky motorů vykazovaly vzájemně odlišné emisní charakteristiky, přičemž spojky motorů, resp. ložisko rotoru a planety jsou si v tomto smyslu bližší. V každém případě se jedná o velmi komplikovaný emisní signál, který nemá jediný zdroj a při aplikaci klasických lokalizačních metod, jako např. vzájemná korelace signálů, nelze očekávat jednoznačné výsledky. Určení lokace případné poruchy lze očekávat spíše na základě detekce singularit v jednotlivých signálech a jejich amplitudovém porovnání.

3. Analýza naměřených signálů

Pokročilá analýza naměřených dat vycházela z prvotního zobrazení závislosti parametru RMS (efektivní hodnoty) po pevně zvolených časových úsecích délky 25ms v závislosti na provozních parametrech reduktoru v průběhů zkoušky (viz obr. 4). Porovnáním obou typů dat (provozních a emisních parametrů) lze vysledovat základní, očekávatelné souvislosti. Je evidentní, že na aktuální RMS akustické emise je možné rozpoznat změny režimů zatěžování reduktoru, resp. změny výkonu turbokompresorů. Provozní parametry tedy přímo ovlivňují základní charakteristiky emitované AE, jako je např. energie. Změnou viskozity oleje, související i s jeho tlakem měřeným na vstupu do reduktoru, je rovněž možné vysvětlit zvýšené tření

a v důsledku i rostoucí emisní aktivitu ve fázi 2. cestovního režimu, kdy byly vydržovány otáčky a výkon turbokompresorů. Detailnějším rozбором parametrů naměřených emisních dat lze podrobněji diagnostikovat již konkrétní stav mechanismů reduktoru.

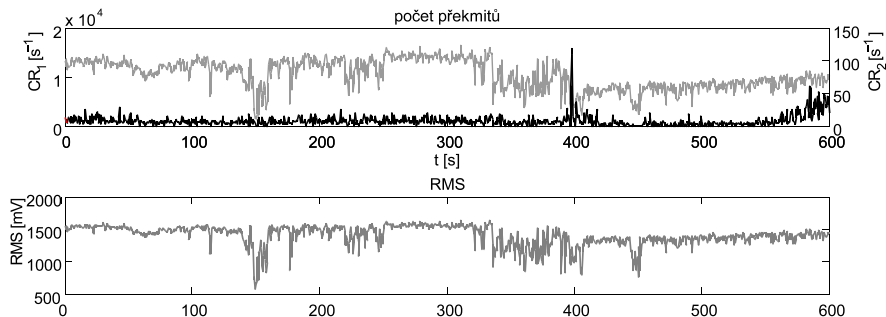


Obr.4 Vývoj provozních parametrů vs. RMS AE.
Fig.4 Evolution of operation parameters vs. RMS of AE.

3.1. Sledování počtů překmitů

Jedním z klasických parametrů AE je počet překmitů amplitudy přes stanovenou prahovou úroveň, který se značí jako NC (z anglického „Number of Counts“). Při měření se obvykle volí alespoň dva prahy. První (NC_1) je zpravidla nastaven těsně nad úroveň šumového pozadí, což v případě spojitě AE není vhodné a využívá se spíše prahů zasahujících do běžné úrovně signálu. Druhý práh (NC_2) detekuje náhlá krátkodobá zvýšení amplitudy. Je volen pod úroveň dosavadní maximální amplitudy signálu a většinu času zaznamenává pouze nulové hodnoty. Parametr NC je velmi citlivý v oblasti zvolené hladiny. Nepatrné zvýšení amplitudy signálu, které ale znamená překročení prahu, se výrazně projeví na hodnotách NC. Naopak změny amplitudy daleko od prahové hranice nemají žádný vliv. Z uvedeného vyplývá, že NC lze označit za silně nelineární transformaci signálu. V případě spojitě AE je nutné specifikovat rovněž délku časového intervalu, pro který načítání překmitů provádíme. Počet průchodů přes prahovou úroveň za pevně stanovenou dobu pak označujeme

jako CR z anglického „Count Rate“. V našem případě se jedná o dobu 0.5s. Přínos popisovaného parametru je evidentní např. z obr.5. Na vybrané části naměřených dat (10 min.) je ilustrováno náhlé zvýšení hodnoty CR_2 , aniž by parametr RMS tuto změnu charakteru signálu zaznamenal. Počty překmitů jsou tedy vhodným parametrem pro rychlou detekci singularit ve spojitém emisním signálu.

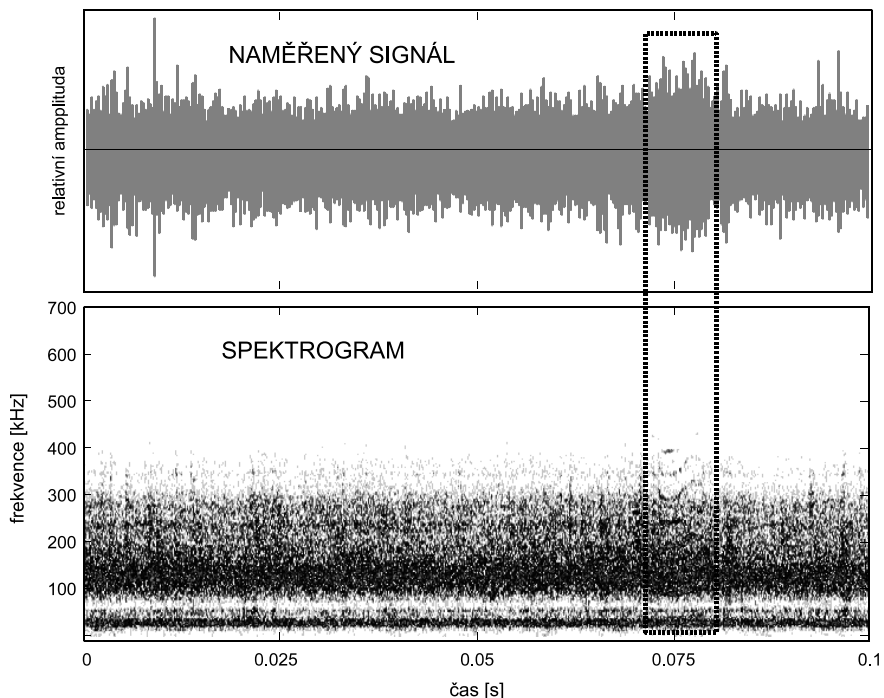


Obr.5 Průběh hodnot CR a RMS ve vybraném intervalu 10 minut
(CR_1 je zobrazen šedě a CR_2 černě).

Fig.5 Progression of CR and RMS values in selected time interval of 10 minutes
(parameters CR_1 and CR_2 are represented by grey and black color respectively).

3.2. Časo-frekvenční analýza

Dalším často aplikovaným nástrojem signálové analýzy je časo-frekvenční analýza. Poskytuje informace o frekvenčním spektru signálu, ale oproti klasické frekvenční analýze zároveň uchovává také časovou informaci. Jednou z metod je okénková Fourierova transformace (STFT - „Short Time Fourier Transform“). Její podstatou je provádět Fourierovu transformaci z kratších úseků signálu, tzv. okének, které jsou posouvány v čase. Výsledným zobrazením vývoje spektrálních koeficientů je tzv. spektrogram. V případě zpracování velmi rozsáhlých objemů dat ale v praxi narážíme na velkou výpočetní náročnost této metody, což v podstatě znemožňuje její reálné nasazení. Analyzovány byly proto jen vybrané krátké úseky signálů. Jelikož bylo měření provedeno na převodovce bez závady, nelze předpokládat výskyt významných defektů, které by se projevil na emisních parametrech. Nicméně, v režimu volnoběhu se na záznamu ze snímače v blízkosti ložiska rotoru objevuje ve frekvenčním spektru singularita, která na jiných částech záznamu není. Na obr.6 je ilustrována část signálu od snímače č.1 v režimu volnoběhu a jeho spektrogram. Je zde patrné charakteristické šumové pozadí a v čase přibližně 75ms od začátku zobrazeného úseku je patrná spektrální odchylka, kterou lze poslechem (po 40-ti násobném zpomalení zvuku) přirovnat ke tření v rotujícím soukolí. Podle detailní spektrální analýzy se jedná o lokální výskyt frekvence přesahující 600kHz. Z výskytu této nepravidelnosti lze usoudit, že závažnější defekty by měly být na obdobných záznamech dostatečně patrné a je jen otázkou vhodných zpracovávajících algoritmů, zda budou detekovatelné i automaticky.

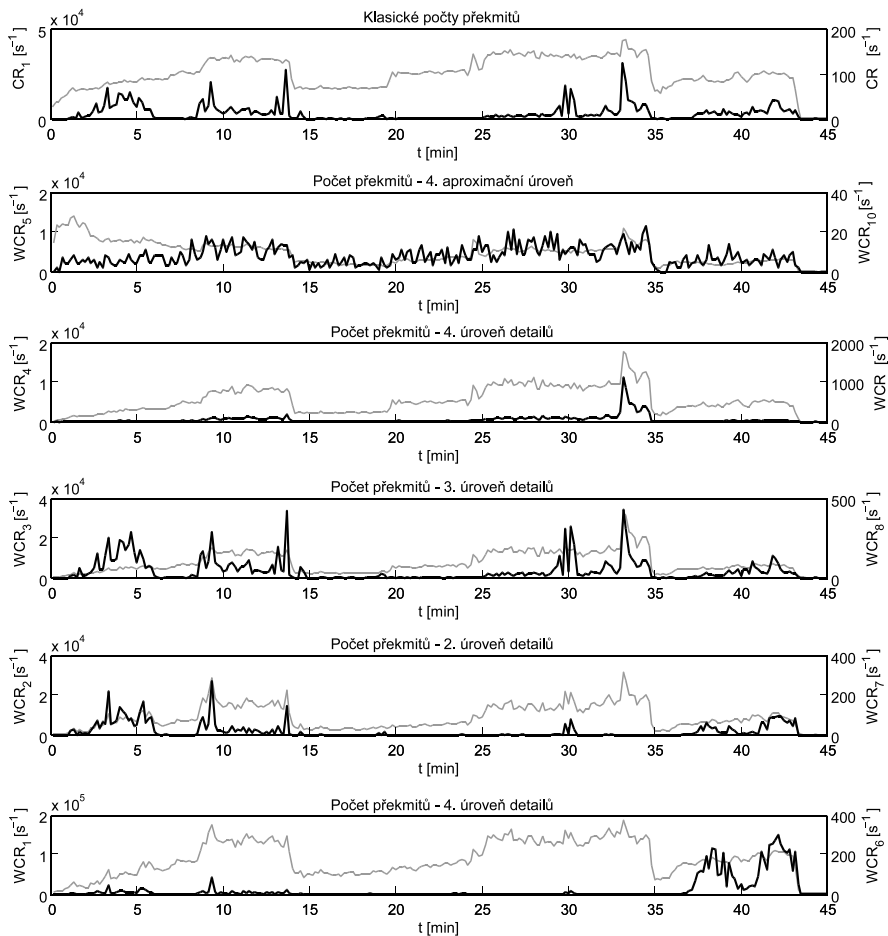


Obr.6 Typický úsek signálu se singularitou a jeho spektrogram.
 Fig.6 Typical section of a signal with singularity and its spectrogram.

3.3. Waveletová analýza

Jelikož výpočet výše zmiňovaného spektrogramu je časově náročný a detekce změn v něm obsažených netriviální, bylo nutné pro velmi rozsáhlá měření vyvinout efektivnější algoritmy. Pro časo-frekvenční analýzu je vhodnější a rychlejší waveletová transformace. Je zobecněním Fourierova rozkladu, přičemž výchozí signál není dekomponován na fázově, amplitudově a frekvenčně odlišné sinusoidy, ale na různě posunuté, zesílené a dilatované základní funkce specifického tvaru, tzv. „vlnky“ (angl. wavelet). Na základě teorie využívající funkcionální analýzu lze ukázat, že diskrétní waveletovou transformaci (DWT) digitalizovaných signálů lze spočítat pomocí tzv. banky filtrů, čímž se označuje sada speciálních frekvenčních filtrů typu horní a dolní propust'. Frekvenčním filtrem se rozumí množina koeficientů, které jsou určitým způsobem aplikovány na signál. V těchto koeficientech je ukryt tvar základní mateřské vlnky. Filtrování probíhá od nejvyšších frekvencí po nejnižší. V prvním kroku je signál rozdělen na dvě složky A1 a D1. Nejprve je na původní signál aplikován filtr typu horní propust a výsledek je označen D1 (Detail 1). Poté je použit filtr typu dolní propust se stejnou mezní frekvencí jako předchozí filtr a výsledek je označen A1 (Aproximace 1). V dalším kroku je obdobný postup aplikován na předchozí aproximaci a jsou získány složky A2 a D2. Tento postup se opakuje až do předem stanoveného počtu požadovaných úrovní rozkladu. Přímé využití výsledků

DWT pro zpracování delších časových úseků (jako např. u spektrogramu) není z výpočetních důvodů možné. Výsledné koeficienty v jednotlivých úrovních waveletového rozkladu (obdoba frekvenčního) se však osvědčilo dále zpracovávat pomocí prahování, obdobně jako původní signál. Metoda byla představena již v [3], ale pouze pro nespojitou AE. Pro spojitou AE označme v obr.7 počet překmitů za jednu sekundu jako WCR_x , kde x je označení příslušného nižšího ($x=1,\dots,5$), resp. vyššího ($x=6,\dots,10$) prahu pro jednotlivé úrovně rozkladu 1-4, přičemž průběhy překmitů přes nižší resp. vyšší práh ilustrují šedé, resp. černé křivky.



Obr.7 Zobrazení CR a WCR v průběhu celé zkoušky.

Fig.7 Illustration of CR and WCR evolution within the whole experiment.

Jelikož výpočetní náročnost DWT pro kratší úseky signálu není vysoká, lze vývoj částečné WCR efektivně zobrazovat i pro celý signál, viz obr. 7 s výsledky pro první kanál. Pro srovnání je zde zobrazen také průběh CR. Lze pozorovat, že průběhy překmitů WCR přes vyšší hladinu jsou značně odlišné. Například v časovém rozmezí 0-15 min. je na úrovni rozkladu D2 a D3 patrná zvýšená aktivita, zatímco u složek D1 a D4 ke zvýšení nedochází. Nebo naopak v okolí času 33 min. lze na D3 a D4 vidět nárůst, který na D1 a D2 není. Celkově je patrné jiné frekvenční složení signálu na začátku a konci zkoušky odvoditelné z odlišných změn v různých úrovních waveletového rozkladu. Výše uvedená pozorování předesílají možnost detekovat popisovanou metodou spektrální změny v signálu. Metoda přináší novou informaci, která není patrná z prvotně počítaného parametru RMS, nebo obálky signálu. Jistou nevýhodou může být hledání vhodných prahovacích úrovní, které se mohou pro různá měření lišit.

4. Diskuse výsledků

Na základě waveletového rozkladu byla rozpracována metodika zpracování rozsáhlých objemů dat z měření spojité akustické emise. S pomocí jednoduchého algoritmu hledání překmitů v různých dekompozičních úrovních se podařilo prokázat změny signálu v závislosti na letových režimech, nejen sledovaným parametru RMS. Metoda byla aplikována při zkoušce renovované převodovky, klasifikované jako „bez závady“. Z výsledků tedy nelze spolehlivě vyvozovat, na jakých parametrech emisního záznamu by bylo patrné poškození bránící provozu. Na základě dosavadních experimentů lze pouze vyslovit hypotézu, že typické frekvenční spektrum při zvoleném letovém režimu je charakteristickým projevem daného kusu reduktoru a postupně změny v zastoupení frekvenčních pásem, resp. ve vývoji parametrů WCR, souvisejí se změnou letového režimu a nemusejí nutně znamenat poškození. K lepšímu poznání souvislostí různých typů závad převodového mechanismu se změnami parametrů AE by bylo nezbytné provést další měření na reduktorech s různými typy a stavy poškození, což je ale vzhledem k technické a finanční náročnosti dohledání, či umělé přípravy emisního zdroje, velmi obtížné. Nicméně, analýzou záznamu nalezené nepravidelnosti, neindikující závažnou poruchu, předesílají relativně velkou citlivost metody detekovat případná fatální poškození i v prvotních stádiích rozvoje.

Poděkování

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR-TI3/775.

Literatura

- [1] T Holroyd, N Randall, 'The use of acoustic emission for machine condition monitoring' Br. J. Non-Destruct. Test. 35(2), p. 75 (1992).
- [2] A K S Jardine, D Lin, D Banjevic, 'A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance' Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20 (7), 1483-1510 (2006).
- [3] Z Převorovský, M Chlada, 'Threshold Counting in Wavelet Domain' Journal of Acoustic Emission, 2002, vol. 20, p. 134-144.



METODA AKUSTICKÉ EMISE V HODNOCENÍ KVALITY ODPOROVÉHO BODOVÉHO SVAŘOVÁNÍ

ACOUSTIC EMISSION TESTING IN QUALITY CONTROL OF RESISTANCE SPOT WELDING

Libor NOHÁL, Pavel MAZAL, Libor TOPOLÁŘ, Luboš PAZDERA

Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav konstruování

Contact e-mail: nohal@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Cílem monitorování výrobních procesů je zaručit maximální kvalitu vyráběných produktů. Při řízení těchto procesů, jako je například bodové odporové svařování, je třeba zajistit zpětnou vazbu. Pro monitorování a řízení těchto procesů proto nachází uplatnění metoda akustické emise, jejíž parametry reagují na změny v charakteristických fázích svařovacího procesu a mohou predikovat vlastnosti svaru. Tento článek shrnuje dosavadní poznatky publikované různými autory a prezentuje poslední výsledky experimentů provedené na Ústavu konstruování Vysokého učení technického v Brně.

Klíčová slova: odporové bodové svařování, akustická emise, hodnocení kvality svarů

Abstract

The goal of manufacturing process monitoring is to ensure the highest quality of manufactured products. During the control and monitoring of these processes, such as spot resistance welding, it is necessary to provide the feedback control. The acoustic emission method is suitable for a monitoring and feedback control of these processes; the acoustic emission parameters respond to changes in characteristic phases of the welding process and can predict the properties of the weld. This article summarizes the current knowledge published by various authors and presents the latest results of the experiments carried out at the Institute of Machine and Industrial Design of Brno University of Technology.

Key words: resistance spot welding, acoustic emission, welding quality control

1. Úvod

Odporové bodové svařování (RSW) patří do skupiny metod tlakového svařování. U tohoto typu svařování dochází ke spojení materiálů v důsledku tlakového silového působení za současného působení tepla v místě vznikajícího svaru. Materiál se v místě styku kontaktních ploch ohřeje odporovým teplem, generovaným při průchodu elektrického proudu přechodovým odporem. Vzniklé teplo můžeme pomocí Joule-Lenzova zákona kvantifikovat dle rovnice (1). Z důvodu snižování nákladů a zvyšování efektivnosti výroby je obecně do výrobních procesů zaváděna automatizace a robotizace. Díky možnosti uplatnit odporové bodové

svařování v automatickém svařovacím procesu, nachází tato metoda největší uplatnění zejména v automobilovém průmyslu při svařování karosérií. Další oblasti využití najdeme v dopravní technice (vagony, letecký průmysl), vzduchotechnice, při výrobě krytování strojů, domácích spotřebičů apod. Jak již bylo zmíněno výše, množství tepla daného přechodovým odporem je dáno Joule-Lenzovým zákonem:

$$Q = R \cdot I_w^2 \cdot t_w \quad (1)$$

kde:

Q – vzniklé teplo (J);

R – elektrický odpor (Ω) – celkový odpor: je součtem několika složek;

I_w – elektrický proud (A);

t_w – doba průchodu proudu (s).

Z hlediska kvality svaru hrají důležitou úlohu při všech způsobech odporového svařování základní parametry svařování. U odporového bodového svařování můžeme tyto parametry odvodit z rovnice (1). Charakteristické základními parametry svařovacího procesu pro tuto metodu jsou tedy **svařovací proud I_w ; přitlačná síla F_w a svařovací čas t_w .**

Pro hodnocení kvality bodového odporového svařování se používá celá řada destruktivních (sekáčová zkouška, odlupovací zkouška atd.) a nedestruktivních metod zkoušení. Nedestruktivní metody zkoušení snižují náklady, zvyšují rychlost a spolehlivost zkoušení. Mezi nedestruktivní metody užívané pro hodnocení kvality bodových svarů patří vizuální kontrola, měření tepelné vodivosti a nejrozšířenější zkoušení hotových svarů ultrazvukovou metodou. Nicméně každá defektoskopická metoda má své omezení vyplývající z fyzikální podstaty, proto se v praxi při hodnocení kvality svarů tyto metody vhodně kombinují [1,2].

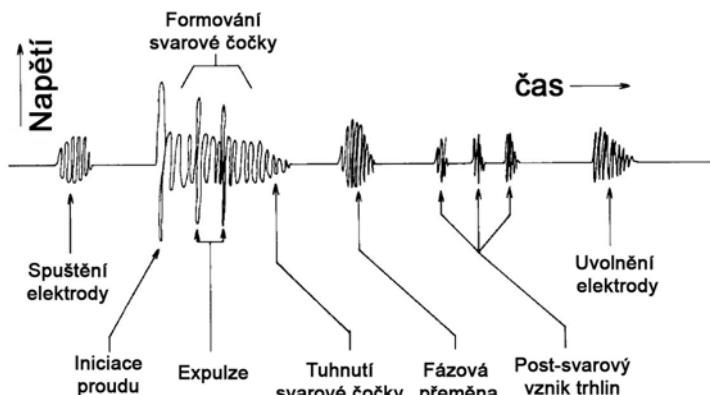
Pro monitorování samotného procesu odporového svařování je využíváno: monitorování hraničních elektrických parametrů (zejména svařovacího proudu); monitorování dynamických elektrických parametrů (snímání napětí, nebo el. proudu a následně dopočet elektrického výkonu, či el. odporu – robustní pouze při ideálních podmínkách); sledování rozšíření svarových čoček a v neposlední řadě využitím metody akustické emise (AE) [2-5, 7].

2. Aplikace akustické emise v monitorování kvality bodových svarů

Metoda akustické emise je dynamická pasivní metoda nedestruktivního zkoušení. Výhodou této metody při monitorování procesu bodového odporového svařování je možnost umístění snímačů AE mimo oblast ovlivněnou svařovacím procesem, jelikož emitované vlny AE se šíří materiálem přes elektrodu až k snímačům. Odporové bodové svařování se sestává z několika fází: spuštění elektrody, sevření, průtoku proudu, kování (zpracování svaru), výdrže a uvolnění elektrod. Během těchto částí svařovacího procesu jsou generovány různé typy signálu akustické emise, viz obr. 1 [3, 4].

Tyto jednotlivé části signálu akustické emise mohou chybět, nebo naopak získat na intenzitě v závislosti na materiálu, tloušťce atp. Pro hodnocení kvality svaru jsou nejpodstatnější informace získané z AE emitované během formace svarové

čočky, jejího rozšíření, fázové transformace (při velké rychlosti ohřevu a chladnutí dochází v místě svaru u ocelí s dostatečným množstvím uhlíku k martenzitické přeměně), případně může být detekován post-svarový vznik trhlin [4,6-8].



Obr. 1 Typický signál AE během RSW [4]

Fig. 1 Typical AE signal during RSW

Během průtoku elektrického proudu je zdrojem akustické emise plastická deformace, expanze svarové čočky, tření, natavení materiálu a expulze. V oblasti formování svarové čočky signály AE způsobené expulzí mají obecně větší amplitudu a jsou rozlišitelné od zbytku signálu AE v této fázi [3, 4].

3. Experimentální část

Tato část prezentuje metodiku měření a shrnuje prvotní výsledky provedených experimentů.

3.1 Metodika měření a použitá aparatura

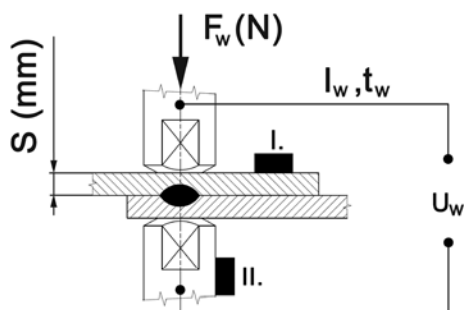
Pro experimenty byly použity vzorky ocelového plechu o rozměrech (š×d×s) (30×360×1) mm. Materiálem všech vzorků byla ocel určená pro svařované konstrukce ČSN 41 1523. Byly provedeny dvě série experimentů, první série (značeno A, B) s novými a druhá série (značeno C, D) s opotřebovanými čepičkami elektrod. Ze základních parametrů se měnil pouze proud I_w , přítláčná síla F_w a doba proudového impulsu t_w zůstaly ve všech experimentech konstantní, viz tab. 1. Na každém vzorku bylo provedeno šest svarů, po třech na každé straně, ve vzdálenosti 10 mm od kraje vzorku a s roztečí 50 mm.

Tabulka 1. Přehled podmínek experimentů
 Table 1. Overview of experimental conditions

	Proud (kA)	Přítlačná síla (N)	Doba proudového impulzu (mS)
A)	8	4060	200
B)	10	4060	200
C)	8	4060	200
D)	10	4060	200

Všechny experimentální svary byly provedeny na stojanové odporové svářečce VARSTROJ VST 40. Svařovací elektrody byly osazeny pro první sérii experimentů novými čepičkami typu B dle DIN 44750. V druhé sérii bylo užito opotřebovaných elektrod téhož typu.

Pro snímání signálu akustické emise byly v experimentech použity dva piezoelektrické snímače umístěné na spodní nepohyblivé elektrodě (typ MIDI a typ MDK 17 s užitým předzesilovačem 35 dB, na obr. 2 místo označeno jako II.) a jeden piezoelektrický snímač na horní části svařovaného materiálu (typ MDK 17 AS s integrovaným předzesilovačem, místo na obr. 2 označeno jako I.). Snímač MIDI byl ke spodní elektrodě přilepen kyanoakrylátovým lepidlem a snímač MDK 17 byl upevněn pomocí svorky. Snímač MDK 17 AS, umístění do středu vorku, byl upevněn k horní části vzorku magneticky. Signál AE byl zaznamenáván čtyřkanálovým analyzátozem DAKEL IPL umožňující 12-bitové synchronní kontinuální vzorkování 4 kanálů frekvencí 2 MSample/s a data byla souběžně ukládána do paměti PC.

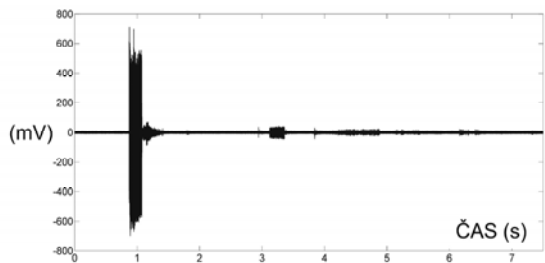


Obr. 2 Schéma uspořádání experimentu
 Fig. 2 Scheme of the experiment layout

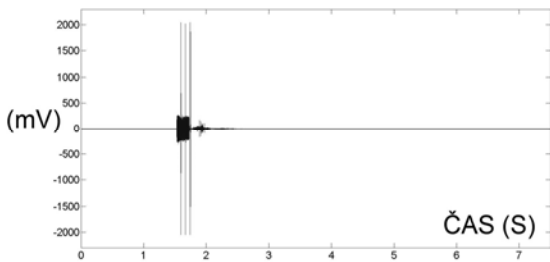
3.2 Výsledky experimentů

Z naměřených experimentů jsou zde prezentovány dva příklady záznamu signálu akustické emise a odpovídající frekvenční charakteristiky vypočítané pomocí Krátkodobé Fourierovy transformace (STFT). Obrázky označené jako a) reprezentují záznam signálu AE svaru provedeného elektrodou s novou čepičkou a obrázky označené jako b) reprezentují záznam signálu AE ze svaru

provedeného opotřebenou elektrodou. Je patrné, že i při stejných parametrech svařování – A), C), viz Tab. 1, jsou patrné rozdíly, jak v časové, tak frekvenční oblasti. V časové oblasti můžeme rozeznat bod iniciace elektrického proudu i formování svarové čochky.

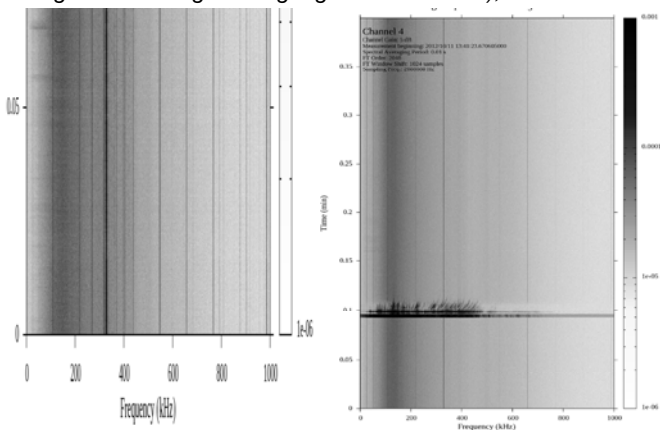


a)



b)

Obr. 3 Signál AE během svařování – dobrá elektroda a); opotřebená elektroda b)
 Fig. 3 Signal AE during welding – good electrode a); worn electrode b)



a)

b)

Obr. 4 STFT spektrogram – dobrá elektroda a); opotřebená elektroda b)
 Fig. 4 STFT spectrogram – good electrode a); worn electrode b)

4. Závěr

Můžeme obecně říci, že metody nedestruktivního zkoušení minimalizují náklady v průmyslové výrobě a umožňují zvýšit spolehlivost produkce i samotného procesu zkoušení. V tomto článku je přiblížena problematika hodnocení kvality bodových svarů při řízení a monitorování procesu odporového bodového svařování. Dále je představena metodika provedených experimentů a prezentovány prvotní výsledky, jejichž hlubší analýza bude publikována v následující práci. Z předchozích prací se jeví jako dobrý parametr pro hodnocení kvality záznam signálu akustické emise z oblasti formování svarové čočky, což naznačují i předběžné výsledky experimentů. Nicméně pro hlubší závěry bude třeba provést detailnější analýzy.

Poděkování

Práce, představené v tomto příspěvku, vznikly v rámci řešení projektu MŠMT MEB091114 „Monitorování kvality bodového svařování s využitím metody akustické emise“ a projektu NETME Centre - Nové technologie pro strojírenství.

Literatura

- [1] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [2] MILLER, R. K., HILL, E. K. a MOORE, P. O. Acoustic emission testing. 3rd ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005, *Nondestructive Testing Handbook*, 446 s. ISBN 1-57117-106-1.
- [3] KEK, T.; POLAJNAR, I.; GRUM, J. Monitoring of Resistance Spot Welding by AE. In *10th European Conference on Non-destructive Testing*, Part 1. první. Moscow: Russian Society for NDT, 2010. s. 298-302. ISBN: 978-5-904270-26- 1.
- [4] ASTM E751-01. *Standard practice for acoustic emission monitoring during resistance spot welding*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- [5] XU G.; WEN J.; WANG C.; ZHANG X. Quality monitoring for resistance spot welding using dynamic signals, *Mechatronics and Automation*, 2009. ICMA 2009. In *International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.2495-2499, 9-12 Aug. 2009.
- [6] POLAJNAR, I. a ESMAIL, E. A. Sources of acoustic emission in resistance spot welding. *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 1999, 45(4), 147-153s. ISSN: 0039-2480.
- [7] DENNISON, A. V.; TONCICH, D. J.; MASOOD S. Control and Process-Based Optimisation of Spot-Welding in Manufacturing Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, vol. 13, p. 256-263.
- [8] SENKARA, J.; ZHANG, H.; Hu S.J. Expulsion prediction in resistance spot welding; *Welding Journal*, Vol. 83/4, 2004, pp. 123-132.



LOKALIZACE A IDENTIFIKACE ZDROJŮ AE POMOCÍ ČASOVÉ REVERZNÍCH ZRCADEL

LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF AE SOURCES BY THE HELP OF TIME REVERSAL MIRRORS

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Zuzana FAROVÁ
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.
e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

Přesná a spolehlivá lokalizace s následnou identifikací zdroje akustické emise (AE) jsou jedněmi z nejdůležitějších, ale také nejobtížněji řešitelných inverzních problémů v diagnostice materiálů a konstrukcí metodou AE. V příspěvku je navržen nový přístup k řešení těchto problémů, využívající vlastnosti časové reverzních zrcadel (TRM) při zpracování signálů AE. Zaznamenaný signál ze snímačů AE je uvažován jako výsledek vícenásobné konvoluce zdrojové funkce s přenosovou funkcí snímačů a aparatury a přenosovou (Greenovou) funkcí prostředí, v němž se šíří elastická vlna od zdroje ke snímačům. Znalost přesné polohy emisního zdroje a zdrojové funkce je důležitým předpokladem k jeho správnému hodnocení. Nová off-line metoda řešení inverzních problémů pomocí TRM, označovaná jako TRAED (Time Reversal AE Deconvolution), je experimentálně nenáročná a nevyžaduje kalibraci ani žádné znalosti o materiálových či geometrických charakteristikách monitorované konstrukce. Její použití, výhody i omezení jsou v příspěvku demonstrovány na jednoduchých experimentech s umělými emisními zdroji (Pen-testy, definované UZ pulzy) na rozměrné ocelové desce. Výsledky testů prokazují efektivitu této metody, umožňující např. lokalizaci zdroje AE s milimetrovou přesností, eliminaci vlnové disperse či minimalizaci rozptylu parametrů emisního signálu. Pokud je pro danou konstrukci k dispozici spolehlivý model simulace šíření elastických vln, lze TRAED aplikovat v tomto modelu i bez dodatečných experimentů.

Klíčová slova: Akustická emise, časové reverzní zrcadla, lokalizace zdroje AE, dekonvoluce signálu.

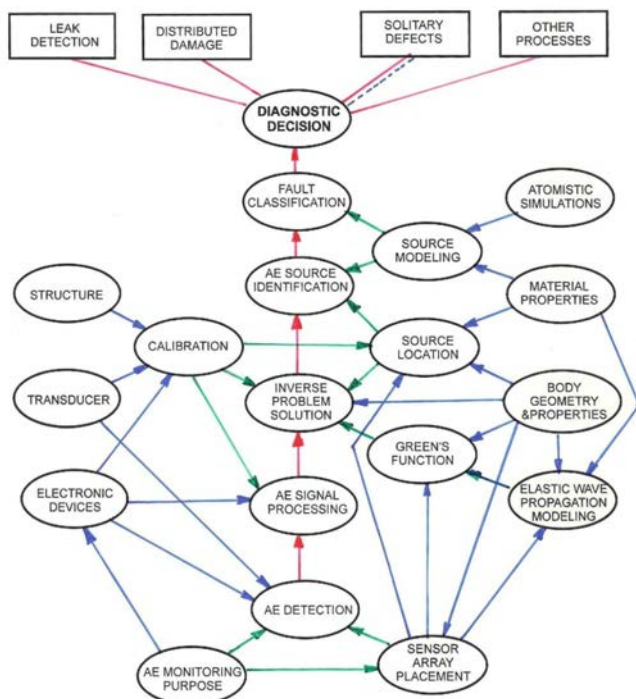
Abstract

Reliable identification and classification of already localized AE sources is one of the most important and also most difficult problems in AE monitoring. In this paper we suggest new concepts of more precise AE source localization and identification in complex structures. The method is based on a Time Reversal (TR) AE signal processing. AE signals, recorded by transducers relatively far from the source can be generally considered as a multiple convolution of the source function with the Green's (wave transfer) function and transfer function of sensors connected to signal processing devices. The new offline procedure, called TRAED (TR AE signal Deconvolution) is relatively simple and doesn't require any knowledge on the structure material and geometry. Its use, merits, and limits are demonstrated on examples of artificial AE sources (PE-Tests, defined US pulses) acting on large steel plate. Results show effectiveness of both inverse problems solution dealing with precise source location and partial reconstruction of the source function. TRAED also removes effects of wave dispersion and e.g. minimizes scatter of AE signal parameters. If we have good simulation model of elastic wave propagation in monitored structure, then the method can be applied to this model without any additional experiments.

Key words: Acoustic emission, time reversal mirrors, AE source location, signal deconvolution.

1. Úvod

Otázka o podstatě zdrojů AE v monitorované konstrukci je stejně stará jako AE metoda. Pokroky v analýze jevu AE za uplynulých 10 let, jak v teoretickém popisu, tak v experimentální technice umožňují lépe charakterizovat emisní zdroje, což vede k rostoucímu zájmu o využívání této techniky při monitorování okamžitého stavu testované konstrukce (SHM - Structural Health Monitoring). Metoda AE, označovaná v NDT jako AT, je dnes díky určité standardizaci zkoušení rovnocenná s ostatními NDT metodami a její aplikace v praxi vyžadují certifikovaný personál – v ČR byly také již před 2 roky zahájeny odpovídající certifikační kurzy a zkoušky. K zodpovědnému diagnostickému posuzování původu a nebezpečnosti detekovaných emisních zdrojů však stále zůstává otevřená celá řada komplexních problémů, které byly formulovány již před 10 lety na 25. mezinárodní konferenci EWGAE v Praze a jejichž vzájemné souvislosti lze charakterizovat např. schématem v Obr.1 [1]. Tyto problémy lze shrnout do tří základních úloh týkajících se zdrojů AE: 1. Detekce a kvantifikace, 2. Lokalizace a 3. Identifikace.



Obr.1: Hlavní problémy v diagnostice metodou AE

Zatímco první dvě úlohy jsou dnes již do značné míry řešitelné normalizovanými postupy a moderními aparaturami, je úloha spolehlivé identifikace a původu emisního zdroje dosud jen obtížně řešitelná. Její obtížnost vyplývá

zejména ze skutečnosti, že snímači AE detekujeme elastické vlny emitované zdrojem a šířící se konstrukcí často na značnou vzdálenost od zdroje ke snímači. Průchodem konstrukcí z určitého materiálu se přichází vlna deformuje, zejména jde-li o součást s komplikovanější geometrií, např. se změnami tloušťky, rozhraními, okraji, otvory, svary apod. Přijatý emisní signál neodpovídá funkci zdroje a jakákoliv analýza resp. parametrizace tohoto signálu může být pro identifikaci zcela zavádějící. To se týká nejen rozpoznávání zdrojů, ale často i jejich lokalizace. K získání nezkrácených informací o poloze a funkci zdroje je zapotřebí řešit inverzní problém (IP), tedy zjistit, jak vypadá emitovaná vlna přímo v místě zdroje.

Většina závažných problémů v soudobé metodice AE, včetně novějších přístupů k jejich řešení je podrobně rozebírána v přehledových knižních publikacích [2] a [3]. V tomto článku nastíníme nově navržený způsob řešení IP v oblasti AE pomocí t.zv. časově reversních zrcadel (TRM - Time Reversal Mirrors).

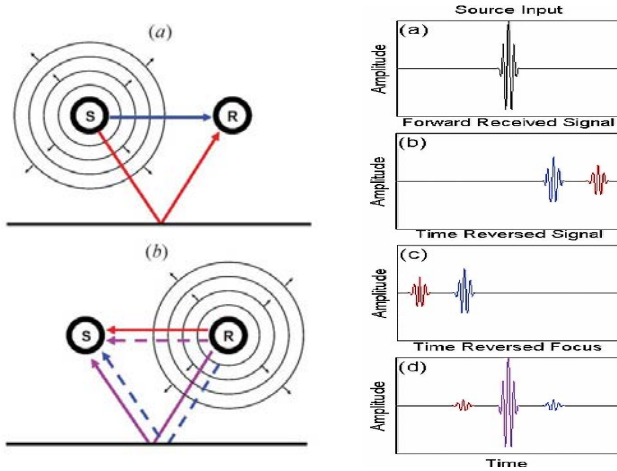
2. Řešení Inverzních problémů při analýze zdrojů AE

Pro lokalizaci emisních zdrojů na základě číslicově zaznamenaných signálů z několika snímačů jsou dnes rozpracovány různé postupy a počítačové algoritmy. Většina z nich je založena na časových rozdílech příchozích emitované vlny ke snímačům, různě rozmístěným v okolí zdroje. Ke správnému výpočtu časových diferencí je však nutné přesně určit okamžiky příchodu stejného typu vlny k jednotlivým snímačům, což nebývá vždy jednoduché, zejména šíří-li se vlny v prostředí s mnoha odrazy, značným útlumem či disperzí resp. v anizotropních tělesech nebo za zvýšeného šumového pozadí. V těchto případech bývá obtížné také stanovení rychlosti šíření vln, která je k lokalizaci zdroje zapotřebí. Možnosti jak obejít tyto problémy a učít polohu zdroje pouze na základě odvozených parametrů emisního signálu jako je RMS apod. byly nastíněny v článku [4]. S ohledem na velmi komplikované závislosti emisních parametrů na geometrii tělesa lze však tento postup použít jen u relativně velmi jednoduchých konstrukcí. Použití TRM techniky nevyžaduje k lokalizaci zdroje ani časové difference ani znalosti o rychlosti šíření vln a ve srovnání s jinými procedurami dává nejpřesnější výsledky. Bodový zdroj AE lze touto technikou lokalizovat s přesností až na jednotky milimetrů, tedy přesněji než je délka snímači detekovaných vln emitovaných zdrojem. Vlastní princip TRM, je přitom relativně jednoduchý a vhodný jak pro lokalizaci zdroje [5], tak pro dekonvoluci signálu AE [6], ale většinou jej nelze využít přímo v reálném čase.

Poprvé byl princip časové reverzace vln využit v roce 1965 jako technika zlepšující odstup signálu od šumu a prostorovou fokusaci vln. Během posledních 20 let od doby, kdy Fink *et al* [7-9] použili myšlenku časové reverzace v akustice, což je v časové oblasti ekvivalentní obrácení vlnového čela ve frekvenční oblasti (Wave Front Reversal), byla navržena celá řada modifikací těchto technik. Základní principy TRA spolu s pokroky v elektronice, zlepšením technologie snímačů a novými teoretickými poznatky vedly k rozpracování experimentální techniky nazvané technika časově reverzních zrcadel (*Time Reversal Mirrors* (TRM)), při řešení mnoha problémů v různých oblastech, jako např. v seismologii či medicíně [9, 10], ale ve spojení s nelineární spektroskopii elastických vln (NEWS) také v NDT jako vysoce citlivý indikátor přítomnosti defektů [11].

Teorie časově reverzních zrcadel je založena na skutečnosti, že rovnice šíření elastických vln v nedisipativním heterogenním médiu je invariantní vůči obrácení času. Princip TRM experimentu je schematicky znázorněn na Obr. 1 (viz Anderson *et al*. [12]):

Zdroj S vyše elastickou vlnu, které se šíří prostředím ke snímači R, kde je zaznamenána spolu s odrazy od hranice objektu. Zaznamenaný signál je časově obrácen a poté vyslán zpět k původnímu zdroji (Obr. 1 vlevo). Na Obr.1 vpravo jsou zobrazeny vysílané a přijaté signály.



Obr.1. Schéma časově reverzního procesu (podle Anderson et al.[12]).
Fig.1. Schematic illustration of TR process (taken from Anderson et al.[12])

3. Dekonvoluce signálu AE pomocí časově reverzních zrcadel

Uvažujme obecný zdroj akustické emise v místě r_0 se zdrojovou funkcí $s(t)$ a snímačem AE v místě r_i . Signál, který je registrován v místě r_i v čase $t \in (0, T_{max})$, je výsledkem konvoluce zdrojové funkce s Greenovou funkcí

$$s_G = s(t) * G(t, r_0, r_i) * P_i(t), \quad t \in (0, T). \quad (1)$$

Naměřený signál je poté časově reverzován a znovu vyslán z místa r_i do místa r_0 . V místě r_0 naměříme poté výsledný časově reverzovaný signál, který lze vyjádřit jako násobnou konvoluci

$$s_{TR} = s(T_{max} - t) * G(T_{max} - t, r_0, r_i) * G(t, r_i, r_0) \quad t \in (0, T_{max}). \quad (2)$$

Odvození vztahu mezi signálem s_{TR} a zdrojovou funkcí $s(t)$ je snazší provést ve frekvenční oblasti. Označme Fourierovu transformaci signálu s_{TR} jako $\mathcal{F}(s_{TR})$. Předpokládáme-li Greenovu funkci ve standardním tvaru

$$G(t, r_i, r_0) = \frac{1}{4\pi c^2} \frac{\delta(t - \frac{\|r_i - r_0\|}{c})}{\|r_i - r_0\|}, \quad (3)$$

bude Fourierova transformace $\mathcal{F}(s_{TR})$ ve tvaru

$$\mathcal{F}(s_{TR}(t)) = \mathcal{F}(s(T_{max} - t)) \frac{1}{16\pi \|r_i - r_o\|^2} e^{z i \omega T} \quad (4)$$

a

$$IFT(\mathcal{F}(s_{TR}(t))) = \frac{1}{16\pi \|r_i - r_o\|^2} s(t) = as(t) \mathcal{F}(s_{TR}(t))$$

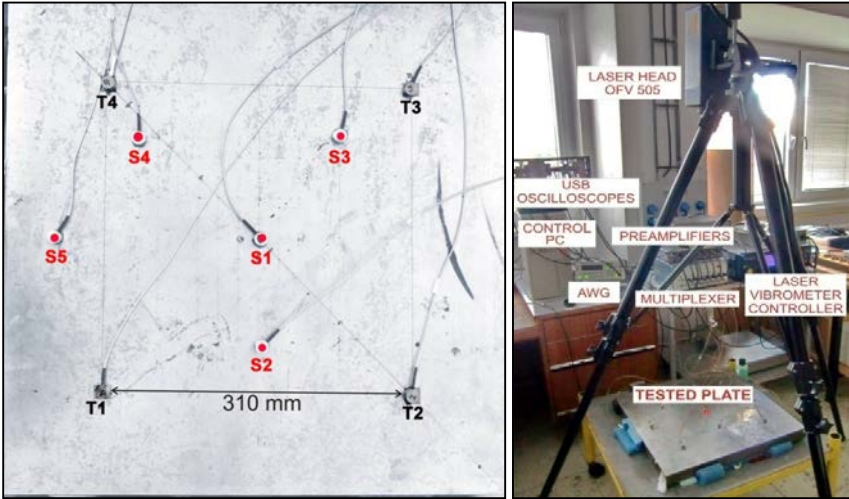
Kde IFT označuje inverzní Fourierovu transformaci a a je konstanta propocionality. Je vidět, že výsledný signál je úměrný původnímu vyslanému signálu ze zdroje akustické emise. Tento výsledek je velmi důležitý pro lokalizaci zdroje akustické emise a pro další analýzu. Při standardním měření akustické emise analyzujeme signály, které jsou ovlivněny jak průchodem vlny od zdroje ke snímači, tak charakteristikami snímací aparatury. Tento vliv znesnadňuje následnou klasifikaci zdrojů AE a výsledný signál $s_V(t)$ nebude pouze $as(t)$, ale bude ještě dvojnásobnou konvolucí s impulsní odezvou snímače a charakteristikou snímací aparatury (jedna konvoluce při detekci snímačem a druhá při vysílání směrem ze snímače)

$$s_V(t) = as(t) ** h(t) * h_A(t), \quad (5)$$

kde h je impulsní odezva snímače a $h_A(t)$ použité snímací aparatury. Předpokládáme přitom pro jednoduchost, že snímač i aparatura jsou lineární systémy a impulsní odezva piezo-měníče je stejná při příjmu i vysílání.

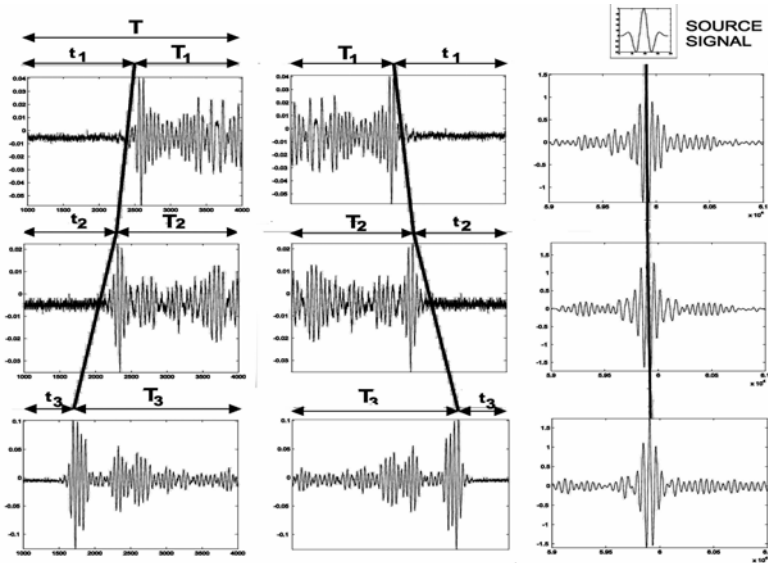
3. Experimentální ověření procedury TRAED

Ověřování možností analýzy zdrojů AE pomocí časové reverzace signálů TRAED bylo realizováno na tlusté ocelové desce o rozměrech 500x500x45 mm (viz Obr. 2 vlevo). Na desce byly přibližně v rozích čtverce o straně 310 mm připevněny 4 snímače AE typu DAKEL MTR 13 s magnetickými podložkami (T1-T4). Dalších pět piezoelektrických měničů S1-S5 stejného typu bylo na desce rozmístěno náhodně (měnič S1 byl umístěn zhruba uprostřed čtvercového pole snímačů). Měníče S1-S5 sloužily jako ultrazvukové vysílače definovaných pulzů různého tvaru, simulující zdroje AE v různých místech. Pulzy byly generovány pomocí generátoru libovolných signálů NI 5421. Vybuzené vlny byly detekovány snímači T1-T4 a po filtraci (20 kHz-2MHz) a zesílení signálu v předzesilovačích typu PAC 20-40-60 byly zaznamenávány USB osciloskopem Tie-Pie HS4 (128 kS frekvencí 10 MHz). Uložené signály byly v PC zkráceny, normalizovány, převráceny v čase a generátorem vyslány prostřednictvím snímačů T1-T4, přepojených jako vysílače posílány zpět k původním zdrojům, kde byly registrovány buď původními vysílači S1-S5, resp. laserovým vibrometrem POLYTEC OFV 5000 s hlavicí OFV 505, zaměřeným na okolí původního zdroje. Celý experiment, včetně přepínání mezi vysílači a přijímači byl automaticky řízen PC programem v prostředí MATLAB. TRM procedura vyžaduje velmi přesnou synchronizaci vysílaných a přijímaných signálů (s přesností na 1 vzorek). Princip dekonvoluce a časové synchronizace zpětně vyslaných signálů ilustruje Obr. 3, kde jsou v levém sloupci zachyceny signály ze zdroje v poloze S3 (vyslán signál typu Rickerův puls - vpravo nahore), přijaté třemi snímači T1- T3. časově obrácené (TR) signály jsou ve sloupci uprostřed. V pravém sloupci jsou TR signály snímáné interferometrem v místě původního zdroje S3.



Obr.2: Zkušební ocelová deska se 4 snímači AE T1-T4 a 5 měniči S1-S5 stejného typu, sloužícími jako vysílače definovaných signálů - umělé zdroje AE (vlevo). Vpravo je pohled na experimentální sestavu s laserovým interferometrem.

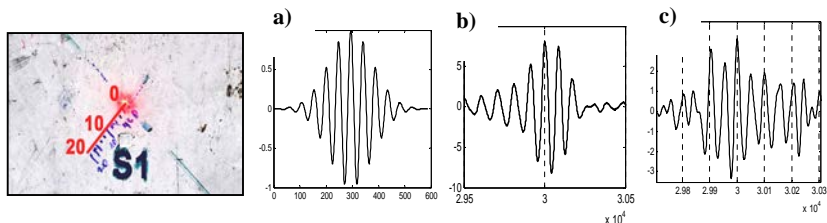
Fig. 2: Testing steel plate (left) with AE transducers T1-T4 receiving direct signals emitted from transducers S1-S5 simulating AE sources. Right is the used experimental arrangement.



Obr.3: Ilustrace časové synchronizace časově reverzních signálů.
Fig. 3: Precise time alignment of time reversed AE signals.

Z Obr.3 je patrné, že po vyslání TR signálů zpět do desky jsou signály z různých snímačů, detekované v místě původního zdroje zcela přesně synchronizovány. Tuto vlastnost lze využít k přesné lokalizaci zdroje: Budeme-li vibrometrem podrobně skenovat okolí původního zdroje, zhruba lokalizované jinou tradiční metodou, dojde k vzájemné synchronizaci pouze přesně v místě zdroje.

Původně vyslaný signál zde není zcela přesně rekonstruován, neboť nebyla provedena dekonvoluce na přenosovou charakteristiku samotného vysílače. K úplné rekonstrukci pole dynamických posuvů v místě zdroje (identifikaci na základě tensoru seismických momentů) by bylo zapotřebí snímat kromě kolmé také další složky, což při použití laserového vibrometru s jedinou osou snímání není možné. Lepší rekonstrukce zdrojové funkce lze dosáhnout také součtem TR signálů z více snímačů (teoreticky z nekonečného počtu snímačů okolo zdroje). Na Obr. 4 je ilustrována závislost rekonstrukce zdrojové funkce na přesnosti polohy snímání TR signálu. Laserový interferometr byl nejprve zaměřen přesně do místa zdroje a poté byl fokusován po 2 mm krocích až do 20 mm dále od polohy zdroje - viz vlevo na Obr.4,kde přesná poloha zdroje (střed vysílajícího měniče) je vyznačena na měřítku jako nula. Vedle jsou vyneseny 3 signály: a) vysílaný signál (tvarovaný sinusový puls 85 kHz), b) TR puls rekonstruovaný v místě zdroje (součet TR signálů vyslaných ze 4 snímači T1-T4) a c) tentýž součet signálů, detekovaných ve vzdálenosti 20 mm od původního zdroje. Na signálu c) je již patrná značná nedokonalost rekonstrukce. Obdobné výsledky byly získány také při snímání TR signálů vysílací sondou místo laserovým vibrometrem. V tomto případě se ale daleko výrazněji projeví opětovná konvoluce přijímaného signálu s impulsní charakteristikou snímače.



Obr. 4: Ilustrace vlivu polohy snímače TR signálu vzhledem k místu zdroje.
Fig. 4. Illustration of TR receiver displacement on resulting signal reconstruction.

4. Závěry

Použití časově reverzních zrcadel (TRM) při analýze signálů AE otevírá nové možnosti řešení komplikovaných inverzních problémů v této oblasti, jako je lokalizace zdrojů a dekonvoluce signálů (eliminace přenosu vln testovanou konstrukcí). V tomto článku je stručně nastíněn princip TRM a výhody použití této techniky jsou ilustrovány na jednoduchém příkladu lokalizace umělých emisních zdrojů na ocelové desce. Procedura TRM podstatně zvyšuje přesnost lokalizace emisních zdrojů a eliminuje distorzi signálu AE, způsobenou šířením elastických vln v konstrukcích s komplikovanou geometrií či anizotropií atd. i bez jakýchkoliv specifických znalostí o této geometrii, materiálové struktuře, rychlostech šíření elastických vln apod. TRM procedura je snadno realizovatelná a nejlepšími výsledky lze dosáhnout použitím např. skenujícího laserového interferometru jako detektoru vln zpětně vysílaných od snímačů AE k původnímu zdroji prostřednictvím generátoru

libovolných signálů. Je-li k dispozici spolehlivý model pro simulace šíření elastických napěťových vln v daném tělese, není k analýze AE touto metodou zapotřebí žádné dodatečné experimentální vybavení a proceduru TRM lze s uspokojivými výsledky realizovat přímo na tomto modelu. K úplné rekonstrukci funkce emisního zdroje v reálném čase bude zapotřebí v budoucnu ještě vyřešit celou řadu teoretických i experimentálních problémů týkajících se časově reverzní akustiky.

5. Literatura

1. Z. Prevorovsky: 'Notes on wave and waveguide concepts in AE' (25th EWGAE 2002, Prague, Proc. Vol II, pp 83 - 90, September 2002)
2. Ch. U. Grosse, M. Ohtsu (eds): 'Acoustic Emission Testing. Basic for Research - Application in Civil Engineering'. (Springer-verlag, 2008)
3. Carpinteri, G. Lacidogna (eds): 'Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics'. (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008).
4. M. Blahacek, M. Chlada, Z. Prevorovsky: 'Acoustic emission source location based on signal features'. (Advanced Materials Research, Vol. 13-14, 77-82, 2006).
5. J-M Parot, 'Localizing impulse sources in an open space by time reversal with very few transducers'. (Applied Acoustics, Vol 69 (4), pp. 311-324, 2008)
6. Z. Farova, Z. Prevorovsky, V. Kus, S. Dos Santos: 'Experimental Signal Deconvolution in Acoustic Emission Identification Setup'. (Proc. of the 6th Internat. Workshop NDT in Progress, Prague, pp. 33-40, 2011)
7. M. Fink, C. Prada, F. Wu, D. Cassereau, 'Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors' (IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings 1, pp. 681–686, 1989)
8. M Fink: 'Time reversal of ultrasonic fields. Part I: Basic principles'. (IEEE Trans. Ultr. Ferr. Freq. Contr. Vol 39 (5), pp 555-566, 1992)
9. M. Fink: 'Time-reversed acoustics'. (Rep. Prog. Phys., Vol. 63, pp.1933-1995, 2000).
10. B. E. Anderson, M. Griffa, C. Larmat, T. J. Ulrich, P. A. Johnson: '. (Acoustics Today, Vol. 4 (1), 4-15, 2008)
11. Prevorovsky Z. , Vejvodova S. , Dos Santos S.: 'Nonlinear Wave Modulation and Time Reversal Tomography of Structural Defects'. (NDT-Welding Bulletin, Vol.19, No.3, pp.45-49, 2009,)
12. B. E. Anderson, M. Griffa, C. Larmat, T. J. Ulrich, P. A. Johnson: 'Time reversal reconstruction of finite sized sources in elastic media'. (JASA Express Letters, Vol. 130 No.4, EL219 - EL225, 2011).

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory MPO ČR v projektech č. FR-T11/274 a FR T11/198 a projektu GAČR č. 104/10/1430.



HEAVY WALL PIPE LINE INSPECTION BY PHASED ARRAY ULTRASONIC TEST (PAUT) AND COMPARISON WITH CONVENTIONAL NDT METHODS

Afshin Yousefi et al.

Metallurgy laboratory in Iranian welding research
and engineering center (IWREC)

Abstract

This research paper contains comparative results about defect sizing and monitoring by three different methods: phased array, conventional UT and radiographic inspection. NDT inspection is playing important role in defect detection during and after manufacturing industrial structures. Common restrictions in RT & UT analysis such as accuracy limitations by increasing thickness can be overcome by PAUT. Phased array has several advantages compared to conventional UT and RT, especially in thick materials ($t > 40$ mm). Defects in thick materials can't be observed clearly by conventional RT. In this research, pipe lines of "Slag Catcher" section in SOUTH-PARS (ASALOUYEH-IRAN) gas refinery has been monitored and inspected by three methods: PAUT, conventional UT and RT. Radiography didn't show defects obviously and defect sizing accuracy decreases in heavy wall pipes by conventional UT and that process is very time consuming specially in field operation conditions, but PAUT detected and determined the dimensions of internal defects quickly and precisely.

Keywords: PAUT, NDT, Heavy Wall Pipe



THE COMPARISON BETWEEN TOFD AND CONVENTIONAL UT CAPABILITIES IN DEFECT SIZING AND MONITORING FOR STEEL STRUCTURES UNDER CYCLIC AND DYNAMIC LOADING

Afshin Yousefi et al.

Metallurgy laboratory in Iranian welding research
and engineering center (IWREC)

Abstract

This research paper has new results about compare of TOFD and conventional UT capabilities in defect sizing. TOFD has special and unique capabilities in sizing and monitoring of structure weld defects produced under cyclic and dynamic loading. A series of tests have been conducted to compare TOFD method and conventional UT method, to monitor and determine size of intentional defects produced during welding of samples. Thicknesses and welding parameters simulated from real conditions that applied for producing steel structure of the most crowded bridge in Tehran (Fadjr Bridge). Samples were inspected by both methods. Results showed that defect size accuracy was higher in TOFD method and some of defects cannot be sized accurately by conventional UT. In some cases, the differences in sizing between two methods came out approximately around 5mm. Since that minor defects and cracks tend to grow and develop under cyclic and dynamic loads (that exist in crowded bridges), lack of identification lead to irreparable damages.

Keywords: TOFD, UT, Inspection, Bridge, Steel structure



DETERMINATION OF FUNGAL ACTIVITY ON WOOD AT EARLY STAGES OF FUNGAL COLONIZATION USING THERMOGRAPHY

Bilgin GÜLLER¹, H. Tuğba DOĞMUŞ-LEHTIJÄRVI² Asko T. LEHTIJÄRVI²

¹ Suleyman Demirel University, Faculty of Forestry, Forest Products Engineering Dept., 32260, Isparta, Türkiye

² Suleyman Demirel University, Faculty of Forestry, Forestry Dept., Isparta, Türkiye

bilginguller@sdu.edu.tr

Abstract

Wood, as a renewable natural resource, has been used for many applications by human being for thousands of years. Instability under changing moisture and biodegradability are major disadvantages of the material. Activity of decay fungi in wood is usually assessed by measuring the linear growth of the fungal hyphae or the mass loss of the infected wood. It is quite difficult to distinguish fungal activity on wood with naked eye or normal imaging techniques, especially at the early stage of infection.

Heat is released in all metabolic processes. Although fungal activity on wood is not visible at early stage of the activity, their metabolic activities cause release of heat. Therefore, theoretically, it is possible to determine the infected area using a thermographic technique.

*In this study, infection and spreading of *Fomitopsis pinicola* on light and dark colored wood surfaces was monitored using FLIR I7 thermal camera for five weeks at laboratory conditions. At the end of the experiment thermal images were evaluated using image analysis technique.*

As a result of biological activity in the areas of intensive fungal activity, the thermal properties (thermal conductivity, and capacity) of wood were different. Consequently the surface temperatures differed. The areas where the fungal activity (fungal metabolic activities) was higher, showed higher surface temperatures than those with no or limited fungal activity.

Results showed that thermography is a very promising technique to monitor fungal activity even at very early stages of their growth both dark and light colored wood surfaces.

Keywords: NDE, thermography, fungus



MONITOROVÁNÍ ROZVOJE POŠKOZENÍ V BETONOVÝCH DÍLCÍCH POMOCÍ NELINEÁRNÍ SPEKTROSKOPIE ELASTICKÝCH VLN

DAMAGE PROGRESSION MONITORING IN CONCRETE PARTS BY MEANS OF NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY

Jan HETTLER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ
Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.
e-mail: hettler@it.cas.cz

Abstrakt

Nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS) je soubor moderních metod ultrazvukové defektoskopie, které umožňují vysoce citlivě zachytit vznik a rozvoj poškození i v materiálově značně komplikovaných tělesech. Tento příspěvek se zabývá hodnocením míry poškození betonových dílců pomocí analýzy vyšších harmonických frekvencí. Zkoušené betonové dílce byly ohybově namáhány až do vzniku magistralní trhliny za současného monitorování amplitudově závislých spektrálních změn ultrazvukového signálu procházejícího zkoušeným dílcem. Pro porovnání byly zaznamenány i signály AE. Metoda hodnocení vyšších harmonických frekvencí se ukázala jako nevhodnější nástroj z metod NEWS pro tento typ zkoušek, zejména díky relativní jednoduchosti experimentální aparatury a snadné interpretaci získaných výsledků. Pozornost je věnována především citlivosti metody na průběh rozvoje poškození a dále pak změnám sledovaných parametrů před finálním porušením zkoušených těles v korelaci se signály AE.

Klíčová slova: nelineární ultrazvuková spektroskopie, vyšší harmonické, zkoušení betonu

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR v rámci grantu číslo GAČR 104/10/1430.

Abstract

Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy is a set of modern and dynamic ultrasonic NDT methods. These methods provide an outstanding sensitivity that can be used to monitor the damage evolution even in very complicated and intrinsically non-linear materials. The presented article deals with the damage assessment of concrete samples using the harmonic analysis. The amplitude dependent spectral changes of the probing ultrasonic signals were measured during the bending loading of the tested samples. AE signals were also analyzed and served as a reference data for comparison. The special attention is paid to the sensitivity of the method to the localized damage evolution and to the correlation of the obtained results with measured AE signals, especially in the pre-final stage of the damage evolution. Results show that the analysis of amplitude dependent spectral changes is a promising method for the damage assessment in concrete.

Key words: nonlinear ultrasonic spectroscopy, higher harmonics, concrete testing

Acknowledgement

This work was supported by the Grant Agency of the Czech Republic with the project no. GACR 104/10/1430.



NĚKTERÉ ASPEKTY DETEKCE ÚNAVOVÝCH TRHLIN METODOU AKUSTICKÉ EMISE

SELECTED ASPECTS OF FATIGUE CRACKS DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION

Václav KOULA*, Martin DRÁB**, Josef VOLÁK***

*Zemědělské družstvo Rpety, **FJFI ČVUT Praha, ***VZÚ Plzeň, a.s.

Abstrakt

V provedených experimentech bylo vedle ověření možnosti potlačení rušivých signálů na zkušebním stroji sledováno rovněž v jaké fázi zatěžovacího cyklu (0,1 – 15 Hz) jsou generovány hity AE. V případě šířící se trhliny se ukazuje, že hity nejsou generovány při maximální síle zatěžovacího cyklu, ale s rostoucí trhlinou naopak při stále nižší úrovni síly po jejím poklesu z maxima. Je navržena metodika umožňující v provozních podmínkách identifikaci šířící se únavové trhliny při použití jediného snímače AE.

Abstract

Besides the verification of the possibility to suppress unwanted noise signals in conducted experiments on the testing rig we've also observed the phase of the loading cycle (0.1 – 15 Hz) when the AE hits from the crack are generated. In case of the propagating crack, it shows that the hits are not generated during the maximal force of the loading cycle, but to the contrary, with the growing crack, the generation moves towards still lower levels of the loading force after its dip from the maximum. A methodology allowing identification of the growing fatigue crack in operating condition using just one AE sensor is proposed.



ACOUSTIC EMISSION TESTING (AET) DURING THE OPERATION

Valentin PETROV, Aleksandr PETROV

OOO "ORK", Saint-Petersburg, Russia, <http://orkspb.ru>
Contact e-mail: valentin.petrov@orkspb.ru, avpetrov@orkspb.ru

Abstract

It is shown, that the acoustic emission testing (AET) methodology reflects the understanding of the fracture nature. As it is known, the alternative exists: mechanical approach or kinetic theory. AET is carried out at the pressure $P_{AE} > P$ in the mechanical approach, where P is allowable pressure (maximum value of the operational pressure $P_{op} < P$). The goal of the AET is flaw detection.

AET is carried out at the pressure $P_{AE} < P$ in the kinetic theory. However, $P_{AE} \geq P^$ and the minimal pressure value P^* during AET is calculated in the paper from the condition of the given remaining life $\Delta\tau = t + m \cdot \Delta t$, which guarantees the prolongation of the service life at every values of the operational pressure up to P on the period Δt with gamma-percentage probability m after the time of operation t .*

It is established, that for typical conditions $P^/P \approx 0.8$. It allows carrying out AET of the vessel with the working space almost in the operational mode. The pressure must be risen up, if $P_{op} < P^*$.*

Detected flaws during AET are automatically included in the remaining life estimation in the kinetic theory, what increases the industrial safety in comparison with the mechanical approach.

Keywords: *acoustic emission, acoustic emission testing, AE, AET, fracture, remaining life.*



LOKALIZACE A IDENTIFIKACE ZDROJŮ AE POMOCÍ ČASOVÉ REVERZNÍCH ZRCADEL

LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF AE SOURCES BY THE HELP OF TIME REVERSAL MIRRORS

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Zuzana FAROVÁ

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.

e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

Přesná a spolehlivá lokalizace s následnou identifikací zdroje akustické emise (AE) jsou jedněmi z nejdůležitějších, ale také nejobtížněji řešitelných inverzních problémů v diagnostice materiálů a konstrukcí metodou AE. V příspěvku je navržen nový přístup k řešení těchto problémů, využívající vlastnosti časově reverzních zrcadel (TRM) při zpracování signálu AE. Zaznamenaný signál ze snímačů AE je uvažován jako výsledek vícenásobné konvoluce zdrojové funkce s přenosovou funkcí snímačů a aparatury a přenosovou (Greenovou) funkcí prostředí, v němž se šíří elastická vlna od zdroje ke snímačům. Znalost přesné polohy emisního zdroje a zdrojové funkce je důležitým předpokladem k jeho správnému hodnocení. Nová off-line metoda řešení inverzních problémů pomocí TRM, označovaná jako TRAED (Time Reversal AE Deconvolution), je experimentálně nenáročná a nevyžaduje kalibraci ani žádné znalosti o materiálových či geometrických charakteristikách monitorované konstrukce. Její použití, výhody i omezení jsou v příspěvku demonstrovány na jednoduchých experimentech s umělými emisními zdroji (Pen-testy, definované UZ pulzy) na rozměrné ocelové desce. Výsledky testů prokazují efektivitu této metody, umožňující např. lokalizaci zdroje AE s milimetrovou přesností, eliminaci vlnové disperse či minimalizaci rozptylu parametrů emisního signálu. Pokud je pro danou konstrukci k dispozici spolehlivý model simulace šíření elastických vln, lze TRAED aplikovat v tomto modelu i bez dodatečných experimentů.

Klíčová slova: Akustická emise, časově reverzní zrcadla, lokalizace zdroje AE, dekonvoluce signálu.

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory MPO ČR v projektech č. FR-TI1/274 a FR-TI1/198 a projektu GAČR č. 104/10/1430.

Abstract

Reliable identification and classification of already localized AE sources is one of the most important and also most difficult problems in AE monitoring. In this paper we suggest new concepts of more precise AE source localization and identification in complex structures. The method is based on a Time Reversal (TR) AE signal processing. AE signals, recorded by transducers relatively far from the source can be generally considered as a multiple convolution of the source function with the Green's (wave transfer) function and transfer function of sensors connected to signal processing devices. The new offline procedure, called TRAED (TR AE signal Deconvolution) is relatively simple and doesn't require any knowledge on the structure material and geometry. Its use, merits, and limits are demonstrated on examples of artificial AE sources (PE-Tests, defined US pulses) acting on large steel plate. Results show effectiveness of both inverse problems solution dealing with precise source location and partial reconstruction of the source function. TRAED also removes effects of wave dispersion and e.g. minimizes scatter of AE signal parameters. If we have good simulation model of elastic wave propagation in monitored structure, then the method can be applied to this model without any additional experiments.

Key words: *Acoustic emission, time reversal mirrors, AE source location, signal deconvolution.*

Acknowledgements: *This work was supported by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic in the projects no. FR-TI1 / 274 and FR TI1/198, and by the Grant Agency of the Czech Republic under the grant no. 104/10/1430.*



TUBE INSPECTION USING ACOUSTIC PULSE REFLECTOMETRY: APPLICATION TO A TUBULAR AIR HEATER

Amir REICHENSTEIN, Noam AMIR, Harel PRIMACK, Dov FURMAN,
Silviu ZILBERMAN

AcousticEye Ltd., 4 Harechev, Tel Aviv, Israel

Abstract

Acoustic Pulse Reflectometry (APR) is an Internal Diameter (ID) tool for tube inspection, offering several advantages over conventional methods, among them very short inspection times and high sensitivity to through holes. It has recently been applied to a wide range of tube diameters, from 3/4" heat exchanger tubes to boiler tubes 3" in diameter and above. In this paper we present the physical principles behind APR and the innovations enabling its implementation in a portable and robust tool. This is followed by a description of a field test on a Tubular Air Heater (TAH). TAHs are typically difficult to inspect, often containing internal sleeves and other constrictions, which make it impossible to use invasive techniques such as Remote Field probes. Usually they are inspected visually, using flashlights, which enable inspection of the first few feet only. To provide a more comprehensive inspection, APR was used recently to examine one such TAH. 901 tubes were inspected, 14' in length and 2" in diameter, in the space of only four hours. 32 leaks were found and quantified, some of them clearly beyond the reach of what could be found by visual inspection.



PŘENOSNÝ ULTRAZVUKOVÝ SYSTÉM S IMPLEMENTOVANOU TECHNOLOGIÍ PHASSED ARRAY

ULTRASONIC PORTABLE SYSTEM WITH IMPLEMENTED PHASED ARRAY TECHNOLOGY

Stanislav Štarman

Starmans Electronics s.r.o.

Abstrakt

V článku je prezentován ultrazvukový přenosný systém DEFECTOBOOK s Phased Array technologií a možné aplikace. Vyvinutý systém slučuje konvenční ultrazvuk, EMAT a Phased Array.

Zkoušení svarů je standardní možností systému, ale geometrie svaru může být snadno vytvořena přímo v přístroji bez externího programu.

Abstract

This paper presented our developed ultrasonic portable system DEFECTOBOOK with phased array technique and possible applications. The developed system contains implemented conventional ultrasonic testing, EMAT testing and phased array testing.

The testing of welds is a standard option in our proposed system, but weld geometry can be easily pre-programmed for any weld configuration without external software.

Název	NDE for Safety / Defektoskopie 2012 42. mezinárodní konference – sborník příspěvků
Editor	Pavel Mazal, Luboš Pazdera
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT
Tisk	BETIS s.r.o. Praha Areál VÚ, Podnikatelská, 19011 Praha Běchovice
Vyšlo	říjen 2012
Vydání	první
Náklad	200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-4609-0

mediální partneři / media partners



Technický týdeník



partneři / partners





11th ECNDT
PRAGUE 2014
October 6 - 10, 2014
www.ecndt2014.com
11th European Conference on NDT

ISBN 978-80-214-4609-0