

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2014

ECNDT 2014

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

44. mezinárodní konference
44th International Conference



9.–10. říjen 2014
October 9–10, 2014

Prague, Czech Republic

**44. mezinárodní konference
DEFEKTOSKOPIE 2014 /
ECNDT 2014**

je sponzorována:

hlavní sponzoři / main sponsors



sponzoři / sponsors



Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2014

44. výroční konference České společnosti pro NDT
44th Annual Conference of Czech Society for NDT

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

**9. až 10. října 2014
October 9 to 10, 2014**

Praha, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera, Marta Kořenská and Pavel Mazal

Konference se koná v rámci 11. Evropské konference a výstavy NDT (ECNDT 2014)



All articles submitted before the deadline 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
- Prof. Karel Hájek – UNOB Brno
- Doc. Pavel Mazal – VUT v Brně
- Ing. Monika Manychová – VUT v Brně
- Ing. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha
- Prof. Josef Šikula – VUT v Brně
- Mgr. Libor Topolář – VUT v Brně

Editors: Luboš Pazdera, Marta Kořenská and Pavel Mazal

Copyright © 2014
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 978-80-214-5035-6

CONTENTS / OBSAH

Ladislav CARBOL, Ivo KUSÁK, Jan MARTINEK MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ METODOU MLS MEASUREMENT OF MATERIAL PROPERTIES BY MLS METHOD	1
Jaroslav FIALA NÍZKOTEPLTNÍ RELAXACE A SEKUNDÁRNÍ STRUKTURA MATERIÁLU LOW-TEMPERATURE RELAXATION AND SECONDARY MATERIAL'S STRUCTURE	9
Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, Michal KOLEGA, František VLAŠIC, Petr LIŠKUTÍN* STRUKTURNÍ ODEZVA OCELI 15CH2NMFA NA CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ STRUCTURE RESPONSE OF THE STEEL 15CH2NMFA TO CYCLIC LOADING	21
Karel HÁJEK, Valeriya NENAKHOVA PRINCIPY 3D „TOMOGRFIE“ POMOCÍ SYSTÉMU NUMIS PRINCIPLES OF 3D „TOMOGRAPHY“ BY SYSTEM NUMIS	29
Hana HASNÍKOVÁ, Michal KLOIBER, Pavel ZÍMA NOVÁ ZAŘÍZENÍ PRO DIAGNOSTIKU HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ NEW DEVICES FOR DIAGNOSTICS OF HISTORICAL STRUCTURES	37
Bernard KOPEC VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD VE VÝTVARNÉM UMĚNÍ USE OF NON-DESTRUCTIVE METHODS IN THE FINE ARTS	45
Marta KOŘENSKÁ, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Monika MANYCHOVÁ VÝZKUM POUŽITELNOSTI METODY AKUSTICKÉ EMISE PRO DIAGNOSTIKU ŽELEZNIČNÍCH VÝHYBEK AN INVESTIGATION ON THE POTENTIAL APPLICABILITY OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR DEFECTOSCOPY OF TURNOUTS	51
Ivo KUSÁK, Miroslav LUŇÁK, Ladislav CARBOL, Jan MARTINEK, Daniela ŠTEFKOVÁ CHARAKTERISTIKA TEPELNĚ NAMÁHANÝCH VZORKŮ BETONU S OBSAHEM PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A POLYMERNÍHO POJIVA VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI THERMAL STRESS OF CONCRETE SPECIMENS CONTAINING RUBBER GRANULATE AND POLYMER BINDER CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD	59

Radek MATULA, Josef STRYK, Karel POSPÍŠIL	69
VYUŽITÍ GEORADARU PŘI DIAGNOSTICE VOZOVEK NA MOSTECH DIAGNOSTICS OF BRIDGE PAVEMENTS BY GROUND PENETRATING RADAR	
Josef NEUGEBAUER	77
KONTROLA CELISTVOSTI VLOŽENÝCH VÁLCŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ POMOCÍ PENETRAČNÍ METODY. CHECKING THE INTEGRITY OF THE CYLINDER LINERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY PENETRATION METHODS.	
Libor NOHÁL, Lukáš KOMENDA, Pavel MAZAL	83
PŘÍNOS METODY AKUSTICKÉ EMISE PRO ZKOUŠKY KONTAKTNÍ ÚNAVY CONTRIBUTION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD TO ROLLING CONTACT FATIGUE TESTS	
Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Kristýna TIMČAKOVÁ-ŠAMÁRKOVÁ, Peter RYPÁK, Olesia MIKHAILOVA, Pavel ROVNANÍK	89
POKROČILÉ NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ BĚHEM TVRDNUTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÉ STRUSKY ADVANCED NON-DESTRUCTIVE TESTING DURING THE HARDENING OF ALKALI-ACTIVATED SLAG	
Alexandr POPOV	95
KONTROLA POVRCHOVÉ HOMOGENITY NÁPRAV PRO ŽELEZNIČNÍ VOZIDLA METODOU MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU. SURFACE HOMOGENEITY INSPECTION OF AXLES FOR RAILWAY VEHICLES USING MAGNETIC PARTICLE METHOD.	
Břetislav SKRBEK	101
KOMBINOVANÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE DISPERZNÍCH KOVOVÝCH MATERIÁLŮ COMBINED NONDESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY OF DISPERSION METALLIC MATERIALS	
Václav SVOBODA, Peter HRINKO	111
KOMPLEXNÍ DIAGNOSTIKA MOSTNÍCH KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ A URČENÍ JEJICH ŽIVOTNOSTI	
Jaroslav ŠNAJBERK	115
PROVĚŘOVÁNÍ MOŽNOSTÍ ZKOUŠENÍ ZA TEPLA DOKONČENÝCH BEZEŠVÝCH TRUBEK ZE SUPER-DUPLEXNÍHO MATERIÁLU VÍŘIVÝMI PROUDY ZA POUŽITÍ VNITŘNÍHO SNÍMAČE VERIFICATION OF POSSIBILITIES FOR HOT FINISHED SEAMLESS TUBES TESTING MADE FROM DUPLEX MATERIAL BY EDDY CURRENT USING INTERNAL PROBE TECHNIQUE	

Daniela ŠTEFKOVÁ, Michael TUPÝ, Konstantinos SOTIRIADIS, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ and Zdeněk CHOBOLA **129**

VYSOCE TEPLOTNÍ DEGRADACE MALTOVÝCH KOMPOZITŮ OBSAHUJÍCÍCH ČÁSTICE PRYŽE A EVA POLYMERU TESTOVANÝCH POMOCÍ METODY IMPACT- ECHO

HIGH-TEMPERATURE DEGRADATION CONFIRMED BY IMPACT-ECHO METHOD TESTED ON CEMENTATIONS COMPOSITE MATERIALS CONTAINING RUBBER AGGREGATES AND ACRYLIC OR ETHYLENE VINYL ACETATE POLYMER BINDER

Kristýna TIMČAKOVÁ-ŠAMÁRKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA **135**

KONTROLA STAVU ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ S VYUŽITÍM AKUSTICKÉ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ

INSPECTION CONDITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING ACOUSTIC METHOD OF NON DESTRUCTIVE TESTING

Petra TUROŇOVÁ **143**

DEFEKTOSKOPIE PRO KONSTRUKTÉRY A TECHNOLOGY

NONDESTRUCTIVE TESTING FOR ENGINEERS AND TECHNOLOGISTS

František VLAŠIC, Denisa BÁRTKOVÁ, Pavel MAZAL **147**

HODNOCENÍ RANÝCH STÁDIÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE V OBLASTI ENERGETICKÉHO PRŮMYSLU

ASSESSMENT OF EARLY FATIGUE OF POWER PLANT MATERIAL USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

AUTHORS INDEX / INDEX AUTORŮ

Carbol L.	1, 59	Nenakchova V.	29
Chobola Z.	129, 135	Nohál L.	83
Bártková D.	147	Neugebauer J.	77
Fiala J.	9, 21	Pazdera L.	51, 89
Hájek K.	29	Popov A.	95
Hasníkové H.	37	Pospíšil K.	69
Hrinko P.	111	Rovnaník P.	89
Kloiber M.	37	Rypák P.	89
Kolega M.	21	Timčaková K.	89, 135
Komenda L.	83	Skrbek B.	101
Kopec B.	45	Sotiriadis K.	129
Kořenská M.	51	Stryk J.	69
Kusák I.	1, 59	Svoboda V.	111
Liškutín P.	21,	Šnajberk J.	115
Luňák M.	59	Štefková D.	59, 129
Manychová M.	51	Topolář L.	51, 89
Martinek J.	1, 59	Turoňová P.	143
Matula R.	69	Tupý M.	129
Mazal P.	21, 83, 147	Vlašic F.	21, 147
Mikhailova O.	89	Zíma P.	37

PAPERS / PŘÍSPĚVKY

NOTES / POZNÁMKY



MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ METODOU MLS MEASUREMENT OF MATERIAL PROPERTIES BY MLS METHOD

Ladislav CARBOL *, Ivo KUSÁK *, Jan MARTINEK *

* VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky, Žižkova 17, 602 00 Brno

Contact e-mail: carbol.l@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Tento článek popisuje srovnání dvou akustických nedestruktivních metod pro měření Youngova modulu osově vibrující tyče. První metoda je klasická impact-echo frekvenční analýza a druhá metoda je založena na MLS signálu. Obě metody poskytují srovnatelné výsledky, ale buzení bílým šumem se zdá být citlivější a může odhalit vyšší harmonické frekvence, které by jinak byly tlumené velmi rychle. Další výhodou testování MLS je možnost kontinuálního automatizovaného měření. Na druhou stranu, piezoměnič připevněný ke vzorku představuje přidanou hmotu, která snižuje naměřené frekvence.

Klíčová slova: *Impact-echo, Youngův modul pružnosti, MLS, impulsní odezva, lineární časově invariantní systém*

Abstract

This paper describes a comparison of two acoustic non-destructive methods for measurement of Young's modulus of axially vibrating bars made of various metals. The first method is a classical impact-echo with frequency analysis and the second method is based on MLS signal. Both methods give comparable results but excitation by white noise appears to be more sensitive and can reveal higher harmonics which would otherwise be damped very quickly. Another advantage of white noise is the possibility of continuous automated measurement. On the other hand, the transducer fixed at the specimen presents an added mass which lowers measured frequencies.

Key words: *Impact-echo, Young modulus, MLS, Impulse response, Linear time-invariant system*

1. Úvod

Podélné kmitání tenké tyče lze použít pro měření Youngova modulu. Myšlenka metody je založena na dvou rovnicích. První z nich se vztahuje k rychlosti zvuku podélných vln, které mohou být vyjádřeny jako

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Druhá rovnice je založena na vztahu vlnové délky k délce vibrující tyče. Vyvolané podélné vlny v konečně dlouhé tyči se odráží od volných konců tyče. Výsledkem jsou stojaté vlny. Tvar vibrací je superpozicí nekonečně mnoha vibračních způsobů, zatímco základní režim s nejnižší frekvencí má poloviční vlnovou délku odpovídající délce tyče:

$$\lambda / 2 = l \quad (2)$$

Tyto dvě rovnice spolu se skutečností, že $c = \lambda f$ nám dávají vzorec pro Youngův modul:

$$E = 4\rho(fl)^2 \quad (3)$$

Mělo by být poznamenáno, že to platí i pro vyšší harmonické frekvence, které jsou přítomny v akustickém spektru. Tyto frekvence ale musí být poděleny řádem každé harmonické frekvence n :

$$E = 4\rho\left(\frac{f_n}{n}l\right)^2 \quad (4)$$

Teoreticky Youngův modul lze vypočítat z libovolného lokálního maxima odpovídajícího vyšší harmonické frekvenci ve frekvenčním spektru. Nicméně měření ukazují, že rezonanční frekvence nemají přesně stejný frekvenční interval. Z tohoto důvodu, pouze základní frekvence se bere v úvahu při výpočtu Youngova modulu a přítomnosti vyšších harmonických jen potvrzení správnosti měření.

2. Experiment

Pokud je testovaný vzorek (DUT) vybuzen, je výsledkem impulzní odezva systému. Ve frekvenčním spektru mohou být spatřeny píky odpovídající základní frekvenci a vyšším harmonickým frekvencím. Pouze materiály, které jsou zcela izotropní, se budou chovat v souladu s popsanou teorií. Takže i jejich harmonické frekvence budou distribuovány se stejnou roztečí. Dále je žádoucí, aby DUT měl co nejmenší koeficient útlumu, čímž se zvýší doba po kterou se dá signál zaznamenávat. Tyto vlastnosti splňuje například ocelová tyč, která byla vybrána jako DUT.

Ocelová tyč použita jako DUT, měla plný kruhový průřez o průměru 7,99 mm a délce 400 mm. Vypočtená hustota byla 7778,2 kg / m³. Přesná hodnota Youngova modulu pro tento typ oceli není známá, ale měly by se blížit 210 GPa.

2.1. Postup měření

Tento článek porovnává výsledky různých metod. Impact-Echo (IE) metodu se dvěma různými senzory a metodu testování akustickým signálem, konkrétně sekvence maximální délky (MLS) s různými druhy spojení budiče a vzorku. Aby byly obě metody srovnatelné zařízení pro sběr dat (DAQ) a snímač MIDI byly stejné pro obě metody. Vzorkování bylo stanoveno na nejvyšší dostupné limity DAQ. Pro NI PCI 6251 kartu, to je 1,25 MS/s 16-bitovým rozlišením.

2.1.1. Impact-Echo

Impact-Echo metoda je dobře popsána běžně používaná v oblasti nedestruktivního zkoušení (NDT) [3] [4]. Fyzikální princip této metody je vybuzení ve vzorku Diracovy delta funkce a pak následuje přímý záznam impulsní odezvy systému (IR). V případě metody IE se používá kladívko k vybuzení systému. Přes nespornou jednoduchost a extrémní přesností IE metody, protože není nutné žádné zpracování signálu, tato metoda má své meze. Impulzní odezvy systému lze dosáhnout tímto způsobem pouze u (LTI) systémů, proto musí být síla počátečního nárazu omezena, jinak by nelineární účinky zkreslovaly výsledek.

2.1.2. Sekvence maximální délky

Matematické vlastnosti, jako je bílé kmitočtové spektrum a opakovatelnost, dělají z MLS vhodný budící signál. Existuje nekonečně mnoho sekvencí maximální délky, ale my potřebujeme jen jednu, která se neustále opakuje. [5] Tímto způsobem není nutné zaznamenávat signál na začátku sekvence, ale kdekoliv, pokud je délka záznamu stejná, jako je délka sekvence. Přesné časování je naprosto zásadní, a proto musí být použit stejný časovač jak pro generování, tak pro záznam signálu. To není omezujícím faktorem, ale spíše výhodou, protože signál je naprosto opakovatelný a protože musí být synchronizován, časové průměrování může být použito pro zlepšení poměru signálu k šumu (SNR). V případě, že je vzorkovací frekvence celočíselným násobkem rychlosti generování, MLS se chová tak, že je více energie posunuto směrem k nižším frekvenčním pásmům.

V této experimentální sestavě se využil D/A převodník zmíněné PCI karty pro generování sekvence a A/D převodník pro příjem signálu. Generovaná posloupnost 0 V a 1 V pak byla zesílena na 0 V a 55 V [6]. Piezoelektrický disk byl spojen s DUT pomocí včelího vosku nebo Sono gelu. Zaznamenaný signál pak byl časově zprůměrován a vynásoben filtrem zohledňujícím přenosovou funkci vysílač-přijímač [7].

2.1.3. Senzory a budič

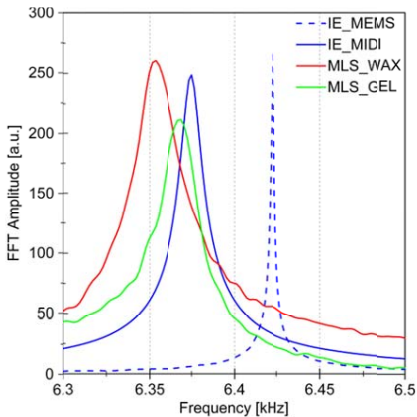
Metoda IE byla měřena mikrofonním čidlem přes vzduch ADMP401 (MEMS) s vnitřním předzesilovačem. Tento všesměrový mikrofon byl umístěn blízko DUT na straně protilehlé nárazu. Metody IE i MLS byly také zaznamenány s piezoelektrickým snímačem DAKEL MIDI spojeny se vzorkem pomocí včelího vosku. Tento snímač je malé velikosti (6,5 mm) ve srovnání s DUT, nicméně se měl významný vliv na impulzní odezvu systému. MLS byla transformována na mechanické vibrace pomocí piezoelektrického disku s rezonanční frekvencí 40 kHz. Budič je 2,5 mm silný a má 50 mm v průměru.

3. Výsledky

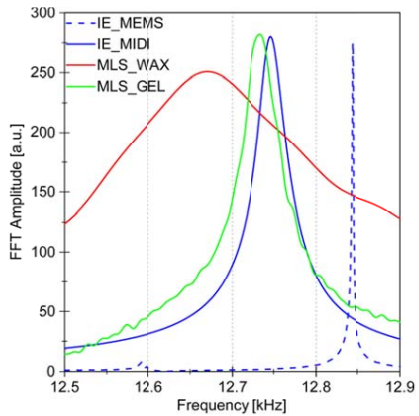
Nejprve se zaměříme na porovnání výsledků IE metody. Obr. 1 až 5 znázorňují základní frekvenci a 4 vyšší harmonické frekvence. Modrá přerušovaná čára odpovídá bezkontaktnímu čidlu, tudíž může být považována za referenční hodnotu pro všechny způsoby. Amplitudy všech prezentovaných píků na obrázcích byly kvůli zřetelnosti normalizovány. Z hlediska Youngova modulu je nejcennější informací pozice základní frekvence Obr. 1. Přesné hodnoty frekvence jsou uvedeny v tab. 1. Pro nás je důležité, že frekvenční vrcholy získané MEMS snímačem jsou vždy ostřejší než se snímačem MIDI. Také všechny vrcholy jsou posunuty směrem k nižším frekvencím o cca 1% z nominální hodnoty. Za účelem vysvětlení tohoto jevu

byl IE způsob opakován s MIDI snímačem spojeným s DUT a údaje byly měřeny pomocí bezkontaktního MEMS senzoru. Píky v tomto sestavení byly nalezeny na téměř stejných místech (0,05% posun k nižší frekvenci). To znamená, že MIDI snímač měří správně, ale vzhledem k vyšší hmotnosti snímače, měření se zkrusí. Vzhledem k tomu, že i MLS metoda využívá stejný MIDI snímač, posun piků k nižším frekvencím je pochopitelný. Ve skutečnosti pozice vrcholů IE_MIDI a MLS_GEL je ve všech případech velmi blízká. Překvapivé je, že poloha základní frekvence pro voskem spojeného budiče a vzorku je také velmi blízká k IE_MIDI, přestože hmotnost budiče je 30 krát větší než hmotnost MIDI snímače.

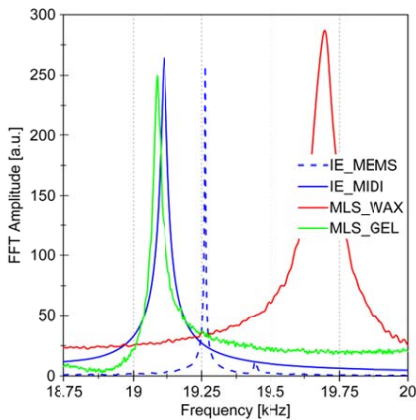
Přidaná hmotnost je velmi problematická. Bohužel vzduchem spojený senzor MEMS nedokáže zachytit frekvence vyšší než 50 kHz. Tato vlastnost činí čidlo nepoužitelné pro testování MLS metodou, kde jsou vrcholy distribuovány až Nyquistově frekvenci.



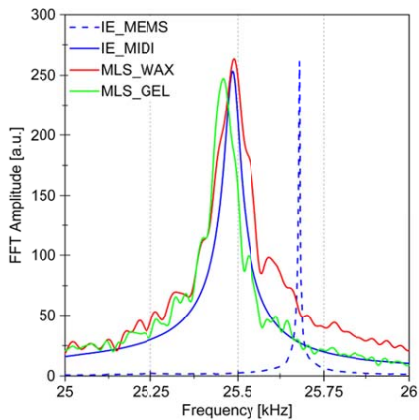
Obr. 1. Základní frekvence
Fig. 1. Fundamental frequency



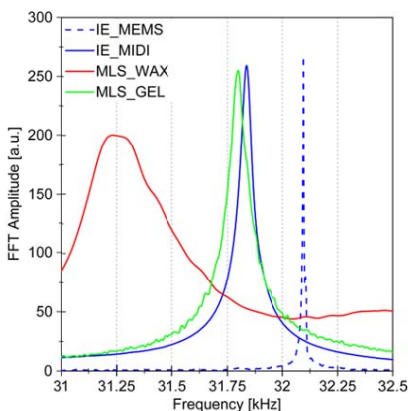
Obr. 2. První harmonická frekvence
Fig. 2. First harmonic frequency



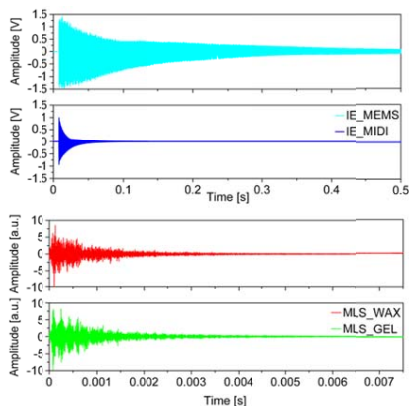
Obr. 3. Druhá harmonická frekvence
Fig. 3. Second harmonic frequency



Obr. 4. Třetí harmonická frekvence
Fig. 4. Third harmonic frequency



Obr. 5. Čtvrtá harmonická frekvence
Fig. 5. Fourth harmonic frequency



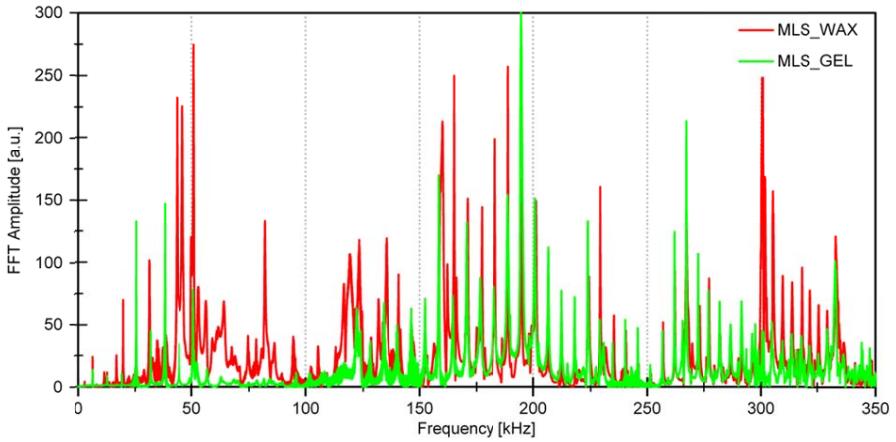
Obr. 6. Délka impulzní odezvy
Fig. 6. Impulse response length

Tab. 1. Pozice vrcholů

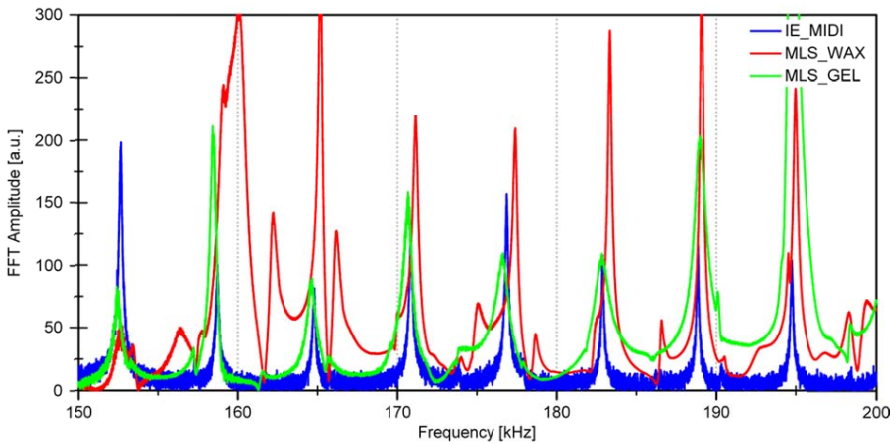
Tab. 1. Peak positions

n	MLS_WAX	diff.[%]	MLS_GEL	diff.[%]	IE_MIDI	diff.[%]	IE_MEMS
0	6,354	-1,07	6,367	-0,87	6,375	-0,74	6,423
1	12,661	-1,42	12,732	-0,87	12,747	-0,75	12,843
2	19,696	2,25	19,085	-0,92	19,111	-0,79	19,263
3	25,488	-0,75	25,456	-0,87	25,486	-0,76	25,680
4	31,252	-2,62	31,796	-0,93	31,839	-0,80	32,094
5	NA		38,130	-0,9729	38,177	-0,8529	38,505
6	NA		44,442	-1,041	44,475	-0,9673	44,909
7	50,954	-0,80	50,698	-1,30	50,739	-1,22	51,364
8	56,348	-2,48	56,886	-1,55	56,967	-1,41	57,782
9	64,069	-0,20	62,848	-2,10	62,808	-2,16	64,198
10	NA		NA		NA		70,613
11	74,579	-3,17	74,578	-3,17	74,727	-2,98	77,018
12	81,926	-1,85	81,497	-2,36	NA		83,466
13	NA		90,095	0,24	90,095	0,24	89,881
14	NA		95,784	-0,53	96,041	-0,27	96,297
15	NA		101,811	-0,88	101,959	-0,73	102,712

Dále se zaměříme na způsoby spojení budiče a vzorku pro metodu MLS. Na Obr. 7 jsou prezentovány ostré vrcholky vyšších harmonických frekvencí. V některých případech je jejich pozice invariantní na způsobu spojení budiče a vzorku. Obr. 8 ukazuje, že vrcholy IE a MLS metody jsou na obdobných pozicích. Bohužel, tento jev může být ověřen pouze v překrývající se oblasti obou metod. Problém je v tom, že IE metodou nejsme schopni generovat kmitočty vyšší než 160 kHz (píky jsou ztraceny v šumu) Obr. 8. Na druhé stranu MLS píky na frekvencích pod 160 kHz jsou většinou rozechvělé a vyhlazení okny se musí použít. Nicméně píky vyšších frekvencí jsou ostré a jejich distribuce naznačuje určitý vzor. Některé další detaily lze vidět v Tab. 2.



Obr. 7. Frekvenční spektrum
Fig. 7. Frequency spectrum



Obr. 8. Pozice vrcholů pro IE a MLS metodu
Fig. 8. Peak positions for IE and MLS method

Tab. 2. Materiálové vlastnosti
Tab. 2. Method properties

	MLS WAX	MLS GEL	IE MIDI	IE MEMS
Number of samples [-]	655k	655k	800k	2M
Length of IR [ms]	4	7	100	1139
Peak-to-peak amplitude [V]	2,21	1,03	2,07	2,49
Maximum readable peak [kHz]	625 (fs/2)	625 (fs/2)	89	277
Fundamental frequency peak [kHz]	6,354	6,367	6,375	6,423
Calculated Young's modulus [GPa]	200,7	201,5	202,0	205,1

4. Závěr

V tomto dokumentu jsou popsány dvě metody pro stanovení základní frekvence izotropního vzorku. Byly použity různé snímače a způsoby spojení a jejich výhody byly prezentovány. Hlavním závěrem této studie je, že MLS signál je schopen vybudit vzorek a po následném zpracování signál obsahuje více informací než IE metodou. Bohužel většina těchto informací se nachází v oblasti vysokofrekvenčního spektra, na rozdíl od metody IE. Tím je obtížné obě metody srovnávat. Možná, že se časem ukáže jiný typ snímače jako efektivnější pro generování nižších frekvencí, a tak bude měření přesnější.

MLS metoda je vhodným nástrojem pro měření Youngůva modulu. Hodnota základní frekvence zjištěná MLS s gelovou vazbou snímače a Impact-echo metody se stejným snímačem MIDI se lišily pouze o 0,13%.

Jelikož žádná z metod uvedených v tomto článku může být upřednostněna před jinou, Youngův modul pružnosti oceli je vypočítán ze všech používaných přístupů a je v intervalu

$$E = (203 \pm 2) \text{ GPa}$$

Poděkování

Tento dokument byl vypracován s finanční podpory z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace Evropské unie, č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti Regionálního centra AdMaS "Advanced Materials, Structures and Technologies".

Tento dokument je podporován Grantovou agenturou České republiky - projekt SV RC projektu: FAST - J -14 - 2260.

Literatura

1. D. Hutchins, P. Burrascano, L. Davis, S. Laureti, and M. Ricci. "Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation," *Ultrasonics* 2014.
2. T. Niederdränk. "Maximum length sequences in non-destructive material testing: application of piezoelectric transducers and effects of time variances," *Ultrasonics*, vol. 35, issue 3, pp. 195-203, 1997.
3. J. Wang, T. Chang, Bo-Tsun Chen, and H. Wang. "Determination of Poisson's ratio of solid circular rods by impact-echo method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, issue 5, pp. 1059-1067, 2012.
4. X. Lu, Q. Sun, W. Feng, and J. Tian. "Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 231-239, 2013.
5. L. Carbol, and J. Martinek, "Deterministic white noise generator based on microcontroller," in 11th workshop ndt 2013 non-destructive testing in engineering practice, Brno: Akademické nakladatelství cerm, 2013, pp. 72-80.
6. L. Svilainis, A. Chaziachmetovas, and V. Dumbrava. "Efficient high voltage pulser for piezoelectric air coupled transducer," *Ultrasonics*, vol. 53, issue 1, pp. 225-231, 2013.
7. A. Potchinkov. "Measurement of frequency responses of nonlinearly distorted SISO systems in noisy environments with generalized parameter frequency response estimators," *Signal Processing*, vol. 86, issue 8, pp. 2094-2114, 2006.



NÍZKOTEPLTNÍ RELAXACE A SEKUNDÁRNÍ STRUKTURA MATERIÁLU LOW-TEMPERATURE RELAXATION AND SECONDARY MATERIAL'S STRUCTURE

Jaroslav FIALA

Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie- Výzkumné
centrum

Abstrakt

Relaxace, tak jak se chápe ve fyzikální chemii, je proces, jenž začíná nastavením vnějších podmínek systému a končí za nekonečně dlouhou dobu, když systém nabude rovnovážného stavu. Relaxace určuje (zbytkovou) životnost konstrukcí a jejich dílců: to, co se snažíme odhadnout jejich nedestruktivním testováním. Potíž je v tom, že relaxace probíhá neustále, je věčná, zatímco naše možnosti jsou pouze časné. Proto zkoušení relaxace urychlujeme: provádíme je v dobré víře za teplot vyšších než jsou teploty provozní- a to je nezdědkou příčinou toho, že naše odhady zbytkové životnosti jsou bohužel špatné. Mechanismus relaxace totiž závisí na teplotě. Za nižších teplot dochází k subtilní přestavbě vnitřní struktury materiálu: na koloidní úrovni vzniká tzv. sekundární struktura, v níž relaxace probíhá mnohem rychleji než za teplot vyšších. V příspěvku uvádíme řadu příkladů z průmyslové praxe i z archeologie, které dokumentují velkou rychlost relaxačních procesů za "pokojové" teploty. Vysvětlujeme také, jak nízkoteplotní relaxaci zpomalit (jak zvýšit strukturní stabilitu materiálu a prodloužit jeho životnost) tím, že zabráníme vzniku sekundární (koloidní) struktury mechanochemickou cestou.

Klíčová slova: strukturní stabilita, spontánní strukturalizace, entropická náročnost

Abstract

Relaxation, as comprehend in physical chemistry, is a process which starts by adjusting outside conditions and finishes after an indefinite time lag when the system under consideration attains an equilibrium state. Relaxation defines remaining service lifetime of constructions and their elements: which we try to estimate by means of non-destructive testing. Problem consists in that the relaxation keeps going constantly, for all future time, while human possibilities are limited. That is why we accelerate the relaxation testing: perform it in good faith at temperatures that are higher than the service temperatures-which quite often lies at the root of the fact that our estimates of the remaining service lifetime are wrong. The thing is that the relaxation mechanism depends on temperature. At lower temperatures, interna! arrangement of atoms in material is slightly rebuilt: new subtle structural features appear, forming on colloidal scale the so called secondary structure in which the relaxation proceeds much more quickly than in the high-temperature, primary structure. A number of examples from both industry and archeology is quoted, which demonstrate the great velocity of relaxation process at ambient temperature. It is also explained how to slow down the low-temperature relaxation (how to raise the materials structure stability and extend its service lifetime), preventing formation of secondary (colloidal) structure by mechanochemical measures.

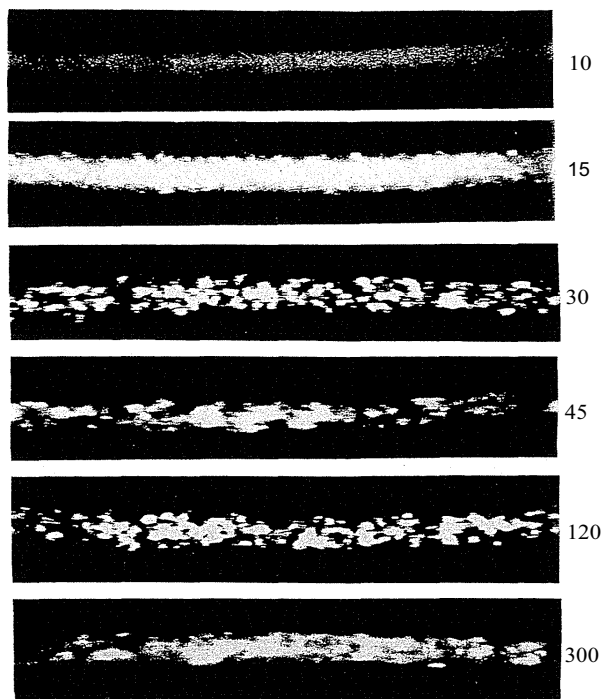
Keywords: stability of structure, spontaneous structuralization, entropy demanding

1. Úvod

Ve strojním inženýrství se relaxací rozumí postupný pomalý pokles napětí v tělese, trvale zatěženém vnější silou, při zachování jeho rozměrů. Relaxací napětí ve šroubech na přírubách parních turbin nebo potrubí tepelných medií může docházet k netěsnosti spojů, úniku tlakového media atp. Rychlost relaxace závisí na složení materiálu, jeho předchozím zpracování resp. režimu exploatace a zejména na teplotě, se kterou roste. V některých případech je však relaxace napětí velmi rychlá i za nízkých ("pokojoyých") teplot. V polovině sedmdesátých let se např. zjistilo, že dílce z předpjatého betonu ztrácejí vložené napětí již po roce. V každém větším strojírenském závodě registrují případy, kdy mimo očekávání došlo k poklesu odolnosti vůči nízkoteplotní relaxaci napětí, aniž se následně zjistilo co toho bylo příčinou. Ve fyzikální chemii se pojmu relaxace přisuzuje mnohem obecnější význam, který souvisí s definicí rovnovážného stavu systému. Jako rovnovážný se chápe takový stav, do kterého systém dospěje za nekonečně dlouhou dobu po instalaci jeho vnějších (a nadále pak konstantních) podmínek a právě proces, kterým se tak děje, nazýváme relaxací. Relaxace napětí je tedy zvláštním případem toho, co je označováno jako relaxace ve fyzikální chemii. S hlediska fyzikální chemie nás zajímá nejen jaké je v uvažovaném tělese napětí, ale také jak jsou v něm uspořádány všechny jeho atomy, neboť to určuje odezvu tělesa na jakýkoli vnější podnět, neboli jeho stav. Relaxací jsou třeba procesy, ke kterým dochází v materiálu vysokotlaké skříňové turbíny od okamžiku, kdy ji smontujeme a turbínu uvedeme do chodu: za provozní teploty kovová matrice často zhrubne [1] a rozláhají se karbidické reakce podle příslušného "rovnovážného stavového diagramu" materiálu, z něhož je skříň zhotovena. Ta slova "rovnovážný stavový diagram" jsme dali do uvozovek proto, že nikdy nikdo žádný rovnovážný stavový diagram nezměřil; neboť "rovnovážný" je podle definice stav, který se konstituuje nekonečně dlouho... To, co nazýváme rovnovážný stavový diagram, je ve skutečnosti "momentní snímek" procesu relaxace. Ve Škodových závodech jsme měli příležitost sledovat fázové složení (karbidických izolátů ve) žárupevných ocelí v průběhu jejich dvaceti- i víceleté služby za vysokých teplot v turbinách. Pomocí rrtg difrakce jsme například v oceli ČSN 15123 (0,1% C; 0,6% Cr; 0,45% Mo; 0,25% V), z níž byl vyroben parovod, našli při instalaci pouze dvě karbidické fáze, totiž Fe_3C a $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, ale po 100 000 hodinách provozu při 550°C už čtyři různé karbidy, jmenovitě Fe_3C , V_4C_3 , $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ a $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$, což je v hlubokém nesouladu s publikovanými stavovými diagramy. (Z nichž pravděpodobně žádný nebyl měřen při teplotách, za kterých pracují turbíny, složení po složení, v průběhu dvaceti let; to by stálo neskutečné peníze.) A v řadě případů není relaxační proces monotonní [2], takže funkční závislost stavu systému na čase je víceznačná [3]. Demonstrují to rentgenové difraktogramy na obr.1, ze kterého je patrné, že disperze (mechanicky nezatěženého) vzorku (nelegované velmi měkké oceli) se v průběhu času rytmicky měnila [4]. Relaxace je přechod z výchozího stavu s vyšším termodynamickým potenciálem (např. energií) do stavu konečného, s nižším termodynamickým potenciálem (obr. 2). Doba t , za kterou k tomu přechodu dojde (a za předpokladu, že konečný stav je stavem mezním, se rovná životnosti), je v případě teplotní aktivace nepřímo, a to exponenciálně úměrná teplotě T

$$t = \exp(E_0/RT), \quad (1)$$

kde E_0 je aktivací energie a R plynová konstanta. Čím nižší je teplota, tím je relaxace pomalejší a životnost delší. Z úsporných důvodů proto rychlost relaxace určujeme za co nejvyšších teplot a korekci (extrapolaci) na skutečnou (nízkou) reakční, tj. provozní teplotu pak provádíme (za předpokladu ekvivalence teploty a času [5]) pomocí vzorce (1). Jak se píše



Obr.1. Střídavé hrubnutí a zjemňování struktury velmi měkké uhlíkové oceli během žíhání na 800°C bez mechanického zatížení, jak se jeví na laterálním (azimutálním) profilu rentgenové difrakční linie (211) železa α ; vpravo od difraktogramů je uvedena doba žíhání v sekundách.

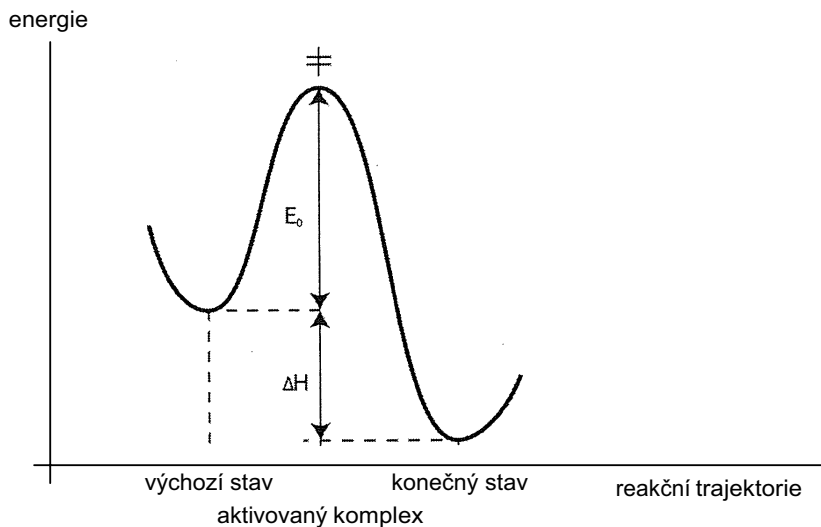
Fig.1. Alternating coarsening and refinement of structure of a very mild carbon steel during its heating at 800°C without mechanical load, as is seen on a lateral (azimuthal) profile of the (211) x-ray diffraction line of iron α ; the heat time in seconds is given on the right-hand side of diffraction patterns.

v odkazu [6]: "... designers are unable to wait for years to obtain design data needed in creep failure analysis. Therefore, certain useful techniques have been developed for approximating long-term creep behavior based on a series of short-term tests ... The thermal acceleration method involves laboratory testing at temperatures much higher than the actual service temperature expected". Bohužel se leckdy ukazuje, že takto vypočítaná (odhadnutá) rychlost relaxace je mnohem menší než rychlost skutečně za nízké teploty změřená. Že tomu tak je, může být velmi nebezpečné tehdy, když relaxace určuje životnost a proč tomu tak je, v tom právě spočívá enigma nízkoteplotní relaxace. Někteří začali pochybovat o univerzální platnosti vzorce (1), zejména o jeho platnosti za nízkých teplot (řekněme 15°C, tedy průměrné teploty na povrchu Země). Což se obtížně dokazuje, protože za takové teploty je rychlost relaxace nízká a obtížně se měří. Posléze se potvrdilo, že vzorec (1) platí obecně na základě analýzy (disperze) mozaikové struktury archeologických nálezů (v případě, o kterém pojednává odkaz [7], se jednalo o keltský meč starý 2400 let) a problém že spočívá v nesprávné hodnotě dosazované za E_0 (viz dále). Tento poznatek má velký význam nejen

teoretický, ale i praktický, neboť je východiskem pro významné zpřesnění odhadů zbytkové životnosti dílců a konstrukcí.

2. Oscilace

Relaxační procesy mají leckdy oscilační charakter (obr. 3). Viz třeba difraktogramy na obr.1, které ukazují jak se struktura (měkké uhlíkové oceli) při žhání na 800°C střídavě zjemňuje a hrubne. Hnací silou hrubnutí agregátu je snižování jeho mezipovrchové energie. Ale během růstu krystalů se v nich hromadí parakrystalické distorze [9], které zvyšují energii objemovou, což posléze vyvolá rozpad, zjemnění agregátní struktury, jejíž velká povrchová energie nastartuje opět hrubnutí atd. Energie rozhraní a parakrystalické distorze pohánějí tento bistabilní proces jako setrvačná a vratná síla nepokoj, který se posléze zastaví (vyústí v rovnovážný stav) disipací, tj. konverzí těchto ušlechtilých energií na energii teplotních kmitů krystalové mříže, jež působí jako síla brzdná. Pokud ovšem není do tohoto hodinového mikrostrukturního mechanismu relaxujícího tělesa vnášena zvětšící neustále další a další energie díky jeho anelasticitě cyklickým zatěžováním-jako budící síla hodinového pera. Pak se ovšem nejedná o rovnovážný stav zatěžovaného tělesa, ale systému zatěžované těleso-

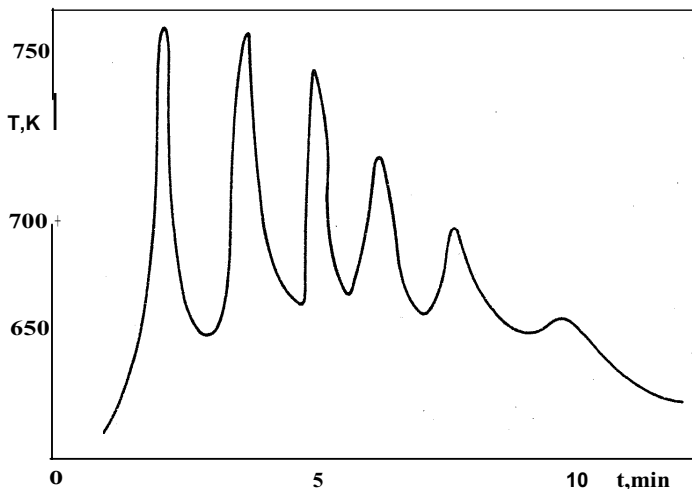


Obr. 2. Energetický profil reakční cesty (relaxace). Reakční teplo H je termodynamickou charakteristikou relaxace, určuje její afinitu; aktivační energie E_0 je kinetickou charakteristikou relaxace, určuje její rychlost.

Fig. 2. Energy profile of the reaction path (relaxation). Reaction heat H is a thermodynamic characteristic of the relaxation, defining its affinity; activation energy E_0 is a kinetic characteristic of the relaxation, defining its rate.

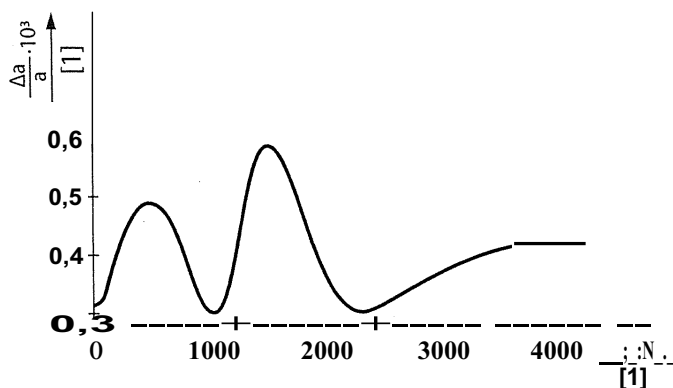
pulsátor; systému, který může být ze své dynamicky stabilní rovnováhy vychýlen třeba osudovou chybou při opakované přestavbě struktury z hrubé na jemnou a z jemné na hrubou (obr. 4), když v ní vznikne nadkritická necelistvost a následně dojde k nestabilnímu únavovému lomu [11]. K určení rychlosti relaxace a potažmo odhadu zbytkové životnosti

dílce nestačí v případě oscilací informace o jeho momentálním stavu: dílec musí být monitorován (Geho struktura sledována) po celou dobu trvání exploatace.



Obr.3. Termochemické oscilace – studený plamen propanu. Oxidaci plynných uhlovodíků často doprovázejí periodické světelné a tepelné impulzy, emitované při opakovaných nárůstech zvýšené aktivity [8].

Fig.3. Thermochemical oscillation – cold flame of propane. Oxidation of gaseous hydrocarbons is frequently accompanied by periodic light and heat bursts at repeating activity maxima [8].

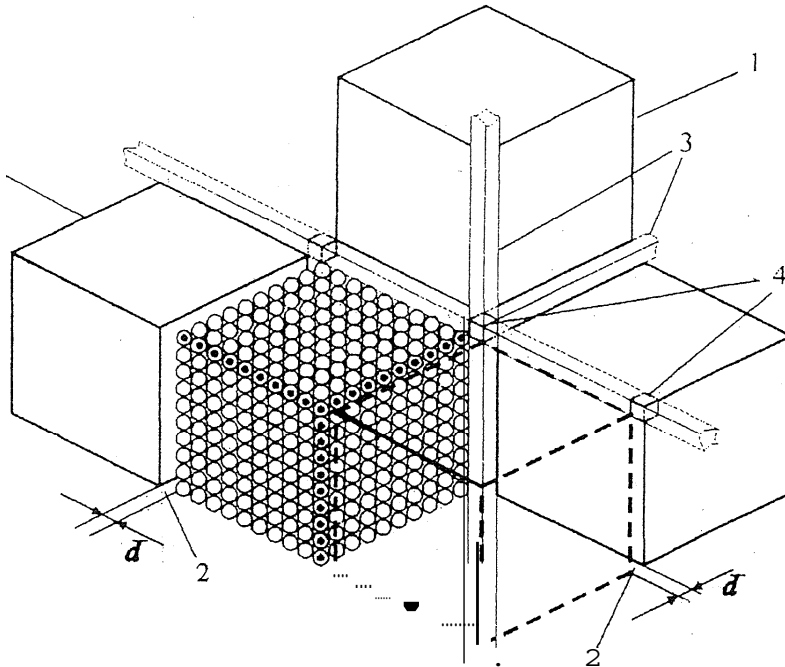


Obr.4. Difrakčně koherentní bloky mozaikové struktury (krystalky) se vlivem cyklického zatěžování střídavě zmenšují a zvětšují. Na horizontální ose je uveden počet zátěžných cyklů N a na vertikální ose hodnota veličiny $\Delta a/a$, nepřímě úměrné velikosti mozaikových bloků [10].

Fig.4. Diffraction coherent blocks of mosaic structure (crystallites) alternately decrease and grow under cyclic loading. The number N of loading cycles is given on the horizontal axis and the value of $\Delta a/a$, indirectly proportional to the size of mosaic blocks, is stated on the vertical axis [10].

3. Chaos

Oscilace relaxačních procesů nejsou vždy periodické. A některé relaxační procesy jsou monotónní, byť probíhají z různých, často obtížně rozpoznatelných příčin, velmi odlišnou rychlostí. (Tak třeba difuze zinku probíhá v mosazi při pokojové teplotě zpravidla milionkrát pomaleji než za červeného žáru. Jestliže však ten vzorek mosazi přebrousíme, bude v něm



Obr.5. Schematické znázornění sekundární struktury krystalu a komponent jeho T-prostoru, v němž jsou koncentrovány defekty (odchylky od ideální) struktury krystalu:

- 1 – bloky ochuzené o strukturální defekty;
- 2 – plošné komponenty T-prostoru;
- 3 – lineární komponenty T-prostoru;
- 4 – uzly (nulrozměrné komponenty) T-prostoru;
- d – tloušťka plošné komponenty T-prostoru.

Fig.5. Diagrammatic representation of the secondary structure of a crystal and the components of its T-space, in which defects (deviations from the ideal) crystal structure are condensed:

- 1 – blocks deprived of structural defects;
- 2 – planar components of the T-space;
- 3 – linear components of the T-space;
- 4 – nodes (zero-dimensional components) of the T-space;
- d – width of a planar component of the T-space.

zinek při 15°C difundovat stejně rychle jako difundoval v nepřebroušeném vzorku při 850°C.) Je to prostě chaos. Ale to, co se nám při povrchním pohledu zvnějška jeví jako nahodilé, má svůj vnitřní, skrytý řád; podobně jako bludné trajektorie planet na nebeské báni maskují exaktní Keplerovy pohybové zákony ("l'essentiel est invisible pour les yeux" [12]). Pravda, najít zákonitý mechanismus zkoumaného chaotického procesu nebývá jednoduché. Metody jak na to jít se začaly profilovat coby renomovaná vědecká disciplína – teorie chaosu – až v sedmdesátých letech minulého století [13, 14]. Jak velice užitečné jest zkoumání chaotických procesů ve fyzikální metalurgii a materiálovém inženýrství dává tušit velké množství nerovnovážných fází, které nenajdeme (a principiálně nemůžeme najít) v rovnovážných stavových diagramech. A jsou to fáze, které mají velký inženýrský význam: martenzit (nejen v systému Fe-C), Guinierovy-Prestonovy zóny v řadě systémů (z nichž nejznámější jest Al-Cu) nebo nerovnovážné fáze, jež vznikají, proměňují se a mizí v průběhu nízkoteplotní relaxace (devitrifikace) skel (silikátových, fosfátových, borátových, kovových, atd.) [15]. Knížka White et al. to komentuje slovy "dočasný nepořádek (chaos) vede k ustavení pořádku na dlouhou dobu" [16].

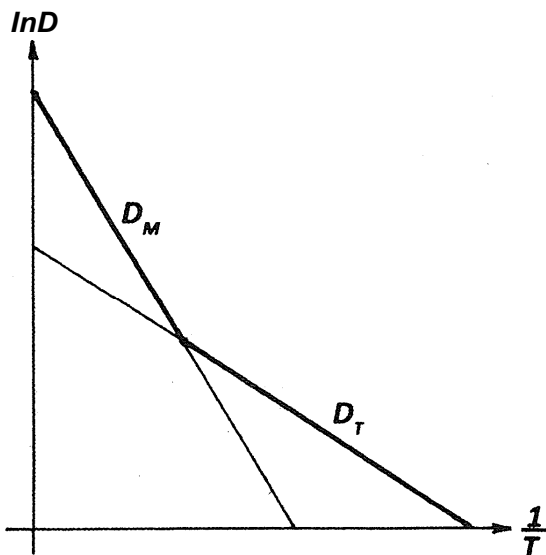
4. Sekundární struktura

Klíčem k parametrizaci (matematického) modelu chaotických procesů je jejich fyzikálně-chemická (hmotná) podstata. Materiální podstatou většiny nízkoteplotních relaxačních procesů v pevných látkách je jejich sekundární struktura [17, 18]. Defekty ideální krystalové struktury, např. dislokace, vakance, intersticiály nebo atomy substitučních příměsí jsou spojeny se zvýšením energie pevné látky. To je pak hnací silou jejich eliminace resp. redistribuce, které zvýšení energie, jež je se strukturálními defekty spojené, redukuje. Děje se tak sdužením defektů v lineární, plošné nebo skeletální útvary, tedy procesem, který označujeme jako spontánní strukturalizace [19].

Sponání strukturalizaci vzniká na bázi "primární" struktury, definované rozložením atomů v ideálním krystalu, jakási hyperstruktura (nadstruktura) či chcete-li "sekundární" struktura definovaná rozložením defektů té ideální struktury. Každý strukturální defekt, řekněme vysunutí atomu z jeho regulární polohy, vyvolá totiž ve svém okolí vysunutí celé řady dalších atomů z jejich regulárních poloh. Pokud jsou dva strukturální defekty daleko od sebe, vysunutí atomů v jejich okolí se vzájemně neovlivňují a energie takových dvou strukturálních defektů se počítá. Jsou-li však takové dva strukturální defekty blízko u sebe, pak posunutí atomů v sousedství jednoho defektu ovlivní i posunutí atomů v okolí druhého defektu. A při vhodné konstelaci těchto dvou (blízkých) defektů bude jejich celková energie menší než dvojnásobek energie jednoho z nich. Snaha o snížení energie vede právě k takové "vhodné konstelaci", již se energie soustavy (v tomto případě "soustavou" rozumíme ideální krystal se dvěma defekty) minimalizuje. Předpokladem minimalizace energie krystalu s defekty je nakupení, sblížení těchto defektů do jakýchsi "koncentračních táborů", segregacních zón. Příčinou toho je pak krátký dosah sil meziatomového působení, které ubývá až šestou až dvanáctou mocninou jejich vzdálenosti. Aby se dva strukturální defekty mohly ovlivňovat, musí být blízko sebe. Anizotropie vazebních sil, podmíněná rozložením elektronových orbitalů a projevující se například v anizotropii ideální krystalové struktury, určuje také charakter a potažmo anizotropii resp. dimenzionalitu sekundární struktury krystalu.

Segregací defektů krystalové struktury v lineárních, plošných resp. skeletálních zónách dochází k "vyčištění" krystalové matrix, vyplňující prostor mezi těmito zónami, od defektů. Fakticky tím dochází ke zvětšení topologicky souvislých oblastí ideální krystalové struktury. To je velmi důležité v případě, že strukturálních defektů je mnoho a při jejich rovnoměrném rozložení by se velikost bloků ideální, bezdefektní struktury zmenšila natolik, že by to

způsobilo zvýšení objemové volné entalpie (ideální) krystalové struktury. Sekundární struktura krystalů, tj. strukturalizace pole defektů v krystalech, je tedy mechanismem procesu, jímž se zachovává určitá minimální velikost bloků, které mají ideální krystalovou strukturu. Že taková spodní hranice velikosti difrakčně koherentních bloků existuje, zjistili lidé krátce po objevu difrakce rtg záření, když shledali, že ani po extrémně intenzivním tváření kovu jeho difrakční čáry nevymizí, jen se mírně rozšíří. Do bilance přitom vstupuje též povrchová energie rozhraní, definujícího sekundární strukturu krystalů, která při zmenšování bloků ideální krystalové struktury roste. Nejmenší blok, na který krystal rozděluje jeho sekundární struktura, představuje něco jako nedělitelný "atom" nebo "kvantum" (ideální) krystalové struktury. Kvanta krystalů mají koloidní velikost (10 – 100 nm). Sekundární struktura krystalů, vzniklá segregací defektů ideální krystalové struktury do lineárních, plošných a skeletálních útvarů, výrazně ovlivňuje difuzi a v důsledku toho též mnohé procesy v pevných

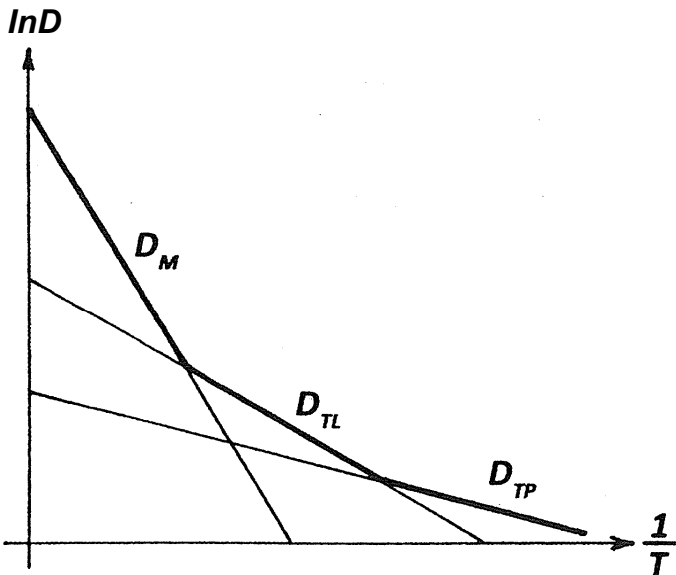


Obr.6. Při nízkých teplotách T převládá difuze T-prostorem-koefficient difuze $D_T = D_{0T} \cdot \exp(-ET / RT)$, při vysokých teplotách převládá difuze maticí-koefficient difuze $D_M = D_{0M} \cdot \exp(-EM / RT)$.

Fig.6. The diffusion through the T-space prevails at low temperatures, with the diffusion coefficient $D_T = D_{0T} \cdot \exp(-ET/RT)$, while at high temperatures, it is the diffusion through matrix, with the diffusion coefficient $D_M = D_{0M} \cdot \exp(-EM/RT)$, which predominates.

látkách, které se mechanismem difuze realizují. Oblastmi, v nichž jsou zkoncentrovány strukturální defekty-někdy se označují jako T-prostor krystalu (obr. 5) - totiž probíhá difuze o několik dekadických řádů rychleji než skrze matrix, kde je strukturálních defektů velmi málo. Je to způsobeno tím, že v T-prostoru jsou od sebe atomy, díky vysoké koncentraci strukturálních defektů, mnohem dále než v matrix, z níž byly strukturální defekty odčerpány do T-prostoru. Jestliže říkáme, že "mnohem" dále, je to třeba chápat v souvislosti s tím, že síla, jíž na sebe působí dva atomy, ubývá se šestou až dvanáctou mocninou jejich vzájemné vzdálenosti. V T-prostoru jsou atomy od sebe vzdáleny jen o jednu nebo několik málo setin angstromu více než v ideální matrix, což nicméně zmenší sílu, jíž na sebe působí sousední

atomy v T-prostoru oproti síle, již na sebe působí sousední atomy v matrixi, mnohonásobně. Difuzivita (koeficient difuze) D závisí jednak na energii E , které je třeba na "protlačení" částice (atomu) difundující látky skrze prostředí ("difuzním kanálem") jímž se difuze děje (tzv. aktivační energie difuze), jednak na počtu těchto difuzních kanálů s aktivační energií E , které jsou k dispozici, a to podle Arrheniova vzorce $D = D_0 \cdot \exp(-E/RT)$, kde T je teplota v Kelvinech a R plynová konstanta. Hodnota $D_0 = D_{0M}$ při difuzi matricí je větší než hodnota předexponenciálního faktoru při difuzi T-prostorem (D_{01}) a také hodnota aktivační energie matriční difuze E_M je větší než aktivační energie difuze T-prostorem (E_1). V důsledku toho bude při nízkých teplotách převládajícím mechanismem difuze T-prostorem – koeficient difuze $D_1 = D_{01} \cdot \exp(-E/RT)$, při vysokých teplotách pak difuze matricí- koeficient difuze $D_M = D_{0M} \cdot \exp(-E_M/RT)$. Bimodální charakter difuze byl v mnoha případech opravdu měřením nalezen- viz obr.6. Někdy najdeme pro jeden materiál dokonce tři módy difuze, které jsou dominantní v různých teplotních oborech: difuzi matricí s koeficientem $D_M = D_{0M} \cdot \exp(-E_M/RT)$, difuzi lineárními komponentami T-prostoru s koeficientem $D_{TL} = D_{0TL} \cdot \exp(-E_{TL}/RT)$ a difuzi plošnými komponentami T-prostoru s koeficientem $D_{TP} = D_{0TP} \cdot \exp(-E_{TP}/RT)$. Zpravidla bývá $E_M > E_{TL} > E_{TP}$ a $D_{0M} > D_{0TL} > D_{0TP}$, takže při nízkých teplotách převládne difuze plošnými komponentami T-prostoru, při středních teplotách difuze lineárními komponentami T-prostoru a při vysokých teplotách matriční difuze- viz obr.7. Soustředění



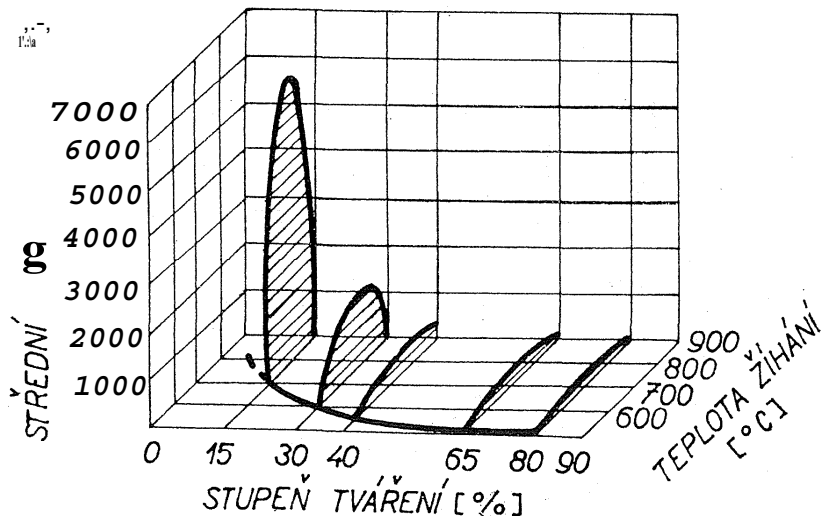
Obr.7. Při nízkých teplotách T převládá difuze plošnými komponentami T-prostoru (koeficient difuze D_{TP}), při středních teplotách dominuje difuze lineárními komponentami T-prostoru (koeficient difuze D_{TL}) a při vysokých teplotách je majoritní matriční difuze (koeficient difuze D_M).

Fig.7. The diffusion via the planar components of the T-space (with the diffusion coefficient D_{TP}) prevails at low temperatures; the diffusion through the linear components of the T-space (with the diffusion coefficient D_{TL}) predominates at medium temperatures, while at high temperatures, the diffusion proceeds mainly through the matrix (with the diffusion coefficient D_M).

strukturních defektů do T-prostoru (strukturalizace pole defektů do T-prostoru, zformování T-prostoru) je spojeno nejen se snížením vnitřní energie (což je hnací silou zformování T-prostoru), ale také se snížením entropie. Snížení entropie vede ke zvýšení Helmholtzova resp. Gibbsova termodynamického potenciálu, jež je tím větší, čím vyšší je teplota. V důsledku toho se s rostoucí teplotou T-prostor stává posléze neúnosný, rozpadá se a tím mizí i kanály anomálně rychlé difuze. To je druhý důvod toho, že při vysoké teplotě probíhá difuze matricí; jinudy probíhat nemůže, protože T-prostor při vysoké teplotě neexistuje. K tomu, aby vznikl a existoval T-prostor, musí být dost nízká teplota, čímž se vliv entropie, která působí proti strukturalizaci, potlačí.

S. Spontánní strukturalizace

Sekundární struktura krystalů je pozoruhodným projevem spontánní strukturalizace. Spontánní strukturalizace je jedním ze základních rysů vývoje vesmíru. Významně se podílí na formování struktury látek v kondenzovaném agregátním stavu. Samovolným uspořádáním atomů pevné látky vznikají a rostou krystaly, spontánní strukturalizací koloidních roztoků koloidní krystaly (například viry), spontánním uspořádáním mikroskopických kuliček amorfního hydratovaného oxidu křemičitého opál a samovolným poskládáním dendritů, tvořících se při tuhnutí taveniny, vzniká (makroskopická) dendritická mříž [20]. Na spontánní strukturalizaci vakancí, kterou se vytváří sekundární struktura krystalů, je zvláštní to, že se jedná o uspořádávání "nicí", tedy nikoli hmotných stavebních prvků (ako třeba atomů, molekul, koloidních částic nebo dendritů). Připomíná to funkci a chování děr v elektronové struktuře: vakance je stavem (příznakem popisu stavu) distribuce atomů. Uspořádání vakancí pak velmi silně ovlivňuje difuzi, což je proces, kterým se uskutečňuje relaxace atomové struktury tělesa, směřující k nastolení "rovnovážného stavu" čili uspořádání atomů.



Obr.8. Rekrystalizační diagram měkké oceli.
Fig.8. Recrystallization diagram of a mild steel.

6. Inhibice

Nízkoteplotní relaxace je nežádoucí, neboť destabilizuje strukturu materiálu (a to i za nízkých teplot), čímž zkracuje životnost dílců z toho materiálu vyrobených. K inhibici relaxace se využívají postupy, které se osvědčily při slinování a tváření za vysokých teplot, kdy relaxace probíhá rychle a lze ji sledovat mnohem snáze než za teplot nízkých. Relaxace je např. škodlivá v závěrečné etapě slinování, neboť vyvolává migraci intergranulárních rozhraní. To jsou kanály rychlé difuze, prvky sekundární struktury, jimiž se odvádí z prostorů mezi jednotlivými částicemi vzduch (plyn), jenž tam zůstal a brání jejich zcelení. Když se pak rozhraní relaxací posunou, ztratí kontakt s "bublinami" zbytkového plynu a ten už pak zůstane v sintrovaném tělese prakticky navždy. K potlačení relaxace (sekundární rekrystalizace) při slinování byla vypracována celá řada postupů [21, 22]. Také při tváření hraje relaxace významnou roli. Tváření se totiž děje plastickou deformací. Ale přitom se tvárnost materiálu vyčerpává a je jí nutno opět obnovit, což se realizuje právě (vysokoteplotní) relaxací. Ta relaxace (a jí uskutečňovaná rekrystalizace) má rezonanční charakter (obr.8): za dané teploty probíhá rychle jen při určitém (tzv. kritickém) stupni deformace [23]. Přetvořením materiálu v něm vzniknou vakance. Při nízkém stupni přetvoření vznikne však vakancí příliš málo na to, aby mohly vytvořit dost hustou sekundární strukturu, jež by zabezpečila rychlou relaxaci. Naopak, po velkém stupni přetváření vznikne v materiálu mnoho poruch (zejména dislokací), jež rekonfigurací, spojenou s tvorbou sekundární struktury, účinně brzdí: zvyšují aktivační energii a tedy snižují rychlost tvorby sekundární struktury a tím také i rychlost relaxace (rekrystalizace). Relaxaci lze tedy zpomalit vhodnou plastickou deformací. Anebo také tepelným zpracováním: popuštěním (umělým stárnutím) zakaleného materiálu v něm snížíme koncentraci vakancí, čímž jeho sekundární struktura zřídne a rychlost relaxace se sníží o několik dekadických řádů [24].

7. Závěr

Nízkoteplotní relaxaci potlačujeme proto, že je škodlivá: zkracuje životnost našich výtvorů, maří to, co jsme vyrobili. Na druhé straně je však projevem transcendentního směřování přírody k řádu, uspořádání, struktuře (k tomu, co fyzikální chemie nazývá rovnovážným stavem). A proto můžeme nízkoteplotní relaxaci zbrzdit jenom dočasně. "Ale jen ten je hoden svobody a žití, kdo rve se o ně znovu, den co den".

Literatura

- [1] J.Fiala, I.Schindler, R.Foret, S.Němeček: Sledování struktury konstrukčních materiálů a její degradace rtg difrakcí, *Strojnícky časopis* **53** (2002), 1 -23.
- [2] J.Kasl, J.Fiala, P.Zuna: Reversní procesy při rekrystalizaci, *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology* **9**, no.2 (2002), 94-98.
- [3] kolektiv autorů za redakce J.Nečase: *Aplikovaná matematika*, SNTL, Praha 1977, 532-537.
- [4] H.Frank, J.Fiala, I.Kraus: *Elektronová struktura a reaktivita povrchů a rozhraní*, České vysoké učení technické, Praha 2013, 233-241.
- [5] P.Veles: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, Alfa Bratislava a SNTL Praha 1985, 285-288.
- [6] J.A.Collins: *Failure of materials in mechanical design*, John Wiley and Sons, New York 1993, 461-466.
- [7] J.Fiala, J.Pavelka, J.Kříž, M.Hložek, P.Hušťák: Changes in the internal structure of bronze and iron over time at ambient temperature, *Advances in Materials* **2** (2013), no.4, 53-58.

- [8] L.Treindl: Chemická kinetika, Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava 1990, 322-323.
- [9] A.M.Hindeleh, R.Hosemann: Paracrystals representing the physical state of matter, *Journal of Physics C: Solid State Physics* 21 (1988), 4155-4170.
- [10] E.M.Gutman: *Mechanochimija metallov i zaštita ot korozii*, Metallurgija, Moskva 1981, 246-252.
- [11] J.Fiala, P.Mazal, M.Kolega, F.Vlašic, P.Liškutín: Mikrostrukturní procesy doprovázející únavu materiálu. In *Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2012*, L.Pazdera, P.Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2012, 63-69.
- [12] Antoine de Saint-Exupéry: *Le petit prince*, Gallimard, 2007, 92.
- [13] R.May: Simple mathematical models with very complicated mechanics, *Nature* **261** (1976), 45-67.
- [14] J.Gleick: *Chaos, making a new science*, Viking, New York 1987.
- [15] J.W.Christian: *The theory of transformations in metals and alloys*, Pergamon Press, Oxford 1981.
- [16] R.M.White, T.H.Geballe: *Long range order*, Academic Press, New York 1979.
- [17] Ju.I.Vesnin: *Vtoričnaja struktura i svojstva kristallov*, ISBN 5-7692-0041-3, Izdatel'stvo Sibirskogo otdelenija Rossijskoj akademii nauk, Novosibirsk 1997.
- [18] J.Fiala, L.Ptáček, M.Hložek, M.Kolega: Nízkoteplotní relaxace. In *Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2007*, P.Mazal (ed), Brno University of Technology, Brno 2007, 61-68.
- [19] J.Fiala, I.Kraus: *Povrchy a rozhraní*, České vysoké učení technické, Praha 2009, 105-108.
- [20] J.Fiala, V.Mentl, P.Šutta: *Struktura a vlastnosti materiálů*, Academia, Praha 2003, 47-66 a 157-162.
- [21] J.Hlaváč: *Základy technologie silikátů*, SNTL Praha a Alfa Bratislava, 1988, 76-92.
- [22] T.Sakuma: Aspects of grain growth in ceramics. In *Proceedings of the Conference on Recrystallization and Related Phenomena 1999*, T.Sakai, H.G.Suzuki (eds), The Japan Institute of Metals, Sendai 1999, 89-98.
- [23] L.Jeníček, P.Ryš, M.Cenek, A.Hrbek: *Nauka o materiálu I/2*, Academia, Praha 1968, 538-564.
- [24] O.Heusler: Diffusion in Metallen bei Zimmertemperatur untersucht am System Kupfer – Zink, *Zeitschrift für Metallkunde* 85 (1994), 47-49.



STRUKTURNÍ ODEZVA OCELI 15CH2NMFA NA CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ STRUCTURE RESPONSE OF THE STEEL 15CH2NMFA TO CYCLIC LOADING

Jaroslav FIALA **, Pavel MAZAL *, Michal KOLEGA **, František VLAŠIČ *,
Petr LIŠKUTÍN *

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

**Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie – Výzkumné centrum

Abstrakt

Mechanickým zatěžováním dochází ke změně struktury materiálu (mechanochemický jev). Mění se (často rytmicky) četnost a rozložení strukturálních defektů, zejména dislokací, rozhraní mosaikových bloků a neclivostí, v souvislosti s tím pak i spektrum teplotních kmitů. Trvalý přísun energie, které je k těmto změnám třeba, zajišťuje při cyklickém zatěžování anelastická. (Nízkoteplotní) relaxace materiálu je pomalá a jeho strukturální odezva je i při stacionárním režimu zatěžování (nikoli funkcí ale) funkcionálem okamžité odezvy uplatňující se po dobu, jež je srovnatelná s jeho únavovou životností. Relaxace je svým způsobem dynamickou rekrystalizací a tudíž velmi závisí (při dané době provozu za uvažované teploty) na počátečním stavu struktury, což zvětšuje neurčitost odhadů zbytkové životnosti. Proto jsme ve své práci také sledovali, jak se během zatěžování vyvíjí struktura (oceli 15CH2NMFA monitorovaná pomocí rtg difrakce) ve vzorcích, jejichž (strukturální) stav byl na začátku cyklického zatěžování odlišný.

Klíčová slova: struktura materiálu, cyklické zatěžování, rentgenová difrakční analýza

Abstract

Mechanical loading induces changes of the materials structure (a mechanochemical effect). Rate and distribution of structural defects, especially dislocations, interfaces of mosaic blocks and bulk defects (often rhythmically) varies and, in connection with this, the spectrum of thermal vibrations varies, too. Permanent supply of energy needed for such reconstructions due to cyclic loading is provided by elastic after – effect. (Low – temperature) relaxation of materials is slow and their structural response is even at steady – state regime of loading (not a function but) a functional of instantaneous response taken into consideration for a time period comparable with their durability. Relaxation is a way of dynamic recrystallization and, therefore, it depends (for a definite running period at a given temperature) strongly on the individual state of materials structure, which increases uncertainty of estimated remaining service lifetime. That is, why we followed also the development of the structure (of steel 15CH2NMFA monitored by x – ray diffraction in course of loading) in samples, the structural state of which was different at the start of loading.

Keywords: materials structure, cyclic loading, x – ray diffraction analysis

1. Motto

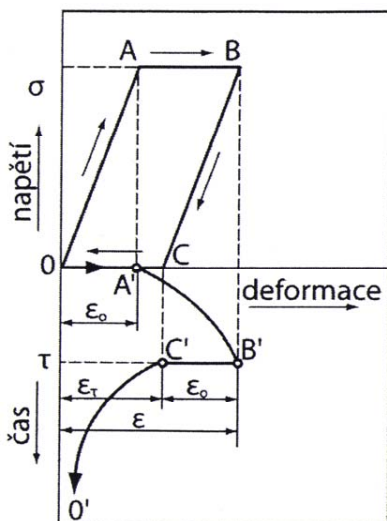
„Fyzikové si rádi myslí, že stačí říci: Toto jsou výchozí podmínky, co se stane pak?“, pravil Richard P. Feynman [1].

2. Únava jako proces

Vlivem mechanického zatěžování vznikají ve struktuře materiálu dislokace. A to i v případě, že se jedná o zatěžování pod mezí kluzu. Skutečná deformace reálných těles totiž není ani v tom případě elastická, ale anelastická (viskoelastická). Nenastává okamžitě 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. Princip anelastických změn při pružném namáhání reálné pevné látky, kterým se říká též dopružování, znázorňuje obr. 1. Přímka OA představuje zatížení σ , při kterém vzniká okamžitá pružná deformace

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E},$$

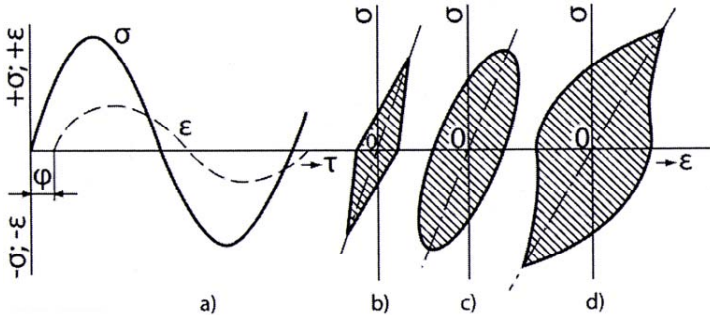
kde E je modul pružnosti dané pevné látky v tahu. Úsečka AB odpovídá působení kontaktního zatížení za dobu τ , během níž se uskutečňuje časově závislá deformace ε . V bodě B nastává po uplynutí času τ odlehčení na $\sigma = 0$, přičemž deformace klesne po uplynutí času τ odlehčení na $\sigma = 0$, přičemž deformace klesne o okamžitou hodnotu ε_0 .



Obr. 1 Princip dopružování.
Fig. 1 Elastic after – effect.

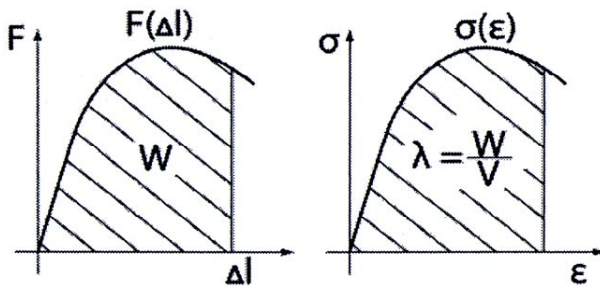
V bodu C je těleso úplně odlehčené, ale má přitom ještě zbytkovou deformaci ε_t . Tato část celkové pružné deformace pak po odlehčení ubývá s postupně se zmenšující rychlostí. V důsledku dopružování (anelasticity) bude deformace ε při opakovaném namáhání tělesa opožděna za přiloženým napětím σ o fázový posuv φ (obr. 2). V průběhu jedné periody namáhání vznikne v souřadnicích $\sigma - \varepsilon$ hysterezní smyčka, jejíž plocha λ je úměrná energii rozptýlené v materiálu zatěžovaného tělesa během jednoho zatěžovacího cyklu (viz obr. 3). Energie, vkládaná při cyklickém

namáhání do zatěžovaného tělesa popsáním způsobem, 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.



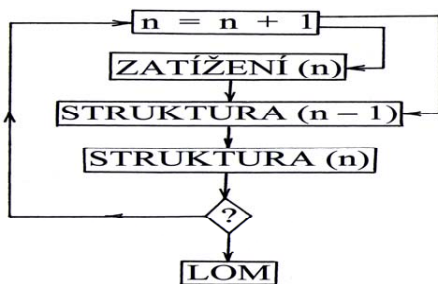
Obr. 2 Fázový posuv φ mezi napětím σ a deformací ε (a) a charakteristické tvary hysterezních smyček při rostoucí amplitudě cyklického zatěžování (b), (c) a (d).
 Fig. 2 Phase shift φ between stress σ and strain ε (a) and characteristic forms of hysteresis loops at increasing amplitude of cyclic loading (b), (c) and (d).

Určitou formou interakce dvou dislokací (protínáním) může dojít k omezení jejich pohyblivosti (imobilizaci). Když se pak s takovou dvojicí znehyněných dislokací protne nějaká další, třetí dislokace, je pravděpodobnost její imobilizace větší, než když se protne s jednou soliterní dislokací. Znehyněné dislokace se hromadí na určitých místech a tím se pole dislokací strukturalizuje, dichotomizuje na „políčka“ (mozaikové bloky) s relativně nízkou hustotou volně pohyblivých dislokací a rozhraní mozaikových bloků, tvořená shlukem znehynělých dislokací, jejichž hustota je na tomto rozhraní vysoká. A tato mozaiková struktura pole dislokací začne hrubnout např. tak, že bloky s nižší zbytkovou hustotou pohyblivých dislokací (tj. bloky, které mají nižší energii, protože nejen dislokace, ale i každý jiný strukturální defekt energii bloku zvyšuje) budou postupně stravovat energeticky bohatší bloky, v nichž je zbytková hustota pohyblivých dislokací vyšší.



Obr. 3 Pracovní diagram „zátěž – protažení“, vyjádřený v hodnotách tahové síly F a prodloužení Δl (a), resp. v hodnotách smluvního napětí σ a poměrného prodloužení ε (b).
 Fig. 3 Stress – strain diagram expressed in terms of tensile force F and elongation Δl (a), or engineering stress σ and engineering strain ε (b).

Při hrubnutí mozaikové struktury se ve zvětšujících se blocích hromadí parakrystalické distorze [2]. Energie mozaikové struktury se tím zvyšuje, což nakonec způsobí její desintegraci, rozpad na jemnější bloky, čímž nahromaděná pnutí odrelaxují. Zjmeněním mozaikové struktury však vzroste její povrchová energie a struktura v důsledku toho začne opět hrubnout atd. Během opakovaného rozpadu a opětného růstu (rekrytalizace) mozaikových bloků se zvětšuje pravděpodobnost, že ve struktuře vznikne nadkritická necelistvost a cyklicky zatěžované těleso posléze praskne únavovým lomem [3]. Ke vzniku nadkritické necelistvosti tedy není třeba vysokého zatěžovacího napětí; necelistvost vznikne jako chyba procesu opakované rekrytalizace (rekonfigurace) mozaikové struktury během cyklického zatěžování. Přestože se cyklické zatěžování děje pod mezí kluzu, hrají při únavovém poškozování klíčovou úlohu dislokace a strukturalizace, specifická nerovnoměrnost jejich rozložení uvnitř pevné látky. Jestliže nerovnoměrnost rozložení deformace (a její koncentrace v jádrech dislokací) je příčinou nízké odolnosti pevné látky vůči plastické deformaci, pak – obdobně – nerovnoměrnost rozložení dislokací a jejich koncentrace v rozhraních mozaikových bloků je příčinou toho, že napětí, při kterém dochází k únavovému lomu – nejnebezpečnější formě porušení celistvosti pevné látky – je mnohem menší než mez kluzu, tedy napětí, při kterém se látka začne plasticky deformovat [2].



Obr. 4. (Mozaiková) struktura tělesa se během jeho zatěžování mění; STRUKTURA(0) = počáteční stav struktury (před zatěžováním); $n = 1, 2, 3, \dots$ jsou pořadová čísla zátěžných cyklů.

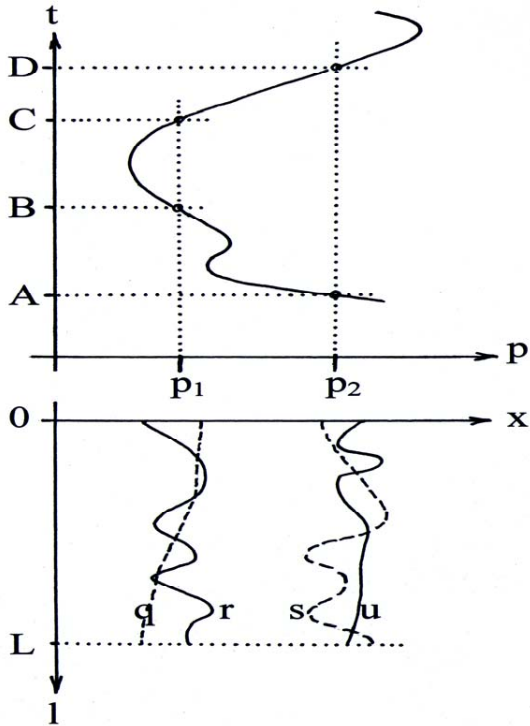
Fig. 4. The (mosaic) structure of a test piece changes during its cyclic loading; STRUKTURA(0) = initial state of structure (before loading); $n = 1, 2, 3, \dots$ serial numbers of loading cycles.

3. Motýlí jev

Vlivem cyklického zatěžování tělesa se mění jeho mozaiková struktura a to zpětně ovlivňuje odezvu tělesa na jeho další zatěžování. Poněvadž vývoj struktury je kriticky závislý na jejím počátečním stavu (před zatěžováním) – obr. 4 – a protože žádnou analytickou technikou nelze stav struktury určit dost přesně (obr. 5), nemůžeme spolehlivě předpovědět ani to, jak se bude určité těleso při přesně definovaném cyklickém zatěžování chovat („jak může příští měsíc změnit systém bouří v New Yorku to, že dnes nějaký motýl zvilil svými křídly vzduch v Pekingu“). Pozorované rytmické změny cyklicky zatěžovaného tělesa, vyjádřené jako superpozice harmonických oscilací

$$a(t) \ddot{p} + b(t) \dot{p} + c(t) p = 0$$

(závislosti $p = p(t)$ střední velikosti mozaikových bloků p na čase t) nebudou lineární a časově invariantní, protože koeficienty a , b , c závisí na čase. Ale ukazuje se, že i mnoho nelineárních systémů může být uspokojivě linearizováno při podmínkách, které se vyskytují v praxi. To „uspokojivě“ se vztahuje k adekvátnosti odhadů zbytkové životnosti cyklicky zatěžovaných dílců a konstrukcí a v daném případě je podmíněno topotaxií [4]. Stereospecifická vzájemná orientace sousedních mozaikových bloků v polykrystalickém agregátu na blízko je totiž hybnou silou jeho překrytí (blastesy) na dálku a tedy předpokladem strukturní koherence agregátu a potažmo koherentní odezvy tělesa na cyklické zatěžování.



Obr. 5. Velikost mozaikových bloků x v daném okamžiku t (po určitém počtu n zátěžných cyklů) je v každém místě $l \in (0, L)$ vzorku jiná. Rozložení q resp. r velikosti mozaikových bloků ve vzorku v okamžiku B resp. C jsou různá, ale mají stejný průměr p_1 ; také rozložení s resp. u velikosti mozaikových bloků v okamžiku A resp. D jsou sice různá, ale přitom mají stejný průměr p_2 , jehož hodnota je však odlišná od p_1 .

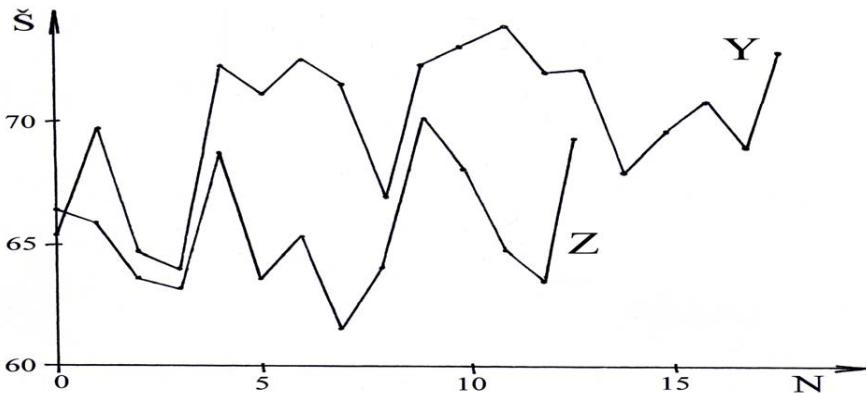
Fig. 5. The size x of mosaic blocks at a moment t (after a definite number n of loading cycles) is different in each point $l \in (0, L)$ of the sample. The distributions q and r of the size of the mosaic blocks in the sample at the moment B and C are different, but they have the same mean p_1 ; and also the distributions s and u of the size of the mosaic blocks at the moments A and D are different, but they have the same mean p_2 , the value of which is different from p_1 .

4. Zkoumaný materiál a experimentální technika

Čtyři vzorky oceli 15CH2NMFA jsme cyklicky zatěžovali až do lomu při určité konstantní a u všech vzorků stejné amplitudě napětí: vzorky V a W v cyklu souměrném, vzorky Y a Z za nenulového středního tahového napětí. Po každých 10 000 cyklech bylo zatěžování přerušeno a ze vzorku byl přístrojem D8 AXS Bruker pořízen v záření CoK_α rentgenový difraktogram. Na difraktogramech jsme pak měřili šířku v poloviční výšce (FWHM = full width at half maximum) radiálního profilu difrakční linie (211) Fe- α . Tato veličina totiž závisí na rozlehlosti (průměrné velikosti) mozaikových bloků v difraktujícím objemu analyzovaného vzorku [5,6] a její sledování umožňuje monitorovat zjemňování a hrubnutí struktury vzorku během (a v důsledku) jeho zatěžování.

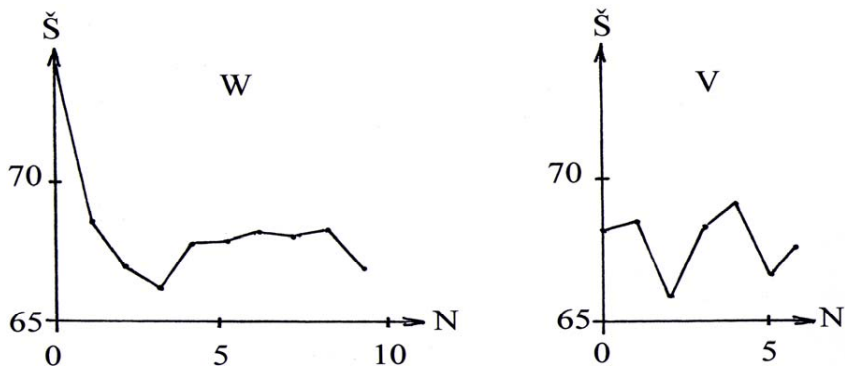
5. Výsledky měření a diskuse

Z obr.6a – 6b, které dokumentují jak se měnila šířka difrakční linie (211) Fe- α vzorků Y, Z, V a W v závislosti na počtu zátěžných cyklů až do lomu, je patrné střídavé zjemňování a hrubnutí mozaikové struktury. Zřejmé jsou také rozdíly mezi odezvou jednotlivých vzorků, jež mohou souviset s velkou strukturální citlivostí únavového procesu v návaznosti na heterogenitu zkoumaného materiálu a různý deformační stav, jakož i historii tepelného zpracování v tom kterém místě, z něhož byly vzorky odebrány. Při nenulovém středním tahovém napětí odolaly vzorky (Y a Z) více zátěžným cyklům než při nulovém středním napětí (vzorky V a W). Konstantní tahové napětí způsobuje totiž drift dislokací, které snižují energii nezbytnou pro přechody mezi hrubozrnným a jemnozrnným stavem mozaikové struktury. K přechodům dochází dříve než se ve struktuře cyklicky zatěžovaného tělesa (díky anelasticitě) nahromadí tak velká energie mezipovrchů případně parakrystalických distorzí, aby dokázala aktivovat nukleaci nadkritické zárodečné trhliny únavového lomu. Počet přechodů, ke kterým došlo mezi hrubozrnnou a jemnozrnnou strukturou při cyklickém zatěžování do lomu, je u vzorků Y a Z mnohem větší než u vzorků V a W.



Obr. 6a Závislost šířky \bar{S} ($=10 \times \text{FWHM}^2 \vartheta$) difrakční linie (211) Fe- α vzorků Y a Z oceli 15CH2NMFA na počtu zátěžných cyklů ($=10000\text{N}$).

Fig. 6a Dependence of the width \bar{S} ($=10 \times \text{FWHM}^2 \vartheta$) of the diffraction line (211) Fe- α for the samples Y and Z of the steel 15CH2NMFA on the number of loading cycles ($=10000\text{N}$).



Obr. 6b Závislost šířky \check{S} ($=10 \times \text{FWHM}^2 \cdot 9$) difrakční linie (211) Fe- α vzorků V a W oceli 15CH2NMFA na počtu zátěžných cyklů ($=10000N$).

Fig. 6b Dependence of the width \check{S} ($=10 \times \text{FWHM}^2 \cdot 9$) of the diffraction line (211) Fe- α for the samples V and W of the steel 15CH2NMFA on the number of loading cycles ($=10000N$).

6. Závěry

Mozaiková struktura zkoumaných vzorků oceli 15CH2NMFA, které vykazaly různou únavovou životností, se během cyklického zatěžování rytmicky měnila. Znalost (monitorování) těchto změn spolu s popisem výchozí struktury, kterou měl materiál před zatěžováním, by mohlo pomoci při zpřesňování odhadu jeho zbytkové životnosti. Jednotlivé vzorky, na základě jejichž destruktivního zkoušení se určuje Wöhlerova křivka a její pásma rozptylu, jsou totiž různé, a proto jejich odezva na cyklické zatěžování je rozdílná. Průběžné nedestruktivní monitorování odezvy předmětného dílce během jeho exploatace (např. pomocí rentgenové difrakce) tento činitel neurčitosti vylučuje.

Poděkování

This work is an output of research and scientific activities of NETME Centre, regional R&D centre built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and, in the follow-up sustainability stage, supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by financial means from the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“.

Literatura

- [1] J. Gleick: Chaos, making a new science, Viking, New York 1987, p.352, ISBN 9781453210475. ISBN 1453210474,
- [2] I. Kraus, J. Fiala: Elementární fyzika pevných látek, Česká technika – nakladatelství, ČVUT, Praha 2013, 92 – 94, 119 – 121, ISBN 978-80-01-04931-0.

[3] 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. ISBN 978-80-214-4182-8.

[4] J. Fiala, I. Kraus: Povrchy a rozhraní, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2009, 91 – 100. ISBN 978-80-01-04248-9.

[5] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega, F. Vlašic, P. Liškutín: Mikrostrukturní procesy doprovázející únavu materiálu. In: Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2012, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno 2012, 63 – 69, ISBN 978-80-214-4609-0..

[6] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega, F. Vlašic, P. Liškutín: Mechanismus únavových procesů. In: Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2013, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2013, 17 – 22, ISBN 978-80-214-4799-8.

PRINCIPY 3D „TOMOGRAFIE“ POMOCÍ SYSTÉMU NUMIS PRINCIPLES OF 3D „TOMOGRAPHY“ BY SYSTEM NUMIS

Karel HÁJEK, Valeriya NENAKHOVA

Katedra elektrotechniky, Univerzita obrany, Brno
e-mail: karel.hajek@unob.cz

Abstrakt

Principy nelineární ultrazvukové spektroskopie (NUMIS) ukazují velké potenciální výhody v porovnání s jinými nelineárními ultrazvukovými metodami. Je to především z hlediska citlivosti a možnosti rychlé, jednoduché a přesné lokalizace defektu. Již publikovaná idea této metody spočívá v posílání dvou pulzů (burstů) s harmonickými signály a rozdílnými kmitočty f_1 a f_2 . Když obě vlny prochází místem defektu s nelineárními vlastnostmi, vzniká nová frekvenční složka s rozdílovým kmitočtem f_d . Optimální výběr kmitočtů budících signálů umožňuje použít analogovou předfiltraci a na druhou stranu vlnová délka složky f_d umožňuje dostatečně přesnou lokalizaci. Tyto bursty jsou pak vzájemně posouvány v postupných krocích, což umožňuje získat obraz rozložení defektů na testovaném tělese v 2D zobrazení v několika sekundách. Příspěvek ukazuje zobecnění principu 2D lokalizace pro 3D testování. Systém pak vytváří v jednotlivých časových krocích pro daný vzájemný posuv mezi budícími signály odpovídající hyperboloidní tomografické řezy tělesem. Po proběhnutí celého testu s cca desítkami kroků zvyšovaných vzájemných časových posuvů tak získá v několika sekundách odpovídající počet tomografických řezů. Tak je vytvořen celý prostorový tomografický obraz případných defektů v tělese pro jediné umístění ultrazvukových sond.

Klíčová slova: Nelineární ultrazvuková spektroskopie, směšovací princip, pulse pulzni tomografie

Abstract

Principles of nonlinear ultrasonic mixing impulse spectroscopy (NUMIS) show great potential advantages in comparison with other nonlinear ultrasonic methods. It is first of all from the point of view of sensitivity and possibility of quick, simple and precise localization of a defect. Already published main idea of this method consists in sending of two impulses (bursts) with the harmonic signals with different frequencies f_1 and f_2 . When two waves come across in the place of defect with nonlinear properties, the new frequency component with different frequency f_d will be created. Optimum choice of exciting frequencies lets using of enough analog pre-filtration and on the other hand the wave length of f_d component enables enough precise localization. These bursts are mutually time shifted in successive steps. It enables to obtain the image distribution of defects on the tested body in a 2D plane in few seconds. The paper shows a generalization of the principle of 2D to 3D localization testing. The system then creates the hyperboloidal tomographic slices of tested body for the corresponding individual time steps for the mutual time-shift between the excitation signals. The system will obtain the corresponding number of tomographic slices in a few seconds after running the entire test with some dozens of steps of increased mutual time-shifts. It creates a tomographic image of the entire space of possible defects in the body for a single location ultrasonic probes.

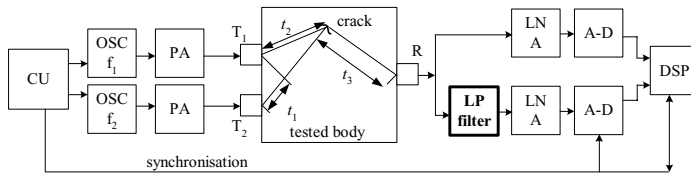
Key words: Nonlinear ultrasonic spectroscopy, mixing principle, pulse tomography

1. Úvod

Nelineární ultrazvukové spektroskopické metody (NUS) jsou rozpracovávány s cílem získat výhodnější metody v porovnání s klasickými ultrazvukovými metodami, a to hlavně pro vyšší citlivost na malé defekty, menší citlivost na parazitní odrazy ultrazvukového signálu a použitelnost pro složitější tvary testovaných těles a některé další dílčí výhody. Tyto metody NUS jsou rozpracovávány různými směry, a to především pro případy buzení jedním, dvěma či více ultrazvukovými signály, buzení kontinuální vlnou či pulzními či burstovými signály. Z velkého množství publikací zastupující jednotlivé varianty metod lze uvést alespoň stručný výběr [1]-[7].

Publikované výsledky ukazují, že tyto metody nedosahují původně předpokládaných vlastností hlavně ve směru vysokých citlivostí a případně následně přesné lokalizace. Rozborem těchto problémů a porovnání jednotlivých principů se věnoval článek [8], který ukázal nesporné potenciální výhody směšovací metod pro možnost použití účinné analogové předfiltrace a tím i podstatného zvýšení ekvivalentního dynamického rozsahu a odpovídající zvýšení citlivosti. Jeho základní blokové schéma je uvedeno na obr. 1. Základní myšlenkou je vysílání dvou burstů s několika vlnami harmonického signálu s rozdílnými kmitočty f_1 a f_2 , které jsou vzájemně postupně časově opožďovány s definovaným krokem. V případě setkání obou vln v místě defektu vznikne v místě defektu s nelineárními vlastnostmi mj. tzv. rozdílový kmitočet. V [8] byl uveden příklad s volbou $f_1 = 1,5$ MHz a $f_2 = 1$ MHz, takže rozdílový kmitočet $f_d = 500$ kHz. Tato volba umožňuje jak použití dostatečné analogové předfiltrace, tak i vzhledem k výšce rozdílového kmitočtu a odpovídající délce vlny i dostatečně přesnou lokalizaci.

Další analýza principů této metody ukázal potřebu podrobné analýzy časových a geometrických poměrů rozmístěných vysílacích a přijímacích sond na testovaném tělese (zatím uvažována 2D deska) a v návaznosti na to i způsobů výpočtů souřadnic defektu pro potřeby lokalizace. Tyto výsledky byly publikovány v [9]. V návaznosti na to je v tomto článku ukázán princip 3D tomografického testování.



Obr. 1 Principiální blokové schéma nelineární ultrazvukové směšovací impulsní spektroskopické metody (CU – řídicí jednotka, OSC – oscilátor, PA – výkonový zesilovač, T_1, T_2 – vysílače, R – přijímač, LNA – nízkopřenosný zesilovač, DSP – číslicové zpracování signálu) [8].

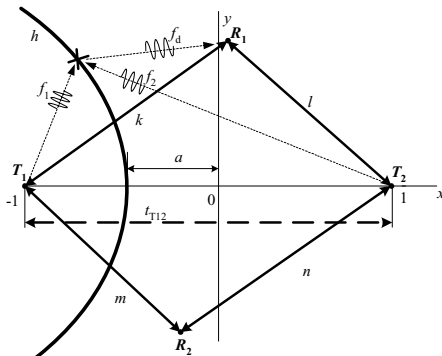
Fig. 1 Principal block diagram of nonlinear ultrasonic mixing impulse spectroscopic method (CU – control unit, OSC – oscillator, PA – power amplifier, T_1, T_2 – transmitters, R – receiver, LNA – low noise amplifier, DSP – digital signal processing) [8].

2. Principy 2D tomografie pomocí systému NUMIS

Tyto principy byly objasněny v [9]. Pro vysvětlení 3D tomografie je nutno principy 2D tomografie zrekapitulovat. Systém je tvořen dvěma ultrazvukovými vysílači T_1 a T_2 a dvěma ultrazvukovými přijímači R_1 a R_2 . Vysílače vysílají ultrazvukové bursty ve formě několika vlnek harmonického signálu s rozdílnými kmitočty f_1 a f_2 . Přijímače snímají signály se zaměřením na příjem nově vzniklé složky s kmitočtem $f_d = f_2 - f_1$, která vzniká díky nelineárním vlastnostem defektů typu prasklina. Tomografické

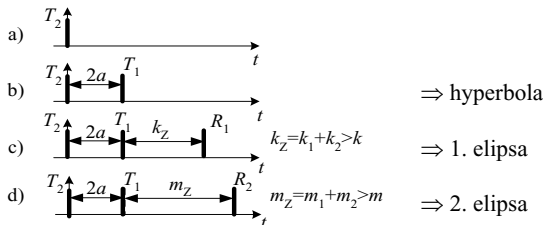
testování prostoru 2D roviny vzniká postupným posouváním časového zpoždění jednoho burstu vůči druhému. Při rozmístění sond podle obr. 2 geometrické místo setkání čel obou impulsů vytváří při daném zpoždění t_D hyperbolu h . Při existenci defektu v místě hyperboly vznikne signál s rozdílovým kmitočtem f_D , který se šíří všemi směry a přichází i do míst přijímačů R_1 a R_2 . Postupnou krokovou změnou zpoždění při opakovaném vysílání pulsů se posouvá i geometrické místo hyperboly a tak dochází k postupnému skenování v 2D rovině. Pro lokalizaci defektu jsou důležité časy šíření jednotlivých signálů. S výhodou lze tyto časy normovat vůči času šíření t_{T12} z vysílače T_1 do vysílače T_2 . Doba zpoždění t_D je pak normovaná podle vztahu

$$2a = \frac{t_D}{t_{T12}/2}. \quad (1)$$



Obr. 2 Základní geometrické vztahy mezi ultrazvukovými vysílači přijímači.
Fig. 2 Basic normalized geometrical relations between ultrasonic transmitters and receivers.

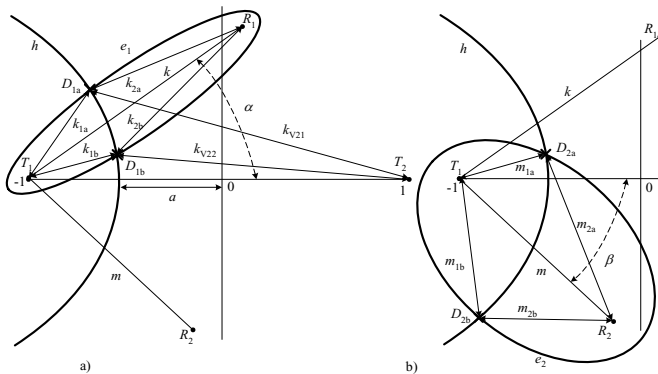
V případě existence defektu na aktuální hyperbole získáme časový sled vysílaných a přijímaných signálů podle obr. 3.



Obr. 3 Časové relace mezi budícími a přijímanými signály.
Fig. 3 Time relations between transmitted and received signals.

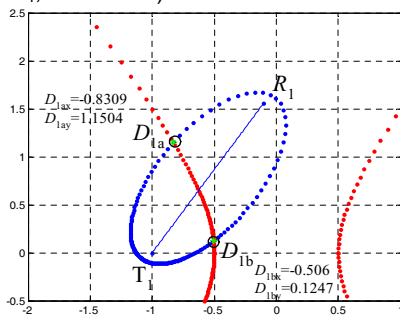
Z hodnot časových úseků lze vypočítat místo defektu. Vychází se z dalšího vztahu, kdy pro případ, že doba šíření budícího signálu z vysílače T_1 do defektu a signálu s rozdílovým kmitočtem z defektu do přijímače R_1 je delší, než přímé šíření budícího signálu z vysílače T_1 do přijímače R_1 . Proto se potenciální místo defektu musí vyskytovat na elipse e_1 , jak je to ukázáno na obr. 4a. Spojíme-li obě podmínky, vyplývá z nich, že defekt se musí vyskytovat na jednom ze dvou průsečíků elipsy a hyperboly. Při znalosti hodnoty časových intervalů z obr. 3, je nejhodnější získat

souřadnice obou průsečíků matematickým iteračním procesem. Příklad výsledku jeho realizace programem MATLAB je na obr. 7.



Obr. 4 Normalizované geometrické vztahy pro potenciální místa defektů:
 a) řešení pro přijímač R_1 , b) řešení pro přijímač R_2
 Fig. 4 Normalized geometrical relations for potential places of defects:
 a) solution for receiver R_1 , b) solution for receiver R_2

Vzhledem k nejednoznačnosti řešení (2 průsečíky) musíme použít dva přijímače, přičemž v případě existence defektu v místě hyperboly musí jeden ze dvou průsečíků pro elipsu odpovídající druhému přijímači odpovídat jednomu z průsečíků pro první přijímač R_1 , viz obr. 4b).

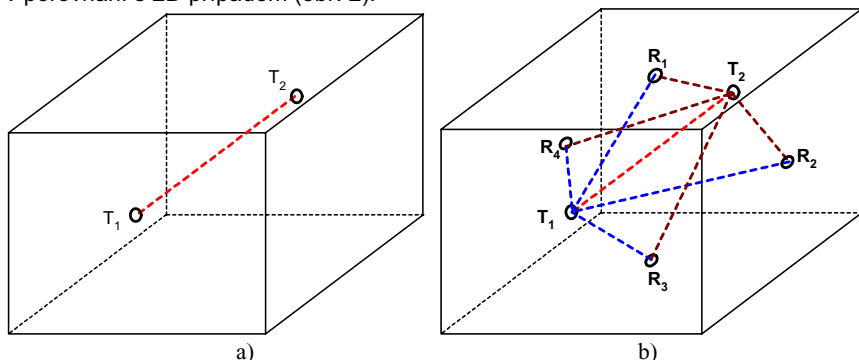


Obr. 5 Příklad řešení průsečíků hyperboly a natočené elipsy pro parametry $\alpha = 60^\circ$, $a_e = 1$, $e_e = 0.9$ a $a_h = 0.5$
 Fig. 5 Example solution of intersections of the hyperbola and shifted ellipse for $\alpha = 60^\circ$, $a_e = 1$, $e_e = 0.9$ and $a_h = 0.5$

3. Principy 3D tomografie pomocí systému NUMIS

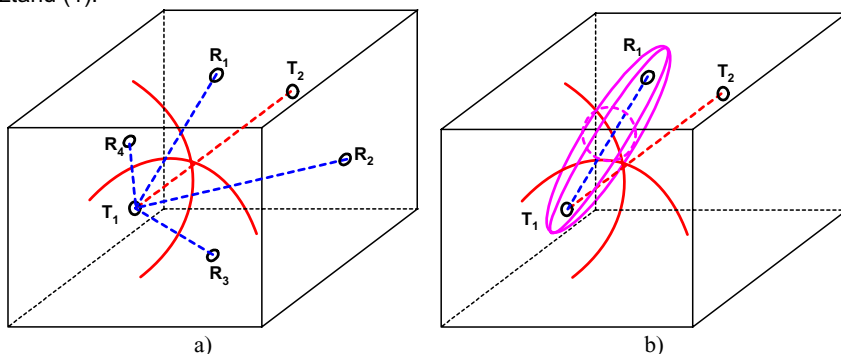
3D lokalizace je založena na výše diskutované 2D lokalizaci, ale je zapotřebí získat informace pro výpočet třetí souřadnice. Nicméně, není zapotřebí zvyšovat počet ultrazvukových vysílačů, využívá se stejný způsob buzení s vysílači T_1 a T_2 . Pro jednoduché těleso ve tvaru kvádru je to ukázáno na obr. 6. a). I v tomto případě je pro signál druhého budiče postupně po krocích zvyšováno zpoždění. Oproti tomu

je nutno výšit počet ultrazvukových přijímačů minimálně o jeden. Pro případ kvádru jako testovaného tělesa, viz obr. 6. b), se ukazuje jako vhodné použít čtyři přijímače R_1-R_4 , nicméně v principu postačují tři přijímače. Z obr. 6. b) je také zřejmé, že v tomto případě vzniká osm spojnic mezi přijímači a vysíláči, což je dvojnásobek v porovnání s 2D případem (obr. 2).



Obr. 6 a) umístění vysíláčů T_1 a T_2 , b) umístění přijímačů $R_1 - R_4$.
 Fig. 6 a) placing of transmitters T_1 and T_2 , b) placing of receivers $R_1 - R_4$.

3D lokalizace používá stejnou metodu zvyšovaného vzájemného časového posuvu mezi budícími impulzy z obou vysíláčů v postupných krocích. Geometrické místo setkání čel obou budících impulzů v tomto případě tvoří rotační hyperboloid, jak je to naznačeno na obr. 7. a). Ohniskem tohoto hyperboloidu je vysílač T_1 . Je zřejmé, že je toto řešení analogické hyperbole v 2D rovině, které je řezem hyperboloidu. Konkrétní umístění plochy hyperboloidu je definováno časovým rozdílem, z něhož vyplývá velikost hlavní poloosy hyperboloidu obdobně jako ve vztahu (1).

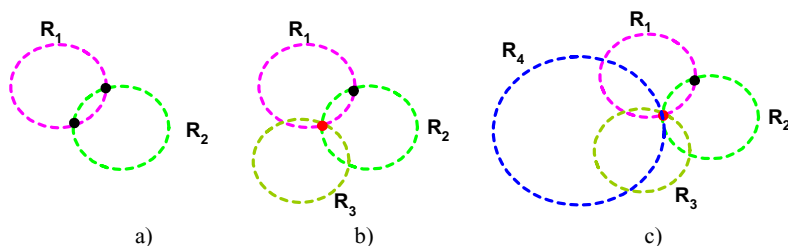


Obr. 7 a) hyperboloid jako geometrické místo setkání obou vln z T_1 a T_2 ,
 b) elipsoid s ohnisky T_1 a R_1 jako geometrické místo potenciálních defektů pro signál z přijímače R_1 .

Fig. 7 a) hyperboloid as geometric place of the encounter of both waves from T_1 and T_2 , b) ellipsoid with foci T_1 and R_1 as geometric place of potential defects for signal from receiver R_1 .

To, zda je v ploše hyperboloidu defekt a v kterém místě určit signály v přijímačích R_1 - R_4 , speciálně pak počátek výskytu nově vzniklého impulsu s harmonickým signálem o rozdílovém kmitočtu, analogicky jako je tomu pro 2D měření. V případě detekovaného signálu s rozdílovým kmitočtem u jednoho přijímače lze nalézt potenciální místa defektů. Pro 3D případ se nám elipsa z 2D roviny rozšíří na rotační elipsoid, jak je to naznačeno na obr. 7. b). Geometrickým místem potenciálního umístění defektu je pak průsečnice mezi hyperboloidem a rotačním elipsoidem.

Pro lokalizaci skutečného místa poruchy musíme použít vyhodnocené časové posuvy rozdílových signálů z dalších dvou přijímačů. Každý z nich definuje svůj rotační elipsoid a odpovídající průsečnici s hyperboloidem. Situaci ukazuje obr. 8. V případě dvou přijímačů se nám při existenci defektu na hyperboloidu protnou dvě průsečnice a definují tak dva potenciální body, v tělese, které odpovídají přijatým signálům. Proto je zapotřebí i třetí přijímač, na základě jehož signálu získáme třetí průsečnici a pouze jeden bod, který odpovídá všem třem signálům (obr. 8 b). Při použití čtvrtého přijímače z jeho signálu pak získáme průsečnici, která musí splňovat předchozí řešení. Teoreticky je tento čtvrtý přijímač zbytečný, ale může zvyšovat přesnost měření obzvláště pro oblasti v blízkosti tohoto přijímače.



Obr. 8 Lokalizace místa defektu pomocí signálů z dvou (a), tří (b) a čtyř (c) přijímačů.

Fig. 8 Localization of the defect by the signals of two (a), three (b) and four (c) receivers.

4. Závěr

Příspěvek rozšiřuje již publikovaný princip metody nelineární ultrazvukové impulzní spektroskopie NUMIS 2D na 3D testování nerovinných těles. Tento princip pro 3D testování je navržen na základě 2D metody prostorovým zobecněním lokalizačních principů. Je k tomu nutno navýšit systém minimálně o jeden přijímač a jemu odpovídající přijímačí cestu.

Systém NUMIS 3D pak pro každý časový krok s odpovídajícím vzájemným časovým posunutím budících impulsů zjistí případnou existenci v tomografickém hyperboloidním řezu tělesem a lokalizuje je. Postupným zvyšováním vzájemného časového posuvu jsou získávány další tomografické řezy tělesem a je tak vytvořen celý prostorový tomografický obraz případných defektů v tělese v několika sekundách pro jediné umístění ultrazvukových sond.

Je ale nutno podotknout, že uvedený rozbor vycházel z idealizovaných bodových ultrazvukových měničů a bezšumového prostředí, kdy lze detekovat čas počátku impulsu s rozdílovým signálem s přesností vyšší než na $\frac{1}{4}$ vlnové délky šíření ultrazvuku. V praxi je možnost přesné detekce počátku impulsu snižována jak šumem, tak i vlivem „rozmazání“ tvarů budících impulsů kmitočtovými vlastnostmi

přenosu ultrazvukových signálů měniči, tělesem i následným zpracováním s použitím kmitočtové filtrace. Proto přesnost lokalizace v reálném případě klesá na jednotky vlnových délek.

Tento příspěvek byl zpracován za podpory institucionálního projektu pro rozvoj organizace PRO K217.

Literatura

1. VAN DEN ABEELE, K. E.-A, JOHNSON, P. A., SUTIN, A. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Res Nondestr Eval* (2000) © 2000 Springer-Verlag New York Inc. DOI: 10.1007/s001640000002.
2. DOS SANTOS, S. VEJVODOVA S., PREVOROVSKY, Z. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy in Symbiosis with Time Reversal for Localization of Defects: Tr-News. In *5th International Workshop NDT in Progress*, Prague 2009. http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/DosSantos_10.pdf
3. HÁJEK, K., KORENSKA, M., SIKULA J., Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Fired Roof Tiles, In *16th World Conference on Nondestructive Testing*, Montreal, Canada, August 30-September 3, 2004, Book of Abstracts, pp. 42, CD
4. ZHAO, X., QI, X., ALEXANDER S, ABERNETHY, E. Damage Detection in Composite Cylinders Using Modulated Guided Wave Vibration, *NDCM 2011*, Blacksburg (USA), Available from: <http://www.ndt.net/article/ndcm2011/papers/A-03-1.pdf>
5. PIECZONKA, L., STASZEWSKI, W. J., AYMERICH, F., UHL, T. Analysis of Nonlinear Vibro-Acoustic Wave Modulations Used for Impact Damage Detection in Composite Structures, In *6th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM 2012, Materials and Qualification*. Available from: <http://www.ndt.net/article/ewshm2012/papers/th2a2.pdf>
6. ZAITSEV, V., MATVEEV, L., MATVEEV, A. On the ultimate sensitivity of nonlinear modulation method of crack detection, *NDT&E International*, 2009, Vol. 42. Available from: http://vladimir.zaitsev.net/articles/2006_nmod_NDT_zaits.pdf
7. KAZAKOV, V., JOHNSON P. A. Modulation Acoustic Method of Crack Location. *16th International Symposium on Nonlinear Acoustics* Moscow, Russia, August 2002.
8. HÁJEK, K., ŠIKULA, J. New possibilities to increase sensitivity of the ultrasound non-linear modulation methods. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, Vol. 6, Nos. 3/4, 201, p. 283-292. DOI: 10.1504/IJMMP.2011.043223
9. HÁJEK, K., NENAKHOVA, V. Principy lokalizace defektu v nelineární ultrazvukové směšovací impulsní spektroskopii. In: *NDE for Safety/Defektoskopie 2013*. s. 31-37. ISBN 978-80-214-4799-8.



NOVÁ ZAŘÍZENÍ PRO DIAGNOSTIKU HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ NEW DEVICES FOR DIAGNOSTICS OF HISTORICAL STRUCTURES

Hana HASNÍKOVÁ*, Michal KLOIBER**, Pavel ZÍMA*

*Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00
Praha 9

**Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Centrum excellence Telč,
Batelovská 485, 588 56 Telč

Contact e-mail: hasnikova@itam.cas.cz

Abstrakt

Cílem příspěvku je představit několik nových zařízení, která byla vyvinuta na ÚTAM AV ČR, pro nedestruktivní zkoušení materiálů, zvláště těch z historicky cenných konstrukcí.

Tzv. mikrotrubice je poloautomatický přenosný nástroj pro měření nasákavosti. Skládá se z krabičky s mikroprocesorem, kde se zaznamenává čas, a plastové „pistole“ – části, která je v kontaktu s povrchem materiálu a na níž je upevněna mikrotrubice se stupnicí. Zařizování mohou být měřeny přírodní kameny, malty a jiné porézní materiály, je velmi užitečná k hodnocení účinnosti různých hydrofobizačních ošetření užívaných při restaurování.

Diagnostické zařízení pro in-situ hodnocení dřeva ve stávajících konstrukcích umožňuje přímé určení konvenční tlakové pevnosti a modulu deformability v libovolné hloubce podél profilu dřevěného prvku. Semidestruktivní metoda způsobuje na konstrukčních prvcích velmi malé poškození.

Klíčová slova: *Historické konstrukce, mikrotrubice, nasákavost, dřevo, tlaková pevnost, modul deformability*

Abstract

The aim of the paper is to present a few new devices that were developed at ITAM AS CR for non-destructive testing of materials, especially those from historically valuable structures.

So called microtube is a semi-automatic portable tool for water absorption measurements. It consists of box with microprocessor where the time is recorded and the plastic “pistol” – a part that is in contact with the material surface and where the scaled micro-tube is fixed on. The natural stones, mortars and other porous materials can be measured by the microtube; it is very useful to assess the efficiency of various hydrophobic treatments used within the restoration.

The diagnostic device for in-situ assessment of timber in existing structures enables direct determination of conventional compressive strength and modulus of deformability in arbitrary depth along timber profile. The semi-destructive method causes a very gentle damage on the structural members.

Key words: *Historical structures, microtube, water absorption, wood, compressive strength, modulus of deformability*

1. Úvod

Historické stavby v našem regionu bývají staré několik staletí a jejich hodnota s rostoucím věkem ještě stoupá. Nedílnou součástí údržby, která je nezbytná, aby konstrukce přežily další desítky a stovky let, je kontrola kvality stavebních materiálů. Odběr vzorků, které se posléze odvezou na zkoušení do laboratoře, je jednou z možností. Při vyšším počtu vzorků však může být narušena vizuální integrita historické stavby, což není z památkové hlediska žádoucí. Nedestruktivní metody, které sledují potřeby konzervátorské praxe, jsou v takových případech vhodnou alternativou.

Kvalita povrchu a schopnost materiálů absorbovat tekutiny reprezentují některé z důležitých vlastností porézních materiálů, kterými jsou např. přírodní kámen, malta nebo omítka vyskytující se v zdech, sochách nebo na fasádách.

Dřevo bylo v minulosti jedním z nejpobulárnějších stavebních materiálů a díky jeho trvanlivosti přežilo do dnešních dnů mnoho dřevěných konstrukcí, které stále slouží. Některé z nich je však nutné vyztužit či zesílit, aby plně vyhovovaly současným požadavkům kladeným aktuálními normami. Jako vstupní informace slouží hodnoty mechanických vlastností, které je ale obtížné získat s průměrnou přesností.

2. Měření nasákavosti

Na ÚTAM AV ČR, v. v. i. bylo vyvinuto přenosné zařízení pro měření nasákavosti pod nízkým tlakem, které je použitelné hlavně při měřeních in-situ. Pomáhá restaurátorům vyhodnotit kvalitu materiálů nebo účinnost prostředků, kterými je ošetřují. Může být samozřejmě použito také v laboratoři ke zkoušení malých vzorků, které nemohou být zkoušeny za pomoci jiných běžných metod jako jsou standardizované měření nasákavosti kapilární vzlinavostí, tzv. sponge method („houbičkovou metodou“) nebo jinými trubicemi (Karstenovou, Mirowského).

Karstenova trubice je otevřená skleněná trubice se stupnicí o objemu 4 ml, která je restaurátory používána více než 40 let. Kruhová kontaktní plocha o průměru cca 25 mm je na povrch zkoumaného materiálu připevněna pomocí různých fixačních tmelů, poté je naplněna vodou a v rámci měření se zaznamenává v přesně určených časových intervalech množství materiálem absorbované vody. Metoda pracuje dobře, když je kontakt mezi Karstenovou trubicí a povrchem materiálu bezchybný. [1] V případě nerovného povrchu a nesoudržného materiálu je to však problém. Mirowského trubice je uzavřenou modifikací, jejíž kontaktní plocha je vyplněna houbovitou zátkou. Proces záznamu dat je obdobný jako u Karstenovy trubice. Tzv. „sponge method“ má mnoho modifikací podle typu použité houbičky, ale základní myšlenkou je vážení vlhké houbičky před a po měření, aby se zjistilo množství absorbované vody za určitý čas, po který je houbička v kontaktu s materiálem. Nevýhodou je potřeba buď perfektně uzavíratelné krabičky pro přepravu houbičky z terénu do laboratoře nebo přítomnost dostatečně citlivých vah v terénu. [2]

Mikrotrubice je nové poloautomatické zařízení, které obsluhuje pouze jeden operátor držící plastové tělo přístroje v kontaktu se zkoušeným materiálem, který je zároveň schopen zaznamenávat data. Dvě důležité části, které mikrotrubicí tvoří, jsou vidět na obr. 1. Prvním je skleněná mikrotrubice se stupnicí a objemem 0,1 ml (dílký stupnice odpovídají 0,01 ml) přichycená pomocí magnetu ke kovové desce na těle plastové pistole, jejíž spoušť je změněna v mikrosopínač. Tím operátor kontroluje záznam dat do paměti, která se ukrývá v malé kovové krabičce – druhé části přístroje (Obr. 1b). Během vývoje mikrotrubice byla snaha vyhnout se nevýhodám, které pozorujeme u Karstenovy trubice, např. znečištění fixačním tmelem v okolí kontaktní plochy po ukončení měření nebo nemožnost umístit těžkou skleněnou trubicí na

vertikální plochy. Kovová destička, na kterou je umístěn magnet s mikrotrubicí, se může otáčet okolo hlavní tak, aby poloha vyhovovala aktuálně měřenému místu, tj. lze s její pomocí měřit i nakloněné plochy a dokonce stropy. Hlaveň pistole s průměrem 8 mm je vyplněna cigaretovými filtry/speciální houbičkou, které zajišťují rovnoměrnou distribuci vody k povrchu materiálu, a je obklopena třemi kovovými hroty zajišťujícími její stabilitu během měření. Paměť zaznamenává čas a je schopná uložit 150 měřených bodů; data jsou později exportována ve formě např. .xls souboru.



Obr.1 a) Tělo zařízení s mikrotrubicí a hlavní naplněnou cigaretovým filtrem; b) kovová krabička s pamětí

Fig. 1 a) Body of the device with microtube and barrel filled by a cigarette filter; b) metal box with memory

Samotné měření začíná v momentě, kdy se hlaveň dostane do kontaktu s materiálem – poprvé se zmáčkne spoušť. Poté pokaždé, když hladina v mikrotrubicí mine dílek stupnice, je spoušť stisknuta znovu. Přístroj zaznamenává pouze čas, proto je vhodné během měření dělat poznámky. Každý materiál totiž nasáká různou rychlostí, což samozřejmě ovlivňuje i průběh jednotlivých měření. Přenosné zařízení bylo primárně vyvíjeno pro měření in-situ, proto je lehké a malý průměr kontaktní plochy umožňuje měřit rozmanitější druhy povrchů než Karstenova trubice. Metoda je lokální a lze ji použít ke zkoušení heterogenit v materiálech nebo poškození povrchu. Příklady měření in-situ jsou na obr. 2.

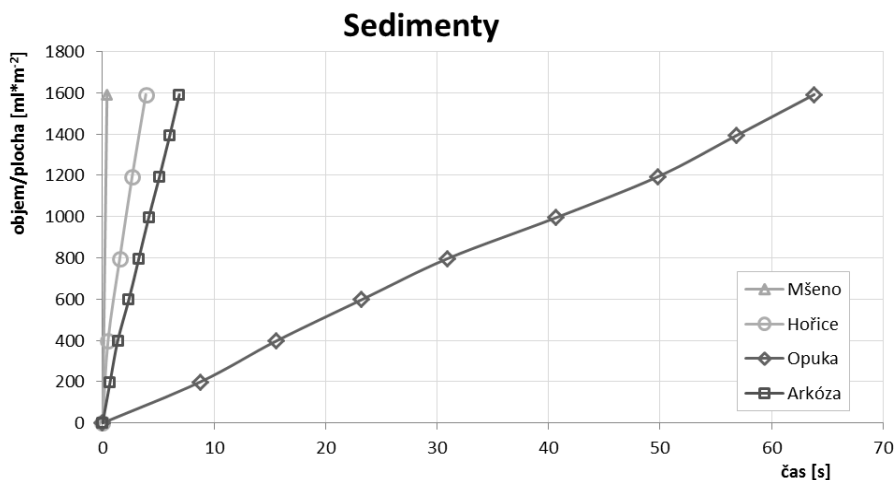
Obr. 3 ukazuje, jak se mohou lišit výsledky na jednotlivých materiálech. Všechny testované přírodní kameny jsou sedimenty vyskytující se v Čechách a používané v historických konstrukcích; mají různou pórovitost a velikost zrn. Všechny absorbovaly shodné množství vody, 0,08 ml, rozdíl je však v rychlosti absorpce. Dva běžné pískovce, těžené v Hořicích a Mšeném, nasákají vodu tak rychle, že je nemožné zachytit každý dílek stupnice. Arkóza, sediment s největšími zrny, je ideálním materiálem – lze zachytit každý krok. Naopak opuka, materiál s velikostí zrn na hranici jílu, je velmi hustá, a proto je i absorpce vody pomalá.

Absorpční vlastnosti velmi dobře korelují s velikostí částic a pórovitostí. Výsledky však ukazují, že je možné korelovat je i s pevnostními charakteristikami. [3]



Obr. 2 In situ měření nasákavosti; a) fasáda v Kőszegu, Maďarsko; b) socha anděla posledního soudu v Pomezí, Česká republika

Fig. 2 In situ measurement of water absorption; a) façade in Kőszeg, Hungary; b) statue of Angel of Last Judgement in Pomezí, Czech Republic



Obr. 3 Diagram znázorňující grafické vyhodnocení různých sedimentárních hornin

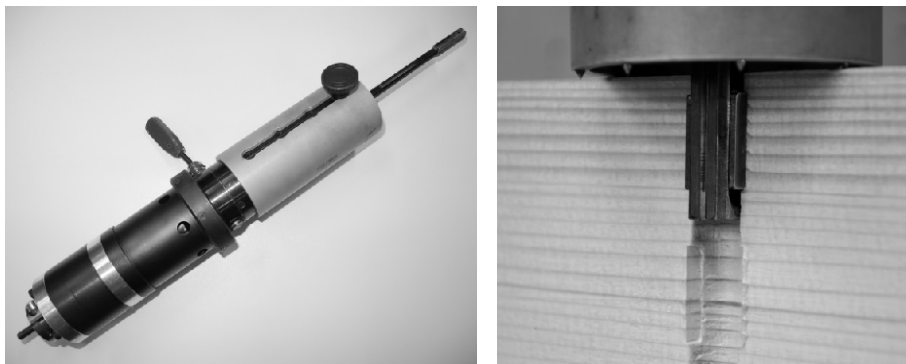
Fig. 3 The diagram showing the graphical evaluation of various sediment rocks

3. Hodnocení dřeva

Inovativní zařízení je navrženo tak, aby měřilo mechanické vlastnosti dřeva za pomoci nedestruktivního či semidestruktivního vyšetřování chování dřeva, které je zatěžováno malými čelistmi vloženými do předvrtaného otvoru, viz obr. 4. [4] Přístroj může být použit jak v laboratoři, tak během měření v terénu při určování stavu a kvality dřeva. Může spolehlivě a s vysokou přesností nahradit standardizované laboratorní zkoušky materiálových vlastností, konkrétně zkoušky pevnosti v tlaku podél vláken. Přístroj poskytuje závislost

deformace na napětí vyvolané tlakem symetricky umístěných čelistí v předvrtaném otvoru o poloměru 12 mm. Výhodou je postupné zaznamenávání síly a posunu čelistí během testu, navíc v různých hloubkách podél profilu dřevěného konstrukčního prvku.

Konstrukčně přístroj obsahuje těleso, k jehož obvodu je v podélném směru připevněno stavitelné pouzdro s aretačními šrouby, kryt baterií a kryt elektrické instalace zajištěné šrouby krytů. V horní části je k tělesu přístroje připevněno pohybové ustrojí složené ze šroubu táhla, zajištěného proti otáčení čepem šroubu táhla, matice táhla s ložiskem a objímky matice zajištěné šrouby objímky. Na šroubu táhla je v jeho dolní kónické části přišroubován siloměr, k siloměru je přišroubované táhlo, které umožňuje výkyv do stran pomocí kloubu táhla a čepu kloubu, ke spodní části táhla jsou připojené rozevírací klíny spojené pomocí šroubu rozevíracích klínů a kolíků rozevíracích klínů, čelisti s pružnými rameny jsou kotvené pomocí šroubu čelistí do tělesa přístroje. Pružná ramena umožňují pohyb čelistí při roztlačování rozevíracími klíny a udržují konstantní vzdálenost od tělesa přístroje. K tělesu přístroje je v horní části připojen snímač posuvu složený z dvojice planžet s tenzometrickým měřením ohybové deformace vyvolané kuželovou částí šroubu táhla, která je úměrná osovému posuvu a tudíž i roztlačení čelistí. Uvnitř tělesa přístroje je v horní části připojen vysílač elektronicky propojený se snímačem posuvu a siloměrem. Vysílač je bezdrátově propojen s počítačem. Přístroj je poháněn pomocí akumulátorové vrtačky s převodovkou.



Obr. 4 Zařízení pro měření tlakové pevnosti; a) celkový pohled; b) detail čelistí v předvrtaném otvoru

Fig. 4 The device for compression strength measurement; a) an overview; b) a detail of the jaws in a pre-drilled hole

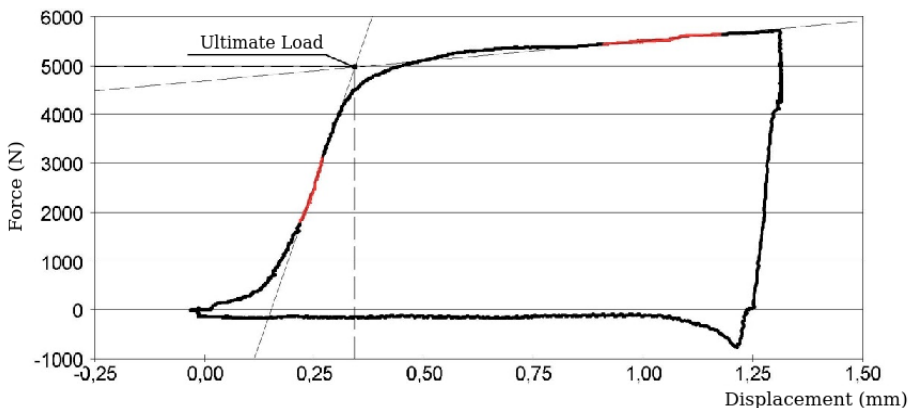
Výhodou přístroje je možnost plynulého snímání síly a posunutí při roztlačení čelistí v různých hloubkách odpovídajících požadavkům na hodnocení prvků konstrukcí běžných dimenzí. Přístroj se na testovaný objekt přikládá (zpravidla konstrukční prvek pravouhlého průřezu) pomocí válcovitého pouzdra, které umožňuje měření ve čtyřech polohách předem vyvrtaného otvoru. Aretace pouzdra je zajištěna pomocí dvou rýhovaných šroubů, pro polohy: (hloubka vývrtu) 5-25, 35-55, 65-85, 95-115 mm. Po zasunutí měřicí části přístroje do vyvrtaného otvoru a přiložení na testovaný objekt jsou pomocí táhla s rozevíracím klínem roztlačovány zakulacené čelisti do stěn vyvrtaného otvoru. Maximální hloubka zatlačení čelistí je na obou stranách 1,5 mm. Pohon táhla je zajištěn přes šroub s maticí (popř. hřeben se šnekem, nebo hydraulickým obvodem). Zdrojem síly je akumulátorová vrtačka s planetovou převodovkou, nicméně může být využit i manuální pohon pomocí jednoručné kliky. Zakulacené čelisti mají šířku 5 mm a délku 20 mm. Čelisti jsou vyrobeny ze speciální nástrojové oceli. Součástí čelistí jsou pružná ramena, jejichž pohyb při roztlačení je zajištěn

pomocí rozvíracího bronzového klínu osazeného na dolním konci táhla pomocí kolíku a šroubu. Vrcholový úhel klínu je 15°. Tento úhel není samosvorný a pro odlehčení čelistí stačí uvolnění roztláčovací síly.

Průběžně je snímána a zaznamenána působící síla při vytahování táhla, která je kalibrována na skutečnou sílu při roztláčování čelistí a následně simultánně vztažena k měřené dráze roztažení (posuvu) čelistí. Měření síly probíhá pomocí siloměru vloženého mezi horní hranu táhla s kloubem a šroub táhla. Snímání posuvu zajišťuje dvojice planžet s tenzometrickým měřením ohybové deformace vyvolané kuželovou částí šroubu táhla, která bude úměrná osovému posuvu a tudíž i roztažení čelistí. Signály jsou z přístroje bezdrátově přenášeny do měřicího přenosného počítače, kde jsou zpracovány. [5]

Chování zařízení a citlivost měřených výstupů na běžné vlivy byly predikovány pomocí numerické analýzy používající metodu konečných prvků. Navzdory malé kontaktní ploše čelistí je plocha materiálu zasažená zkouškou teoreticky dostatečně velká na to, aby postihla globální (nelokální) vlastnosti dřeva. K širšímu pochopení dopadu lokálního zatížení materiálu byla dále aplikována metoda digitální korelace obrazu. Vzorky byly rozpůleny, aby bylo umožněno sledovat povrch v okolí předvrtaného otvoru podél směru vláken dřevní hmoty. Všechny dosažené výsledky byly v rozmezí elastických relativních deformací a v parabolickém rozložení přesně, jak předpovídala analýza MKP. [6]

Informace o průběhu zatěžování jsou bezdrátově přenášeny po počítače, kde jsou dále zpracovávány. Mechanické vlastnosti jsou determinovány ve formě pracovního diagramu, který je na ukázkou na obr. 5. Osa x reprezentuje posun, když jsou čelisti zatlačovány do dřeva (horní větev křivky), a osa y ukazuje sílu potřebnou k jejich roztažení. Maximální síla – mez kluzu mezního zatížení je určena z průsečíku tečen elastické i plastické části diagramu. Konvenční tlaková pevnost je určena z velikosti mezního zatížení a plochy čelistí. Modul deformability je určen pomocí úhlu, který svírá s osou x , lineární elastická část diagramu.



Conventional Strength = 49,691 N/mm² Modulus of Deformability = 26064, 8 N/mm

Fig. 5 Grafické vyhodnocení zkoušky; elastická i plastická část křivky jsou použity pro výpočet mezního zatížení

Fig. 5 The evaluation diagram of the test; both elastic and plastic parts of the curve are used to calculate the ultimate load

4. Závěr

Obě zařízení během svého vývoje prošla několika modifikacemi, než dosáhla současné podoby. Jsou velmi vhodná a užitečná pro nedestruktivní zkoušení historických konstrukcí. Mikrotrubice pomáhá restaurátorům zhodnotit kvalitu poréznych materiálů a je také výhodná ke srovnávacím měřením před a po aplikaci hydrofobizačních nebo konsolidačních prostředků. Lze měřit množství bodů a nasákavost tak může být detailně zmapována v rámci celé stavby. Přínos přenosného zařízení je řízen jeho všestranností a jednoduchostí, jejíž výsledkem je nízká cena. Správné používání přístroje operátorem vyžaduje pečlivou práci a trochu zručnosti, kterou však lze získat krátkým tréninkem.

Zařízení na měření konvenční tlakové pevnosti in-situ dostatečně nahrazuje laboratorní zkoušky, a stalo se proto zajímavé pro specialisty nejen z České republiky, ale také z Německa nebo Norska, tj. z oblastí, ve kterých mají dřevěné konstrukce dlouhou tradici. Je to velmi perspektivní zařízení, které svou přesností úspěšně konkuruje jiným nedestruktivním přístrojům dosud v praxi používaným.

Poděkování

Příspěvek mohl vzniknout díky finanční podpoře projektu Ministerstva kultury NAKI DF11P010VV001 „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci projektu č. LO121 Národního programu udržitelnosti I.

Literatura

- [1] Hendrickx, R., 2013. “Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials”, *Material and Structures*, Vol. 46, pp. 1309-1320.
- [2] Vandevoorde, D., Cnudde, V., Dewanckele, J., Boone, M.N. and Verhaeven, E., 2011. “Contact-Sponge Method: Performance compared with Capillary Rise, Karsten Tube and Mirowski Pipe”, *Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage*.
- [3] Drdácký, M., Hasníková, H. and Valach, J., 2012. “Complex comparative tests on historic stone”, *EUROMED 2012 4th International Conference Progress in Cultural Heritage Preservation Short Papers* (M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. David, F. Remondino, R. Caffo - eds.), pp. 337-341.
- [4] Kloiber, M., Drdácký, M., Tippner, J. and Sebera, V., 2013. “New construction NDT device for in situ evaluation of wood by using compression stress-deformation measurements parallel to grain”, *18th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, September 24-27, Madison, Wisconsin, pp. 585-592.
- [5] Drdácký, M. and Kloiber, M., 2013. “In-situ compression stress-deformation measurements along the timber depth profile”, *Structural Health Assessment of Timber Structures, Advanced Materials Research*, Vol. 778, pp. 209-216.
- [6] Kloiber, M., Kunecký, J., Tippner and J., Sebera, V., 2014. “A new diagnostic device for in-situ determination of conventional strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to fiber”, *9th International Conference on Structural Analysis Historical Constructions*, 10 pp. (in print)
- [7] Kloiber, M., Drdácký, M., Tippner and J., Hrivnák, J., 2014. “Conventional compressive strength parallel to the grain and mechanical resistance of wood against pin penetration and microdrilling established by in-situ semidestructive devices”, *Materials and Structures*, Netherlands. ISSN: 1359-5997, 15 pp. (in print)



VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD VE VÝTVARNÉM UMĚNÍ

USE OF NON-DESTRUCTIVE METHODS IN THE FINE ARTS

Bernard Kopec

Quality Testing Ultrasound
Contact e-mail: b.kopec@email.cz

Abstrakt

Historici umění, restaurátoři, znalci umění, soudci našli v nedestructivním zkoušení výtvarných uměleckých děl, využívajících především rentgenové záření, velmi užitečného pomocníka. Rentgenové záření se ve výtvarném umění využívá ve dvou oblastech: při zjišťování historických souvislostí tvorby výtvarného díla restaurátory a historiky umění a při odhalování padělků uměleckých děl znalci a pro soudní účely. V obou případech nedestructivně, bez jakéhokoliv poškození uměleckého díla nebo odebrání vzorků pro zkoumání. Paprsky rentgenu pronikají několika vrstvami malby nebo sochy a vypovídají nejen o autentické struktuře díla, ale i o tajemstvích skrytých pod povrchem.

Klíčová slova: výtvarné umění, rentgenové záření, výtvarné dílo, historie uměleckého díla, padělky výtvarného díla

Abstract

Art historians, restorers, art connoisseurs, the judge found in non-destructive testing of works of art, primarily using X-rays, a very useful helper. X-rays are used in the fine arts in two areas: on the historical context detection creation of artwork in the restoration and history of art and the detection of counterfeit artworks of art connoisseurs and judicial purposes. In both cases without any damage to the artwork or the taking of samples for the study as the use of other method. X-rays penetrate several layers of paintings or sculptures and reveal not only the authentic structure of the work, but also the secrets hidden beneath the surface layers of painting or sculpture materials.

Key words: fine art, X-rays, a work of fine art, history of art work, counterfeit artworks

1. Úvod

Rentgenografie jako nedestructivní metoda průzkumu uměleckých děl pomáhá odhalit složení obrazových vrstev neinvazivně, bez poškození díla. Vychází z poznatku, že RTG záření je silněji pohlcováno těžšími prvky. Vzhledem k tomu, že v podmalbách obrazů starého umění převládá olovnatá běloba, lze na rentgenogramu jednoduše identifikovat spodní partie, jejich změny či další doplňky. Pomocí rentgenového záření lze zjišťovat použitou techniku, charakter autorského rukopisu, autorské i druhotné přemalby, získat informace o podkladových vrstvách, podložce a jejich poškozeních a v neposlední řadě též rozpoznávat padělky. Tyto informace potřebují pro svou práci restaurátoři, historici umění i soudní znalci.

Jako konkrétní příklad lze uvést historii obrazu *Hostina bohů*, který namaloval italský malíř *Giovanni Bellini* roku 1514, který byl dán *římskému restaurátorskému studiu na Kapitolu* k restaurování. Ozařováním rentgenovými paprsky se zjistily zajímavé osudy tohoto obrazu:

- na původním obrazu z roku 1514 stály všechny postavy před řadou stromů, v současné verzi jsou všechny postavy za řadou stromů
- některé ženské postavy byly původně namalovány v jiném oblečení
- po Belliniho smrti (1516) částečně změnil kompozici obrazu jiný italský malíř *Dosso Dossi*
- roku 1529 přemaloval slavný benátský malíř *Tizian* většinu pozadí (hory, modrá obloha) a v této podobě známe obraz dnes

Tyto a další skutečnosti se podařilo vědcům objevit ozařováním obrazu rentgenovými paprsky a zkoumáním rentgenového snímku. Zkušební restaurátoři a historici umění mohou pomocí rentgenového záření nejen odhalovat padělký uměleckých děl, ale studovat i metody a pracovní postupy významných malířů. Rentgenový snímek obrazu je pro defektoskopického pracovníka nebo historické hodnoty (kovové plastiky, mince, sakrální předměty, železné a bronzové archeologické nálezy) a k identifikaci barevných pigmentů zejména na olejomalbách, akvarelech, polychromovaných plastikách, freskách za účelem verifikace uměleckých děl. *EDXRF* se jakožto přenosná nedestruktivní metoda využívá také pro studium elementárního složení pravěkých jeskynních maleb. Díky tomu lze určit, kdy byly malby vytvořeny.

2. Používané nedestruktivní metody

Energeticky dispersní rentgenová fluorescence (EDXRF) s radionuklidovým buzením je metoda stanovení prvkového složení a ke stanovení tloušťky vrstvy prvku na libovolném materiálu. Metoda je využívána k prvkovým analýzám slitin drahých kovů, kovových předmětů vysoké kulturní nebo historické hodnoty (kovové plastiky, mince, sakrální předměty, železné a bronzové archeologické nálezy) a k identifikaci barevných pigmentů zejména na olejomalbách, akvarelech, polychromovaných plastikách, freskách za účelem verifikace uměleckých děl. *EDXRF* se jakožto přenosná nedestruktivní metoda využívá také pro studium elementárního složení pravěkých jeskynních maleb. Díky tomu lze určit, kdy byly malby vytvořeny.

Rentgenová difrakce (XRD) se používá pro získání informací o vlastnostech složení podle analýzy krystalické fáze.

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) identifikuje jak druh organických pigmentů, tak druh pojiva. Mnohdy bývá *FTIR* doplněna o analýzu *Ramanovou spektroskopií*.

Kombinací dvou nedestruktivních technik, *mikro-rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF)*, která odhaluje atomové složení a *mikro-Ramanovy spektroskopie (MRS)*, která odhaluje molekulární informace, lze získat údaje o chemickém složení barev použitých na zkoumaném objektu. *MRS* má velkou výhodu v tom, že dokáže analyzovat směsi různých pigmentů, ze kterých se skládá určitý barevný odstín a poskytne tak spektra jednotlivých částíček. Tyto techniky byly použity k prostudování nizozemských deskových obrazů z konce 14. století, u nichž je odběr vzorku kvůli jejich vysoké kulturní hodnotě zakázán.

Nedestruktivní a neinvazivní metoda, *optická koherentní tomografie (OCT)*, se používá k zobrazení vnitřních struktur malby. Tato metoda využívá infračervené záření, které proniká hlouběji a má vysokou rozlišovací schopnost. Může tedy odhalit například hloubku umístění autorova podpisu a tím rozhodnout o jeho autorství.

Infračervená reflektografie je nedestruktivní metoda průzkumu spodních obrazových vrstev malby, zejména podkreseb, podmaleb a přemaleb. Používá se také při zjišťování restaurátorských zásahů, či pravosti uměleckých děl. Infračervené záření proniká do větší hloubky obrazové struktury než viditelné světlo, umožňuje specifické rozlišení barev, materiálů a pigmentů v závislosti na jeho odrazu, průniku a absorpci. S jeho pomocí lze také zjistit přítomnost laků či jiných ochranných vrstev.

3. Využití rentgenových paprsků a doplňujících metod k odhalování historie uměleckých obrazů

Rentgenový snímek by měl bez obtíží rozlišit pravé dílo *van Gogha* od falešného. Padělatel by tomu sice mohl čelit, kdyby znal vývoj jeho malířské techniky. Prosvícení by v každém případě ukázalo podobnost s jeho některými díly nebo nepatrné rozdíly. Nejistota však zůstane. *Tizian*, *Rubens*, *Rembrandt*, *van Eyck* a mnoho dalších malířů měnilo během let svůj původní styl, střídali malířské techniky, řemeslné pomůcky a materiály, takže se jejich díla z různých tvůrčích období nedají určit jednoduchým srovnáváním nebo pomocí chemie a fyziky. Již v roce 1587 *van Eyck* používal jen olejomalby. Podle italského historika umění Vassariho maloval *Tizian* ve svém raném období s neuvěřitelnou pilí a jemností, takže jeho obrazy působily „stejně při pohledu zblízka i zdálky“, kdežto později nasazoval barvy tak zešířena, že se obraz jevil jako dokončený a postavy jako živé teprve při pohledu z dálky. Mnohé nasvědčuje tomu, že *Tizian* ve svém pozdním období nanášel plochy barev zešířena a že zanedbával mnohé detaily také proto, že se stával ve stáří dalekozrakým. Kdyby se tedy při chemickém nebo fyzikálním rozboru techniky velmi pozdního *Tizianova* díla vycházelo ze znaků typických pro jeho velmi rané období, mohly by vzniknout pochybnosti o pravosti jednoho či druhého obrazu. Tedy k interpretaci a vysvětlení rentgenových snímků obrazu je třeba hlubokých historických znalostí tvorby díla a malíře.

Zkoušky vědeckými metodami mají dnes široký rozsah. I odborníci někdy přeceňují a jindy zase podceňují možnosti moderních zkoušek. Velmi důležité jsou vědecké zkoušky pomocí nesčetných způsobů *fotografování*, od detailních záběrů přes zvětšeniny, snímky při různě intenzivním světle, nasvícení a prosvícení obrazu ultrapaprsky různého druhu, až k rentgenovým snímkům jednotlivých vrstev obrazu.

Prosvícení obrazu v *Dörmerově ústavu* v Mnichově vedlo k důležitým zásadním poznatkům. Práce vědců tohoto ústavu vycházejí ze zásady, že základem a východiskem je vždy osobitost každého uměleckého díla a že zkoumání obrazů rentgenovými paprsky má opravdový význam jen ve spojení se všemi ostatními zkouškami. Přitom je důležité si uvědomit, že rentgenový obraz zřetelně ukáže zejména na dvě věci:

Za prvé použití olovnaté běloby, z něhož se dá odhalit výstavba obrazu. Ukáže se tak plastická, prostorová skladba, která vypovídá o malbě většinou jednoznačněji než kompozice linií a ploch. Také vystoupí ostřejší detaily, které jsou bez použití technických prostředků sice vidět, ale jsou méně zřetelné.

Za druhé proces vzniku a tím pohledy, které ukončené dílo nedovoluje pouze vizuálně.

Mikroskop umožňuje zkoumání i těch nejmenších průhledných částic materiálu v tisícínásobném zvětšení, *elektronový mikroskop* v dokonce v několikatisícínásobném zvětšení. Fotografické filtry dovedou eliminovat barvy nebo je zdůraznit.

K vědeckým metodám exaktního zkoumání patří i využívání různých vlnových délek a srovnávacích škál spektra.

Použití srovnávacího mikroskopu dovoluje současně pozorovat detaily vnitřní výstavby dvou obrazů, tedy jednoho pravého a jednoho pochybného. Srovnáním se dospěje k závažným objasněním.

Kromě optických metod má věda k dispozici i *chemické analýzy*. Ovšem jestliže padělatel věnuje dostatečnou péči tomu, aby se jeho barvy co nejvíce podobaly starým materiálům, nepodaří se vždy získat pozitivní důkaz o falšování. Podezření, že jde o falsum, silně vzroste, dokáže-li analýza jen jedinou látku, která v údajné době ještě neexistovala.

Tizian pokládal 30 až 40 lazur, ne však na celou plochu obrazu, nýbrž jen na určitá místa podle potřeby. Proto také ani rentgenové zkoušky obrazových vrstev nedávají úplně spolehlivý důkaz o pravosti *Tizianových* obrazů. Vedle malby „alla prima“ vznikaly postupně podmalby a přemalby nanášením obyčejných nebo zvláštních pryskyřičných laků. *Tizian* nejen radil druhým, aby barvu zašpinili, chtějí-li dosáhnout určitých účinků, ale sám to také dělal. Lomením jednotlivých tónů kontrastními barvami vznikl nový způsob malby odlišný od původního; proto vede zkoumání dvou časově velmi vzdálených děl jen ke zjištění, které platí pouze pro práce z jednoho nebo druhého období. Na této skutečnosti se zakládají hlavní námitky proti absolutní spolehlivosti rentgenologických či jiných exaktních vědeckých zkoušek. Pochybnosti ztrácejí samozřejmě své opodstatnění tehdy, když zkoušky odhalí dodatečné přemalby nebo jiné změny struktury neviditelné pouhým okem, z nichž nezvratně vyplývá, že jde o falzifikát. Neumělé napodobeniny dokáže určit zkušený historik umění bez exaktních zkoušek. Nejistota je tím větší, čím je padělek dokonalejší.

Expertizy, které se omezují výhradně na zhodnocení stylu a vnějších znaků uměleckého díla, jsou u mistrovsky provedených padělků naprosto nespolehlivé. Práce takových padělatelů, napodobovatelů a výrobců replik, jako byli například *Dossena*, *Malskat*, *Wacker* a především geniální *van Meegeren* byly prohlášeny za originály. Zásadní omyly významných znalců umění v nedávných procesech vyvolaly nedůvěru v expertizy založené jen na dojmech.

Lidské oko se může mýlit. Umění padělatelů otřáslo důvěrou v expertizy znalců umění, opírající se o znalosti a intuici. V pochybných případech mají tedy poslední slovo vědecké zkoušky. Avšak nedostatečné zhodnocení exaktních výsledků fyzikálních a chemických zkoušek změní absolutní pravdu zase v relativní. Neboť i ten nejdokonalejší přístroj je závislý na člověku, který je používá. Ale přesto by se měla v pochybných případech dát přednost exaktním vědeckým zkouškám prováděným odborníky před starým estetickým a intuitivním hodnocením. Zásadně by mělo platit: Při posuzování toho, co je pravé a co falešné, rozhoduje v poslední instanci pouze výsledek chemických a fyzikálních zkoušek. Jsou-li výsledky exaktních vědeckých zkoušek v rozporu se znaleckými posudky, musíme je považovat za lidské omyly. Je pochopitelné, že výtvarný kritik trvá na svém posudku i proti nevyvratitelným výsledkům vědeckých zkoušek, ale tím znechává na přesvědčivosti. Kde se dostávají do konfliktu poznatky a pocity, musí dojmy ustoupit faktům. Dnes, kdy měřením záření můžeme určit s neuvěřitelnou přesností stáří prehistorických hornin, primitivních nástrojů i složitých geologických útvarů, nemělo by se odmiat vědecké ověřování uměleckých děl. Přesto určitě existují padělky, které nelze odhalit.

4. Král padělatelů van Meegeren

Henricius Antonius van Meegeren (1889 – 1947) byl geniální specialista na padělky nejuznávanějšího nizozemského malíře 17. století *Jana Vermeera*. Svou skvostnou kariéru padělatele postavil na tom, že maloval *Vermeerovy* obrazy, které v průběhu století zmizely. O dokonalosti jeho prací svědčí skutečnost, že jím namalovaný obraz *Emauzští učedníci* byl řadu let součástí sbírky Boymanova muzea v Rotterdamu.

Nesmrtelnost si ale sympatický dareba *van Meegeren* vydobyl v průběhu druhé světové války. Za částku 4 miliónu liber prodal „znalci“ Hermannu Göringovi padělek obrazu *Křtus a cizolovnice*. V zápětí po válce byl proto obviněn z kolaborace s nacisty a zatčen. A tak se přiznal k padělatelství. Ostře sledovaný proces však přinesl šok. Akademická elita země tulipánů považovala *van Meegerena* nejdříve za blázna a všechny jím označené obrazy označila jednoznačně za pravé. A tak začal geniální padělatel, který se stal v průběhu procesu mediální hvězdou, demonstrovat své umění. Akademiky definitivně zlomil a současně ponižil v okamžiku, kdy načrtl původní kresbu nacházející se na plátně, na které posléze namaloval *Emauzské učedníky*. Navíc jeho slova potvrdil rentgen. Proces udělal z *van Meegerena* takřka národního hrdinu, který zesměšnil jak velkého říšského maršála Göringa, tak především určitě vysoce erudované znalce umění. Těsně po vynesení

směšného rozsudku se nechala holandská královna slyšet, že geniálního umělce omilostní. *Van Meegeren* však záhy po procesu zemřel na zástavu srdce. Případ *van Meegeren* měl významný vliv na další rozsáhlé využívání rentgenových paprsků ve výtvarném umění a přesvědčivě podal hodnověrnost této nedestruktivní metody.

5. Nové přístupy, využívající rentgenové paprsky

Na nový způsob jak detailně zkoumat obrazy skryté pod pozdějšími přemalbami přišli *Joris Dik z university v Delftu* a *Koen Janssens z university v Antverpách*. Jejich nový přístup spočívá hlavně v tom, že i když k analýze používají stejně jako jejich předchůdci rentgenové paprsky, je výsledkem nikoli černobílý, ale barevný snímek zakrytého obrazu. Obraz vystavili *vysokoenergetickému rentgenovému záření v částicovém urychlovači*. S jeho pomocí získali jakousi dvourozměrnou mapu umístění atomů jednotlivých prvků. Se znalostí barevných pigmentů a jejich chemického složení pak dají dohromady barevný obraz. Atomy rtuti jsou součástí červeného barviva a atomy antimonu naznačují přítomnost žlutého pigmentu. Poprvé tuto metodu experti vyzkoušeli na obraze *Vincenta van Gogha Kvetoucí pastvina*, kde pod nánosem barev objevili starší a dosud neznámou *van Goghovu* malbu. *Kvetoucí pastvinu* vytvořil *van Gogh* v roce 1887 v Paříži v ulici *Rue Lepic*. Stejně jako u jiných pláten tohoto období při práci použil svůj starší obraz, který přemaloval. Zmizel tak dřívější obraz ženy, který podle odborníků mohl být jednou z přípravných studií pro slavný obraz *Jedlící brambor* z roku 1885.

Procházet se mezi díly starých mistrů je jistě povznášející, ale ruku na srdce, pokud nemáte k umění bližší vztah, někdy je to docela nuda. Několik století stará plátna strnule visí na zdech proslulých galeriích a nám stále více chybí potřebné propojení s dobou, ve které vznikala, i s malíři, kteří je stvořili. Na geniální nápad, jak v nás znovu probudit zájem o „veké umění“, přišli v jedné z nejslavnějších galerií světa, v *madriidském Prado*. Za pomoci „chytřejšího mobilu“, který je sice stále neovladatelný většinou nám dříve narozeným, pomocí mobilního operačního systému iOS se můžete podívat pod kůži starým obrazům. A věřte tomu, objevy to budou překvapivě vzrušující. Madridští galeristé zatím zpřístupnili zájemcům 14 proslulých děl, ale počítá se s dalšími. To co lze spatřit prostřednictvím rentgenových paprsků pod povrchem malby překvapuje i samotné znalce umění. Jedním z takto prozkoumaných a zpřístupněnou historii je „*Snímání z kříže*“ od nizozemského mistra *Rogiera van der Weydena*, který tvořil v 15. století. Rentgen odkryl na mistrně provedené postavě Jana Křtitele (mimořádně hlavu Jana Křtitele nechal sřát Herodes před ukřižováním Krista) nejen na první pohled nepostřehnutelné slzy kanoucí po jeho tvářích, ale také to, že na původní malbě měl Kristus hrdlo zborčené krví. Tento sadistický prvek ale přemaloval sám *van der Weyden*. V rozích obrazu byly také odkryty malby samostatlých, což vrací malbě původní symboliku. Za prvé vznikla pro cech leuvenských lukostřelců, a za druhé si nelze nevšimnout, že postava umírajícího Krista je prohnuta do siluety připomínající luk.

6. Závěr aneb úvaha proč padělek nemůže mít stejnou hodnotu jako původní dílo

Současný umělec není schopen vyjádřit ve svém díle tvůrčím způsobem ducha, styl, atmosféru a prožitky minulých století stejně jako tehdejší malíři a sochaři. Skutečný umělec je totiž smyslově a citově vázán na vlastní dobu a prostředí více než kterýkoliv jiný člověk. Dílo vytvořené ve stylu dávno minulých období se může napodobiteli podařit jen po formální stránce, nevyvrstá z ducha oné doby, nerozvíjí se v souladu s ním, což je nutný předpoklad každého opravdového uměleckého díla. Apollón z doby klasické Hellady se v ruce umělce patnáctého století změní v pouhou kopii, kterou od originálu odděluje nepřekročitelná propast dvou myšlenkově odlišných epoch. Byzantský člověk se díval na svou dobu svými očima,

středověký člověk, stavitelé katedrál, prožívali a vytvářeli svou dobu právě svými díly. Umělec z přelomu osmnáctého a devatenáctého století viděl, vnímal, radoval se a trpěl jiným způsobem než umělci naší doby. Jiné prostředí, jiné problémy, jiné naděje, jiná zklamání a jiné radosti zrodily jiné výrazové prostředky každého umění. Bachovská kantáta se dá napsat i dnes, když skladatel sestaví noty tak, jak by to udělal Bach – ale přesto to nikdy nedokáže jako on i při využití nejmodernější počítačové techniky: Barokní mistr tak nejen mohl, ale musel tak komponovat. I kdyby se nějaký soudobý umělec vžil do dřívější doby, zůstává přece jen zajatcem současnosti, takže jeho dílo sice může být oděno do hávu jiného století, nikdy však nevyjadřuje jeho ducha. Rozpor mezi formou a obsahem, tématem a výrazem pozná ovšem jen ten, kdo se dovede bez závratí pohybovat po ostří hrany mezi skutečností a zdáním, a to i kdyby měl k dispozici nejmodernější nedestruktivní techniku.

VÝZKUM POUŽITELNOSTI METODY AKUSTICKÉ EMISE PRO DIAGNOSTIKU ŽELEZNIČNÍCH VÝHYBEK AN INVESTIGATION ON THE POTENTIAL APPLICABILITY OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR DEFECTOSCOPY OF TURNOUTS

Marta KOŘENSKÁ*, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Monika MANYCHOVÁ
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Korenska.m@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Výhybka je zařízení umožňující plynulý přechod vozidel z jedné koleje na jinou bez zastavení. Železniční výhybky jsou nutnou součástí železničního svršku, náleží k jeho nejvíce namáhaným částem, proto je nezbytné provádět kontrolu jejich stavu. Po počátečním výzkumu uplatnění metody akustické emise pro hodnocení integrity povrchu železniční trati jsme se zaměřili na možnost využít tuto metodu pro testování železničních výhybek. Záměrem této práce bylo nalézt bezpečné umístění snímačů na jednotlivých částech výhybek a současně ověřit jejich použitelnost. Sledována byla četnost signálů akustické emise na jednotlivých prvcích výhybky při přejezdu vlakové soupravy. Vyhodnocována byla frekvenční spektra zaznamenaných signálů a časový výskyt dominantních frekvencí. Výsledky měření poskytly informaci o zatížení jednotlivých prvků výhybky.

Klíčová slova: železniční výhybky, akustická emise, frekvenční spektra signálů AE

Abstract

A turnout is equipment which allows vehicle smooth passage from one line to other ones without stop. Turnouts are essential parts of track structure which appertain to its most strained parts and that's why their structural health condition monitoring is desirable. We followed up with initial study of use acoustic emission method for evaluation of rail track integrity and focused on the use this method to turnouts testing. Firstly we aimed to finding the sensor safety places and simultaneously to verify their applicability. Acoustic emission count was monitored during train crossing on turnout elements. Frequency spectra of the recorded signals and dominant frequencies time dependence were evaluated. Measurements results proved information about turnout element straining during train crossing.

Key words: turnout, acoustic emission, frequency spectra of AE signals

1. Úvod

Výhybka je drážní zařízení v místě, kde se dráhy (koleje) rozcházejí nebo sbíhají. Umožňuje jízdu vozidla do příslušného směru. Kolejová výhybka je součástí železničního svršku a je jeho nejvíce namáhanou částí. Pro zajištění její bezpečnosti a bezporuchovosti jsou hledány nedestruktivní metody, které by umožnily identifikovat strukturální poruchy v počátečním stadiu. Včasné zjištění poruchy

podstatně sníží náklady na opravy a zabrání případné havárii. Presentovaná práce navazuje na počáteční výzkum zaměřený na ověření možnosti uplatnění metody akustické emise pro účely monitorování stavu kolejnic [1-5]. Na základě výsledků získaných z měření realizovaných in situ byl systém pro detekování akustické emise optimalizován pro testování na železniční trati [6,7]. V další fázi výzkumu jsme se zaměřili na možnost využít metodu akustické emise rovněž pro testování výhybek.

2. Experiment

Předmětem experimentu byla jednoduchá výhybka v základním tvaru (jedna větev přímá, druhá v oblouku), viz obr. 1.



Obr. 1 Pohled na proměřovanou výhybku
Fig. 1 The view of measured turnout

Cílem prvního měření bylo ověřit možnost použití magnetických snímačů na výměnové pohyblivé části výhybky. Hlavní částí výměny tvoří jazyky a opornice, přičemž poloha jazyků určuje směr dalšího pohybu dvojkolí. Z důvodu výluky odbočujících spojů bylo měření realizováno pouze na výhybkách nastavených na přímý směr, t.z. vlak nepřejížděl po výhybce na kolej. Čtyři magnetické snímače byly připojeny na spodní plochu jednotlivých prvků výhybky ve vzdálenosti 170 cm od jejich konce. Umístění a označení snímačů je uvedeno na obr. 2. Snímač 1 byl připojen na pravou opornici, snímač 2 na pravý jazyk, snímač 3 na levou opornici, snímač 5 na levý jazyk. Pravá a levá strana byly stanoveny dle směru příjezdějícího vlaku. Fotosnímek na obr. 3 zobrazuje detail umístění snímačů na pravé opornici a levém jazyku.

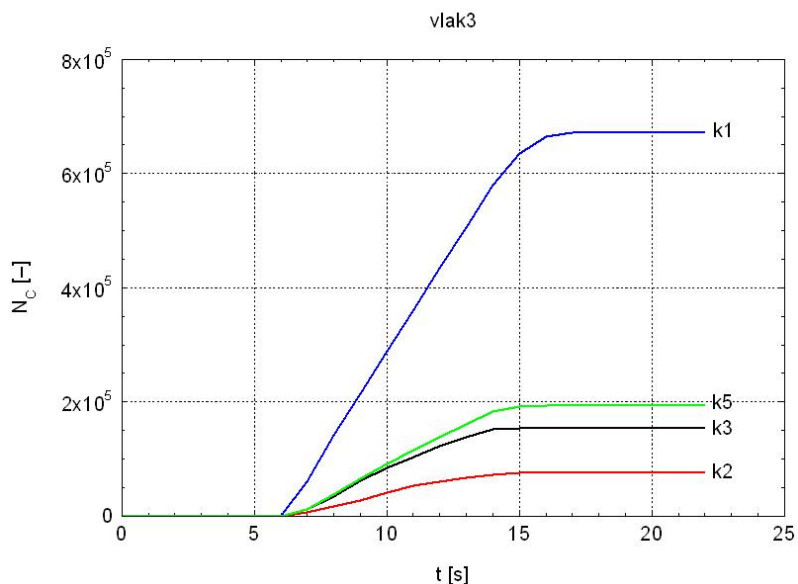


Obr. 2 Umístění snímačů na výhybce, vlaky přejížděly zleva doprava
 Fig. 2 Location of sensors on the turnout, train driving from left to right



Obr. 3 Vlevo snímač 1 na pravé opornici, vpravo snímač 5 na levém jazyku
 Fig. 3 Sensor 1 on right stock rail (left), sensor 5 on left switch blade (right)

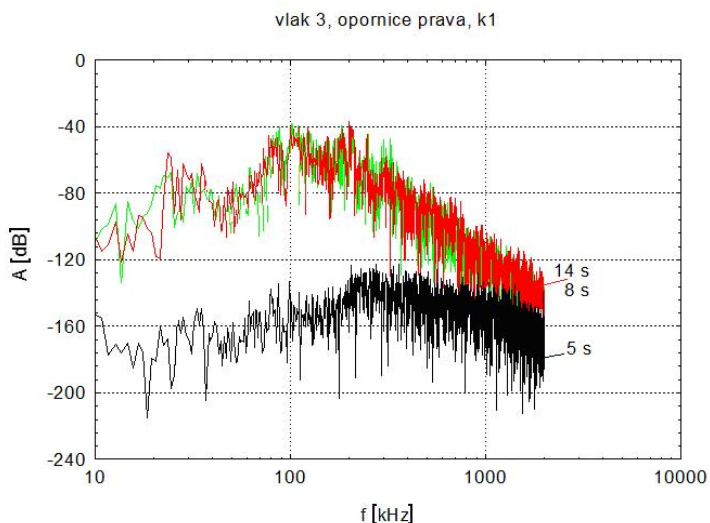
Výsledkem měření je grafické vyhodnocení sledovaných parametrů. Na obr. 3 je zobrazena časová závislost zaznamenaných signálů všemi čtyřmi snímači (číselné označení snímače a příslušného kanálu analyzátoru jsou totožné).



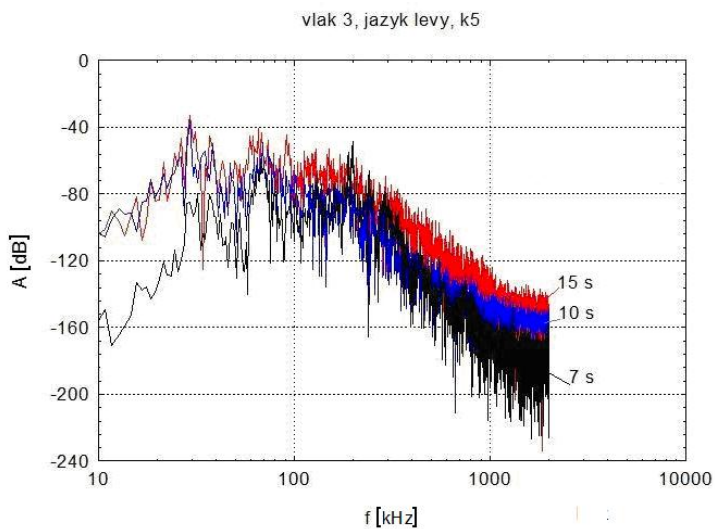
Obr. 3 Časová závislost četnosti signálů AE při přejezdu osobního vlaku
 Fig. 3 Train passage induced AE signal count rate vs. time plot

Z grafu je zřejmé, že prudký nárůst signálů AE byl zaznamenán v časovém intervalu 6 až 16 s. Přičemž maximální počet signálů byl zaznamenán kanálem 1, který odpovídal pravé opornici, která se nacházela nejbliže poježděné koleji. Na obr. 4 jsou zobrazena frekvenční spektra tří signálů AE z tohoto časového úseku. Ve spektru jsou zvýrazněny frekvenční složky v oblasti 30 kHz a 80 kHz a dále v okolí 200 kHz.

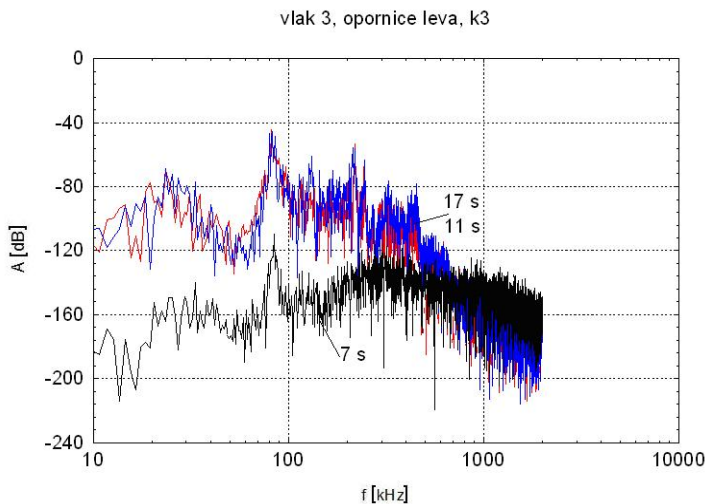
Druhý nejvyšší počet signálů AE zaznamenaný kanálem 5 dosahuje pouze jedné třetiny v porovnání s kanálem 1. Frekvenční spektra tří signálů z časového intervalu 7 s až 15 s jsou zobrazena na obr. 5. Frekvenční spektra opět vykazují tři zvýrazněné oblasti ovšem nejvyšších hodnot dosahují amplitudy frekvenčních složek v blízkém okolí frekvence 30 kHz a 70 kHz, oblast nad 100 kHz je ve srovnání s obr. 4 méně zvýrazněna.



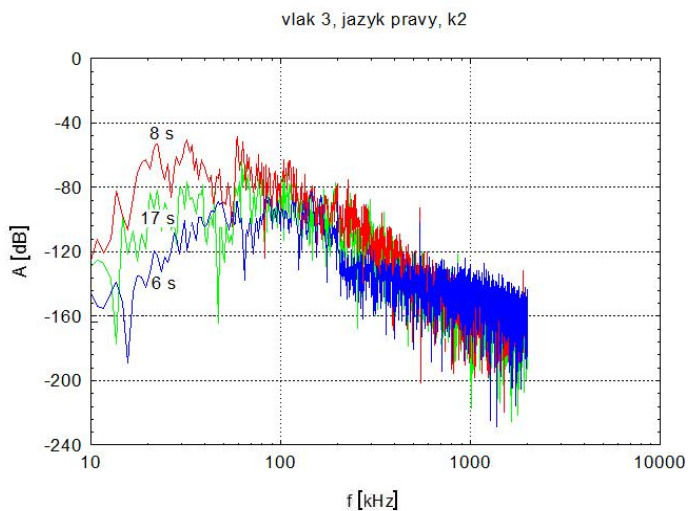
Obr. 4 Frekvenční spektra signálů AE zaznamenaných na opornici pravé (kanál 1)
 Fig. 4 Frequency spectra of AE signals as recorded channel 1 (right stock rail)



Obr. 5 Frekvenční spektra signálů AE zaznamenaných na jazyku levém (kanál 5)
 Fig. 5 Frequency spectra of AE signals as recorded channel 5 (left switch blade)



Obr. 6 Frekvenční spektra signálů AE zaznamenaných na opornici levé (kanál 3)
 Fig. 6 Frequency spectra of AE signals as recorded channel 3 (left stock rail)



Obr. 7 Frekvenční spektra signálů AE zaznamenaných na jazyku pravém (kanál 2)
 Fig. 7 Frequency spectra of AE signals as recorded channel 2 (right switch blade)

V pořadí třetím prvkem výhybky, dle počtu zaznamenaných signálů AE, je opornice levá. Na obr. 6 jsou opět zobrazena frekvenční spektra tří signálů zaznamenaných kanálem 3, z časového intervalu 7 s až 17 s.

Obdobně jako v případě opornice pravé (obr. 4) je potlačena oblast v okolí 30 kHz a zvýrazněny frekvence v okolí 80 a 200 kHz. Nejnižší počet signálů AE byl zaznamenan na jazyku pravém. Frekvenční spektra tří signálů z časového úseku nárůstu signálů (5 s až 17 s) jsou zobrazena na obr. 7. Dominantní frekvence se v tomto případě vyskytují převážně ve frekvenčním rozsahu 20 kHz až 70 kHz, potlačení frekvenční oblasti nad 100 kHz je výraznější v porovnání s obr. 5 odpovídajícím jazyku levému.

3. Závěr

Na základě prezentovaných výsledků měření lze vyvodit následující závěry:

Připojení snímačů pomocí magnetických stykových ploch umožňuje měření na výhybkách; dostatečná pevnost magnetického styku snímače s jednotlivými prvky výhybky byla prokázána rovněž v případě manipulace s výhybkou.

Při přejezdu vlakové soupravy (po nefunkční výhybce) volné prvky výhybky vykazovaly dominantní frekvence v rozsahu frekvencí 10 – 100 kHz, které jsou zřejmě způsobeny mechanickými vlivy a vibracemi; pouze na opornicích se výrazněji projevíly frekvence v okolí 200 kHz související s interakcí dvojkolí s kolejnici.

Poděkování

Tento příspěvek byl vypracován s finanční pomocí EU „OP Výzkum a vývoj pro inovace“, projekt reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního Centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“.

Literatura

- [1] Murav'ev, V.V., Muravev, M.V., Murav'ev, T.V. (2008): The possibilities of acoustic emission testing of rails during exploitation. Russian Journal of Nondestructive Testing, 44 (1), pp. 33-40.
- [2] Yilmazer, P., Amini, A., Papaalias, M., (2013): The Structural health condition monitoring of rail steel using acoustic emission techniques. Centre for Railway Research and Education, University of Birmingham Birmingham, West Midland, B15 2TT, United Kingdom.
- [3] Kostryzhev, A.G., Davis, C.L., Roberts, C., (2013): Detection of crack growth in rail steel using acoustic emission. Ironmaking and Steelmaking, 40 (2), pp. 98-102.
- [4] Thakkar, N.A., Steel, J.A., Reuben, R.L., (2010): Rail-wheel interaction monitoring using Acoustic Emission: A laboratory study of normal rolling signals with natural rail defects. Mechanical Systems and Signal Processing, 24 (1), pp. 256-266.

- [5] Thakkar, N.A., Steel, J.A., Reuben, R.L., (2012): Rail-wheel contact stress assessment using acoustic emission: A laboratory study of the effects of wheel flats. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 226 (1), pp. 3-13.
- [6] Manychova, M., Korenska, M., Pazdera, L., Topolar, L. Janku, M., (2013): An initial investigation on the potential applicability of acoustic methods for contactless rail track fault detection. In Proc. The 43rd International Conference Defektoskopie 2013/NDE for Safety, November 2013, Olomouc, Czech Republic, pp 87-92.
- [7] Korenska, M., Pazdera, L., Topolar, L., Manychova, M., Rodriguezova, V., Janku, M., (2013): The possibilities of acoustic emission testing of rails during exploitation. In Proc. The 43rd International Conference Defektoskopie 2013/NDE for Safety, November 2013, Olomouc, Czech Republic, pp. 71-76.

CHARAKTERISTIKA TEPELNĚ NAMÁHANÝCH VZORKŮ BETONU S OBSAHEM PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A POLYMERNÍHO POJIVA VE STŘÍDAVÉM ELEKTRICKÉM POLI

THERMAL STRESS OF CONCRETE SPECIMENS CONTAINING RUBBER GRANULATE AND POLYMER BINDER CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Ivo KUSÁK, Miroslav LUŇÁK, Ladislav CARBOL, Jan MARTINEK,
Daniela ŠTEFKOVÁ

Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 95, 602 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: kusak.i@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Tato práce se zabývá testováním kompozitů na cementové bázi, které byly vystaveny vysokým teplotám. Nedestruktivní metoda využitá pro testování se jmenuje impedanční spektroskopie. Pro výrobu maltových směsí byl využit Portlandský cement typu CEM I, křemičitý písek a drcené automobilové pneumatiky. Jednotlivé směsi se lišily příměsí drcené pneumatiky a polymeru. Vzorky byly vystaveny vysokým teplotám (rozsah teplot: 23 - 400 °C). Sledování strukturálních změn během tepelného zatěžování je účinný způsob, jak zjistit např. spolehlivost celé konstrukce. Pomocí impedančního spektra byla získána relativní permitivita (pro referenční frekvenci 1 kHz), ztrátový činitel a složky impedance. Na základě Debyeovy teorie dielektrika byla sledována změna impedančních parametrů tepelně zatěžovaných vzorků a byly dány do souvislosti se strukturálními změnami.

Klíčová slova: impedanční spektroskopie, dielektrické ztráty, ztrátový činitel, polymerní pojivo, tepelné zatěžování, pryžový granulát, struktura betonu

Abstract

The present paper deals with the application of impedance spectroscopy method to test cement-based composites after their exposure to high temperatures. A type CEM I Portland cement, siliceous sand and shredded automobile tires were used to prepare mortar specimens. Various mixtures, different admixture shredded tires and the polymer. The specimens were exposed to high temperatures (temperature range: 23 - 400 °C). Monitoring of structural changes during subjection to thermal stress is an effective way to determine the reliability of specimen structure. Based on Debye's dielectric theory, the specimens were created dielectric models. Impedance spectra were obtained, while relative permittivity, loss factor and impedance were also measured. The results obtained at each temperature were an indicator of the structural changes and material reliability.

Key words: impedance spectroscopy, dielectric losses, loss factor, polymer binder, thermal stress, rubber aggregates, concrete structure

1. Úvod

Beton se pro svoji vysokou schopnost odolávat působení tlakových sil a pro svoji trvanlivost široce používá jako hlavní konstrukční materiál v moderních konstrukcích. Beton má však i některé nedostatky. Jedním z nich je omezená houževnatost, respektive křehkost, kvůli které se mohou betonové konstrukce zřítit náhle nebo dokonce explozivně. Tento problém narůstá s pevností betonu a velikostí konstrukcí. Pokud je mez pevnosti byť jen lokálně překročena, může dojít ke katastrofě, a to bez předchozího varování, tj. bez plastické deformace předcházející zřícení. Působení zvýšených teplot tento problém umocňuje [10 - 12].

Monitorování strukturních změn při tepelném namáhání je velmi důležité například pro určení spolehlivosti celé konstrukce. Metoda, která byla pro toto monitorování využita se jmenuje impedanční spektroskopie.

Analýza a popis změn impedančního spektra $\tan \delta(f)$, $\text{Im } Z(f)$ nebo $\text{Re } Z(f)$ u nehomogenních materiálů je součástí této metody, která je stále v rozvoji [1,2]. V současné době nelze zcela jednoznačně určit, které materiálové složky se v jaké míře podílejí na celkové elektrické vodivosti a ovlivňují polarizační složku. Na materiál se tedy zatím díváme spíše komplexně. Materiály, které mají vyšší hodnoty elektrického odporu (přes 500 k Ω), lze považovat (za určitých zjednodušujících předpokladů) za dielektrika. Pro popis chování dielektrických materiálů ve střídavém elektrickém poli byl vytvořen „Debyeův“ model. Nicméně, experimenty prováděné na reálných materiálech ukázaly nesoulad příslušných závěrů se základními teoriemi. Nejvhodnější se tedy zdá popis pomocí modelu „Havriliak-Negami“ [3,4], který popisuje chování materiálu komplexněji. Díky těmto modelům jsme schopni určit například relaxační dobu τ , případně komplexní hodnotu permitivity ϵ^* (včetně jejich složek).

Relaxační polarizace jsou jevy s pomalým průběhem. Různé polární částice, které jsou se sousedními částicemi slaběji vázané, konají kmitavé pohyby a zároveň se vlivem tepelných pohybů chaoticky přemísťují na vzdálenosti přibližně rozměrů molekul. Začne-li působit vnější elektrické pole, jsou jeho účinkem tyto chaotické tepelné pohyby částečně překonány a usměrněny, přičemž se nosiče nábojů zároveň natáčí do směru (nebo proti směru) elektrického pole. Tím vznikne nesymetrické rozložení nábojů v dielektriku a následkem toho vzroste dipólový moment.

Označení těchto polarizací jako relaxační je dáno tím, že od okamžiku, kdy začne působit elektrické pole, narůstá polarizace pomalu a s opožděním, naopak přestane-li elektrické pole působit, polarizace pomalu ubývá. Proto doby potřebné k ustálení těchto jevů, jsou poměrně dlouhé – odtud název pomalé polarizace. Časový průběh jejich dozrívání lze vyjádřit exponenciální závislostí, charakterizovanou časovou konstantou τ (s), nazývanou též relaxační dobou. Pomalé polarizace značně závisí na teplotě i na tepelném pohybu částic, jehož energie je příčinou přemístění částic z jejich rovnovážných poloh, přičemž elektrické pole toto přemístění jen orientuje do svého směru. Proto se často označují jako polarizace tepelné nebo teplotně závislé. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku.

2. Úvod

Materiály. Testovaná tělesa byla vyrobena z cementové malty s vodním součinitelem (W/C) 0,55. Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I Portlandský cement (Českomoravský cement - Heidelberg Cement Group), křemenný písek (maximální velikost 2 mm) a drcené automobilové pneumatiky (velikost v rozmezí od 1-2 mm), které byly využity jako plnivo.

Acronal S400 (BASF), je vodní disperze aniontového kopolymeru akrylového esteru a styrenu, která byla použita jako polymerní pojivo [7,8], (polymerní disperze - 20 % w/w cementové hmoty).

Práškový polymer EVA, se rozpouští ve vodě. Byl použit jako polymerní pojivo ve dvou procentech (10 % hmotnosti cementu). Složení každé směsi a její plasticity jsou uvedeny v **Tabulce 1**.

Drcené odpadní pneumatiky se mohou využívat jako přísada do betonu a přispět tak k hospodárnému řešení likvidace pneumatik. Z výsledků mnoha výzkumů vyplývá, že přidavek pryžového granulátu může nejen zlepšit pružnost a houževnatost betonu, ale i překonat nevýhodu betonu v křehkosti [15]. Použití polymeru jako přísady do pórobetonu se jeví jako efektivní přístup k masivnímu využití odpadních pneumatik.

Text níže popisuje vzorky betonu, kde je drcená automobilová pneumatika využita jako částečná náhrada minerálního kameniva (písku), která má v pórobetonu zlepšit pružnost a tažnost a zlepšit tak mechanické vlastnosti například proti oděru a nárazu. Morfologie hydratačních procesů a mikrostruktura mezifázových přechodových oblastí již byly pozorovány i mikroskopicky [14,15].

Označení	Cement [g]	Písek [g]	Pryžový granulát [g]	Vodní disperze [g]	Polymerní pojivo [g]	Celková voda [g]	W/C	Plasticita [cm]
PAG	500	750	250	-	-	275	0.55	13.0
PAG-AC		750	250	100	50			15.0
PAG-EVA		750	250	-	50**			17.5

Tabulka 1. Složení směsí a jejich plasticita
Table 1. Mortar composition and relevant plasticity

*složení polymerní disperze (50 g vody + 50 g akrylové pojivo ACRONAL S400)

**práškový polymer EVA (50 g - neobsahuje vodu)

Testovaná tělesa tvořily hranoly: 40 mm × 40 mm × 160 mm. Po namíchání byly nejdříve ponechány ve formách po dobu 24 hodin, následně byl proveden proces vytvrzování ve vodě po dobu 27 dnů, a nakonec na vzduchu po dobu 32 dnů při laboratorní teplotě (25 ± 2 °C).

Testování. Připravená testovaná tělesa (Tabulka 1) byla charakterizována metodou impedanční spektroskopie. Byly použity sinusový generátor signálu Agilent 33220A a dvoukanalový paměťový osciloskop Agilent 54645A. Tyto přístroje byly sestaveny dle navrženého schématu pro plně automatizovaného měření [5]. Pro komunikaci zařízení a zpracování dat byl vytvořený software v programovacím prostředí C++ Builder. Vzorky byly proměřovány ve využitém frekvenčním spektru 40 Hz až 1 MHz. Sledované veličiny byly: ztrátový činitel $\tan \delta (f)$, imaginární složka impedance $\text{Im } Z (f)$, reálná složka impedance $\text{Re } Z (f)$ a dopočítána kapacita C pro zvolenou

frekvenci tohoto spektra. Pro možnost provedení impedanční analýzy bylo nutné umístit vzorky mezi mosazné elektrody s povrchem $7 \times 3,5$ cm [5].

3. Výsledky a diskuse

Na Obr. 1 můžeme vidět závislost ztrátového činitele na frekvenci $\tan \delta (f)$ pro vzorky směsi PAG. Ve směsi PAG je nahrazeno 25 % písku drcenou pryží. Sledovaný frekvenční rozsah je 40 Hz - 1 MHz. Jednotlivé křivky odpovídají různému teplotnímu namáhání. U nežíháného vzorku (23 °C) dosahuje ztrátový činitel $\tan \delta$ hodnot od 0,3 do 0,6. Vyžháním směsi PAG teplotou 200°C však došlo ve spektru $\tan \delta$ k velkému nárůstu hodnot až k 1,0 mezi frekvencemi 40 Hz až 1 kHz. Chvost křivky od 1 kHz do 1 MHz je klesající (pokles polarizačních ztrát až na 0,1), uplatní se pouze vliv vodivostních ztrát. Přítomná pryž vytvořila tepelným stresem lepší propojení se složkami betonu a zaplnila volné póry ve vzorku.

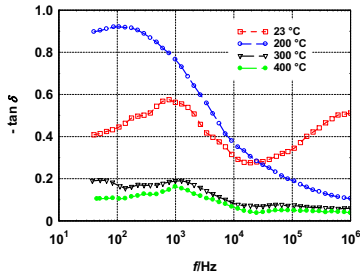
Dalším žháním při vyšších teplotách 300 °C a 400 °C však došlo k degradaci pryže a jejího propojení s částicemi betonu a pravděpodobně k vytečení části pryže ze vzorku. Vzorek se stal více porézním, na povrchu ulpěly uhlíkové složky pryže a povrch se stal více vodivým. Křivky ztrátového činitele ($\tan \delta$) vzorků po žhání 300 °C a 400 °C mimořádně poklesly pod hodnoty 0,2 s mírným zviditelněním polarizačních ztrát v oblasti 40 Hz až 1 kHz. Pro vyšší frekvence jsou hodnoty $\tan \delta$ nízké až na hranici měřitelnosti.

Obr. 2 popisuje změnu relativní permitivity (ϵ_r), reálné složky impedance ($\text{Re } Z$), imaginární složky impedance ($\text{Im } Z$) a absolutní hodnoty impedance $|Z|$ směsi PAG při tepelném namáhání (23 °C až 400 °C). Zvolená referenční frekvence budícího elektrického pole je 1 kHz. Relativní permitivita (ϵ_r) vzorků PAG nevyžhánaných (23 °C laboratorní teplota) hodnotu 185. Dále docházelo k poklesu těchto hodnot: pro teplotu 200 °C dosáhla hodnoty 59, pro teplotu 300 °C dosáhla hodnoty 25 a pro teplotu 400 °C dosáhla hodnoty 22. Diskrétní hodnoty relativní permitivity (ϵ_r) jsou tedy pro teploty 300 °C a 400 °C velmi blízké.

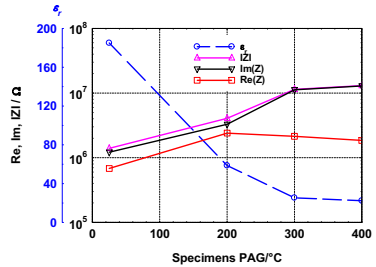
Hodnoty reálné složky impedance ($\text{Re } Z$), imaginární složky impedance ($\text{Im } Z$) i absolutní hodnoty impedance $|Z|$ se zvyšují se zvyšující se teplotou namáhání. Blízké hodnoty těchto složek se opět vyskytují v teplotním rozsahu 300 °C až 400 °C.

Před žháním se impedance (Z) směsi PAG (bez konkrétního určení složky impedance) pohybuje mezi $0,3 \times 10^6 \Omega$ až $1,4 \times 10^6 \Omega$. Vyžháním 200 °C hodnoty vzrostly téměř o řád. Dalším vyžháním při 300 °C se hodnoty zvýšily vyšší mírou než při teplotě 200 °C. Je nasnadě předpokládat, že po žhání 300 °C a vyšším stupni, došlo ke zuhelnatění složek pryže, které přispělo k vodivosti materiálu. Přehledně hodnoty zobrazuje **Tabulka 2**.

Při zahřívání betonu dochází postupně k těmto změnám: Při teplotě do 80 °C dochází ke ztrátě kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti. Při teplotách 80 °C – 150 °C dochází k dehydrataci ettringitu a posléze při teplotách okolo 170 °C k rozkladu sádry $\text{CaSO}_4 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Důsledkem je výskyt explozivního odpráskávání. Při teplotách nad 200 °C dochází ke ztrátě fyzikálně vázané vody a zvýšení vnitřního tlaku. Při teplotách okolo 350 °C dochází k praskání křemičitého kameniva. Při teplotách nad 375 °C už není možná přítomnost vody. Při teplotách 400 °C dochází k rozkladu Portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ [9-12].



Obr. 1 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci (PAG vzorky)
Fig. 1 Loss factor on depending frequency diagram (PAG specimens)



Obr. 2 Hodnoty relativní permittivity a složky impedance (PAG vzorky, $f = 1$ kHz)
Fig. 2 Permittivity values and impedance parts (PAG specimens, $f = 1$ kHz)

Na **Obr. 3** můžeme vidět závislost ztrátového činitele na frekvenci $\tan \delta (f)$ pro vzorky směsi PAG-AC. Směs PAG-AC obsahuje stejné množství pryžového granulátu jako směs PAG a liší se přidavkem akrylového pojiva ACRONAL S400 v množství 50 g. Sledovaný frekvenční rozsah je 40 Hz - 1 MHz. Jednotlivé křivky odpovídají různému teplotnímu namáhání. Srovnáním spekter ztrátového činitele vzorků směsi PAG a PAG-AC (Obr. 3 a Obr. 5) pozorujeme téměř shodu pro ztrátový činitel ($\tan \delta$) nevyžeháných vzorků (23 °C), odchylka nastala v oblasti $f > 10^5$ Hz. Výrazný rozdíl ve spektru nalézáme pro vzorky vyžeháné teplotou 200 °C, kde pro směs PAG-AC nastal pokles hodnot v celém spektru frekvencí. U vzorku s plastifikátorem nevrostly prvním stupněm vyžehání polarizační ztráty. Vyšším stupněm žehání už došlo u obou vzorků k poklesu hodnot ztrátového činitele $\tan \delta$, kde předpokládáme degradaci pryže.

Graf na **Obr. 4** znázorňuje hodnoty relativní permittivity (ϵ_r), reálné složky impedance (Re Z), imaginární složky impedance (Im Z) a absolutní hodnoty impedance |Z| směsi PAG-AC při tepelném namáhání (23 °C až 400 °C). Zvolená referenční frekvence budícího elektrického pole je 1 kHz. Relativní permittivita (ϵ_r) vzorků PAG-AC nevyžeháných (23 °C laboratorní teplota) má hodnotu 121. Dále docházelo k poklesu těchto hodnot: pro teplotu 200 °C dosáhla hodnoty 38, pro teplotu 300 °C dosáhla hodnoty 19 a pro teplotu 400 °C dosáhla hodnoty 16. Diskrétní hodnoty relativní permittivity (ϵ_r) jsou tedy pro teploty 300 °C a 400 °C opět velmi blízké a oproti předešlé směsi PAG se snížily opět o hodnotu 6 (pro teplotu žehání 400 °C). Vzorky směsi PAG-AC (Obr. 6) vykazují o 24-36 % nižší hodnoty relativní permittivity (ϵ_r) se zahrnutím všech teplot žehání než je tomu u vzorků směsi PAG (Obr. 4). Trend poklesu relativní permittivity (ϵ_r) s teplotou žehání je společný a odpovídá postupné degradaci pryže.

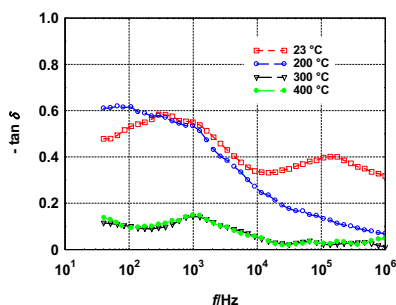
Závislosti elektrické impedance (Z) a jejich složek mají opět stejný trend jako u předešlé směsi PAG. Hodnoty reálné složky impedance (Re Z), imaginární složky impedance (Im Z) i absolutní hodnoty impedance |Z| se zvyšují se zvyšující se teplotou namáhání. Blízké hodnoty těchto složek se opět vyskytují v teplotním rozsahu 300 °C až 400 °C.

Před žiháním se impedance (Z) směsi PAG-AC (bez konkrétního určení složky impedance) pohybuje mezi $1 \times 10^6 \Omega$ až $2,2 \times 10^6 \Omega$. Vyžiháním 200°C se hodnoty impedance pohybovaly v rozmezí $3,2 \times 10^6 \Omega$ až $6,9 \times 10^6 \Omega$. Dalším vyžiháním na 300°C se hodnoty zvýšily až na hodnotu $15,5 \times 10^6 \Omega$. K pozvolnějšímu navýšení impedance (Z) došlo vyžiháním na teplotu 400°C , kde dosáhla hodnoty až $19,1 \times 10^6 \Omega$. Ve všech případech jsou hodnoty absolutní hodnoty impedance $|Z|$ i imaginární složky impedance ($\text{Im } Z$) vzorku s pryží a akrylovým pojivem Acronal S400 (PAG-AC) vyšší než u směsi PAG. Reálná složka impedance je u vzorků s pryžovým granulátem a akrylovým pojivem (PAG-AC) při teplotě žihání do 200°C vyšší než u vzorků směsi PAG. Hodnoty reálné složky impedance $\text{Re}(Z)$ jsou si po vyžihání teplotou 200°C , 300°C a 400°C poměrně blízké. Hodnoty reálné a imaginární složky impedance ($\text{Re } Z$ a $\text{Im } Z$) v grafech na Obr. 2 a Obr. 4 mají stejný trend nárůstu. V **Tabulce 2** vidíme, že všechny hodnoty složek impedance u směsi PAG-AC jsou vyšší než u vzorků směsi PAG. Elektrická kapacita vzorků směsi PAG-AC je naopak nižší.

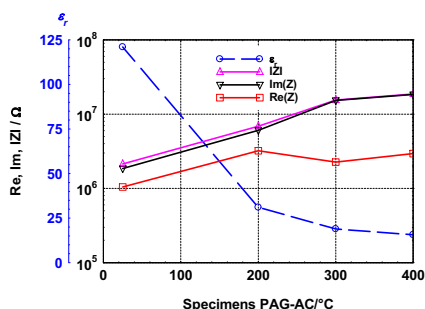
Přidavek polymeru působí jako přidavek složky s nižší polaritou, než je cement, písek a voda.

Zahříváním polymeru dochází k jeho postupné tepelné degradaci. V případě použití polymeru Acronal nejprve dochází k roztržení funkčních skupin a k odštěpení vody a oxidu uhličitého (cca $150\text{--}300^\circ\text{C}$). Tím se na makrořetězci polymeru utvoří cykly, které jsou při vyšších teplotách nestálé. Polymer zde ztrácí své mechanické vlastnosti (pevnost i pružnost).

Další krok termické degradace nastává při teplotě $300\text{--}500^\circ\text{C}$, kdy dochází k postupnému trhání polymerních řetězců, tvorbě dvojných vazeb a také volných radikálů [13,14]. S postupnou degradací polymeru (s odštěpováním postranních funkčních skupin a následnou karbonizací) se zřetelně ztrácí polarita polymeru, jeho vodivost a také permitivita klesá.



Obr. 3 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci (PAG-AC vzorky)
Fig. 3 Loss factor on depending frequency diagram (PAG-AC specimens)

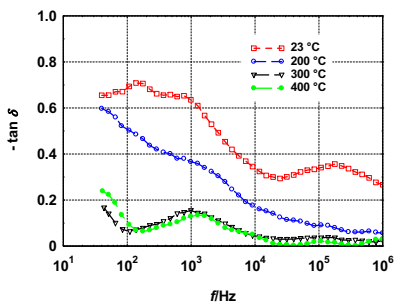


Obr. 4 Hodnoty relativní permitivity a složky impedance (PAG-AC vzorky, $f = 1 \text{ kHz}$)
Fig. 4 Permittivity values and impedance parts (PAG-AC specimens, $f = 1 \text{ kHz}$)

Na Obr. 5 můžeme vidět závislost ztrátového činitele na frekvenci $\tan \delta (f)$ pro vzorky směsi PAG-EVA. Směs PAG-EVA obsahuje stejné množství pryžového granulátu jako směs PAG a PAG-AC a současně je zde přidán práškový polymer EVA v množství 50 g. Sledovaný frekvenční rozsah je 40 Hz - 1 MHz. Jednotlivé křivky odpovídají různému teplotnímu namáhání. Srovnáním spekter ztrátového činitele vzorků směsi PAG-AC a PAG-EVA (Obr. 5 a Obr. 7) pozorujeme jen nepatrně vyšší hodnoty ztrátového činitele ($\tan \delta$) u vzorků směsi PAG-EVA nevyžehnaných vzorků (23 °C) v celé oblasti frekvenčního spektra. Podobný trend vyšších hodnot ztrátového činitele ($\tan \delta$) lze u směsi PAG-EVA oproti směsi PAG-AC sledovat i u ostatních žihacích teplot. Charaktery křivek jsou ovšem podobné. Vyšším stupněm žihání došlo opět u směsi PAG-EVA k výraznému poklesu hodnot ztrátového činitele ($\tan \delta$), kde opět předpokládáme degradaci pryže.

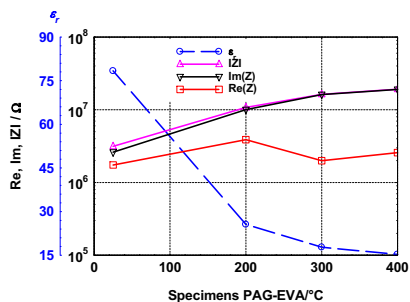
Graf na Obr. 6 znázorňuje hodnoty relativní permittivity (ϵ_r), reálné složky impedance (Re Z), imaginární složky impedance (Im Z) a absolutní hodnoty impedance |Z| směsi PAG-EVA při tepelném namáhání (23 °C až 400 °C). Zvolená referenční frekvence budícího elektrického pole je 1 kHz. Relativní permittivita (ϵ_r) vzorků PAG-EVA nevyžehnaných (23 °C laboratorní teplota) má hodnotu 78. Dále docházelo k poklesu těchto hodnot: pro teplotu 200 °C dosáhla hodnoty 26, pro teplotu 300 °C dosáhla hodnoty 18 a pro teplotu 400 °C dosáhla hodnoty 15. Diskrétní hodnoty relativní permittivity (ϵ_r) jsou pro teploty 300 °C a 400 °C opět velmi blízké. Vzorky směsi PAG-EVA (Obr. 6) vykazují o 5-36 % nižší hodnoty relativní permittivity (ϵ_r) se zahrnutím všech teplot žihání než je tomu u vzorků směsi PAG-AC (Obr. 6). Trend poklesu relativní permittivity (ϵ_r) s teplotou žihání je opět společný a odpovídá stupni degradace pryže.

Závislosti elektrické impedance (Z) a jejích složek mají opět stejný trend jako u předešlé směsi PAG-AC. Hodnoty reálné složky impedance (Re Z), imaginární složky impedance (Im Z) i absolutní hodnoty impedance |Z| se zvyšují se zvyšující se teplotou namáhání. Blízké hodnoty těchto složek se opět vyskytují v teplotním rozsahu 300 °C až 400 °C.



Obr. 5 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci (PAG-EVA vzorky)

Fig. 5 Loss factor on depending frequency diagram (PAG-EVA specimens)



Obr. 6 Hodnoty relativní permittivity a složky impedance (PAG-EVA vzorky, $f = 1$ kHz)

Fig. 6 Permittivity values and impedance parts (PAG-EVA specimens, $f = 1$ kHz)

Před žiháním se impedance (Z) směsi PAG-EVA (bez konkrétního určení složky impedance) pohybuje mezi $1,7 \times 10^6 \Omega$ až $3,2 \times 10^6 \Omega$. Vyžiháním 200°C se hodnoty impedance pohybovaly v rozmezí $3,8 \times 10^6 \Omega$ až $13,9 \times 10^6 \Omega$. Dalším vyžiháním na 300°C se hodnoty zvýšily až na hodnotu $16,4 \times 10^6 \Omega$. K pozvolnějšímu navýšení impedance (Z) došlo vyžiháním na teplotu 400°C , kde dosáhla hodnoty až $19,3 \times 10^6 \Omega$. Ve všech případech jsou hodnoty absolutní hodnoty impedance $|Z|$ i imaginární složky impedance ($\text{Im } Z$) vzorku s pryží a práškovým polymerem EVA (PAG-EVA) vyšší než u směsi PAG i směsi PAG-AC. Reálná složka impedance je u vzorků s pryžovým granulátem a práškovým polymerem (PAG-EVA) při teplotě žihání do 200°C vyšší než u vzorků směsi PAG-AC. Hodnoty reálné složky impedance $\text{Re}(Z)$ jsou si po vyžihání teplotou 200°C , 300°C a 400°C poměrně blízké (stejně jako u směsi PAG-AC). Hodnoty reálné a imaginární složky impedance ($\text{Re } Z$ a $\text{Im } Z$) v grafech na Obr. 4 a Obr. 6 mají stejný trend nárůstu. V **Tabulce 2** vidíme, že všechny hodnoty složek impedance u směsi PAG-EVA jsou vyšší než u vzorků směsi PAG-AC. Elektrická kapacita vzorků směsi PAG-EVA je naopak nižší.

	PAG PAG-AC/PAG-EVA				
	ϵ_r [-]	$\text{Re}(Z)$ [M Ω]	$\text{Im}(Z)$ [M Ω]	$ Z $ [M Ω]	C [pF]
23 °C	185	0.68	1.22	1.39	100.38
	121/78	1.04/1,74	1.86/2.61	2.13/3.14	65.63/42.51
200 °C	59	2.40	3.29	4.08	31.80
	38/26	3.21/3.88	6.07/10.07	6.87/10.79	20.64/13.88
300 °C	25	2.14	11.22	11.43	13.78
	19/18	2.26/1.99	15.31/16.18	15.48/16.31	10.25/9.63
400 °C	22	1.85	12.92	13.05	12.17
	16/15	2.94/2.57	19.04/19.04	18.66/19.21	8.49/8.28

Tabulka 2. Elektrické parametry vzorků (pro referenční referenci 1 kHz)
Table 2. Electrical parameters of specimens (reference frequency of 1 kHz)

4. Závěr

V příspěvku je popisována změna elektrických parametrů testovaných materiálů bez a s příměsí pryžového granulátu jako částečnou náhražkou písku. Dále byla diskutována změna impedančního spektra u vzorků, které se lišily přidavkem plastifikátoru. Vzorky byly tepelně zatěžovány a byly dány do souvislosti změny ve struktuře vzorků s relativní permitivitou, ztrátovým činitelem a složkami impedance. S postupnou degradací akrylového polymeru (s následkem štěpení funkčních skupin a následné karbonizaci) dochází nejenom ke ztrátě polarity a snížení vodivosti, ale také ke snížení jeho permitivity.

Poděkování

This paper was elaborated with the financial support of the European Union's "Operational Program Research and Development for Innovations", No. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, as an activity of the regional Centre AdMaS "Advanced Materials, Structures and Technologies".

Literatura

- [1] I. Kusák, M. Luňák, 'Comparison of Impedance Spectra of Concrete Recorded with Utilizing Carbon Transition Paste', in: Adv Mater Res. Vol. 897 (2014), p. 131-134.
- [2] M. Luňák, I. Kusák, Z. Chobola, 'Dielectric Properties of Concrete Specimens after Heat Stress', in: Appl Mech and Mater. Vol. 446-447 (2014), p. 1389-1394.
- [3] M. Cabeza, P. Merino, A. Miranda, X.R. Novoa and I. Sanchez, 'Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste', in: Cem Concr Res. Vol. 32 (2002), p. 881-91.
- [4] M. Luňák, I. Kusák, L. Pazdera, L. Topolář, V. Bilek, '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).
- [5] I. Kusák, M. Luňák, P. Schauer, 'Tracing of Concrete Hydration by Means of Impedance Spectroscopy (New Tool for Building Elements Testing)', in: Appl Mech Mater. Vol. 248 (2013), p. 370-378.
- [6] L. Pazdera, L. Topolář, V. Bilek, J. Smutný, I. Kusák, M. Luňák, 'Measuring of Concrete Properties during Hardening', In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 311-318. ISBN 978-80-244-2533-7, (2010).
- [7] Z. Czech, R. Pelech, 'Thermal deradation of butyl acrylate-methyl acrylate-acrylic acid-copolymers', in: J of Therm Anal Calorim, Vol. 96 (2) (2009), p. 583–586.
- [8] S. Dubinsky, G.S. Grader, G.E. Shter, M.S. Silverstein, 'Thermal degradation of poly(acrylic acid) containing cooper nitrate', in: Polym Degrad Stabil. Vol. 86 (2004), p. 171-178.
- [9] T. Krejčí, T. Nový, L. Sehnoutek and J. Sejnoha, 'Structure – Subsoil Interaction in view of Transport Processes in Porous Madia', CTU Reports 1, 2001, CTU Prague.
- [10] U. Schneider: 'Behaviour of concrete and high temperature', Fachbereich Bauingenieurwesen, Universita Gesamthochschule kastel, Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst ; sohn, Berlin, 1982.
- [11] G.M. Xie and Z.Z. Qian, 'Research on bond and pension behavior of concrete after high temperature', J Zhejiang Univ. Vol.32, p.597-602, (1998).
- [12] P.K. Mehta, P.J.M. Nonteiro, 'Concrete: structure, properties and materials', Prentic-Hall, Englewood Clifs, NJ, (1993).
- [13] M. Cabeza, P. Merino, A. Miranda, X.R. Novoa and I. Sanchez, 'Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste', Cem and Concr Res, 32 881-91 (2002).
- [14] F. Pelisser, N. Zavarise, TA. Longo, et al., 'Concrete made with recycled tire rubber. Effect of alkaline activation and silica fume addition', J Cleaner Prod, Vol. 19, p. 757–763 (2011).

- [15] IB. Topcu, '*The properties of rubberized concrete*', Cem and Concr Res; Vol. 25, p. 304–310 (1995).
- [16] Y.S. Rohana Yahya, A.R. Azura and Z. Ahmad, '*Effect of Curing Systems on Thermal Degradation Behaviour of Natural Rubber (SMR CV 60)*', Jour Phys Sci, Vol. 22, Issue 2, p. 1–14, (2011).
- [17] A.J. Conesa, I. Martin-Gullo'n, R. Font, '*Rubber tire thermal decomposition in a used oil environment*', J. Anal. Appl. Pyrolysis, Vol. 74, p. 265–269, (2005).
- [18] E.Kwon and M.J. Castaldi, '*An investigation of the thermal degradation mechanisms of a waste tire through chemical analysis including hydrocarbons, benzene derivatives, and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) at high temperature*', Proceedings of NAWTEC16 16th Annual North American Waste-to-Energy Conference, May 19-21, 2008, Philadelphia, Pennsylvania, USA.



VYUŽITÍ GEORADARU PŘI DIAGNOSTICE VOZOVEK NA MOSTECH

DIAGNOSTICS OF BRIDGE PAVEMENTS BY GROUND PENETRATING RADAR

Radek MATULA*, Josef STRYK*, Karel POSPÍŠIL*

*Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
Contact e-mail: radek.matula@cdiv.cz

Abstrakt

Článek je zaměřen na zjištění přesnosti při stanovení tloušťky vrstev asfaltové vozovky na mostě při použití georadaru (GPR) a možnosti identifikovat potenciálně riziková místa, kde může, vlivem proměnlivé tloušťky a nedostatečného spolupůsobení vrstev, vzniknout ve vozovce porucha.

Měření pobíhalo v blízkosti vysprávek, které byly před jejich vyplněním správkovou hmotou přesně změřeny. Ověřovalo se zde použití autokalibračních metod pro stanovení rychlosti šíření EM signálu vozovkou, které nevyžaduje provádění kontrolních vývrtů.

Klíčová slova: georadar, rychlost šíření EM signálu, silniční most, vysprávky

Abstract

The paper aims to determine bridge pavement thickness accuracy by using ground penetrating radar (GPR) and to identify potentially risky spots, where a crack may occur due to the effect of variable thickness and insufficient connection of layers.

The measurements were performed in the vicinity of patches in asphalt layers, which had been accurately measured before they were filled. The use of auto calibrating methods for the determination of electromagnetic (EM) signal propagation velocity through pavement, which needs no cores, was tested.

Key words: ground penetrating radar, velocity of EM signal propagation, bridge, patches

1. Úvod

Georadar má již určitou tradici při diagnostice objektů dopravní infrastruktury. Dá se využít nejenom pro jednorázové zjištění stavu konstrukce, ale také pro srovnání vývoje za určité časové období. Georadar se zpravidla nepoužívá přímo jako přejímací zkouška, ale slouží spíše k vyhledávání slabých a poškozených míst konstrukce, které vznikají v průběhu jejího užívání. Často se kombinuje s jinými metodami. Některé aplikace se již standardně uplatňují v praxi, jiné se teprve ověřují v rámci výzkumných projektů.

Významným aspektem pro měření georadarem je rychlost měření. U liniových staveb se zpravidla provádí měření jen v podélném směru a za vysokých rychlostí tak, aby nedocházelo k omezování provozu na pozemní komunikaci. V tomto případě se měření často provádí jednou nebo několika trychtýřovitými anténami, případně polem

antén. Některé aplikace vyžadují lokální měření, které se provádí zpravidla jednou nebo několika anténami typu dipól.

2. Současný stav poznatků

Jediným technickým předpisem v ČR, který popisuje diagnostiku pozemních komunikací georadarem je TP 233 [1]. V těchto technických podmínkách Ministerstva dopravy jsou obecně popsány možnosti využití georadaru při diagnostickém průzkumu konstrukcí pozemních komunikací. Jediná aplikace, u které je uvedena přesnost měření, je stanovení polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonových krytech vozovek, kde se uvádí, že pokud se provede kalibrace, lze očekávat přesnost při určení hloubek uložení těchto prvků do 1,0 cm. V jednání je doplnění TP 207 [2] o kapitolu: „Experiment přesnosti zařízení měřících tloušťky vrstev vozovek pozemních komunikací“, kde je uvedeno, jak postupovat při provádění srovnávacího měření georadarových zařízení. Experiment přesnosti dle tohoto doporučení nebyl u nás doposud realizován.

V zahraničí existuje velké množství článků a výzkumných zpráv k tomuto tématu. Níže jsou uvedeny pouze vybrané a nejaktuálnější z nich. Velmi komplexní jsou americké zprávy z programu SHRP 2 [3-5], a výsledky evropského projektu Maranord [6-8].

Jednou z prvních aplikací georadaru v silničním stavitelství související s tématem předkládaného článku bylo kontinuální stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovky [9-11]. Jedná se o zjištění tloušťek krytových a podkladních vrstev.

Co se týká diagnostiky mostních objektů georadarem, měření se zpravidla provádí, až když se vyskytnou nějaké problémy zjištěné v rámci vizuální prohlídky. Většinou se diagnostika týká stavu mostovky [12–15], tloušťek vrstev vozovky, napojení na mostovku, ale i dalších aplikací jako jsou:

- poloha betonářské výztuže v mostovce,
- krytí betonářské výztuže v mostovce,
- poloha předpínacích kabelů a ocelových kanálků [16],
- stav porušení mostovky (trhliny, kaverny, atd.),
- tloušťka mostovky,
- spolupůsobení a delaminace asfaltových vrstev,
- diagnostika mostních nosníků [17], apod.

Výzkumné aplikace v oblasti diagnostiky mostních objektů jsou následující:

- průměr výztuže zabudované v betonu [18],
- stav výztuže v mostovce (např. stav koroze výztuže) [19],
- stav těsnící vrstvy mostovky [20],
- stav vlhkosti.

3. Metoda měření

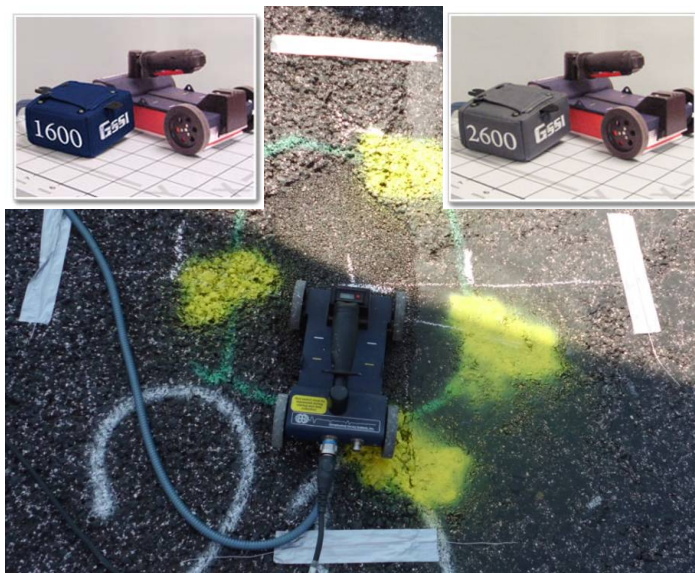
Obvykle se pro účely stanovení rychlosti šíření elektromagnetického signálu jednotlivými konstrukčními vrstvami vozovek provádí minimálně jeden vývrt. Tímto způsobem se kalibrují stanovené tloušťky vrstev. Jelikož žádné vývrty ani odečty hloubky vysprávek obrusné vrstvy nebyly předem k dispozici, použily se pro účely

vyhodnocení rychlosti šíření zjištěné měřením dvěma anténami metodou CMP (Common Midpoint Method).

Měření proběhlo při uzavírce celého levého jízdního pásu na dálničním mostě. Pro měření byla použita sestava georadaru (obr. 1), obsahující dipólové antény se střední vysílací frekvencí 1,6 a 2,6 GHz americké firmy GSSI. Tato sestava je vhodná pro lokální měření menších tloušťek vrstev vozovky při uzavírkách.

Měření georadarem bylo provedeno v blízkosti čtyř vysrávek, v liniích u sledovaných míst, které byly vyznačeny žlutým sprejem, viz obr. 1. V místě jedné vysrávky bylo provedeno podrobné měření v šesti příčných a sedmi podélných liniích. V místě ostatních vysrávek bylo provedeno měření v jednom podélném a jednom příčném směru (vždy třikrát pro každou linii). Celkem bylo provedeno 46 měření georadarem, ze kterých bylo následně stanoveno 20 tloušťek asfaltových vrstev v konkrétních místech.

Pro snadnější identifikaci délky jednotlivých přejezdů byly na povrch vozovky nalepeny ocelové drátky, které jednoznačně identifikovaly začátek a konec měření v georadarových záznamech a také bylo použito manuální zaznamenávání označovačem.



Obr. 1 Sestava georadaru pro lokální měření

Fig.1 GPR set for local measurement

Tloušťky vrstev byly vypočítány ze změřeného času průchodu signálu asfaltovými vrstvami a z určené rychlosti šíření EM signálu v asfaltových vrstvách. Rychlosti šíření byly stanoveny autokalibrační metodou CMP (Common Midpoint Method) na vysrávkách a v blízkosti těchto vysrávek. Celkem byla takto provedena čtyři měření a vypočítané rychlosti šíření jsou uvedeny v tabulce 1.

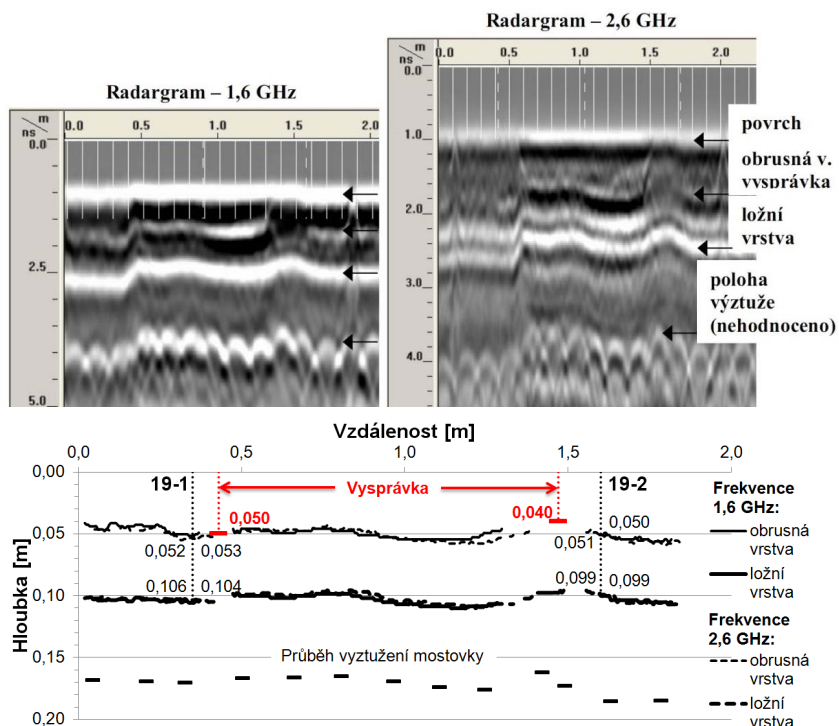
Tab. 1 Stanovené rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity
 Tab. 1 Determined velocity of EM signal propagation and relative permittivity

Vrstva	Rychlost šíření EM signálu [m/ns]	Relativní permitivita materiálu
obrusná vrstva	0,110	7,4
vysprávka	0,145	4,3
ložní vrstva	0,140	4,6

4. Výsledky měření

Výsledky všech měření byly interpretovány pro každý přejezd v následující formě, viz obr. 2:

- interpretace záznamů z georadaru pro frekvence 1,6 a 2,6 GHz
- grafické vyhodnocení tloušťek vrstev se zaznačením sledovaných míst.



Obr. 2 Shora: Radargramy získané z jednoho přejezdu přes vysprávku anténami 1,6 a 2,6 GHz; grafické vyhodnocení tloušťek vrstev se zaznačením skutečné změřené tloušťky vrstev (červeně)

Fig. 2 Radargrams obtained from a ride over one patch by 1.6 and 2.6 GHz antennas (top); layer thicknesses with marked really measured layer thicknesses -in red (bottom)

Tabulkové vyhodnocení tloušťek asfaltových vrstev ve sledovaných místech je uvedeno v tab. 2. Jako přesnější byly vybrány hodnoty měřené anténou 2,6 GHz, které byly brány jako výsledné. Hodnoty měřené anténou 1,6 GHz měly spíše kontrolní charakter.

Tab. 2 Vypočítané tloušťky asfaltových vrstev
Tab. 2 Calculated thicknesses of asphalt layers

Sledované místo	Tloušťka obrusné vrstvy [m]		Hloubka ložní vrstvy [m]	
	f: 1,6 GHz	f: 2,6 GHz	f: 1,6 GHz	f: 2,6 GHz
18-1	0,036	0,040	0,084	0,080
18-1	0,036	0,040	0,084	0,079
18-2	0,041	0,043	0,090	0,085
18-2	0,043	0,045	0,092	0,085
18-3	0,037	0,040	0,088	0,085
18-3	0,037	0,041	0,087	0,085
18-4	0,040	0,043	0,084	0,081
18-4	0,040	0,040	0,084	0,081
19-1	0,052	0,053	0,106	0,104
19-2	0,051	0,050	0,099	0,099
19-3	0,048	0,052	0,105	0,104
19-4	0,049	0,052	0,105	0,103
20-1	0,033	0,037	0,101	0,104
20-2	0,037	0,041	0,103	0,106
20-3	0,040	0,041	0,110	0,109
20-4	0,035	0,036	0,101	0,101
21-1	0,052	0,053	0,116	0,116
21-2	0,052	0,056	0,112	0,113
21-3	0,053	0,057	0,116	0,116
21-4	0,048	0,054	0,115	0,115

5. Porovnání skutečných tloušťek obrusné vrstvy s výsledky měření georadarem

Porovnání výsledků bylo provedeno až po zpracování výsledků měření tloušťek asfaltových vrstev georadarem. Skutečné tloušťky obrusné vrstvy v místě vysprávek byly změřeny pracovníky správce pozemní komunikace před vyplněním ohraničeného prostoru výtluku asfaltovou směsí a byly porovnány s výsledky měření georadarem .

Porovnání skutečných tloušťek vrstev ve sledovaných místech a výsledků nedestruktivního měření georadarem je uvedeno v tabulce 3.

Maximální chyba zjištění tloušťky vrstev georadarem na místě č. 19-2 (označena v tabulce 3 tučně) je zdůvodněna následovně. Průběh tloušťky obrusné vrstvy není v tomto místě konstantní, navíc přímé měření hloubky výtluku před jeho zapravením bylo provedeno na okraji vysrávky a georadarové stanovení tloušťky obrusné vrstvy bylo provedeno cca 10 cm od okraje vysrávky (v těsné blízkosti okraje vysrávky je měření zkresleno kvůli přechodu mezi dvěma odlišnými prostředními), viz obr. 2. Průběh tloušťky obrusné vrstvy v blízkosti sousedního místa 19-1 je poměrně konstantní a proto zde nebyla zjištěna taková chyba měření.

Tab. 3 Porovnání zjištěných tlouštěk asfaltových vrstev
Tab. 3 Comparison of measured asphalt layer thicknesses

Sledované místo	Tloušťka obrusné vrstvy [m]		Rozdíl [m]
	Skutečná tloušťka	Tloušťka zjištěná georadarem 2,6 GHz	
18-1	0,040	0,040	0,000
18-1	0,040	0,040	0,000
18-2	0,045	0,043	-0,002
18-2	0,045	0,045	0,000
18-3	0,040	0,040	0,000
18-3	0,040	0,041	+0,001
18-4	0,040	0,043	+0,003
18-4	0,040	0,040	0,000
19-1	0,050	0,053	+0,003
19-2	0,040	0,050	+0,010
19-3	0,050	0,052	+0,002
19-4	0,050	0,052	+0,002
20-1	0,040	0,037	-0,003
20-2	0,040	0,041	+0,001
20-3	0,040	0,041	+0,001
20-4	0,030	0,036	+0,006
21-1	0,050	0,053	+0,003
21-2	0,050	0,056	+0,006
21-3	0,050	0,057	+0,007
21-4	0,050	0,054	+0,004

Po zohlednění výše uvedeného se dá konstatovat, že tloušťka obrusné vrstvy v místě vysrávek byla georadarem s centrální vysílací frekvencí 2,6 GHz zjištěna s přesností +/- 3 mm, což je cca 6-7 % z tloušťky obrusné vrstvy.

6. Závěr

Bylo dosaženo vysokých přesností při nedestruktivním určení tloušťky obrusné vrstvy vozovky na mostě. Výsledky z měření georadarem anténami o dvou frekvencích byly porovnány mezi sebou u všech sledovaných vysprávek obrusné vrstvy vozovky. Přesnější byly hodnoty naměřené anténou 2,6 GHz, které byly brány jako výsledné.

V případech, kdy nejsou k dispozici údaje z kontrolních vývrtů, se ukázalo jako velice přínosné nasazení autokalibrační metody CMP (Common Midpoint Method).

Dá se konstatovat, že tloušťka obrusné vrstvy v místě výtluků byla georadarem s centrální vysílací frekvencí 2,6 GHz zjištěna s přesností +/- 3 mm, což je cca 6-7 % z tloušťky obrusné vrstvy.

V dalších krocích řešení se předpokládá vyrobení přípravku s možností automaticky řízeného oddalování vysílače a přijímače georadaru, který urychlí měření metodou CMP (nebo metodou WARR - Wide Angle Reflection and Reflection).

Výsledky výzkumu se mohou promítnout do současných i připravovaných technických předpisů, které se týkají nedestruktivní diagnostiky objektů dopravní infrastruktury georadarem.

Poděkování

Výše uvedené měření bylo provedeno v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky č: TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure).

Literatura

- [1] TP 233, 2011. "Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací", (technické podmínky Ministerstva dopravy ČR), (<http://www.pjpk.cz/TP%20233.pdf>).
- [2] TP 207, 2009. "Experiment přesnosti zařízení pro měření povrchových vlastností a průhybu vozovek pozemních komunikací" (technické podmínky Ministerstva dopravy ČR), (<http://www.pjpk.cz/TP%20207.pdf>).
- [3] SHRP 2, Strategic Highway Research Program 2, 2013. "Nondestructive testing to identify delaminations between HMA layers: Volumes 1 and 2", Transportation Research Board.
- [4] SHRP 2, Strategic Highway Research Program 2, 2013. "Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration", Transportation Research Board.
- [5] SHRP 2, Strategic Highway Research Program 2, 2013. "Mapping voids, debonding, delaminations, moisture, and other defects behind or within tunnel linings", Transportation Research Board.
- [6] Mara Nord Project, 2011. "Recommendations for guidelines for the use of GPR in road construction quality control".
- [7] Mara Nord Project, 2011. "The use of GPR in road rehabilitation projects".
- [8] Mara Nord Project, 2011. "Recommendations for guidelines for the use of GPR in bridge deck surveys".
- [9] Saarenketo, T., 2006. "Electrical properties of road materials and subgrade soil and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys", Faculty

of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Ph.D. dissertation work, 121 p.

- [10] Fauchard, C.; Rejiba, F.; Dérobert, X.; Côte, Ph. and Sagnard, F., 2008. "*Step frequency radar applied for asphalt thickness measurements with various interface conditions*", In 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Birmingham, UK.
- [11] Loizos, A. and Plati, Ch., 2007. "*Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches*", NDT&E International, vol. 40, pp. 147-157.
- [12] Tarussov, A.; Vandry, M. and De La Haza, A., 2013. "*Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation*", Construction and Building Materials, vol. 38, pp. 1246-1254.
- [13] Hugenschmidt, J. and Mastrangelo, R., 2006. "*GPR inspection of concrete bridges*", Cement and Concrete Composites, vol. 28(4), pp. 384–392.
- [14] Sbartai, Z.M.; Laurens, S.; Rhazi, J.; Balayssac, J.P. and Arliguie, G., 2007. "*Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity*", Journal of Applied Geophysics, vol. 62, pp. 361-374.
- [15] Benedetto, A.; Manacorda, G.; Simi, A. and Tosti, F., 2012. "*Novel perspectives in bridges inspection using GPR*", Nondestructive Testing and Evaluation, vol. 27(3), pp. 239-251.
- [16] Dérobert, X. and Berenger, B., 2010. "*Case study: Expertise and reinforcement of a particular ribbed slab post-tensioned structure*", Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, vol. 2, pp. 574-584.
- [17] Beben, D.; Mordak, A. and Anigacz, W., 2012. "*Identification of viaduct beam parameters using the ground penetrating radar (GPR) technique*", NDT&E International, vol. 49, pp. 18–26.
- [18] Chang, CH.W.; Lin, CH.H. and Lien, H.S., 2009. "*Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR*", Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 1057–1063.
- [19] Hubbard, S.S.; Zhang, J.; et al, 2003. "*Experimental detection of reinforcing bar corrosion using nondestructive geophysical techniques*", Aci Materials Journal, vol. 100(6), pp. 501-510.
- [20] Dérobert X.; et al, 2011. "*Pathologies, diagnostic et réparation des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art*", Techn. et Méthodes LPC, chapter 6, annex 2, 199 p.

Kontaktní adresa autorů :

Oblast dopravní infrastruktury, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Líšeňská 33a, 636 00, Brno, tel.: +420 541 641 711, radek.matula@cdv.cz, josef.stryk@cdv.cz, karel.pospisil@cdv.cz.



KONTROLA CELISTVOSTI VLOŽENÝCH VÁLCŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ POMOCÍ PENETRAČNÍ METODY

CHECKING THE INTEGRITY OF THE CYLINDER LINERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY PENETRATION METHODS

Josef NEUGEBAUER

PTS Josef Solnař s.r.o.

neugebauer@ptsndt.com

Abstrakt

Příspěvek se zabývá využitím penetrační metody v opravárenské praxi. Článek se věnuje kontrole vložených válců spalovacích motorů. Zkoušení je realizováno bez demontáže těchto válcových vložek z motoru.

Tato kontrola umí s velkou přesností určit prasklou vložku v celé ploše pracovní části a to, za snížených finančních nákladů.

Klíčová slova: *zkoušení penetrační metodou, spalovací motor, válcová vložka, opravárenství*

Abstract

The paper deals with the use of penetrating methods in the repair practice. The article deals with the control of cylinder liners of internal combustion engines. Testing is carried out without disassembly of cylinder liners of the engine.

This control can be determined with high accuracy cracked liner over the entire surface and this causes reduction financial costs

Key words: *liquid penetrant testing, combustion engine, cylinder, repair*

Úvod

Podstatou tohoto příspěvku je využití penetrační metody ke kontrole vložených válců spalovacích motorů. Tato kontrola probíhá na válcích bez jejich demontáže z motoru. Důvodem provádění těchto kontrol byla nutnost ověřit informaci dílny (řidiče) o prasklé vložce nebo hlavě spalovacího motoru

Tato kontrola s úspěchem dokáže odhalit prasklou válcovou vložku a to ve skoro celé výšce pracovní části válcové vložky. Vedlejším produktem je též kontrola celistvosti dosedací plochy bloku spalovacího motoru a hlav.

Válcové vložky, rozdělení, způsoby namáhání a opotřebení

Válce pístového spalovacího motoru jsou součástí bloku spalovacího motoru. Obecně rozdělujeme bloky spalovacích motorů s válci vloženými a válci odlitými. Výhodou vložených válců je možnost výměny válce, jenž je neschopen plnit požadované funkce.

Vložené válce pak dělíme podle kontaktu vnější plochy s chladícím médiem. Tedy zda jsou nebo nejsou v kontaktu s chladícím médiem, pak tedy zpravidla rozlišujeme válce suché a válce mokré.



Obr. 1 Mokrý válcová vložka; Cylinder

Podle způsobu uložení vloženého válce v bloku motoru dělíme válce na válce s horní dosedací plochou (tzv. visící či zavěšené), a s dolní dosedací plochou.

Válce spalovacích motorů plní tyto následující požadavky:

- stěny válce ohraničují pracovní prostor
- válce zabezpečují vedení pístu a zachycují síly vázané na kinematiku klikového mechanismu
- válce tvoří kluznou a těsnící plochu, přičemž povrch pracovní plochy válce musí zajistit vytvoření a udržení olejového filmu ve všech režimech práce spalovacího motoru
- válce zabezpečují odvod tepla a taktéž chlazení spalovacího prostoru

Za provozu je válec pístového spalovacího motoru namáhán silami od tlaku plynů, normálovými silami od pístu a v neposlední řadě také změnou teploty. Pracovní plocha je také namáhána třením a její opotřebení zvyšuje abrazivní a korozivní účinek provozních hmot a produktů spalování.

Výše jmenované účinky se ještě násobí nedodržením technologických pokynů při montáži.

Poznamenejme, že na tzv. mokré straně je povrch vloženého válce namáhám korozivními a také kavitačními účinky chladícího média.

Zkušební kapilární metodou bylo prováděno na mokřích válcových vložkách s horní dosedací plochou

Současné způsoby kontroly vložených válců

V současnosti se běžně provádí kontrola vložených válců vizuálně nebo metodou ultrazvukovou. Ultrazvuková kontrola je omezena pouze na oblast příruby pouzdra, tzv. límce. Kontrolu se zpravidla provádí z vnitřní strany vloženého válce a zkoušenou oblastí je právě jen horní okraj vloženého válce.

Zkouška se provádí pomocí ultrazvukové úhlové sondy jejíž dosedací plocha je zabroušena na potřebný rádius.

Uvedme nevýhody této zkoušky:

- pod kontrolou je pouze malá část plochy vloženého válce
- pro každé vrtání válce je potřeba konkrétně zabroušená ultrazvuková úhlová sonda
- vložené válce s malým průměrem vyžadují zabrousit dosedací plochu ultrazvukové sondy na takový rádius, který je pro sondu z hlediska její konstrukce nemožný

Předkládaná kontrola vložených válců eliminuje výše uvedené nevýhody zkoušky ultrazvukové.

Kontrola vložených válců metodou penetrační

Zkoušení vložených válců pístových spalovacích motorů jsme zkušebně prováděli na vznětových, čtyřdobých přeplňovaných, vodou chlazených ležatých šestiválcích. Konkrétně LIAZ M 1.2C - ML 640D s výkonem 300 kW. Vrtání vložených válců u pístového spalovacího motoru tohoto typu je 130 mm.



Obr. 2 LIAZ M1.2.C-ML640

Námi prováděná kontrola byla zaměřena na vnitřní plochu vloženého válce a přilehlé dosedací plochy bloku spalovacího motoru.

Kontrolu jsme prováděli v několika identických krocích, vždy pro dva vložené válce. Před započítím penetračního zkoušení je potřeba provést přesunutí pístů kontrolovaného vloženého válce do dolní úvratí. Natočení provádíme montážním klíčem na výstupním hřídeli spalovacího motoru. Po dosažení dolní úvratí, z konstrukce uvedeného spalovacího motoru vždy u dvou pístů, můžeme začít s prováděním penetrační zkoušky podle standardních postupů.



Obr. 3 Před provedením zkoušky; Before to testing

Zkoušku tedy začneme dokonalým očištěním kontrolovaných povrchů od všech nečistot. Pro uspokojivý výsledek zkoušky je bezpodmínečně nutno odstranit veškeré zbytky karbonu na stěnách vloženého válce.



Obr. 4 Provozovaný motor; Combustion engine

Dalším kritickým místem při čištění kontrolovaných povrchů jsou všechny montážní otvory, otvory pro vačkovou hřídel a další. Všechny tyto otvory jsou více méně naplněny mazacím olejem. V praxi využíváme ucpání větších otvorů čistým hadrem, nepouštějícím vlas. Povrch po aplikaci čističe důkladně vytřeme čistým hadrem.

Nyní nic nebrání tomu, abychom mohli nanášet, penetrant. Tento nanáším na vnitřní stěnu válce až do úrovně pístu a také na přilehlou dosedací plochu bloku spalovacího motoru.



Obr. 5 Místa kontroly; Place of inspection

Během penetračního času je nutno opakovaným nástřikem penetrantu zabránit jeho zaschnutí či stečení z kontrolovaných povrchů.

Dobu penetrace ovlivňuje teplota zkoušeného povrchu a teplota okolí. V praxi jsme si ověřili, že při teplotách pod 15°C je výsledek zkoušky neprůkazný. Tudiž se držíme pravidla 2x15. Toto pravidlo znamená min. 15°C a min 15 min penetračního času. Po uplynutí penetračního času nastává velmi choulostivá část operace. Odstranění přebytku penetrantu.

Jak si určitě každý, kdo s penetrační metodou začínal, ověřil – nedostatečně odstraněný přebytek penetrantu znehodnotí celou zkoušku. Také při kontrole vložených válců v zavázaném stavu platí toto pravidlo více jak 100%. Obrázek vyčištěné, používané vložky dává jasnou představu o pracovní ploše, kterou zkoušíme a nároky na její vyčištění.



Obr. 6 Pracovní plocha válcové vložky; The working surface of a cylinder

Již z konfigurace součástí, jež fyzicky vymezují kontrolní prostor je zřejmé, že je zde velmi mnoho míst, kde se hromadí penetrant. Tento pak se škodolibou pravidelností znehodnotí celou naši práci. Při odstranění přebytku penetrantu se velmi osvědčil

nástřík kontrolovaných ploch čističem a následné vytření několika čistými hadry. V další fázi odstraníme ucpávky technologických otvorů a nahradíme je čistými hadry. Okraje opatrně oťžeme.

Nastává poslední část zkoušení – nanesení vývojky. Při nanášení vývojky do vloženého válce se velmi osvědčilo několikeré fouknutí do spalovacího prostoru, které urychlí zasychání vývojky. Zde je nutno začít co nejdříve hodnotit. A to z toho důvodu, že penetrant, který zatekl mezi píst a vložený válec začíná rychle kolem válce pronikat do vývojky.

Jako poslední hodnotíme dosedací plochu bloku spalovacího motoru.

Vyhodnocení a závěr

Ve sledovaném období bylo uvedenou metodou odzkoušeno 20 spalovacích motorů, což znamená 120 vložených válců. Kontrola byla vždy prováděna na žádost dílny a to při podezření na prasklý vložený válec či hlavu.

Něco málo statistických údajů:

Zkontrolováno podezřelých vložených válců	Vyřazeno	%
120	98	82

= 73% všech zkontrolovaných válcových vložek (88 vložených válců) byla detekována lineární trhlina, orientovaná rovnoběžně s podélnou osou válce a nacházející se cca ve 2/3 výšky vloženého válce (směrem od příruby).

= 7% všech zkontrolovaných válcových vložek (8 vložených válců) byla lineární trhlina u horního okraje (u příruby) nebo přímo v přírubě vloženého válce.

= 2% všech zkontrolovaných válcových vložek (2 vložené válce) měly indikace vady typu pór (kavitace).

Zbýlých 18 % nevyřazených válcových vložek se rozdělilo takto:

= 10% (12 ks) byly prasklé hlavy spalovacího motoru

= 8% (10 ks) se podezření nepotvrdilo

Závěr

Jak je zřejmé z uvedeného, tato metoda vykazuje dobrou spolehlivost. Je relativně rychlá a levná. Jejím nedostatkem je ovšem značná pozornost, kterou musíme věnovat odstranění přebytečného penetrantu.



PŘÍNOS METODY AKUSTICKÉ EMISE PRO ZKOUŠKY KONTAKTNÍ ÚNAVY CONTRIBUTION OF THE ACOUSTIC EMISSION METHOD TO ROLLING CONTACT FATIGUE TESTS

Libor NOHÁL, Lukáš KOMENDA, Pavel MAZAL
Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav konstruování
Contact e-mail: nohal@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Zkoušky materiálů na odolnost proti kontaktní únavě jsou prováděny na mnoha typech zkušebních zařízení. Přítomnost kontaktní únavy na povrchu vzorku je většinou indikována pomocí vibrací. Nicméně v posledních letech nachází uplatnění pro zpřesnění detekce počátečního poškození i metoda akustické emise. V této práci jsou prezentovány výsledky ze zkoušek ložiskové oceli 100Cr6 a zkoušek vlivu maziv na kontaktní únavu. Metoda akustické emise přináší další informace pro identifikaci počátků kontaktní únavy a procesů probíhajících během zkoušek.

Klíčová slova: akustická emise, kontaktní únava, pitting, mazivo

Abstract

The tests of materials on rolling contact fatigue are carried out on many types of test-rigs. Presence of rolling contact fatigue on the sample surface is usually indicated by vibration. However, in the last years acoustic emission method has been used for more accurate detection of initial damage. This paper presents the results of tests bearing steel 100Cr6 and testing the effect of lubricants on contact fatigue. Acoustic Emission method provides additional information to identify the origins of contact fatigue and processes occurring during the tests.

Key words: acoustic emission, rolling contact fatigue, pitting, lubricant

1. Úvod

Mezi základní parametry ložiska patří základní dynamická únosnost, která je definována dle ISO 281 jako stálé neproměnné zatížení, které může ložisko teoreticky přenášet při základní trvanlivosti jednoho milionu otáček. Zkoušky základní dynamické únosnosti jsou díky velkému počtu ložisek nutných pro spolehlivé statistické zhodnocení ekonomicky náročné. Z tohoto důvodu se provádí zkoušky trvanlivosti na geometricky jednoduchých tělesech – disky, válečky, kuličky apod. Běžně se pro detekci počátku kontaktní únavy – pittingu, která je limitujícím faktorem trvanlivosti valivého kontaktu, při těchto zkouškách využívá monitorování vibrací. Nicméně v posledních letech byly publikovány práce zabývající se identifikací počátečních stádií kontaktní únavy pomocí metody akustické emise.

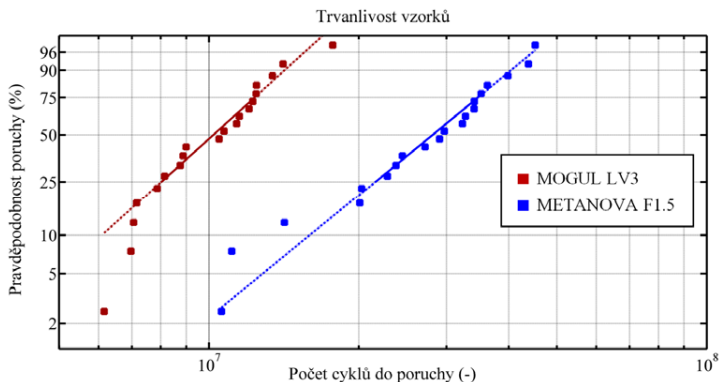
Počátky aplikace metody akustické emise v monitorování vzniku poškození ve valivých ložiscích, respektive valivém kontaktu, můžeme datovat do 70. let 20. století. Jednou z prvních prací zabývajících se hodnocením vzniku kontaktního poškození ve valivém kontaktu publikoval Balderston [1]. Jeho práce mezi prvními poukázala na schopnost metody akustické emise detekovat dřívější stádium poškození. Prováděl experimenty s uměle vytvořeným poškozením za podmínky hladového kontaktu. Yoshioka a Fujiwara [2] provedli sérii experimentů na zařízení pro zkoušky plochého vzorku. Vzorek materiálu byl axiálně zatěžován přes tři kuličky vedené v kleci. Metoda akustické emise detekovala při těchto experimentech dřívější stádium kontaktní únavy. Na práci Yoshioky navázali Elforjani a Mba [3], kteří prováděli experimenty na axiálně zatěžovaném kuličkovém ložisku, u kterého byl jeden kroužek nahrazen kroužkem z válečkového axiálního ložiska – plochým vzorkem. Experimenty probíhaly při nízkých otáčkách 76 min^{-1} až do vzniku spallingu na povrchu ložiska. Autoři tohoto článku prezentovali dříve výsledky zkoušek cementační oceli 17MnCr5 provedených na obdobném zařízení pracujících standardně při zatížení kontaktním tlakem 5 000 MPa a otáčkách $1\,380 \text{ min}^{-1}$ [5]. Zde byla prezentována schopnost metody akustické emise detekovat kontaktní poškození dříve, než vibrodiagnostika. Zpřesněnou detekci kontaktního poškození se zabýval i Rahman et al. [4], kteří prováděli experimenty na dvou-diskovém zařízení. Pro charakterizaci poškození využívali četnost emisních událostí. Byli schopni charakterizovat velikost defektu a pomocí snímače polohy lokalizovat defekt na kkušebním kotouči.

2. Metodika

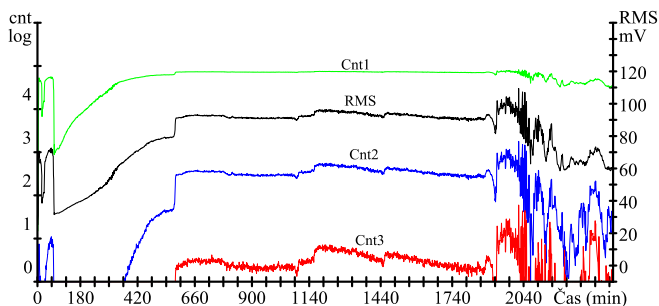
Pro experimenty bylo použito zařízení AXMAT pro zkoušky diskového tvaru až do průměru 70 mm, viz [5]. V experimentech byly použity vzorky o rozměrech $28 \times 10 \times 5$ mm (vnější průměr, vnitřní průměr, tloušťka) vyrobené z dvou typů oceli (100Cr6, 16MnCr5). Vzorky byly tepelně zpracovány a broušeny na drsnost Ra 0.2. Zatěžovací maximální Hertzovo kontaktní napětí bylo 5 000 MPa, otáčky byly konstantní 1380 min^{-1} . Jako opěrný kroužek byl použit kroužek z ložiska ZKL 51102A P6 a 21 kuliček průměru 3.175 mm. Kontakt byl mazán plastickým mazivem na bázi lithného mýdla MOGUL LV 2–3, nebo plastickým mazivem s EP aditivem Metanova F1.5.

3. Výsledky

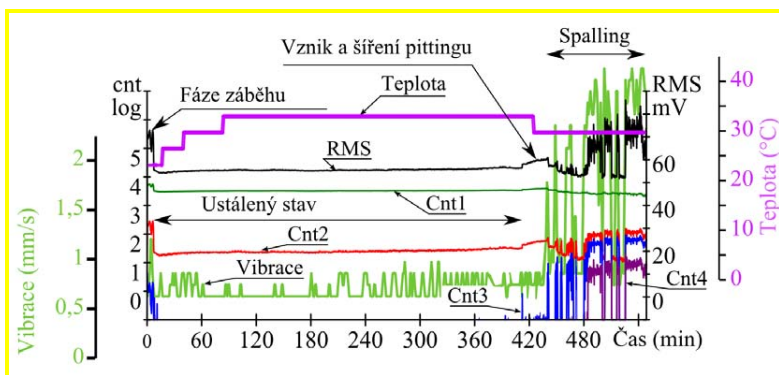
Na obrázku 1 je znázorněn výsledek zkoušek porovnávací vliv výše zmíněných maziv s EP aditivem a bez EP aditiva na trvanlivost kontaktu. Experimenty byly provedeny v rámci bakalářské práce, viz [7]. Záznam základních parametrů akustické emise jedné z těchto zkoušek s použitím EP maziva je znázorněn na obrázku 2. Zde je zobrazen charakteristický průběh efektivní hodnoty signálu – RMS, a tří hladin četnosti překmitů přes detekční práh. Během fáze záběhu – cca prvních 15 min zkoušky, narůstají při použití maziva bez EP aditiv všechny parametry AE. Po této fázi nastává standardně ustálený stav, kdy se hodnota AE parametru mění minimálně. U zkoušek s EP mazivem dochází k razantnímu nárůstu, poklesu a pak trvalému růstu parametrů až do ustálení, což je pravděpodobně způsobeno reakcí složek maziva (aditiv) s povrchem kkušebního vzorku. Záznam parametrů AE, vibrací a teploty ze zkoušky materiálu 100Cr6 mazaného mazivem MOGUL LV 2-3 bez EP aditiv je zobrazen na obr.3.



Obr. 1 Trvanlivost materiálu 100Cr6 při použití dvou druhů maziv
Fig. 1 Durability of material 100Cr6 lubricated by two types of grease

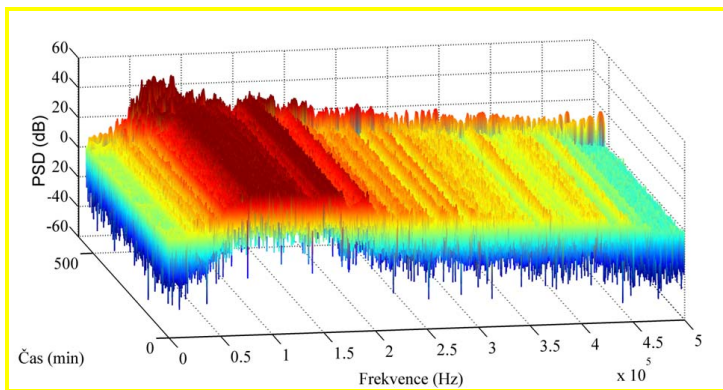


Obr. 2 Záznam RMS a tři hladiny četnosti překmitů – METANOVA F 1.5
Fig. 2 Graph of RMS and three levels of count rate – METANOVA F 1.5



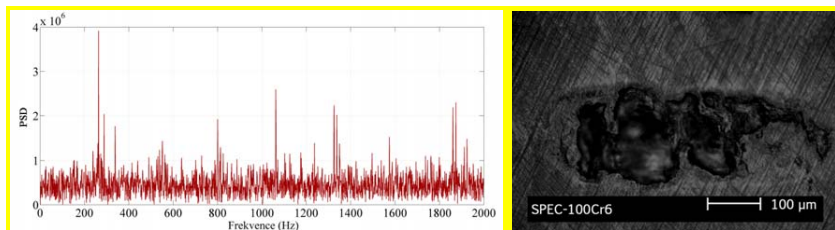
Obr. 3 Záznam zkoušky materiálu 100Cr6 (vibrace, RMS, teplota, četnost překmitů)
Fig. 3 Observation of 100Cr6 test (vibration, RMS, temperature, count-rate)

Na obr. 4 je zobrazeno časově-frekvenční spektrum zkoušky, jejíž časové parametry AE jsou zobrazeny v obr. 3. Je zde patrné, že během zkoušky nedochází ke změnám ve frekvenci. Až v závěru zkoušky při výskytu rozsáhlejšího spallingu je patrný nárůst v amplitudě napříč celým spektrem.



*Obr. 4 Časově-frekvenční spektrum zkoušky 100Cr6
Fig. 4 Time-frequency spectrum from 100Cr6 test*

Přítomnost defektu lze identifikovat demodulací signálu pomocí Hilbertovy transformace a vytvořením frekvenčního spektra z obálky signálu AE. Výsledek je zobrazen na obr. 5 vlevo, maximální pík odpovídá frekvenci defektu 241,5 Hz. Takto identifikovaný defekt je zobrazen na obr. 5 vpravo.



*Obr. 5 Frekvenční spektrum obálky signálu (vlevo) a detail defektu (vpravo)
Fig. 5 Frequency spectrum of signal envelope (left) and detail of defect (right)*

4. Závěr

Byly zde prezentovány výsledky ze zkoušek ložiskové oceli 100Cr6 mazaných plastickým mazivem bez EP aditiv a s EP aditivou. Metoda akustické emise dokáže charakterizovat procesy probíhající při reakcích aditiv s povrchem materiálu, případně detekovat dřívější stádium kontaktního poškození proti tradiční vibrodiagnostice. Přítomnost defektu lze identifikovat ve spektru demodulovaného signálu AE Hilbertovou transformací. Metoda akustické emise přináší další informace o procesech probíhajících ve valivém kontaktu během zkoušek trvanlivosti a doplňuje tak běžně monitorované veličiny, jako vibrace a teplota.

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního příspěvku Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Literatura

- [1] BALDERSTON, H. L.; Incipient Failure Detection, The detection of incipient failure in bearings. *Materials Evaluation*, 1969, Vol 27, pp 121-128.
- [2] YOSHIOKA T. a FUJIWARA T. Application of acoustic emission technique to detection of rolling bearing failure, American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division publication PED, 1984, Vol. 14, pp. 55-76.
- [3] ELFORJANI, M. a MBA, D. Accelerated natural fault diagnosis in slow speed bearings with Acoustic Emission. *Engineering Fracture Mechanics*, Jan 2010, Vol. 77, No. 1, p. 112-127.
- [4] RAHMAN Z., OHBA H., YOSHIOKA T., YAMAMOTO T., Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission, *Tribology International*, Vol. 42, No. 6, June 2009, pp. 807-815, ISSN 0301-679.
- [5] NOHÁL, L.; HORT, F.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. An Experimental Investigation of Rolling Contact Fatigue of Steels Using Acoustic Emission Method. *INSIGHT*, 2013, roč. 55, č. 12, s. 665-669. ISSN: 1354- 2575. DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2012.55.12.665>
- [6] MIETTINEN, J. a ANDERSSON, P. Acoustic Emission of Rolling Bearings Lubricated with Contaminated Grease. *Tribology International*, 2000, Vol. 33, pp. 777-787.
- [7] ŠEMBERA, V. *Experimentální studium vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Nohál.



POKROČILÉ NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ BĚHEM TVRDNUTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÉ STRUSKY

ADVANCED NON-DESTRUCTIVE TESTING DURING THE HARDENING OF ALKALI-ACTIVATED SLAG

Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Kristýna TIMČAKOVÁ-ŠAMÁRKOVÁ,
Peter RYPÁK, Olesia MIKHAILOVA, Pavel ROVNANÍK

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering
Contact e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Článek uvádí výsledky měření v průběhu tvrdnutí a sušení vzorků alkalicky aktivovaných struskových malt. Alkalicky aktivovaná struska je materiál, který má velký potenciál pro použití v praxi. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je na vysoké autogenní smrštění a to zejména z autogenního smrštění sušením, což způsobuje zhoršení mechanických vlastností. Cílem tohoto příspěvku je představit vliv způsobu a doby ošetřování na mikrostrukturu alkalicky aktivované struskové malty. Pochopení vztahů mikrostruktury je klíčem k pravému pochopení chování materiálů. Výsledky získané v laboratoři jsou užitečné pro pochopení různých fází aktivity mikrotrhliny během tuhnutí u kvazi-křehkých materiálů, jako jsou alkalicky aktivované struskové malty a jejich rozšíření pro aplikace.

Abstract

This paper reports the results of measurements during hardening and drying of specimens of alkali-activated slag mortars. Alkali activated slag is a material having a great potential to be used in practice. The main drawback of this material is a high level of autogenous and especially drying shrinkage, which causes a deterioration of the mechanical properties. The aim of this paper is introduce the effect of method and time curing on the microstructure of alkali activated slag mortars. An understanding of microstructure–performance relationships is the key to true understanding of material behaviours. The results obtained in the laboratory are useful to understand the various stages of micro-cracking activity during the hardening process in quasi-brittle materials such as alkali activated slag mortars and extend them for field applications.

Key words: *acoustic emission method, duration of acoustic emission signals, amplitude of acoustic emission signals, alkali-activated slag, loss in weight*

1. Úvod

Akustická emise je termín pro emisi vyzařovanou materiály a konstrukcemi, pokud jsou vystaveny zatížení, které může být mechanické, tepelné nebo chemické [1]. Tato emise je způsobeno rychlým uvolněním energie v materiálu v důsledku událostí, jako je tvorba trhlin, a následné šíření vyskytující se na základě aplikovaného napětí, které vytváří přechodné elastické vlny, jež mohou být detekovány pomocí piezoelektrických čidel [2]. Metodou akustické emise lze sledovat změny v chování materiálů po dlouhou dobu a bez pohybu jejich komponentů. To je technika zcela unikátní spolu se schopností detekovat trhliny, které se generují nejen na povrchu, ale i hluboko uvnitř materiálu. Metoda akustické emise je považována za "pasivní" nedestruktivní technika, protože obvykle identifikuje vady, které se vyvíjejí v průběhu zkoušky [3].

Impact-echo je druh nedestruktivní zkušební metody, kdy mechanické krátkodobé buzení, generované klepnutím kladiva na povrch betonové konstrukce, vytváří nízkofrekvenční napěťové vlny, které se šíří do struktury [4]. Takto vytvořená vlna se šíří prostřednictvím struktury vzorku a odráží od vad nacházejících se v objemu nebo na povrchu. Povrchové posuny způsobené odraženými vlnami jsou zaznamenány pomocí snímače umístěného v blízkosti dopadu [5]. Signál je digitalizován pomocí analogového / digitálního datového systému a přenášen do paměti počítače. Tento signál popisuje přechodné místní vibrace, které jsou způsobeny mechanickými vlnami mnohonásobných odrazů uvnitř konstrukce. Dominantní frekvence těchto vibrací podává zprávu o stavu struktury, kterou vlny procházejí. [6]

Alkalicky aktivovaných alkalicky aktivované materiály představují alternativu k běžnému portlandskému cementu, tedy snížení dopadu stavebnictví na životní prostředí a nabízí nové vynikající vlastnosti. Alkalicky aktivovaná struska je založen na granulované vysokopeční strusce, která může být aktivována pomocí alkalických hydroxidů, uhličitanu nebo nejvýhodněji silikátů [7]. Druh a dávka aktivátoru, jakož i způsob vytvrzení mají významný vliv na průběh a hydratační konečné mechanické vlastnosti [8]. Hlavní nevýhodou Alkalicky aktivovaná struska je zvýšená smrštění při vytvrzování období, způsobené jak autogenním tak smrštěním sušením, což nakonec vede k objemové kontrakci, mikrovady a zhoršení tahu a ohybových vlastností [9].

2. Experiment

Krátkodobý mechanický impuls (úder kladivem) se aplikuje na povrch vzorku během zkoušky a je detekován pomocí piezoelektrického snímače. Impuls se odráží od povrchu, ale také od mikrotrhlin a defektů přítomných ve vzorku, které jsou předmětem sledování. Rezonanční frekvence je stanovena pomocí frekvenční analýzy. Dominantní frekvence může být určen ze signálu odezvy pomocí rychlé Fourierovy transformace. Piezoelektrický snímač MIDI byl použit k zachycení odezvy a příslušné podněty směřovaly do vstupu osciloskopu dvoukanálového TiePie Engineering Handyscope HS3 s rozlišením 16 bitů. [10]

Iniciace trhlin v průběhu vytvrzování byla sledována metodou akustické emise. Signály akustické emise byly pořízeny měřícím zařízením DAKEL XEDO se čtyřmi kanály. [11]

Změna hmotnosti v průběhu vytvrzování byla měřena pomocí zařízení QuantumX se siloměrem Z6 pro maximální hmotnost 50 kg od HBM.

Pro testování ultrazvukem byl použit měřicí přístroj PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester).

Směs pro vytvoření tří vzorků 40 x 40 x 160 mm byla vytvořena ze 450 g jemně zrnité granulované vysokopecní strusky Štramberg 380 (specifický povrch 380 m² / kg), 180 g křemičitanu sodného (vodní sklo), s modulem 1,6, oxid křemičitý, písek s třemi různými zrnitostmi, tj. 450 g od každé velikosti zrna, a 95 ml vody. Alkalicky aktivovaná strusková suspenze byla nalita do forem z oceli (40 x 40 x 160 mm). Po 24 hodinách byly vzorky odformovány a jedna směs byla měřena a druhá byla ponořena do vody po dobu dalších 28 dní před testováním.

3. Výsledky

Pro hodnocení původu mikrotrhlin při napětí, jsme se zaměřili na aktivitu akustické emise, respektive na nejpoužívanější parametr, kterým je počet překmitů, které přesáhly práh předem nastavený. Schéma na Obr. 1 ukazuje závislost počtu překmitů v čas. Předpokládalo se, že počet mikrotrhlin může být odvozena z činnosti akustické emise. Bohužel, signály akustické emise pocházejí nejen z tvorby trhlin, ale také z procesu odpařování vody. Nicméně, většina z počtu aktivity byla pozorována v průběhu prvních 24 hodin po spontánním sušení.

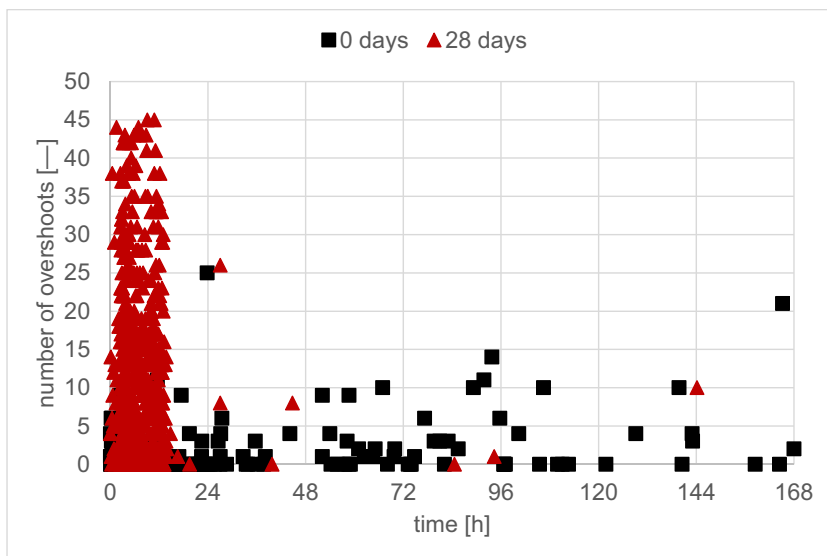


Fig. 1 Dependence of number of acoustic emission overshoots versus time for both specimen

Obr. 1 Závislost počtu akustické emise překročí v závislosti na čase pro oba vzorky

Pro vyhodnocení signálů z Impact-echo metody byla použita rychlá Fourierova transformace. Modifikace dominantní frekvence v průběhu procesu sušení je zobrazena na Obr. 2. Frekvence se změnila od 5010 Hz do 6800 Hz, v průběhu prvních 70 hodin od začátku měření, a poté se držela na konstantní hodnotě asi 5630 Hz u vzorku bez uložení ve vodě. Výsledek ukazuje, že frekvence se snížila z počáteční hodnoty 12120 Hz do 8440 Hz na konstantní hodnotu pro vzorek ve vodě po dobu 28 dnů.

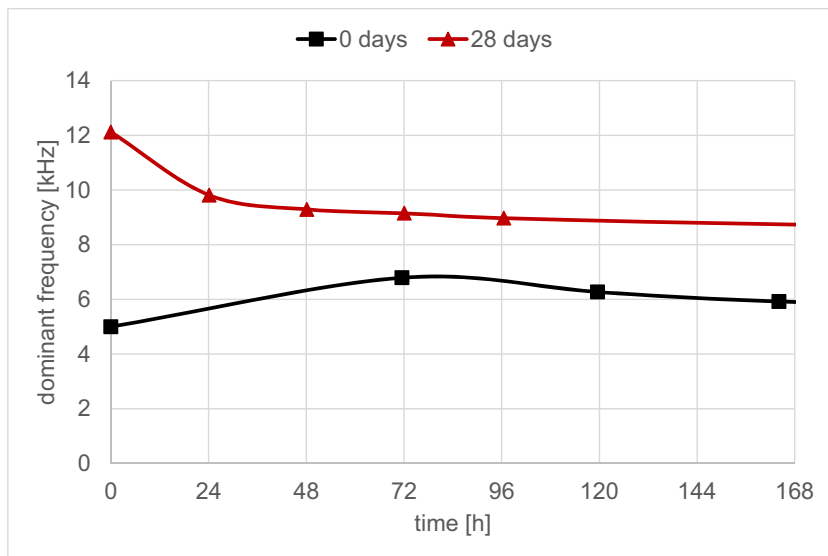


Fig. 2 Change of dominant frequency over time for both specimen

Obr. 2 Změna dominantní frekvence v průběhu doby pro oba vzorku

Srovnání úbytku hmotnosti pro různě chráněné vzorky je uveden na Obr. 3. Úbytek hmotnosti byla vypočtena vzhledem k dosažení rovnovážného stavu po spontánním sušení. Relativní váha v ustáleném stavu byla stanoven na 1. Lze předpokládat, že alkalicky aktivované vzorky, které nebyly zcela hydratované, byly více porézní, a tudíž obsahovaly vyšší množství neodpařitelné vody.

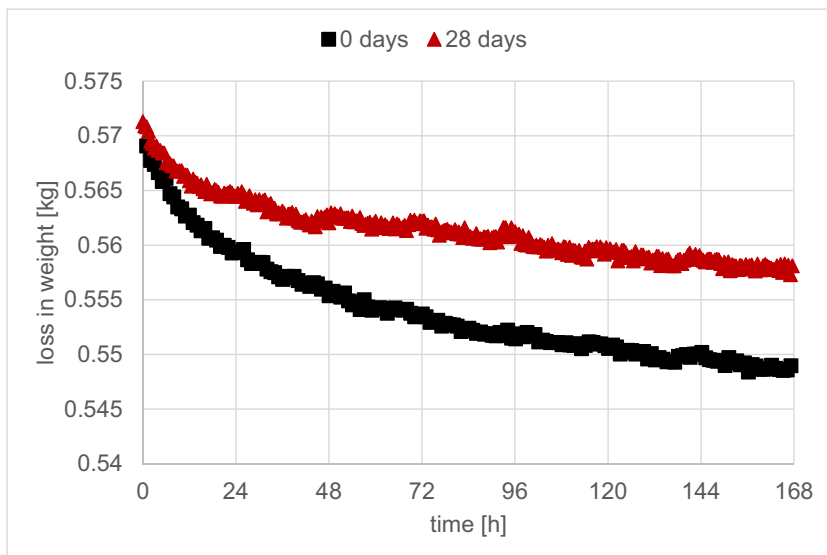


Fig. 3 Dependence of loss in weight versus time for both specimens

Obr. 3 Závislost úbytku hmotnosti v závislosti na čase pro oba vzorky

4. Závěr

Článek se zabývá využitím akustických metod v průběhu tuhnutí, tvrdnutí a zrání alkalicky aktivovaných struskových malt. Změny objemové alkalicky aktivované struskové malty jsou spojeny s autogenním smršťováním a smršťování od vysychání. Úbytek hmotnosti pozorovaný během tuhnutí a tvrdnutí alkalicky aktivovaných strusek je výsledkem procesu sušení. Rychlost uvolňování vlhkosti je v dobrém souladu s počtem signálů zjištěných metodou akustické emise. Také jsou patrné změny dominantní frekvencí směrem k nižším hodnotám u obou vzorků. Předpokládáme, že většina z těchto signálů lze přičíst vzniku trhlin. Proto, lze dojít k závěru, že hlavní proces, který vede k zhoršení alkalicky aktivovaného struskového pojiva je spojena s smrštěním sušením.

Poděkování

Tento příspěvek byl vypracován s finanční pomocí EU „OP Výzkum a vývoj pro inovace“, projekt reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního Centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“

Literatura

- [1] G. Shuling, T. Wenling, W. Ling, Ch. Pei, W. Xiaowei, Q. Jinli, Comparison of the Mechanics and Durability of Hybrid Fibre Reinforced Concrete and Frost Resistant Concrete in Bridge Deck Pavement, in: Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation, China, 2010, pp. 2927-2935.
- [2] M. Korenska, M. Manychova, L. Pazdera, Experimental study of the nonlinear effects generated in a concrete structure with damaged integrity, Russian Journal of Nondestructive Testing 49 (2013) 530-537.
- [3] Ch.U. Grosse, M. Ohtsu, Acoustic Emission Testing, Springer-Verlag, Berlin, 2008. 1. C. Shi, P. V. Krivenko, D. Roy, Alkali-Activated Cements and Concretes, Taylor & Francis, Oxon, UK, 2006.
- [4] M. Sansalone, N. J. Carino, Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, 1986.
- [5] I. Plšková, Z. Chobola, M. Matysík: Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method. Ceramics-Silikáty 55(2) (2011) 176 – 182
- [6] M. T. Liang, P. J. Su, Detection of Corrosion Damage of Rebar in Concrete Using Impact-Echo Method, Cement and Concrete Research 31 (2001) 1427–1436.
- [7] C. Shi, P. V. Krivenko, D. Roy, Alkali-Activated Cements and Concretes, Taylor & Francis, Oxon, UK, 2006.
- [8] C. Shi, R. L. Day, Factors affecting early hydration characteristics of alkali-slag cements, Cem. Concr. Res. 26 (1996) 439–448.
- [9] M. A. Cincotto, A. A. Melo, W. L. Repette, Effect of different activators type and dosages and relation with autogenous shrinkage of activated blast furnace slag cement, in: G. Grieve, G. Owens (eds.), Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 2003, 1878–1888.
- [10] L. Pazdera, L. Topolar, Application acoustic emission method during concrete frost resistance, Application acoustic emission method during concrete frost resistance, Russian Journal of Nondestructive Testing, (2014) 50 (2) 127-131
- [11] M. Korenska, M. Manychova, New Possibilities of Non-Destructive Testing of Ceramic Specimen Integrity, Ceramics-Silikaty (2010) 54(1)72-77



KONTROLA POVRCHOVÉ HOMOGENITY NÁPRAV PRO ŽELEZNIČNÍ VOZIDLA METODOU MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU

SURFACE HOMOGENEITY INSPECTION OF AXLES FOR RAILWAY VEHICLES USING MAGNETIC PARTICLE METHOD

Alexandr POPOV

PTS Josef Solnař s.r.o.
popov@ptsndt.com

Abstrakt

Příspěvek se zabývá využitím magnetické práškové metody při zjišťování povrchových vad, zejména při kontrole náprav pro železniční vozy. Kontrola se provádí v poloautomatické zkušební lince v rámci výrobního procesu kontinuální mokrou technikou s použitím suspenze fluorescenčního magnetického prášku.

Tato kontrola umožňuje odhalit a určit velikost indikací na celém válcovém vnějším povrchu náprav.

Klíčová slova: *zkoušení magnetickou práškovou metodou, nápravy železničních vozů, povrchové vady.*

Abstract

The paper deals with the use of magnetic particle method for surface defects detection, especially during the inspection of axles for railway vehicles. The inspection is carried out in semi-automated test line during the manufacturing process by the continuous wet technique using a suspension of fluorescent magnetic particles.

This inspection enables revealing and sizing of indications on whole cylindrical outside surface of axles.

Key words: *automated equipment, non-destructive testing, axles of railway vehicles, wheels of railway vehicles.*

Úvod

Neustálá optimalizace prostředků kolejové dopravy, zejména rychlovlaků, klade stále vyšší požadavky na zdokonalování bezpečnosti. Tyto požadavky kladou stále vyšší nároky také na nedestruktivní kontrolu materiálů.

Pro defektoskopii dílů železničních kolejových vozidel jsou obvykle zapotřebí nejméně dvě metody nedestruktivního zkoušení: jedna pro zjišťování vnitřních vad a druhá pro zjišťování vad souvisejících s porušením povrchu. Při prvním úkolu, metoda

ultrazvuková (UT) splňuje všechny požadavky na citlivost a rozlišení a je zcela mimo konkurenci. U druhého úkolu se obvykle používá metoda magnetická prášková.

Společnost PTS Josef Solnař s.r.o. se již více než 20 let zabývá vývojem a výrobou zařízení a systémů pro magnetickou práškovou kontrolu (MT). Naše technické oddělení ve spolupráci s odborníky na programování PLC nabízí řešení z jediného zdroje a rychle reaguje na specifické požadavky konkrétního zákazníka. Systémy MT jsou vyvíjeny dle nejnovějšího stavu vývoje techniky a nabízejí se stroje modulární koncepce se dvěma obvody střídavého proudu (AC), které pracují se suspenzemi magnetického prášku na vodní bázi. Od roku 2000 je náš systém řízení jakosti certifikován TECHNICKÝM A ZKUŠEBNÍM ÚSTAVEM STAVEBNÍM PRAHA, s.p. a byl úspěšně re-certifikován v roce 2012 s ohledem na nejnovější revizi normy ČSN EN ISO 9001:2009.

Magnetická prášková metoda (MT) je velmi populární pro detekci povrchových vad v různých typech komponent vyrobených z feromagnetických materiálů. Hlavními důvody pro takové popularity metody MT jsou relativní jednoduchost a pozoruhodná možnost kontroly komponent nepravidelného tvaru. Vzhledem k dlouholetým zkušenostem je tato metoda uvedena v mnoha normativních dokumentech. V některých dokumentech je kontrola MT doporučována jen jako jedna z metod, která má být pro vytvoření automatizovaného kontrolního systému zkombinována s ultrazvukovou kontrolou.

V současné době má metoda MT mnoho omezení v souvislosti s nízkou produktivitou v důsledku časově náročných operací, jako jsou čištění povrchu, magnetizace a demagnetizace komponenty, nanášení a odstranění suspenze atd. Na druhé straně má metoda MT nízkou spolehlivost v reálných výrobních podmínkách v důsledku vlivu lidského faktoru a stavu povrchu. Dalšími nevýhodami metody MT jsou vysoké náklady na spotřební materiály a neschopnost odhadnout hloubku vad.

Metoda MT je jednou z nejjednodušších metod, jedním z nejvíce opakovatelných procesů a jedním z nejlevnějších systémů z hlediska údržby v průmyslu NDT. Z výrobního hlediska se může zdát, že to stojí čas a peníze bez přidané hodnoty. Avšak z celospolečenského hlediska je přidaná hodnota nalezení každé vadné komponenty nevyčíslitelná – lidé mohou bez obav používat dopravní prostředky při cestách do práce či na dovolenou a vrátit se domů bezpečně.

Zařízení pro magnetickou práškovou kontrolu náprav železničních vozidel

Zařízení pro MT náprav železničních vozů a jeho řídicí systém splňují požadavky těchto norem: EN ISO 9934-1, 2, 3; ISO 6933; EN 13261; BN 918 275; AAR M-101, ASTM 1444; GOST 21105-87 a dalších.

Defektoskop MZO 3000 je určen pro zjišťování přítomnosti podélně nebo příčně orientovaných trhlin na vnějším povrchu železničních náprav pomocí magnetické práškové metody.

Tato metoda slouží ke zviditelnění povrchových necelistvostí, zejména trhlin. Zkoušený materiál je magnetován, průřezem prochází magnetický tok, přičemž v místě necelistvostí dochází ke zhušťování siločar magnetického toku. Část těchto



Obr. 1 – Magnetizační zařízení MZO 3000 pro zkoušení železničních náprav

siločar vystupuje v oblasti vady nad povrch a vytváří tzv. rozptylový tok. Jemný magnetický prášek, který se nanáší na zmagnetovaný předmět, se působením rozptylového toku zachytí na povrchu a vykreslí indikaci povrchové necelistvosti. Necelistvost se takto výrazně zviditelní, protože indikace necelistvosti je větší než samotná necelistvost, která ji způsobila. V místech mimo necelistvost, mimo oblast rozptylového toku, se magnetický prášek nezachytí.



Obr. 2 – Zkušební kabina MZO 3000

U defektoskopu MZO 3000 se pro zviditelnění necelistvostí používá suspenze fluorescenčního magnetického prášku a případné indikace necelistvostí se prohlíží pod ultrafialovým (černým) světlem. Proto je celé zkušební zařízení umístěno v uzavřené kabině, která zabraňuje průniku denního světla.

Zkoušení železničních náprav na přítomnost podélných vad (vad v axiálním směru) se provádí pomocí proudu procházejícího nápravou, přičemž se vytváří cirkulární magnetické pole. Zkoušení na příčné vady (vady ve směru obvodu) se provádí pomocí magnetizační cívky vytvářející podélné magnetické pole ve směru osy nápravy. Realizace obousměrné magnetizace se střídavou aktivací sprchových kroužků zkracuje dobu cyklu.

Defektoskop MZO 3000 je vybaven automaticky pojezdnou cívku pro podélnou magnetizaci, na které je umístěna sprcha se šesti tryskami pro dokonalé polítky celé nápravy.

Pro vlastní kontrolu se používá zdroj ultrafialového světla UF 400, který je umístěn na ručně ovládaném pojezdném rameni.

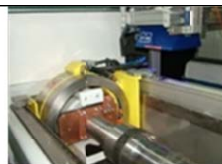
Upínání náprav, které zaváží manipulátor, se provádí pomocí pneumatických válců, a to tlakem 6 bar. Kontaktní desky se upínají zvlášť až po umístění a upnutí kontrolované hřídele (nápravy). Tyto kontaktní desky je možno měnit podle rozměru hřídele. Zkoušená náprava se upíná mezi hroty, díky čemuž je zajištěna 100% kontrola vnějšího povrchu rovněž u konců nápravy. Dále je stroj vybaven mechanismem pro řízené otáčení upnuté hřídele během prohlížení.

Celé zařízení je vybaveno řídicím systémem SIMATIC, který spolupracuje s manipulátorem zavážejícím hřídele. Pro bezpečnost obsluhy je stroj vybaven bezpečnostní zábranou, která se automaticky vysouvá při zavážení a odvážení nápravy.

Provozní režimy zkušebního zařízení:

- automatický – pro běžné zkoušení;
- ruční – pro ruční ovládání mechaniky stroje;
- kalibrační – pro nastavování zkušebních parametrů.

Zařízení se skládá z těchto částí: stůl magnetizéru s upínáním náprav a otáčecím mechanismem, cívka podélné magnetizace s pojezdem; čerpadlo detekční kapaliny s nerezovou nádobou cca 50 litrů; sprcha se šesti tryskami; rám s pojezdem pro zavážení UV lampy a samotnou UV lampou 400 W; elektrorozvaděče s výkonovým



Obr. 3 – Cívka pro podélnou magnetizaci se sprchou



Obr. 4 – Zavážení nápravy manipulátorem

transformátorem a s řídicí automatikou SIMATIC; bezpečnostní zábrana; panel s monitorem a PC pro komunikaci; ovládací panely.

Technické parametry:

- napájení: 3 NPE, AC 50 Hz, 400/230 V / TN-S
- jištění: 125 A
- instalovaný příkon: 42 kVA
- výstupní proud příčné magnetizace: max. 3000 A
- měření proudu: digitální s kontrolou dosažení nastaveného proudu
- výstupní proud podélné magnetizace: max. 80 A
- regulace proudů: plynulá – fázovými regulátory
- demagnetizace: automatická při zpětném pojezdu cívky
- upínací délka náprav: max. 2600 mm
- průměr kontrolovaných náprav: 70 – 200 mm
- čerpadlo detekční kapaliny: nerezová nádoba cca 50 litrů
- přívod tlakového vzduchu: 6 bar
- váha stroje: cca 3000 kg

Další zařízení pro zkoušení magnetickou práškovou metodou

Společnost PTS Josef Solnař s.r.o. vyvinula a dodává magnetizační zařízení pro zkoušení různých komponent ve výrobě a při provozních kontrolách.

Magnetizační zařízení MZO 1400 pro kontrolu železničních kol a obručí

Technické parametry:

- napájecí napětí: 3 × 400 V / 50 Hz TN-C
- ovládací napětí: 1 PEN 24 V / 50 Hz TN-C
1 PEN 230 V / 50 Hz TN-C
- jmenovitý proud: 100 A
- proud magnetizace cívkou: 0 až 50 A
- proud pólové magnetizace: 0 až 15 A
- způsob regulace proudů magnetizace: plynulý
- měření proudů:
magnetizace cívkou – Hallova sonda, digitální ampérmetr
pólová magnetizace – bočník, digitální ampérmetr
- magnetizační čas: volitelný obsluhou
- způsob demagnetizace: poklesem proudu a mechanickým vzdalováním (otáčení)



Obr. 5 – Magnetizační zařízení MZO 1400 pro zkoušení železničních kol a obručí

Magnetizační zařízení MZK 1000 pro kontrolu železničních kol

Technické parametry:

- napájecí napětí: 3 × 400 V / 50 Hz TN-S
- ovládací napětí: 1 PEN 24 V / 50 Hz TN-S
1 PEN 230 V / 50 Hz TN-S
- jmenovitý proud: 100 A
- napájení UV lampy: 12V /DC /10A
- proud magnetizace cívkou: 0 až 1500 A
- proud pólové magnetizace: 0 až 5 A
- způsob regulace proudů magnetizace: plynulý
- měření proudů:
 - magnetizace cívkou – digitální ampérmetr
 - pólová magnetizace – digitální ampérmetr
- způsob demagnetizace: poklesem proudu
- rychlost otáčení kola: plynule nastavitelná



Obr. 6 – Magnetizační zařízení MZK 1000 pro zkoušení železničních kol

Magnetovací stůl MAS 500M AL

Technické parametry:

- způsoby magnetizace:
 - podélná – magnetovací cívkou
 - příčná – průchodem proudu
- magnetovací proudy: max. 1500 A
- průměr magnetovací cívky pevné: 320 mm



Obr. 7 – Magnetovací stůl MAS 500M AL

Magnetovací stůl MAS 1000

Technické parametry:

- napájení: 3 × 400 V 50 Hz /50 A
- napěťová soustava
 - silové obvody – 3 NPE AC 50 Hz 400/230 V TN-S
 - řídicí obvody – 2-24 V AC/PELV
 - 2-24V DC/SELV
- způsoby magnetizace:
 - podélná – pólovými nástavci
 - příčná – průchodem proudu
- typ magnetizace: střídavá
- rozsah proudu příčné magnetizace: do 2000 A/AC
- rozsah proudu podélné magnetizace: do 40A/AC
- tlakový vzduch: cca 6 bar
- celkové rozměry stolu: 2400×750×1930 mm
- hmotnost: cca 160 kg
- objem nádrže detekční kapaliny: cca 40 litrů
- rozměry rozvaděče: 800×400×1900



Obr. 8 – Magnetovací stůl MAS 1000

Závěr

Systémy pro zkoušení magnetickou práškovou metodou fy PTS Josef Solnař pracují v poloautomatickém režimu a podstatně zjednodušují kontrolu výrobků a polotovárů. Výsledkem je nejen vysoká spolehlivost, ale také vysoká reprodukovatelnost výsledků kontroly. Parametry a výsledky kontroly jsou dokumentovány přesně a úplně.



KOMBINOVANÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE DISPERZNÍCH KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

COMBINED NONDESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY OF DISPERSION METALLIC MATERIALS

Břetislav SKRBĚK

Technická Univerzita v Liberci.
Bretislav.skrbek@tul.cz

Abstract

Range of investigated materials – graphite cast irons, selected austenite alloys, powder metallurgic products, porous castings; materials containing considerably physically different constituents. Character of interphase boundaries. Resulting useful properties of product are created by superposition of partial phases effect. These properties can not be measured with acceptable accuracy by only single method of nondestructive structuroscopy.

Practical examples of results of combined nondestructive structuroscopy development. Equipment for nondestructive determination of material quality (TELIT) after UV 17830..

Combination of magnetic spot method and measurement of sound rate by ultrasound.

Structure and mechanical properties diagnostics of graphite cast irons products and piston combustion engines valves from austenite steels.

Measurement system for nondestructive determination of layers quality after UV 22141.

Combination of ultrasound testing with magnetic or eddy-current method. Structure and mechanical properties diagnostics of layers manufactured by powder metallurgy .

Porosity determination of walls of pressure cast castings.

Keywords: *Dispersion materials, nondestructive structuroscopy, combined methods.*

1. Úvod

Obecně nedestruktivní strukturoskopie kvantifikuje a využívá vztah mezi fyzikální měřenou veličinou a mechanickou vlastností či parametrem strukturní fáze.

V současné době je neustálý tlak odběratelů na dokládání mechanických vlastností přímo na odlitcích, produktech práškové metalurgie i ostatních druhů polotvarů z vícesložkových materiálů. Nedestruktivní strukturoskopie umožňuje spolehlivé určení konkrétní hodnoty vlastnosti a neshodného výrobku v konkrétním místě pokud se použije příložených snímačů, Proto se stává součástí vnitřní jistoty kvality materiálu ve firmě.

Ke komplexnímu popisu struktury složených materiálů však nestačí použít jednu fyzikální metodu. Optimální korelaci s cílovými vlastnostmi přináší jen současné nasazení nejméně dvou fyzikálních metod.

Poster předkládá stručný přehled principu a využití užitečných vzorů (vynálezů), které jsou výsledkem bádání na katedře materiálu TU v Liberci v popsaném oboru za posledních 10 let.

Většina z cca 180ti norem NDT se zabývá ocelovými svařenci, rourami, tlakovými nádobami a hutní tyčovinou s výkovky.. 18 standardů řeší testování odlišných nedestruktivními procedurami. Všechny NDT standardy se zabývají klasickou defektoskopií, to jest technikami k hledání a prezentaci souvislostí s defekty. RT a UT metody pro vnitřní defekty a MT a PT pro defekty na povrchu. Stávají se předmětem přejímacích podmínek.

Ne - destruktivní strukturoskopie zůstává nehledě na zmíněný pohled na standardy, bez jednotícího prvku. Ale v specifických případech litin její význam pro kvalitu finální slévárenské výroby převládá nad defektoskopií. Strukturoskopie kvalifikuje vztah mezi fyzikální nedestruktivní měřenou veličinou a mechanickými vlastnostmi, metalografickou charakteristikou nebo (mechanické) napětím.

2. Grafické litiny.

Litiny tvoří ocelová matrice a v ní vyloučený grafit ve tvaru kuliček až lupinků. ISO 945 rozlišuje 6 forem grafitu litin a 8 jejich velikostí. Pevnost v tahu R_m litiny závisí na morfologii grafitu a stejnou měrou na pevnosti matrice (obvykle ji tvoří ferit – perlit). Litiny stále tvoří nejrozšířenější lité materiály a konstrukční prvky dopravních prostředků. Neboť ze slitin železa mají nejvyšší ekonomickou odolnost vůči teplotní únavě ETF

$$ETF = EF/P = R_m \times \lambda / (E \times \alpha \times P) \quad (1)$$

R_m ...pevnost v tahu

EF... Eichelbergův faktor odolnosti k teplotní únavě

P...price (cena)

λ ... koef. tepelné vodivosti

α ... Koef. teplotní roztažnosti

E... modul pružnosti v tahu.

2.1. Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti materiálu popisují rychlosti šíření pružného příčného nebo podélného kmitání atomů (molekul) kolem rovnovážné polohy a jeho útlum. Rychlost šíření akustické vlny c zvuku je funkcí modulu pružnosti E, měrné hmotnosti ρ , Poissonova čísla μ . Pro podélnou rychlost zvuku platí [1]

$$c_L = \left\{ \frac{E}{\rho} \times (1 - \mu) / [(1 + \mu) \times (1 - 2 \times \mu)] \right\}^{0.5} \text{ [m/s]} \quad (2)$$

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Za nespojitost lze považovat inkluze se značně odlišným vlnovým odporem Z vůči matici [2]

$$Z = c \times \rho \quad \text{[MPa/s]} \quad (3)$$

Čím větší je rozdíl akustických odporů Z_m a Z_g , tím větší je množství a velikost odrazu R tlaku akustické vlny z rozhraní zpět

$$R = (Z_g - Z_m) / (Z_g + Z_m) \quad (4)$$

Například pro ocelovou matici platí $Z_m = 5,92 \times 7,2 = 46,2$ MPa/s
 Pro grafit litin přibližně platí $Z_g = 2 \times 2 = 4$ MPa/s
 Rozhraní matrice - grafit odrazí $R = 80,5\%$ tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od nespojitostí vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny maticí pak závisí na labyrintu útvarů nespojitostí. Čím více útvary maticí oslabují (čím jsou štíhlejší a delší), tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny) L . Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$c_L = c_{L0} \times L / L_u = 5920 \times L / L_u \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

c_{L0} ... rychlost zvuku ocelové matrice litiny.

Útlum amplitudy akustických kmitů α výrazně roste pokud délka vlny λ se blíží velikosti útvarů l nespojitostí [1]

$$\alpha = k_\alpha \times l \times (c_L / \lambda)^2 \quad [\text{dB/mm}] \quad (6)$$

Většinu strojírenských polotvarů lze charakterizovat vlastní rezonanční f_r , která je funkcí modulu pružnosti E , měrné hmotnosti a geometrické štíhlosti H/D . Frekvence f_r se nalézá obvykle ve slyšitelném rozsahu [3]

$$f_r = k_f \times (E/\rho)^{0,5} \times D/H^2 \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

Hodnota E závisí přímo na velikosti rychlosti zvuku c_L a tedy na tvaru a množství nespojitostí. Úpravou (2) lze získat zjednodušený výraz

$$E = (K \times L/L_u)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Hodnotu K lze vypočítat z výsledků akustických měření na štíhlých tyčích.

2.2. Metoda magnetické skvrny.

Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón (stěn) a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky (zdroj Barkhausenova šumu). Po zániku vnějšího magnetického pole H_0 se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r [2]. Vratným změnám brání atomy feromagnetika vázané v molekulách (tuhý roztok Fe-Cu) a atomární, napětí, mřížkové poruchy. Proto složky struktury, které obsahují karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace I_r .

$$H_r = H_0 - N \times I_r / \mu \quad [\text{A/m}] \quad (8)$$

Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i strukturální geometrické poměry rozhraní feromagnetika.

Na zkoušené místo výrobku působí impulsní magnetické pole o intenzitě H_0 . Tvar proudového impulsu vedený do příložné silové cívky, případně přesně definovaný jejich sled definuje tok parazitních vířivých proudů (mohou se vhodně využít k potlačení negativních vlivů N) a strukturálně selektivní citlivost metody. Metody používané v Rusku a České republice se právě odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací [2]. Snímačem H_r může být Hallova nebo Försterova sonda. Příspěvek jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku a jejich vzdálenosti od snímače.

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r .

$$H_r = \sum m_i \times dH_{ri} \quad [\text{A/m}] \quad (9)$$

Elementární příspěvek dH_{ri} zrna je nepřímo úměrný vzdálenosti t_i k povrchu a je snižován stínícím účinkem ($m < 1$) feromagnetika.

Pro strukturoskopii se obvykle využívá k měřenému povrchu kolmá H_m složka H_r nebo gradient normální složky ∇H_m . Strukturoskopy se nastavují podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole H . Lineární kvantifikace strukturální složky (např. perlitu) nebo tvrdosti HB získaná regresní analýzou bývá vyhovující.

$$H_{rL} = H_{rL12} \times (81 \times L^{-3} + 1) \quad [A/m] \quad (10)$$

S klesající tloušťkou L měřeného feromagnetika roste hodnota H_{rL} ve srovnání s H_{rL12} na tlusté stěně ($L = 12\text{mm}$). Matematický model (10) nezávisí na struktuře. Metodou magnetické skvrny lze proto měřit tloušťky stěn.

Díky stálému vývoji této metody lze pomocí přístrojů DOMÉNA měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost či hloubku prokalení.

V porovnání s klasickými způsoby měření tvrdosti je tato metoda velmi rychlá, nedestruktivní, umožňuje měření i na neopracovaném povrchu, jednoduchá na obsluhu a umožňuje měřit tvrdost materiálu i přes povrchovou vrstvu.

2.3. Zařízení TELIT

Tento kombinovaný strukturoskop [1] byl vyvinut v rámci projektu ministerstva průmyslu a obchodu BONATRANS, pro určení meze pevnosti R_m , meze kluzu R_p a tažnosti A kotoučů spojek a brzd lokomotiv [2] z litin s kompaktním grafitem. Spojuje metodu magnetické skvrny (H_r) s ultrazvukovým tloušťkoměrem (L_u) a posuvným měřítkem k měření skutečného rozměru L . Komplexně a operativně popisuje mechanické vlastnosti lokálních oblastí odlitků z grafitických litin.

Podle experimentálně stanovených matematických modelů se vypočítají konkrétní hodnoty.

Pro litiny s lupínkovým grafitem :

$$HB = 0,6 \cdot Hr + 100 \quad (11)$$

$$E_0 = (446,1 \cdot L/L_u)^2 \quad (\text{MPa}) \quad (12)$$

$$R_m = 7,211 \cdot (L/L_u)^{2,278} \cdot HB_{0,75} \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

Pro litiny s kompaktním grafitem:

$$R_m = 8,54 \cdot (L/L_u)^{5,257} \cdot HB_{0,86} \quad (\text{MPa}) \quad (14)$$

$$R_p = 9,3 \cdot (L/L_u)^3 \cdot HB_{0,756} \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

$$A = 132000 \cdot (L/L_u)^{13} \cdot HB - 1,635 \quad (\%) \quad (16)$$

Verifikovaná chyba R_m , R_p , A činí cca 10%.

Tab.1. Příklad výstupního protokolu kombinovaného strukturoskopu TELIT
 Table 1.Example of output protocol of combined structuroscope TELIT

Vstupni protokol	Hr	HB	GPa	MPa	MPa	5 %	
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 81 1
1 11.22 10.69	206.7	224	173.9	571.9	0	0	
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 86 1
1 22.155 20.82	170.4	202.2	169.2	498.3	0 0		
2 22.155 21.06	170.4	202.2	173.1	515.7	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 901
1 23.644 22.44	141.2	184.7	172.6	467.2	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 90 2
1 24.592 21.98	166.5	199.8	153.1	423.8	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 91 2
1 24.876 22.7	136.4	181.8	159.6	408.2	0 0		
2 55.856 51.83	173.7	204.2	165	484.3	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 107 2
1 55.586 51.37	154.1	192.4	163.6	450.7	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 108 1
1 55.721 51.8	208.4	225	165.6	533.5	0 0		
No Lu L	M	T	Eo	Rm	Rp	A	vzorek = 108 2
1 55.18 51.07	187.7	212.6	164.1	499.6	0 0		



Obr.1. Kombinovaný strukturoskop TELIT se snímači (odleva) Hr, Lu, L.Vynález UV 17830.

Figure 1. Combined structuroscope TELIT with sensors (from left) Hr, Lu, L. Utility model (invention) CZ 17830.

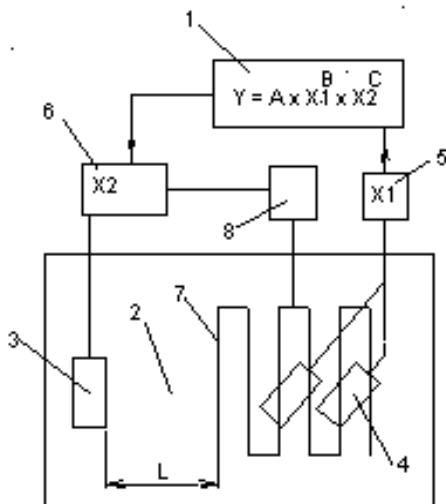
Kombinovaný strukturoskop umožňuje vektorové zobrazení výsledků v rovině $\langle H_r; L/L_u \rangle$ nebo-li $\langle HB; E_o \rangle$ doplněné isopevnostními křivkami [3]. Podle tvaru množiny koncových bodů vektorů lze odhadnout metalurgickou minulost souboru odlitků.

Nemonotónní matematické modely dílčích fyzikálních vlastností pro jednoznačnou diagnostiku struktury, tvrdosti a pevnosti izotermicky kalených litin si rovněž vynutily nasazení kombinované strukturoskopie [4].

Zvláštní kapitolu aplikací popisované kombinované strukturoskopie tvoří austenitické oceli pro ventily pístových spalovacích motorů. Jejich dlouhodobá provozní degradace se projeví tvorbou feromagnetických fází a zvýrazněním hranic zrn. Mezní stav hlav ventilů tak detekuje metoda magnetické skvrny a nepřipustný pokles rázové odolnosti měření rychlosti zvuku [5].

3. Strukturoskop s magneticky buzenou akustickou vlnou [6].

Zařízení slouží k nedestruktivnímu stanovení kvality materiálu místních oblastí feromagnetických disperzních materiálů, např. produktů práškové metalurgie, kompozitů a litin. Klasický ultrazvuk s kapalinovou akustickou vazbou (provozní překážka) nahrazuje magneticky buzenou Rayleighovou vlnou [7]. Strukturu u těchto materiálů tvoří základní kovová feromagnetická matrice a póry, plnivo či výztuž, které jsou v různých tvarech, rozloženích a množstvích v této matici vyloučeny. Hodnoty Y vlastností, jež jsou měřítkem kvality příslušného materiálu, vznikají superpozicí obou X_1 a X_2 uvedených základních složek.



Obr. 2. Schéma strukturoskopu dle vynálezu CZ24597 a CZ24598 (varianta pro neferomagnetické matrice kompozitů).

Figure 2. Scheme of structural microscope after invention CZ24597 and CZ24598 (variant for non-ferromagnetic composite matrices).

1 – sdužovací jednotka, procesor (pro stanovení kvality feromagnetického kompozitního materiálu)

4 – snímač (intenzity remanentního magnetického pole indukčně buzené magnetické skvrny)

A; B; C – regresní analýzou vypočtená reálná čísla

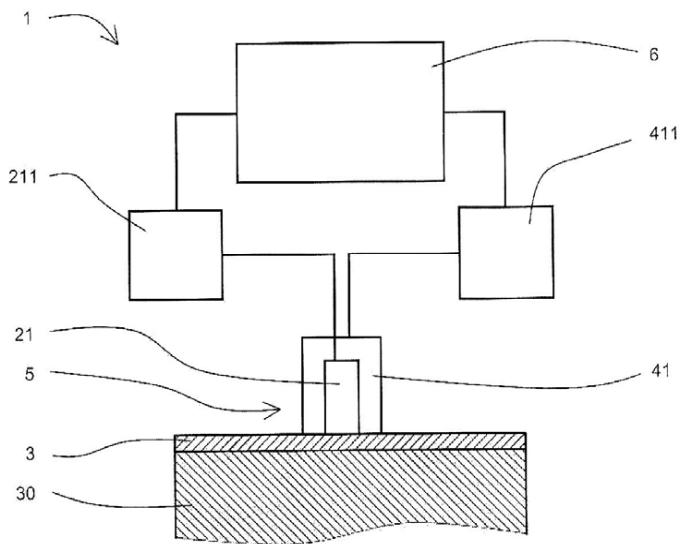
Y – vlastnost (feromagnetického) kompozitního materiálu.

Na zvolené místo hodnoceného feromagnetického kompozitního materiálu se přikládají současně Hallovy sondy, magnetizační meandrovitá indukční cívka **7** i přijímací sonda **3** indukčně buzené povrchové akustické vlny. Impulz proudového zdroje **8** vybudí v magnetizační meandrovité indukční cívice **7** magnetickou indukci a tím v hodnocené oblasti **2** feromagnetického kompozitního materiálu magnetickou skvrnu a prostřednictvím Lorenzových sil a magnetostricke cíleně směřovanou povrchovou akustickou vlnu. Vhodně umístěné Hallovy sondy napojené na vyhodnocovací zařízení **5** pro měření gradientu tečné složky remanentního magnetického pole vykazuje na svém výstupu hodnotu parametru **X1** magnetické složky charakterizující matrici feromagnetického kompozitního materiálu. Vyhodnocovací zařízení **5** slouží k vyhodnocení parametru **X1** magnetické složky na základě změřené remanentní intenzity hodnoceného feromagnetického kompozitního materiálu prostřednictvím Hallových sond. Přijímací sonda **3** indukčně buzené povrchové akustické vlny napojená na vyhodnocovací přístroj **6** vyhodnotí čas pohybu vybuzené povrchové akustické vlny mezi magnetizační meandrovitou indukční cívkou **7** a přijímací sondou **3** indukčně buzené povrchové akustické vlny. Po zakódování rozteče **L** do vyhodnocovacího přístroje **6** je stanoven parametr **X2** akustické složky. Vyhodnocovací přístroj **6** zpracovává signál změřeného parametru **X2** akustické složky na základě registrované povrchové akustické vlny.

4. Kombinované zkoušení kompozitních vrstev a poréznic kovů

Dodávky kluzných ložisek s proměnlivou kvalitou naspěkaných kluzných bronzových vrstev a poréznic tenkostěnných odlitků ze slitin AlSi pro automobilový průmysl vedly k výzkumu účinné nedestruktivní diagnostiky jejich porózity. Principiální výzkum provedly studentské práce [8, 9,10].

Práce [8] zkoumala bronzové vrstvy ložisek ojníc pístových motorů tlusté 0,2 – 0,9mm naspěkané s porózitou 3 až 19% na ocelové 2mm podložce. Střední chyba v měření porózity P činí 1,1%.



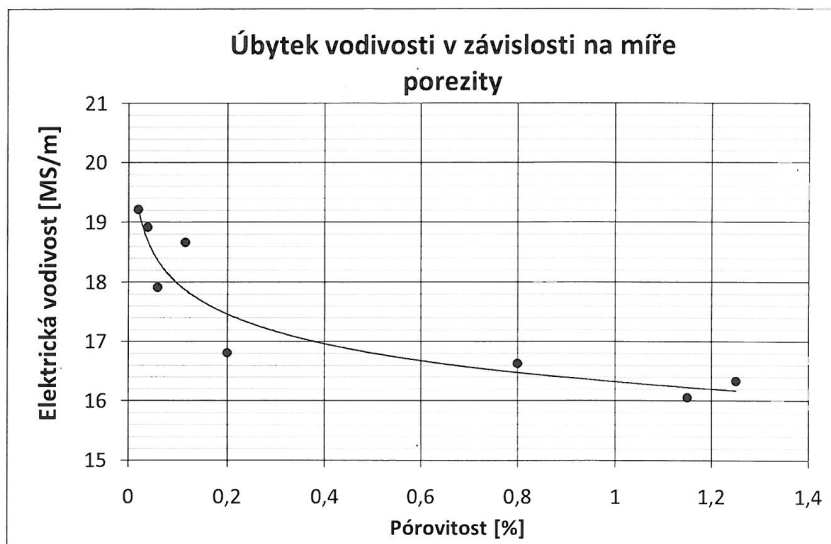
Obr.3. Schéma strukturoskopu 1 pro hodnocení kompozitních vrstev dle vynálezu CZ.22141.

Figure 3. Scheme of structuroscope 1 for evaluation of composite layers after invention CZ.22141.

6 – sdužovací jednotka, procesor; 3– vrstva o tloušťce L; 30 – podkladový materiál
 21 – magnetoinduktivní nebo vířivoproudá sonda; 211 – magnetoinduktivní nebo vířivoproudý měřič tloušťky vrstev či tenkých stěn
 41 – ultrazvuková sonda; 411 – ultrazvukový impulzní přístroj

Další studentské práce zvětšily citlivost a zmenšily chybu měření nedestruktivní cestou porózity o řád.

Spolehlivou diagnostiku 0 až 2% porózity v tlakově litých odlitcích z Al slitin vyvinuli studenti v rámci závěrečných děl [9, 10] ve spolupráci s Politechnika Czestochowska (Polsko). Magnetoinduktivní nebo vířivoproudá metoda umožňuje měřit skutečnou tloušťku vrstvy L a povrchovou elektrickou vodivost S. Ultrazvukový tloušťkoměr měří zdánlivou tloušťku L_u ovlivněnou vnitřní stavbou kompozitu – porózitou P. Neplatí obecný matematický model $P = f(L/L_u, S)$ pro všechny zkoumané porózní materiály. Dílčí závislosti (např. $P = f(S)$ – obr.4) nedosahují potřebné spolehlivosti.



Obr.4. Výsledek měření poróznosti elektrickou vodivostí na slitině AISi10 s koef. korelace $K^2 = 0,87$.

Figure 4. Porosity measurement result using electrical conductivity of AISi11 alloy with correlation coefficient $K^2 = 0,87$.

5. Závěr

Kombinovaná nedestruktivní strukturoskopie slaví úspěch v provozu pouze s jednoduše ovladatelným zařízením na základě kvalitně vypracované kontrolní úlohy. Kontrola pevnosti odlitků z grafitických litin přístroji TELIT je toho důkazem.

Principiální schemata a vynálezy z obr. 2 a 3. zatím čekají na projektový sponzor – finanční krytí výzkumu a realizace provozně použitelných přístrojů.

Poděkování

Poster byl sestaven s přispěním projektu OP Vyvojové Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace CZ.1.05/2.1.-00/01.0005 a projektem Rozvoj řešitelských týmů projektů VaV na technické univerzitě v Liberci CZ.1.07/2.3.00/30.0024.

Literatura:

- [1] BÍLEK, D., and SKRBEK, B. *Application of Ultrasound and Magnetic Methods of Non-destructive Structuroscopy for Strength Determination of Graphite Cast Irons Using TELIT Structuroscope*. Hutnické listy vol.63, 2010, No.5, pp.63-66. ISSN 0018-8069 .
- [2] SKRBEK, B., Nosek, V. *NON-DESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY OF BRAKE AND CLUTCH DISKS* . TRANSCOM 2009, 8-th EUROPEAN CONFERENCE OF YOUNG RESEARCH AND SCIENCE WORKES, UNIVERSITY OF ŽILINA, Slovak Republic, CD, s. 2-7, september 2009, ISBN 978-80-554-0042-6 .
- [3] SKRBEK, B., DOČEKAL, J., NOSEK, V.: *VECTOR EXPRESSION OF CAST IRON STRUCTURE*. METALLOGRAPHY 2007, 13th International Symposium on Metallography, Slovak Republic Stará Lesná, 2-4 may 2007, Acta Metallurgica Slovaca, r. 13, 1/2007s. 123 - 129 , ISSN-1335-1532.
- [4] ANDRISOVA, Z, SKRBEK, B. *The use of magnetic and ultrasonic structuroscopy for inspection of ADI/AGI castings*. Manufacturing Technology, vol. 12, 20012, no. 13. ISSN 1213-2489. - (to be published)
- [5] SKRBEK, B.: *NDT diagnostika strukturních změn austenitických ventilových ocelí* In: Sborník semináře "Provozní degradace austenitických ventilových ocelí" Liberec : TU KMT, 2006, p. 58-62, ISBN 80-7372-113-9.
- [6] DVOŘÁK, J. *Simulation of physical conditions of the magnetic method*. Jemná mechanika a optika, vol. 56, 2012, no.6, p.173-174. ISSN 0447-6441.
- [7] DVOŘÁK J. *Rayleighova vlna a její aplikace v kompozitních materiálech*. Jemná mechanika a optika vol. 56, 2012, č. 11-12, p.333-334. ISSN 0447-6441.
- [8] ŠVEC, MARTIN. *Research of porosity of the matalic systéme in the powder metalurgy with the assistance of the nondestructive proofing*. Bachelor work, KMT-B-141, Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [9] KOVACS, O..*DIAGNOSTICS POROSITY LIGHT ALLOYS EDDY CURRENTS ON MASCHINED SURFACES*. Bachelor work, KMT-B-183, Technická univerzita v Liberci, 2011
- [10] CEJNAR, ZDENĚK. *RELATION OF POROSITY AND ACOUSTIC LOSS OF Al AND Mg ALLOYS*. Bachelor work, KMT-B-165, Technická univerzita v Liberci, 2011.



KOMPLEXNÍ DIAGNOSTIKA MOSTNÍCH KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ A URČENÍ JEJICH ŽIVOTNOSTI

Ing. Václav SVOBODA, Ing. Peter HRINKO

Preditest s.r.o.

Abstrakt: Provedení NDT inspekce mostní konstrukce na ocelovém, nýtovaném, příhradovém, čtyřpólovém mostu.

Abstract: Perform NDT inspections on steel bridge structure-riveted, lattice, four-pole bridge.

I. Použité NDT metody

1. Vizuální kontrola
2. Metoda magnetické paměti materiálu (MPM)
3. Metoda akustické emise
4. Metoda měření vibrací
5. Tenzometrické měření dynamického namáhání

1. Vizuální kontrola

Zjištění základního stavu mostního úseku, stav svarových spojů, stav ochranného nátěru a zjištění případných deformačních anomálií po celé délce mostního úseku a jeho stav z hlediska korozního poškození

2. Metoda MPM

Metoda **MPM (Magnetická Paměť Materiálu)** je NDT metoda založená na snímání intenzity magnetického pole **H_p** ve formě zbytkové magnetizace na povrchu materiálu pomocí jedné, nebo více sond, z nichž každá snímá magnetické pole ve třech nebo dvou na sebe kolmých rovinách. Zbytková magnetizace materiálu je ovlivňována procesem výroby, obráběním, dělením, svařováním, ohýbáním, tepelným zpracováním, ochlazováním, provozním namáháním atd. Podobná magnetizace

materiálu nastává při procesu degradace materiálu v provozu vlivem degradačních podmínek – únava materiálu, případná koroze a pod. Skenovacím zařízením, na kterém jsou umístěny sondy, se přejezdí nad měřeným materiálem. Signál z jednotlivých kanálů se spolu se vzdáleností zaznamenává v digitální podobě do paměti přístroje a zobrazuje se na displeji v grafické podobě buď přímo jako **Hp**, nebo v podobě gradientu **dHp/dx** v závislosti na ujeté dráze **Lx** (případně na čase v režimu Timer).

Data uložená v paměti lze pomocí příslušného software přenést do PC a zde pomocí speciálního software analyzovat, případně vytisknout v podobě grafu (tzv. magnetogram). **Na základě vyhodnocení můžeme určit místa se zvýšenou koncentrací napětí (Stress Concentration Zones - SCZ), kde je zvýšená pravděpodobnost výskytu defektů v materiálu.** Koncentrace napětí je úměrná naměřené velikosti gradientu intenzity magnetického pole v okolí daného místa.

Podstatnou výhodou této NDT metody je rychlost měření a také to, že není potřeba upravovat povrch sledovaného materiálu (např. brousit, odstraňovat barvu apod.).

3. Metoda AE

Analogový signál ze sondy AE přiveden propojovacím kabelem do měřicí aparatury AE IDT 04, kde je dále zesílen a je provedena obálková analýza signálu. Při měření v režimu plošné lokalizace je zaznamenána posloupnost příchodu signálu k jednotlivým sondám měřicí sítě, včetně Δt časů a na základě znalosti podmínek šíření signálu a na základě znalosti geometrie rozmístění sond AE je provedena v reálném čase lokalizace zdroje signálu. Nastavení parametrů měřicí aparatury a sběr dat je prováděno pomocí řídicího počítače (notebook). Naměřená data jsou v tabulkové nebo v grafické formě průběžně zobrazována na monitoru a zároveň ukládána na pevný disk řídicího počítače pro další zpracování.

4. Metoda měření vibrací VIB

Pro stanovení vibračních charakteristik mostní konstrukce vlivem vnějších zatěžujících podmínek provedení měření na předem určených místech pomocí tříosého akcelerometru DT-178A v určené časové prodlevě.

5. Tenzometrické proměření dynamického namáhání mostní konstrukce

Pro měření rozsahu deformací při průjezdu jednotlivých vlaků byly použity odporové tenzometry umístěné na pásnicích hlavního nosníku.

II. Postup a výsledky měření

Vizuální kontrola - Vizuální kontrola míst s mírným korozním poškozením

Metoda magnetické paměti materiálu MPM – Prokázala korozní poškození povrchu materiálu mostní konstrukce

Metoda akustické emise

Podle normy ČSN EN 14584 jsou emisní zdroje vzhledem k zatěžovacímu stimulu (tlaku) klasifikovány do 3 tříd podle následující tabulky:

Klasifikace zdroje	Definice	Další postup
1	Nevýznamný zdroj	Žádná další činnost není nutná, zdroj se zahrne do protokolu pro porovnání s následnou zkouškou.
2	Aktivní zdroj	Pokud zdroj souvisí se specifickými částmi tlakového zařízení, doporučuje se další NDT (například svarové spoje, přivařované součásti).
3	Kritický aktivní zdroj	Před uvedením tlakového zařízení do provozu musí být provedeno další vyhodnocení pomocí vhodné NDT

Na základě výše uvedených skutečností lze konstatovat, že na měřených částech mostu nebyl detekován a lokalizován aktivní nebo kriticky aktivní emisní zdroj (klasifikace zdroje ve stupni 2 nebo 3), který by vykazoval příznaky odpovídající přítomnosti aktivních defektů v materiálu měřené části mostní konstrukce.

Měření vibrací

Bylo provedeno měření vibrací na určených místech. Na tato místa byl magneticky upevněn tříosý akcelerometr - Vibrační datalogger DT-178A a na připojeném NTB proveden záznam.

Tenzometrické měření dynamického namáhání

Na mostní konstrukci bylo umístěno 8 tenzometrů. Byla sledována dynamická odezva od průjezdů cca 90 vlakových souprav.

III. Závěr

- Vizuální kontrolou dolní části mostní konstrukce nesoucí kolej 2, nebyly zjištěny defekty typu trhliny na hlavních nosnících, ani na výtuhách konstrukce.
- V spojovacích uzlech jednotlivých mostních prvků se projevovalo částečné povrchové korozní poškození, jehož intenzita se zvyšovala směrem ke řece Hornád.
- Aplikovaná metoda magnetické paměti materiálu potvrdila korozní poškozování.
- Výsledky, které byly získány na základě měření pomocí metody akustické emise neprokázaly významné emisní zdroje, které by odpovídaly ve sledovaných uzlech trhlínám, nebo dalším významných poškozením.
- Byly provedeny tenzometrické vibrační měření a měření průjezdu cca 93 vlaků různých typů (osobní vlaky, rychlíky a nákladní vlaky různé váhy).
- Dosažené maximální hodnoty poměrné deformace nepřesahovaly 150 μe
- Největší dynamická zátěž byla naměřena při přechodu nejtěžšího nákladního vlaku.
- Charakter zatěžování mostní konstrukce obsahuje několik frekvenčních zátěží

- K základní zátěži se připojují minimálně dvě další frekvenční zátěže , což je patrné z grafu.
- Tento typ dynamického zatěžování může ovlivňovat (snižovat) životnost mostu
- V celkovém hodnocení je tento sledovaný úsek mostu schopen dalšího provozování.
- Na základě provedených měření a vyhodnocení výsledků , bylo možno provést odhad zbytkové životnosti mostu pomocí metod lomové mechaniky .

PROVĚŘOVÁNÍ MOŽNOSTÍ ZKOUŠENÍ ZA TEPLA DOKONČENÝCH BEZEŠVÝCH TRUBEK ZE SUPER- DUPLEXNÍHO MATERIÁLU VÍŘIVÝMI PROUDY ZA POUŽITÍ VNITŘNÍHO SNÍMAČE

VERIFICATION OF POSSIBILITIES FOR HOT FINISHED SEAMLESS TUBES TESTING MADE FROM DUPLEX MATERIAL BY EDDY CURRENT USING INTERNAL PROBE TECHNIQUE

Jaroslav ŠNAJBERK, kolektiv pracovníků PTS
Josef SOLNAR, PTS s.r.o.
Contact e – mail: jasn@volny.cz

Abstrakt

Předmětem zkoušení jsou silnostěnné trubky vyrobené z duplexního (superduplexního materiálu), které mají tloušťku stěny cca 8 až 9 mm. Požadavkem je zkoušení vířivými proudy ze strany vnitřního povrchu za použití vnitřního průchozího snímacího systému. Vnitřní průměr těchto trubek se pohybuje v rozmezí 50 až 60 mm, jejich délka případně až přes 10 m. Vyzkoušen má být celý vnitřní povrch trubky a vrstva pod vnitřním povrchem do hloubky až cca 2,5 mm. Jedná se zde o kontrolu trubek po jejich vyrobení, případně o kontrolu takových trubek jako polotovárů. Z hlediska zkoušení vířivými proudy pomocí vnitřních snímačů se jedná o výrazně komplikovaný případ. Lze uvést několik faktorů, které zkoušení komplikují. Jsou to například rozměry trubky, značná tloušťka stěny, hrubost vnitřního povrchu, výskyt malých změn vnitřního průměru a zvláštní relevantní vlastnosti samotného materiálu trubky.

Klíčová slova: vířivé proudy, hysterezní křivka, permeabilita, silnostěnná trubka, umělá vada

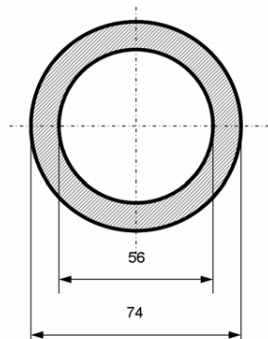
Abstract

Subject of testing are thick wall tubes made from duplex (super-duplex) material. The wall thickness is ranging from 8 to 9 mm. It is demanded to provide internal surface inspection of tubes using an internal testing system. Internal tubes diameter is 50 to 60 mm, their length may be over 10 m. Complete internal tube surface should be tested, subsurface layer of 2,5 mm included. This inspection of tubes or as semifinished products shall be carried out after their production in steelworks. In terms of eddy current method using internal probes it seems to be significantly complicated task. It is possible to introduce a few factors that complicate this, for example tube dimensions, big wall thickness, rough internal surface, small variations of internal diameter and particular relevant characteristics of tube material.

Key words: eddy current, hysteresis loop, permeability, thickwall tube, artificial flaw

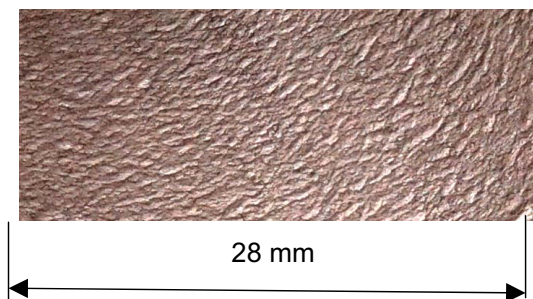
1. Úvod

Účelem prací popsaných v tomto příspěvku je prověřit možnosti zkoušení trubek především z duplexního materiálu, které mají tloušťku stěny blížíci se 10 mm. Uvedený materiál má od běžných ocelí poněkud zvláštní vlastnosti, jak bude uvedeno dál, nicméně se jeví jako slabě magnetický. Technika zkoušení je zaměřena na vnitřní povrch, který vykazuje značnou hrubost. Proporce jedné z takových trubek jsou pro okamžitou představu uvedeny na následujícím obrázku č. 1.



Obr 1, Rozměry trubky v příčném řezu
Fig. 1 Tube dimensions – cross section

Hrubost povrchu je znázorněna na obrázku č.2 s orientačním měřítkem.



Obr. 2 Vnitřní povrch trubky
Fig. 2 Internal surface of the tube

2. Zjištění charakteristik materiálu trubek

Měření konduktivity bylo provedeno na vytvořeném vzorku ve tvaru tenké tyčky . Byla použita Ohmova metoda měření malých odporů. Měření základních magnetických vlastností bylo provedeno na toroidním vzorku.

Přibližné výsledky jsou v tomto podání prezentovány následovně:

Konduktivita $\sigma = 1,6 \text{ MS/m}$

Amplitudová maximální permeabilita (relativní) $\mu_r = 31$

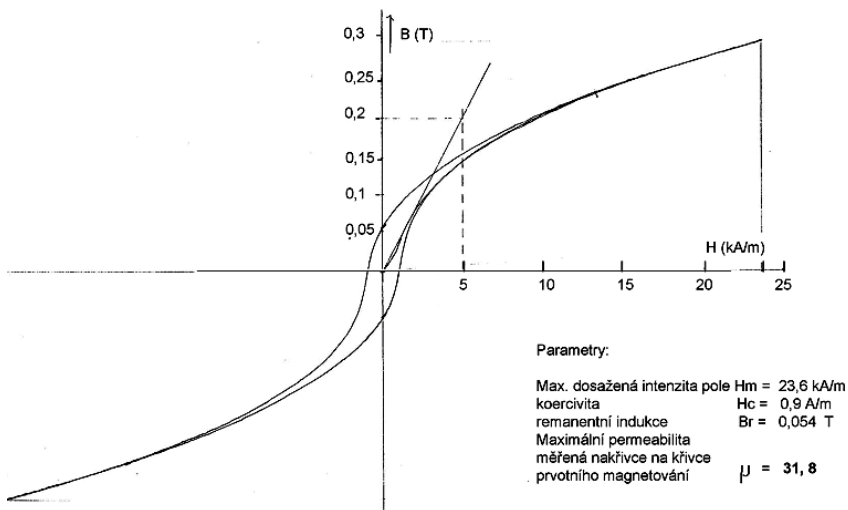
Koercivita $H_c = 680 \text{ A/m}$

Remanentní indukce $B_r = 0,05 \text{ T}$

Získané výsledky měření je nutno vzít pouze jako orientační a to vzhledem na omezený počet vzorků a dostupnou měřicí techniku. Toleranční pole hodnot může být +/- 20%.

Tvar graficky zaznamenané hysterezní smyčky je výrazně odlišný od smyček např. uhlíkatých feromagnetických ocelí. Koercivita je srovnatelná, ale hodnota remanentní indukce vykazuje řádově nižší hodnotu. Ze záznamu je patrný protáhlý tvar, nelze nalézt výrazné koleno a tudíž i oblast magnetického nasycení. Maximální hodnota magnetického pole, kterou bylo možné s danými prostředky dosáhnout je cca 24 kA/m. K tomu odpovídající hodnota magnetické indukce dosahuje sotva 0,3 T.

Nutno je zde uvést, že měření byla provedena na materiálu finální hladké trubky, takže materiál předmětných trubek nebude pravděpodobně vykazovat z hlediska elektromagnetických vlastností zcela totožné hodnoty.



Obr.3 Záznam změřené mezí statické hysterezní smyčky duplexního materiálu včetně křivky prvotního magnetování

Fig. 3 Record of measured static saturation hysteresis loop of duplex material. Initial magnetizing curve included.

3. Řešení systému pro zkoušení na vnitřím povrchu

Ze zjištěných elektrických a magnetických charakteristik a dlouholeté praxe je zřejmé, že se z hlediska zkoušení vířivými proudy na trubky z uvedeného materiálu se musí zacházet podobně jako s trubkami z feromagnetických ocelí, přestože je zde permeabilita o více jak řád nižší ve srovnání s permeabilitou na příklad uhlíkatých ocelí. Proto se také u trubek z duplexního materiálu provádí při běžném průchozím zkoušení ze strany vnějšího povrchu (vnějším průchozím snímačem) silné stejnosměrné předmagnetování .

4. Stručné charakteristiky jednotlivých technik jako podklad volby systému zkoušení

- 1) Vnitřní průchozí snímač pro zkoušení vířivými proudy s vestavěnými permanentními magnety

Vlastnosti:

Poměrně jednoduchá koncepce nezávislá na elektrickém napájení
Nespolehlivý způsob předmagnetování (v řadě případů pouze částečně i v případě použití vysokoenergetického magnetu).

Hraje zde roli poměr vnitřního průměru a tloušťky stěny trubky. S tímto rostoucím poměrem je výhled na požadované sycení větší. Poněkud obtížnější manipulace s tímto snímačem ve srovnání se snímačem bez magnetů.

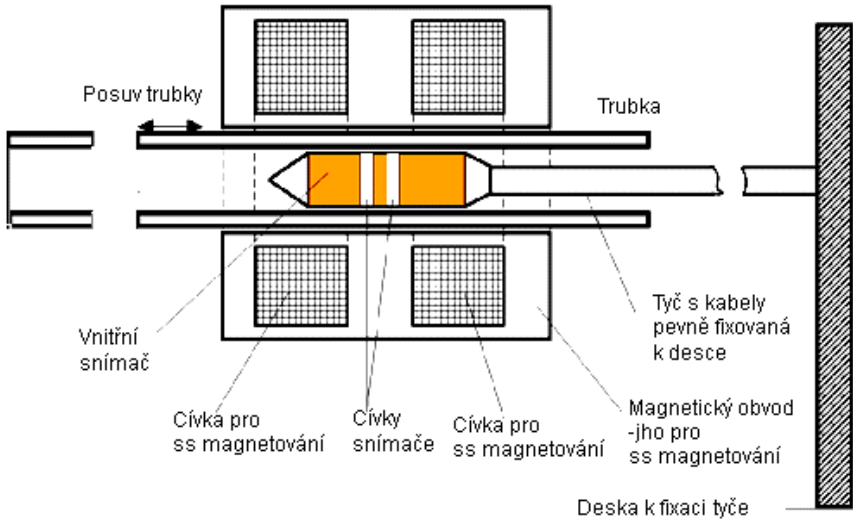
Při tloušťce stěny trubky, blížíci se 10 mm a vnitřnímu průměru cca 55 mm by byla konstrukce vnitřního magnetovacího jha, které by zajistilo potřebné magnetické pole ve stěně trubky ve směru její osy velice problematická. A to se samozřejmě musí vzít v úvahu i prostor pro umístění vlastního zkušebního systému vířivých proudů bez nebezpečí nežádoucí interference konstrukčních prvků jha.

- 2) Technika „Remote field eddy current testing“ - zkoušení vířivými proudy se vzdáleným polem. Vzhledem ke značné tloušťce stěny předmětných trubek a požadované rychlosti zkoušení představuje problematický způsob a nelze jej vzít jako vhodný způsob pro požadované zkoušení
- 3) Vnitřní rotační snímač
Vhodný spíše pro hladké povrchy, velmi efektivní pro indikaci vad otevřených na vnitřní povrch, převážně s podélnou orientací (zejména trhliny)
Dle zadání je požadavek indikace podpovrchových vad v hloubce až 2 mm, takže zde by mohl být problém, včetně požadované rychlosti.
- 4) Systém stejnosměrného předmagnetování pomocí vnějšího průchozího jha a vnitřního snímače – obojí fixováno v nehybné definované poloze, přičemž trubka vykonává posuvný pohyb. Tento způsob představuje provádění nejlepšího stejnosměrného magnetického přesycení celé tloušťky stěny a tím i optimální podmínky pro zkoušení vířivými proudy. V publikacích – (např. norma SEP 1917 i když se týká jiných magnetických materiálů) jsou uváděny nutné hodnoty tečné složky pole v podélném směru $H =$ cca 170 kA/m a i výše .

5. Navrhovaná koncepce

Na základě rozboru cíle prací a technických možností, byla pozornost zúčastněných pracovníků PTS soustředěna na způsob zkoušení za podmínek řádného, technicky realizovatelného stejnosměrného předmagnetování, magnetického přesycení celé stěny trubky v zóně okamžitého působení budicího a snímacího systému vířivých proudů, což vede k aplikaci dostatečně dimenzovaného průchozího jho pro magnetování ze strany vnějšího povrchu trubky.

Na obrázku č.4 je naznačen ve zjednodušené formě princip použité techniky. Magnetovací jho je umístěno fixně v definované poloze a rovněž tak je průchozí snímací systém fixován ve vnitřním prostoru jho uvnitř trubky. Přípraven je na tyči – trubce, jejíž délka je o málo větší nežli délka zkoušených trubek. Při zkoušení je trubka v pohybu – posouvána podélně a prochází plynule pokud možno konstantní rychlostí magnetovacím jhem.



Obr. 4 Princip navrhované koncepce zkoušení – bez detailů (cívky i ostatní části jsou znázorněny pouze symbolicky)

Fig. 4 Principle of the eddy current internal testing system concept – no details (coils and the other parts are illustrated as symbols)

Na obrázku č.5 jsou jednoduchým způsobem znázorněny poměry pro stejnosměrné magnetování, snímač není z důvodu přehlednosti zakreslen.

Ocelová vodítka jsou součástí magnetického obvodu. Ve volném úseku jha po délce označené L působí část magnetického napětí označeného U_{mL} , které generovaného cívkami a protékajícím proudem. Pro toto napětí platí následující:

$$U_{mL} = H_D \times L$$

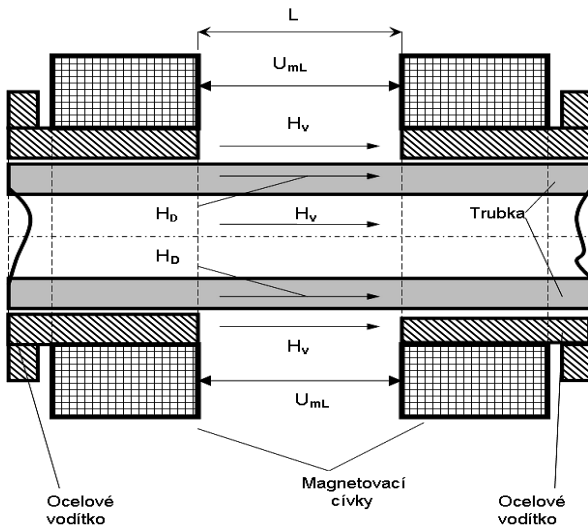
$$U_{mL} = H_v \times L$$

$$H_D \times L = H_v \times L$$

z toho : $H_D = H_v$

kde H_D je intenzita magnetického pole ve stěně trubky

H_v je intenzita magnetického pole ve vzduchu



Obr. 5 Znáornění poměrů při stejnosměrném podélném magnetování trubky v průchozím jhu

Fig. 5 Illustration on conditions under DC magnetization of the tube in axial direction using throughput magnetizing yoke

Obě tyto intenzity jsou orientovány ve směru osy trubky a jejich hodnoty jsou v uvedeném úseku shodné. Toto bylo overěno měřeními při různých hodnotách proudu cívek a byla potvrzena shodná hodnota pole vně trubky s hodnotou pole v jejím vnitřním prostoru.

Toto potvrzuje skutečnost, že je celá stěna trubky o tloušťce téměř 10 mm v daném úseku magnetována homogenně a to s hodnotou pole $H_D = H_v$.

Neprojeví se tedy nežádoucí gradient pole v radiálním směru.

6. Předběžné ověřovací práce

Na vzorku předmětné trubky, který byk k dispozici bylo možno vytvořit umělé vady typu necelistvosti

Tento vzorek trubky byl o délce cca 1 m. Tuto délku lze skutečně považovat za minimální pro aplikaci ve jhu. I velikým úsilím bylo možno provádět posuv ve jhu cca o 550 mm.

V uvedeném intervalu délky byly vytvořeny umělé vady (necelistvosti) v následující podobě a sledu:

A Podélná drážka hloubka: 1,0 mm délka cca 7 mm šířka: 0,3 mm

B Podélná drážka hloubka: 0,5 mm délka cca 7 mm šířka: 0,3 mm

C Vývrt celou stěnou průměr 3 mm

D Vývrt celou stěnou průměr 1,5 mm

E Vývrt s plochým dnem ze strany vnějšího povrchu – dno vývrtu je vzdáleno 2,5 mm od vnitřního povrchu, průměr je 3 mm

F Příčná drážka hloubka: 0,5 mm délka cca 7 mm šířka: 0,3 mm

G Příčná drážka hloubka: 1,0 mm délka cca 9 mm šířka: 0,3 mm

Všechny umělé vady jsou rozmístěny po délce trubky v jedné řadě.

7. Magnetovací jho

Toto jho obsahuje cívky s vinutím v několika vrstvách a to, vodička z magneticky měkké oceli a uzavřeno je v krytu, tvořícího část magnetického obvodu. Jeho přibližné rozměry jsou (400 x 500 x 500) mm.

Toto jho muselo být pro uvedené experimenty konstrukčně upraveno.. Jho je schopno generovat magnetické pole o intenzitě blízké se hodnotě 200 kA/m ovšem ve spojení s patřičně dimenzovaným zdrojem.

8. Snímače

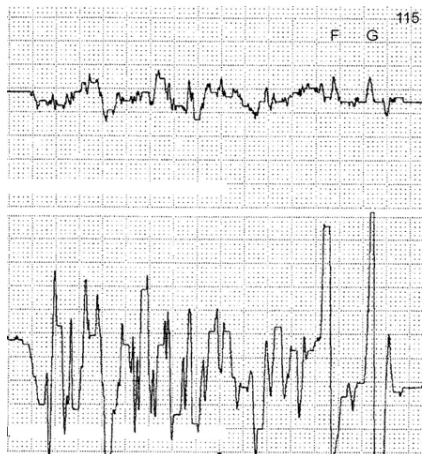
Za účelem předběžných zkoušek byly navrženy a zhotoveny čtyři experimentální snímače. Liší se rozměry, počtem cívek, konfigurací a způsobem jejich zapojení. Navrženy jsou pro zkoušení za podmínek řádného předmagnetování trubky.

Zásadní rozdíl ve způsobu aplikace zkoušení celého obvodu jedním systémem (snímače typu 1) a zkoušení pomocí segmentových snímačů (snímače typu 2). Pro předběžné ověření typu 2 byl použit zatím jeden segment. Všechny uvedené typy jsou koncipovány pro diferenční způsob zkoušení.

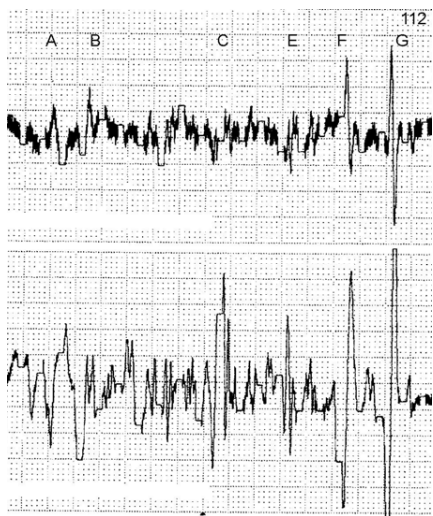
9. Pořízení záznamů

Pro posouzení byla provedena řada zkoušení a pořízeny záznamy signálu z úseku trubky, kde se nacházejí umělé vady. Trubka byla ručně protahována jhem, uvnitř trubky byl fixován snímač ve stálé pozici vůči středu jha. Snímač byl upevněn na zakotvené tyči.

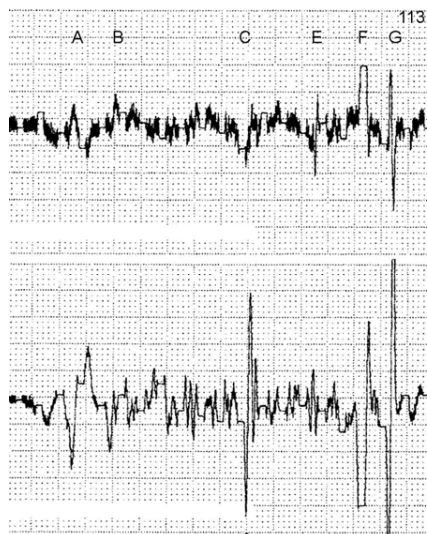
Z řady pořízených záznamů jsou prezentovány následně zde uvedené.



Obr. 6 Záznam signálu při frekvenci 17 kHz bez předmagnetování – snímač typ 1
 Fig. 6 Chart record of signals at 17 kHz, no magnetic saturation – probe type 1

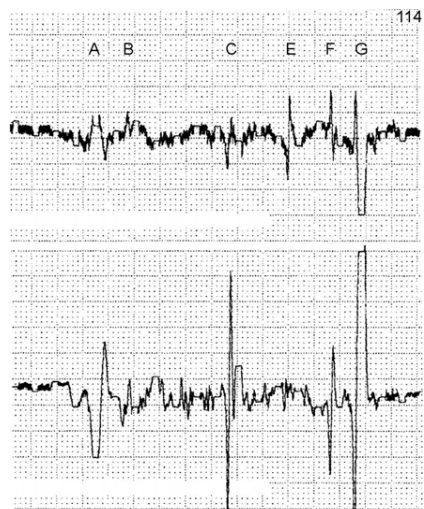


Obr. 7 Záznam signálu při frekvenci 17 kHz , magnetovací pole $H = 51 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 1
 Fig. 7 Chart record of signals at 17 kHz, magnetic saturation $H = 51 \text{ kA/m}$
 – probe type 1



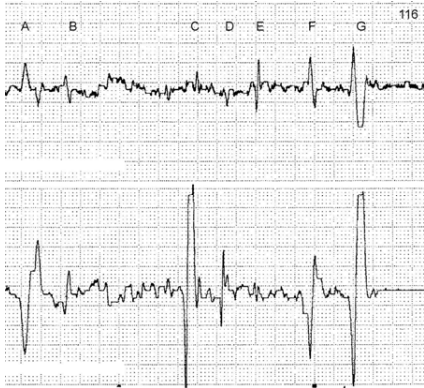
Obr. 8 Záznam signálu při frekvenci 17 kHz , magnetovací pole $H = 64 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 1

Fig. 8 Chart record of signals at 17 kHz, magnetic saturation $H = 64 \text{ kA/m}$
 – probe type 1



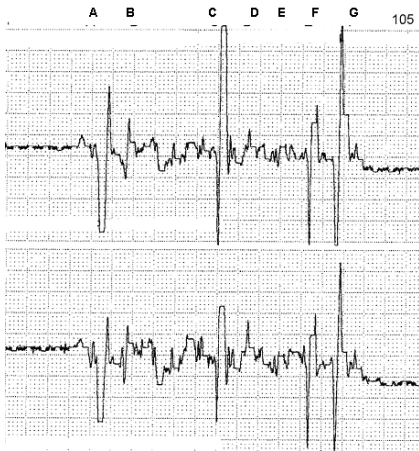
Obr. 9 Záznam signálu při frekvenci 17 kHz , magnetovací pole $H = 90 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 1

Fig. 9 Chart record of signals at 17 kHz, magnetic saturation $H = 90 \text{ kA/m}$
 – probe type 1



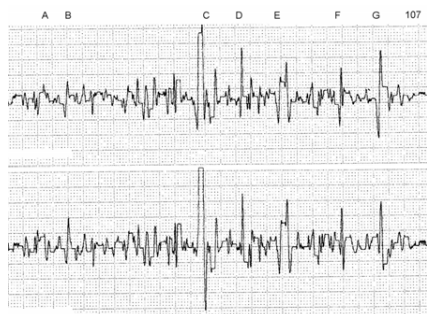
Obr. 10 Záznam signálu při frekvenci 17 kHz , magnetovací pole $H = 130 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 1

Fig. 10 Chart record of signals at 17 kHz, magnetic saturation $H = 130 \text{ kA/m}$
 – probe type 1



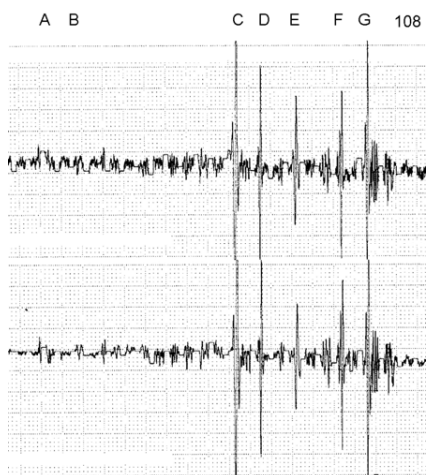
Obr. 11 Záznam signálu při frekvenci 80 kHz , magnetovací pole $H = 130 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 1

Fig. 11 Chart record of signals at 80 kHz, magnetic saturation $H = 130 \text{ kA/m}$
 – probe type 1



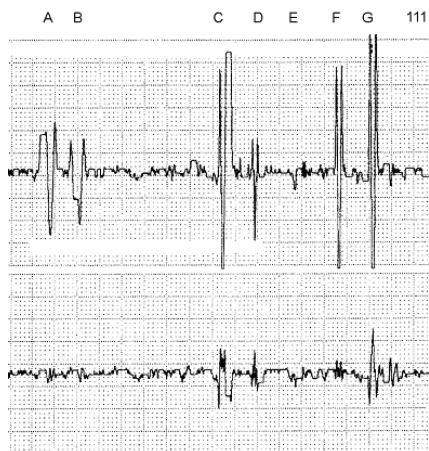
Obr. 12 Záznam signálu při frekvenci 10 kHz , magnetovací pole $H = 130$ kA/m
– snímač typ 1

Fig. 12 Chart record of signals at 10 kHz, magnetic saturation $H = 130$ kA/m
– probe type 1



Obr. 13 Záznam signálu při frekvenci 10 kHz , magnetovací pole $H = 64$ kA/m
– snímač typ 2

Fig. 13 Chart record of signals at 10 kHz, magnetic saturation $H = 64$ kA/m
– probe type 2



Obr. 14 Záznam signálu při frekvenci 80 kHz , magnetovací pole $H = 130 \text{ kA/m}$
 – snímač typ 2 , zařazen filtr HP

Fig. 14 Chart record of signals at 80 kHz, magnetic saturation $H = 130 \text{ kA/m}$
 – probe type 2 , HP filter used

Při ručním posuvu poměrně krátké trubky nebylo možno zcela dodržet její plynulý pohyb a zcela stálou rychlost a to ani při opakovaní procesu. V záznamech se to projevuje zejména jejich ne zcela shodnou délkou a fluktuacemi šířky indikací. Plochá linie na vrcholu indikace (namísto špičky) je způsobena náhodně, a to malou nechtěnou časovou prodlevou při ručním posuvu trubky, samozřejmě pokud se nejedná o limitaci signálu v případě překročení rozsahu zapisované amplitudy (rozkmitu). Pokud nebyl zapojen filtr HP, což je u většiny záznamů, pak kolísání rychlosti posuvu nemá na velikost amplitudy žádný vliv.

V horní stopě zápisu je záznam složky x signálu, ve spodní stopě vždy záznam složky y . Fázové nastavení bylo zvoleno libovolně a ponecháno neměnné.

10. Vliv předmagnetování

Označení umělých vad je platné jak bylo výše uvedeno při jejich popisu. Pokud v některém záznamu chybí označení indikace D, je to tím že vada D (vývrt o průměru 1,5 mm) že byla vytvořena až po několika prvních provedených záznamech.

Prvních několik záznamů (obr. 6 až 10) ukazuje vliv velikosti intenzity pole pro předmagnetování a tudíž nepochybné zlepšování poměru indikací vad k šumu (pozadí) s rostoucí hodnotou aplikovaného předmagnetizačního stejnosměrného pole.

Získaný velmi přibližný přehled vlivu velikosti pole pro předmagnetování na poměr velikosti signálu zvolené referenční vady C (vývrt celou stěnou o průměru 3 mm) je dále uveden v tabulce. Kalkulace byla provedena na základě odečtu složek X a Y ze záznamu a vypočtena příslušná absolutní hodnota pro každý případ. Odečet byl proveden ze záznamů, kde nebyl použit filtr HP.

Velikost intenzity pole pro předmagnetování kA/m	Poměr velikosti indikace vývrtu k šumu (pozadí)
	-
50	2,0
65	3,2
90	4,6
130	6,2

Tab. 1 Závislost poměru signálu k šumu na velikosti saturačního pole
Tab. 1 Dependence of signal to noise ratio on saturation field intensity

Z uvedeného je patrné, že zde existuje rezerva účelného zvýšení magnetovacího pole a tím ještě další zlepšení poměru velikosti signálu vad a pozadí (šumu). Avšak napájecí zdroj, který byl i po úpravách k dispozici, neposkytoval další možnost zvýšení proudu.

11. Použití filtru HP

Jak je známo, zařazením frekvenčních filtrů HP je možno potlačit výrazně pomalejší složky časového průběhu modulačního signálu. Hodnoty při použití snímače typu 1:

- a) pro případ zařazení HP P = 2,4
- b) bez zařazení HP P = 1,8

Tentýž postup byl proveden pomocí snímače typu 2 a s přibližnými výsledky následovně:

- a) pro případ zařazení HP P = 6,1
- b) bez zařazení HP P = 2,8

Zkoušení se záznamem při použití filtru HP muselo být několikrát opakováno z důvodu obtížného dodržení rychlosti při ručním posuvu trubky. Použití filtru HP i zde pro předmětné řešení je co do zvýšení citlivosti k lokálním necelistvostem bezpečné.

12. Shrnutí

Základní koncepce spočívá v aplikaci stejnosměrného magnetování předmětné trubky pomocí vnějšího jha, stabilně umístěného spolu s vnitřním snímačem. Řádné, důkladné magnetické přesycení celé tloušťky stěny trubky v zóně působení vířivých proudů je nutné pro vytvoření nejlepších podmínek pro zkoušení vířivými proudy. Jedná se o potlačení vlivu permeability nejlepším technicky realizovatelným způsobem a to i vzhledem k tloušťce stěny. Pouze tímto způsobem lze z hlediska vlastností daného materiálu přispět k dosažení nejlepších hodnot poměru signálu vad k šumu a tím i k dosažení nejlepší výsledné citlivosti zkoušení. K tomu lze dodat, že za uvedených podmínek by mohla být v určité míře prováděna také ještě navíc fázová analýza signálu, t.zn. možnost separace některých vlivů a posouzení hloubkové pozice vady.

Magnetování z vnitřního prostoru trubky by bylo zejména z hlediska tloušťky stěny předmětných trubek nedostatečné, v rozsahu tloušťky stěny ne zcela homogenní a tudíž lze důvodně předpokládat horší výsledky zkoušení.

Řádné stejnosměrné předmagnetování samozřejmě řeší problém s nežádoucí interferencí permeability, nikoliv případný vliv změn konduktivity v souvislosti se strukturou materiálu nebo vliv stavu povrchu, který je zde hrubý a jistě přispívá k vyšší úrovni pozadí (šumu).

Základní koncepce je podepřena předběžnými, výše uvedenými experimenty. Tyto experimenty bude možné provést v poněkud větším rozsahu a snadněji, po získání delších vzorků trubek a získání výkonnějšího zdroje pro předmagnetování.

Pro případ realizace by bylo nutno uvažovat o instalaci pohybového zařízení pro zkoušenou trubku pro její posuv vpřed a vzad – při průjezdu jhem. Délka tohoto zařízení (linky) by musela odpovídat cca dvojnásobné délce zkoušené trubky.

Snímací systém by mohl aplikovat výše uvedené snímače typu 1 (Cívky opisující vnitřní obvod trubky) nebo snímače typu 2 (složené z příložených segmentů). Aplikace snímače typu 2 očekávaně a to i podle vytvořených záznamů vykazuje poněkud lepší výsledky, ale vyžadovala by několikakanálové zařízení, které lze realizovat.

Pokud se týká zkušební frekvence, dle očekávání a ověření v záznamech signálu jsou při nižších frekvencích hůře indikované mělké povrchové vady a lépe indikována vada pod vnitřním povrchem a naopak. Při realizaci by bylo možné počítat se simultánním zkoušením při dvou frekvencích, na příklad $f_1 = 10$ kHz a $f_2 = 80$ kHz nebo jinak.

Prozatím nebyly prováděny kroky k posouzení vhodnosti fázové analýzy signálu, avšak v dalších pracech je s tímto postupem rovněž počítáno.



VYSOCE TEPLOTNÍ DEGRADACE MALTOVÝCH KOMPOZITŮ OBSAHUJÍCÍCH ČÁSTICE PRYŽE A EVA POLYMERU TESTOVANÝCH POMOCÍ METODY IMPACT- ECHO

HIGH-TEMPERATURE DEGRADATION CONFIRMED
BY IMPACT-ECHO METHOD TESTED ON CEMENTATIONS COMPOSITE
MATERIALS CONTAINING RUBBER AGGREGATES AND ACRYLIC OR
ETHYLENE VINYL ACETATE POLYMER BINDER

Daniela ŠTEFKOVÁ I*, **Michael TUPÝ II****, **Konstantinos SOTIRIADIS III****, **Kristýna ŠAMÁRKOVÁ IV*** and **Zdeněk CHOBOLA V***

* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky, Žižkova 17, 602 00 Brno, Česká republika

** Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika
Kontaktní e-mail: stefkova.d@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Tento článek se zabývá analýzou možností testování vzorků připravených z cementové malty, degradovaných působením vysokých teplot pomocí metody Impact-echo.

Vzorky byly připraveny ze směsi cementu CEM I, Portlandský cement a křemenného písku pro přípravu malt nahrazeným z 25% drcenou automobilovou pneumatikou s příměsí pojiva EVA polymeru (10% w/w hmotnosti cementu).

Vzorky byly namáhány teplotou 200 °C - 400°C. Výsledky, nedestruktivního testování těchto vzorků pomocí akustické metody Impact-echo, potvrdily změny ve struktuře maltových vzorků. Přidání pryžového agregátu do směsi způsobilo pohlcení nižších frekvencí ve srovnání s referenčními vzorky. Výrazný pokles absorbovaných frekvencí byl pozorován v závislosti na teplotě. K největšímu poklesu došlo při namáhání vzorků teplotou 200°C a 300 °C. Z toho vyplývá, že přidáním EVA polymeru se snižuje účinek vysokých teplot.

Klíčová slova: EVA polymer, Malta, Impact-echo, pryžové agregáty, Vysoko-teplotní degradace, frekvence.

Abstract

The present paper deals with the applicability of Impact-echo acoustic method to testing of cement - based mortar composites degraded at high-temperatures. The specimens were prepared by using a type CEM I Portland cement and siliceous sand, as well as by substituting 25% of sand with shredded automobile tires and by adding of EVA polymer binder (10% w/w to cement mass). The samples were subjected to high-temperature treatment in the temperature range of 200°C - 400°C. The results of non-destructive testing of such samples by acoustic methods confirmed the differences in the structure of mortar specimens. Addition of rubber aggregates in samples caused absorption of lower frequency as compared to reference specimens. A significant decrease of the absorbed frequencies was observed depending on the temperature. The largest decrease happened after exposure of samples at 200-300 °C. It indicates that the effect of heat treatment was reduced when the EVA binder was added.

Key words: EVA polymer, Mortar, Impact-echo, rubber aggregates, High-temperature degradation, frequencies.

1. Úvod

Článek se zabývá analýzou možností testování vzorků, připravených z cementových kompozitů, realizovaných ze směsí cementové malty, křemenného písku a pryžového agregátu, degradovaných působením vysokých teplot (200°C-1200°C), pomocí metody Impact-echo. Impact-echo je nedestruktivní akustická analýza pro testování vzorků. Základem této metody je mechanická vlna, která vzniká elastickým impulsem [1-4]. Krátkodobý mechanický impuls, způsobený poklepem malého ocelového kulovitého tělesa na povrch, vyvolá tlakovou vlnu nízké frekvence. Vzniklá vlna se šíří strukturou a odráží se od poruch, na vnitřním či vnějším povrchu. Časový rozdíl mezi vysílanou a odraženou vlnou je zachycen snímačem, který zobrazuje časový průběh signálu. Tento signál popisuje přechodné lokální vibrace, způsobené násobným odrazem mechanické vlny uvnitř struktury. Dominantní frekvence těchto vibračních referují o stavu struktury, od které se vlny odrážejí. Signál je obvykle digitalizován datovým systémem a přenášen do paměti počítače. Pomocí matematických operací se signál upravuje např. na frekvenční spektrum. Vrcholy v tomto spektru představují rezonanční frekvence v průběhu křivky a mohou se používat pro posouzení stavu sledované struktury.

Množství vyřazených automobilových pneumatik se odhaduje na zhruba 10 miliard pneumatik ročně na celém světě. Trh využívá pouze 80% odpadu z použitých pneumatik. Zbytek 20% je likvidován na legálních a nelegálních skládkách [5, 6].

Tyto metody likvidace jsou znepokojivé hlavně pro životní prostředí. Vzhledem k obtížné likvidaci pryže z pneumatik, se zvyšuje riziko náhodného požáru a nebezpečí pro zdraví našeho okolí, jakož i z hlediska estetického [7].

Malty obsahující drcené části pneumatiky, kameniva a polymerních pojiv mohou být použity v různých prostředích. Tato studie byla zaměřena na zkoumání odolnosti těchto materiálů, když se podrobí výraznému namáhání. Polymer použitý v této směsi byl poly-ethylen-vinyl-acetát (EVA). EVA polymer je přidáván do malty jako prášek, který má za následek zlepšení některých vlastností betonů. EVA může být přidána do směsi cementu a kameniva před smícháním s vodou, nebo může být přidána ve formě tekuté, latexové disperze. Má se za to, že částice EVA prodlouží indukční dobu a snižují rychlost reakce namáhání.

2. Experiment

2.1 Materiál

Vzorky byly vyrobeny z cementu CEM I Portlandský cement (Českomoravský cement - Heidelberg Cement Group); složky cementu byly použity ve 2 poměrech, voda s cementem (W/C) 0,50 - 0,55. Byly přidány minerální a pryžové agregáty; křemičitý písek (maximální velikost zrna 2 mm) a drcené použité automobilové pneumatiky (velikost drti 1-2 mm). Částice polymeru EVA, byly rozpuštěny ve vodě, polymerní pojivo bylo použito ve dvou procentuálních poměrech (5% a 10% hmotnosti cementu). Složení vzorků a hodnoty jeho plasticity jsou uvedeny v tabulce 1.

Table 1. Mortar composition and relevant plasticity

Označení	Cement [g]	Písek [g]	Pryžový agregát [g]	Polymer pojivo [g]	Voda [g]	W/C	Plasticita [cm]
REF		1000	-	-	275	0.55	15.5
PAG	500	750	250	-	275	0.55	13.0
PAG-EVA		750	250	50	275	0.55	17.5

Vzorky byly připraveny ve velikosti (40 mm × 40 mm × 160 mm). Byly tvrzeny ve formách po dobu 24 hodin, poté se ponechaly po dobu 27 dnů ve vodě a na závěr byly ponechány na vzduchu po dobu 32 dnů při laboratorní teplotě (25 ± 2 ° C).

Po počátečním vytvrzení, byly vzorky sušeny při teplotě 60 ° C po dobu dvou dnů. Následně byly vzorky zahřívány v peci při teplotách 200 ° C, 300 ° C a 400 ° C s teplotním zvýšením rychlostí

5° C / min, s ponecháním 60 min na maximální teplotě, aby se zajistil vliv vysoké teploty na těchto vzorcích. Pro vychladnutí po tepelné degradaci, byly vzorky ponechány na vzduchu o laboratorní teplotě.

2.2 Experimentální uspořádání

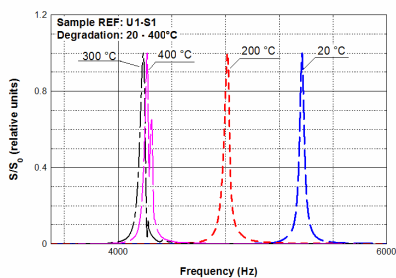
Signál byl vyvoláván úderem kladívka o hmotnosti 12 g umístěného na závěsu, které bylo spouštěno z výšky 4 cm. Odezva byla snímána piezoelektrickým snímačem typu MIDI přes dvoukanálový osciloskop handyscope HS3 s rozlišením 16 bitů. Signál zaznamenaný osciloskopem byl poté vyhodnocen na řídicím počítači. Pomocí speciálního vyhlazovacího algoritmu bylo určeno z každého výstupního signálu 5 dominantních frekvencí. Měření probíhala vždy v deseti sériích a byly vyhodnoceny průměrné hodnoty z těchto měření [8].

3. Výsledky měření a diskuze

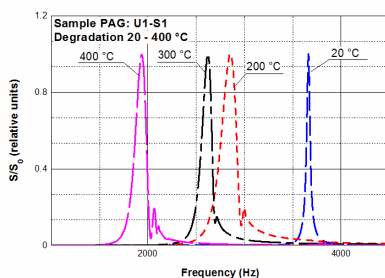
Na obr. 1 je uveden záznam frekvenčního spektra pro referenční vzorek při průběhu degradace. Při měření byl snímač umístěn uprostřed delší strany vzorku. Signál byl vyvolán na protilehlém konci vzorku ve směru kolmém k ose - uspořádání U1-S1. Podélné vlny, které se šíří do vzorku při rychlosti asi 5100 ms⁻¹, ovlivňují oscilaci vzorku.

Na obr. 2 a 3 je uveden záznam frekvenčního spektra v závislosti na frekvenci pro vzorky PAG (obsahující pryžové prvky) a PAG-EVA (obsahující jak pryžové agregáty, tak i akrylové polymerní pojivo). Vrcholy hustoty spektra jsou vyšší u REF vzorků, oproti vzorkům PAG a PAG-EVA. Ve všech případech, hustota spektra dosahuje maximální hodnoty v různých frekvencích, v závislosti na teplotě zahřívání. Vyšší teploty udržují vrcholy při nižších frekvencích. Při degradaci na teploty 300 ° C a 400 ° C jsou pozorovány poměrně podobné frekvence. Nicméně u REF a PAG vzorků jsou hodnoty při 300 ° C a 400 ° C odlišné od těch, které se vyskytují při teplotě 200 ° C. Ovšem není tomu tak u směsi PAG-EVA, kde je vrchol pozorovaných frekvencí při teplotě 200 ° C blízký hodnotám vzorků vystavených vyšším teplotám.

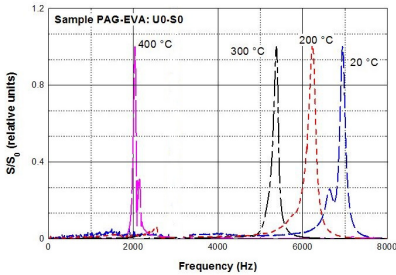
Na obr. 4, je zobrazena změna spektrální hustoty v závislosti na frekvenci vzorku při teplotní degradaci pro směs PAG-EVA. Rozdíl mezi Obr. 3 a Obr. 4 je takový, že na obr. 4 je snímač umístěn na střed delší strany vzorku a signál je vyvolán na protilehlé straně snímače ve směru kolmém k ose - uspořádání U1-S1 a na obr. 3 byla čidla umístěna ve středu kratší strany vzorku, ve směru jeho střednice, přičemž signál byl vyvolán na opačné straně ve směru střednice - uspořádání U0-S0. Srovnání obr. 3 a 4 ukazuje, že vrcholy dosahují nižších frekvencí, ve směru uspořádání U1-S1. Kromě toho, jsou hodnoty vrcholů spektrální hustoty dominantních frekvencí, výraznější při teplotách 300 ° C a 400 ° C, tj. uspořádání U1-S1.



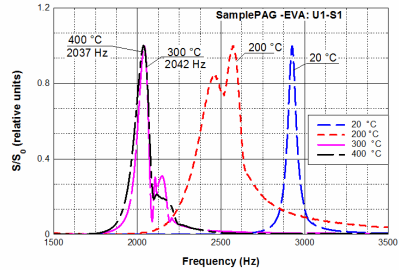
Obr. 1. Frequency spectrum for specimen REF (Arrangement U1-S1).



Obr. 2. Frequency spectrum for specimen PAG (Arrangement U1-S1).

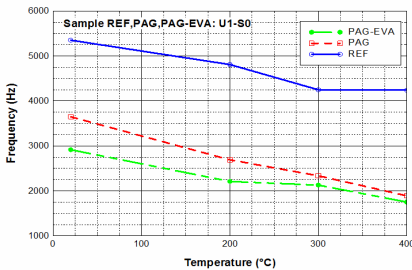


Obr. 3. Frequency spectrum for specimen PAG - EVA (Arrangement U0-S0).

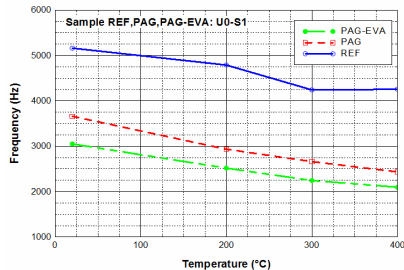


Obr. 4. Frequency spectrum for specimen PAG-EVA (Arrangement U1-S1).

Obr. 5 představuje změnu dominantních frekvencí v závislosti na teplotě, pro vzorky REF, PAG a PAG-EVA (uspořádání U1-S0). Převládající frekvence se přesouvá směrem ke spodní hranici frekvenčního rozsahu v průběhu degradace. Změna je patrná v teplotním rozsahu 200 °C - 300 °C, kde jsou patrné výrazné změny. Obr. 6 ukazuje také změnu dominantních frekvencí, avšak v tomto případě je uspořádání U1-S0, kde převažují příčné vlny. Srovnání Obr. 5 a Obr. 6 ukazuje, že změna frekvence je nižší, pokud se použije uspořádání U0-S1. Kromě toho, obr. 5 a obr. 6 znázorňuje, že u referenčních vzorků, které neobsahují gumové agregáty, je dosahováno vyšších hodnot frekvence, než jsou pozorovány pro směsi PAG a PAG-EVA.



Obr. 5. Shift of dominant frequency induced by degradation at elevated temperatures for specimens REF, PAG and PAG-EVA (Arrangement U1-S0).



Obr. 6. Shift of dominant frequency induced by degradation at elevated temperatures for specimens REF, PAG and PAG-EVA (Arrangement U0-S1).

4. Závěr

Příspěvek se zabývá analýzou možnosti použitelnosti metody Impact-echo pro zkoušení cementových kompozitů degradovaných vysokou teplotou. Získané výsledky ukazují, že metoda Impact-echo je vhodná jako jednoduchý nástroj pro posouzení kvality a životnosti těchto kompozitních materiálů, vystavených zvýšené teplotě. Výsledky akustického testování prokázaly, rozdíly ve struktuře vzorků malty. Důsledkem použití pryžových agregátů u vzorků PAG a PAG-EVA byly zaznamenány nižší frekvence nežli u referenčního vzorku, vzorku REF. Byl pozorován významný pokles absorbovaných frekvencí v závislosti na teplotě. K největšímu poklesu došlo po

vystavení vzorků při 200 až 300 ° C. To znamená, že se účinek tepelného zpracování se snižuje, pokud se přidá pojivo EVA.

Poděkování

Tento dokument byl vypracován s finanční podporou z "Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace", Evropské unie CZ.1.05 / 2.1.00 / 03,0097, v rámci činnosti Regionálního centra AdMaS "Advanced Materials, struktury a technologií"

a projekt SV RC: FAST - J - 14 - 2201. Výzkum byl podpořen také v rámci projektu SV RC: FAST - S - 13 - 2149 a projektu CZ.1.07 / 2.3.00 / 30.0005 - Podpora vytváření vynikajících interdisciplinárních výzkumných týmů na VUT v Brně.

Literatura

1. M. Korenska, Z. Chobola, R. Sokolar, P. Mikulkova, J. Martinek, *Frequency inspection as an assessment tool for the frost resistance of fired roof tiles*. Ceramics-Silikaty 50 (2006) pp. 185 -192.
2. P. Mazal, L. Pazdera, J. Dvořáček, Application of acoustic emission method in contact damage identification. Int. J. Mater. Prod. Tec. 41 (2011) pp 140-152.
3. I. Plskova, M. Matysik and Z. Chobola, (2010). Optimizing the location of piezoelectric sensors, Transactions on Transport Science 3 (2010) pp 23-28.
4. I. Plskova, Z. Chobola and M. Matysik, (2011). Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method, Ceramics-Silikaty 55 (2011) pp 176-182.
5. L. A. Alamo-Nole, O. Perales-Perez, and F. R. Roman-Velazquez, "Sorptions study of toluene and xylene in aqueous solutions by recycled tires crumb rubber," J. Hazard. Mater. vol. 185, pp 107–111, 2011.
6. F. Pelisser, A. Barcelos, D. Santos, M. Peterson and A. M. Bernardin, "Lightweight concrete production with low Portland cement consumption," J. Clean. Prod., vol. 23, p. 68–74, 2012.
7. A. M. Betioli, P. J. P. Gleize, V. M. John, and R. G. Pileggi, "Effect of EVA on the fresh properties of cement paste," Cem. Concr. Compos. vol. 34, pp 255–260, 2012.
8. Martinek J., 2006. Data Acquisition in Linux Using NI PCI-6111 Measurement Card and Comedi Drivers, Proc. of the Physical and material engineering 2006, Bratislava: Slovak university of technology, pp 121–124.

KONTROLA STAVU ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ S VYUŽITÍM AKUSTICKÉ METODY NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ

INSPECTION CONDITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING ACOUSTIC METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

Kristýna TIMČAKOVÁ-ŠAMÁRKOVÁ *, Zdeněk CHOBOLA *

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky

Contact e-mail: timcakova.k@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Koroze ocelové výztuže provází život většiny železobetonových konstrukcí. Expanze koroze má negativní vliv na vlastnosti struktury materiálů a má za následek snížení jejich životnosti. Pro omezení případů nevratných škod způsobených korozi, je důležité detekovat korozi včas. Nedestruktivní metody nabízejí nové možnosti pro testování stavebních konstrukcí a mohou závčas zjistit počáteční poškození daných konstrukcí. Jednou z těchto metod je metoda Impact-Echo, která patří mezi tradiční akustické metody nedestruktivního zkoušení. V článku jsou prezentovány výsledky měření získané po 24 měsících kontrolované degradace ve vodném roztoku chloridu sodného. Měření byla prováděna na betonových vzorcích vyztužených jedním ocelovým prutem o průměru 8 mm. Srovnávací měření byla provedena za použití elektrického odporu, kdy byl pro měření elektrického odporu betonářské oceli použit Thomsonův dvojitý můstek. Výsledky získané z obou metod byly vzájemně porovnány.

Klíčová slova: stavebnictví, akustické emise (AE), koroze betonářské oceli, Impact-Echo, frekvenční kontrola, elektrický odpor, Thomsonův dvojitý můstek

Abstract

Corrosion of steel reinforcement accompanies the lives of most reinforced concrete structures. Expansion of corrosion has a negative effect on the properties of these structures and has resulted in a reduction of their lifetime. For the reduction of cases of irreversible damage caused by corrosion, it is important to detect the corrosion timely. Non-destructive methods offer new possibilities for testing the damage to the building constructions. These methods can early detect initial damage. One of them is Impact-Echo method as a traditional acoustic method of non-destructive testing. The article presents the results of measurements obtained from a reinforced concrete beam with a steel rod diameter of 8 mm after 24 months controlled degradation in aqueous NaCl solution. Measurements were carried out on samples of reinforced concrete beam with a steel rod diameter of 8 mm. The comparative measurements were carried out using electrical resistance when the Thomson double bridge was used for measurements of electrical resistance of reinforcing steel.

Key words: civil engineering, Acoustic Emission (AE), corrosion of reinforcing steel, Impact-Echo, frequency inspection, electrical resistance, Thomson double bridge

1. Úvod

Použitá metoda Impact-Echo umožňuje detekci mikrotrhliny ve struktuře materiálu [1] a umožňuje sledovat stav vnitřní struktury. Tato metoda patří do skupiny akustických metod nedestruktivního zkoušení a jeví se jako vhodný způsob pro sledování stavu stavebních konstrukcí a detekci, identifikaci a lokalizaci defektů, které jsou součástí technické diagnostiky [2, 3].

Použití nedestruktivních metod zkoušení umožňuje včasné odhalení vzniku a rozvoje vady v materiálu a zamezuje zásadnímu poškození nebo dokonce zhroutilí konstrukce [4, 5]. Tyto metody umožní detekovat škody způsobené mechanickým nebo tepelným namáháním a mohou odhalit také vliv koroze.

Frekvenční inspekce (metoda Impact-Echo) patří do rodiny nedestruktivních zkušebních metod a může být použita v mnoha odvětvích, mimo jiné i ve stavebnictví [6, 7]. Tato metoda měření je založena na využití akustických vlastností materiálu k posouzení míry koroze [8-12].

2. Experimentální uspořádání

Pro účely výzkumu byly vyrobeny betonové nosníky s rozměry 340 x 50 x 50 mm, které byly vyztuženy jedním standardním ocelovým prutem, který prochází středem nosníku. Délka tyče byla 400 mm s průměrem 8 mm.

Pro přípravu nosníku byla použita betonová směs se složením 400 kg cementu CEM II / BS 32,5 a 1400 kg písku Želešice s podílem kameniva 2 až 4 mm a 225 litrů vody. Čerstvý beton byl ztuhnut na vibračním stole. Dalších 24 hodin byly betonové vzorky uchovávány ve formě při pokojové teplotě a po odformování byly umístěny po dobu 28 dnů do vody. Pak byly vzorky dalších 28 dnů uloženy při pokojové teplotě.

Vzorky byly degradovány pomocí působení chloridů zrychlenou korozí. Vzorky byly na dobu 16 hodin ponořeny do 5% vodného roztoku chloridu sodného a následně umístěny do sušárny s teplotou vzduchu udržovanou na 40 °C, po dobu 8 hodin. Tyto cykly se opakují po 24 hodinách.

Pro zkoušení připravených vzorků byla použita Metoda Impact-echo. Tato metoda je založena na analýze odezvy mechanického impulzu, který ve zkoumaných vzorcích vyvolává harmonické vlnění na vlastní frekvenci a na vyšších harmonických frekvencích.

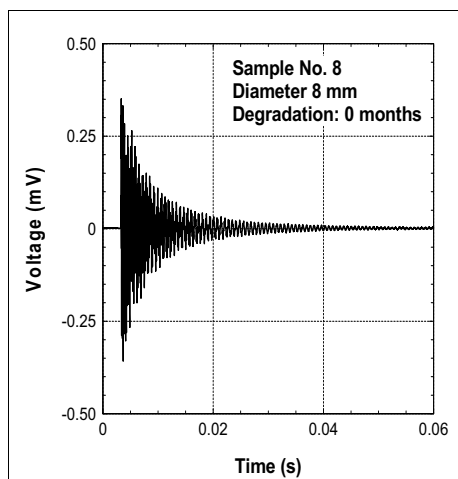
Krátkodobý mechanický impuls (úder kladivem) je aplikován na zkoušený vzorek a je detekován pomocí piezoelektrických snímačů, které jsou umístěny na povrchu vzorku. Vyvolaný impuls se odráží od povrchu vzorku, ale také od mikrotrhlin a vnitřních vad, které jsou předmětem šetření. Takto získaný signál je následně pomocí Fourierovy transformace podroben frekvenční analýze a je nalezena dominantní frekvence, která je hlavním kritériem pro hodnocení stavu vzorku.

Pro vyvolání napěťového impulsu bylo použito úderu ocelového kladívka o hmotnosti 12 g aplikovaného na povrch vzorku. K sejmutí signálu odezvy bylo použito piezoelektrického snímače typu MIDI, který byl umístěn také na povrchu vzorku. Takto získaný signál byl přiveden do dvoukanalového osciloskopu TiePie engineering Handyscope HS3 s rozlišením 16 bitů a poté analyzován pomocí softwarového balíku s názvem TiePie Multi Channel software. Piezoelektrický snímač byl umístěn ve středu podélné strany betonového nosníku a úder kladívkem byl proveden na protilehlé straně ve směru příčné osy vzorku.

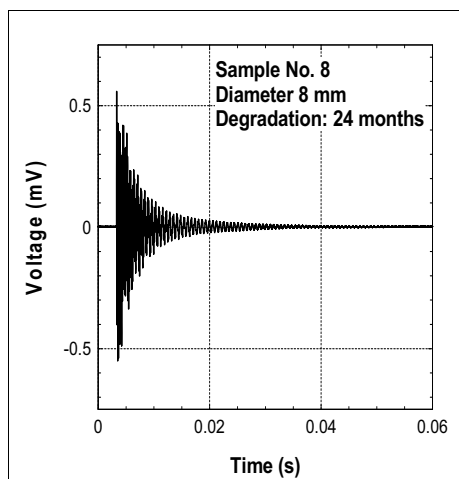
Pro srovnávací měření bylo použito měření elektrického odporu za použití Thomsonova dvojitého můstku. Použitím tohoto můstku umožňuje měřit i velmi malé odpory, čímž jsme schopni získat velmi přesné výsledky. Přesnost měření pomocí Thomsonova dvojitého můstku závisí na přesnosti použitých rezistorů, citlivosti můstku a různých interferencí. Měřicí přesnost bude prakticky ovlivněna pouze přesností odporů můstku za předpokladu, že citlivost můstku je dostatečná a rušivé vlivy jsou potlačeny vhodnou metodikou měření.

3. Výsledky a diskuse

Měření byla prováděna tak, že snímač byl umístěn ve středu podélné strany betonového nosníku a úder byl proveden ve středu protilehlé strany betonového nosníku v příčném směru. Na Obr. 1 je vidět časový průběh signálu odezvy vzorku číslo 8 před začátkem degradace. Signál odezvy u stejného vzorku po 24 měsících ukazuje Obr. 2.

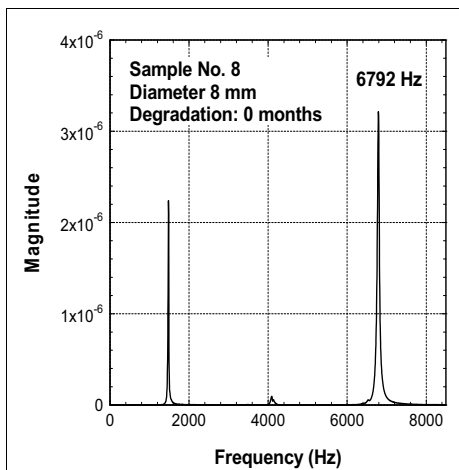


Obr. 1. Výstupní signál v závislosti na čase pro vzorek č. 8 před degradací.

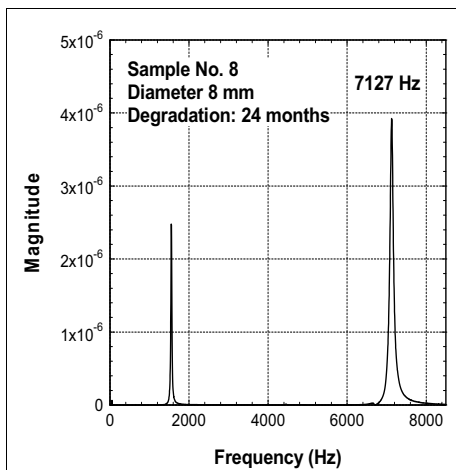


Obr. 2. Výstupní signál v závislosti na čase pro vzorek č. 8 po 24 měsících degradace.

Na obr. 3 je ukázán graf frekvenčního spektra pro vzorek číslo 8 před řízenou degradací. Součástí frekvenčního spektra je dominantní frekvence s hodnotou $f_1 = 6792$ Hz. Na Obr. 4 pak můžeme z frekvenčního spektra vidět změnu sledované dominantní frekvence pro stejný vzorek po 24 měsících řízené degradace ve vodném roztoku chloridu sodného. Původní sledovaná dominantní frekvence se posune na hodnotu $f_2 = 7127$ Hz.

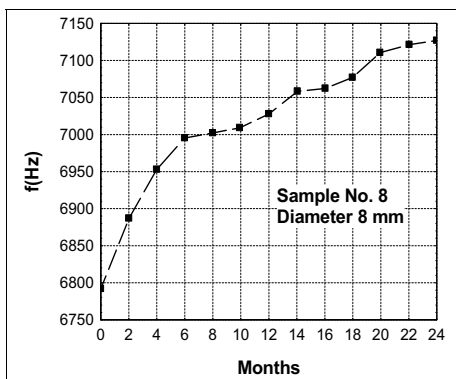


Obr. 3 Frekvenční spektrum pro vzorek č. 8 před degradací.



Obr. 4 Frekvenční spektrum pro vzorek č. 8 po 24 měsících degradace.

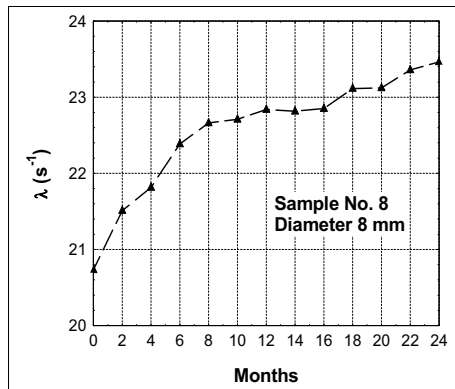
Na Obr. 5 můžeme pozorovat změnu dominantní frekvence v průběhu 24 měsíců řízené degradace ve vodném roztoku NaCl. Graf ukazuje prudký nárůst dominantní frekvence v prvních šesti měsících degradace. Změny v nadcházejících měsících jsou již postupné. Frekvence před degradací byla rovna $f_1 = 6792$ Hz a její hodnota vzrostla až na hodnotu $f_2 = 7127$ Hz po 24 měsících degradace. Celková změna frekvence je $\Delta f = 335$ Hz, což znamená změnu o 4,9%.



Obr. 5. Změna dominantní frekvence v průběhu 24 měsíců degradace.

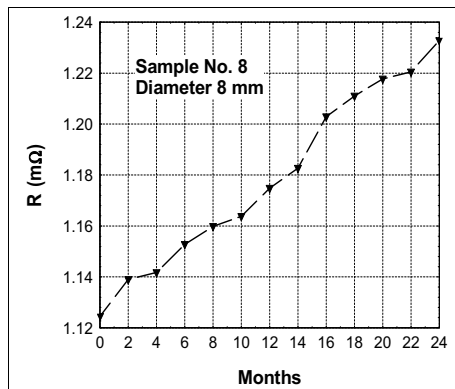
Kromě dominantní frekvence byl také sledován koeficient útlumu λ vypočítaný z exponenciální rovnice $A = A_0 \cdot e^{-\lambda T}$. Graf vývoje koeficientu útlumu opět ukazuje

významný nárůst hodnot v průběhu prvních šesti měsíců degradace, jak je uvedeno na obr. 6. Koeficient útlumu byl navýšen z původní hodnoty $\lambda_1 = 20,7 \text{ s}^{-1}$ na hodnotu $\lambda_2 = 23,5 \text{ s}^{-1}$, změna tedy o $\Delta\lambda = 2,8 \text{ s}^{-1}$, což znamená změnu 13,5%.



Obr. 6. Změna koeficientu útlumu v průběhu 24 měsíců degradace.

Obr. 7 ukazuje změny v odporu betonářské oceli během 24 měsíců řízené degradace získané na vzorku číslo 8 o průměru 8 mm. Počáteční hodnota elektrického odporu se změnila z původní hodnoty $R_1 = 1,12 \text{ m}\Omega$ až hodnotu $R_2 = 1,23 \text{ m}\Omega$. Po 24 měsících došlo tedy ke změně elektrického odporu o $\Delta R = 0,11 \text{ m}\Omega$, to představuje změnu o 9,8%. Měření bylo prováděno s použitím Thomsonova dvojitého můstku, což umožnilo měření velmi malých odporů.



Obr. 7. Změna odporu oceli v průběhu 24 měsíců degradace.

4. Závěr

V tomto článku se zabýváme studiem koroze ocelové výztuže v betonu pomocí monitorování vývoje dominantní frekvence a koeficientu útlumu. Tyto parametry získáváme za použití metody Impact-echo ze signálu odezvy. Takto získané výsledky jsou porovnány s měřením elektrického odporu výztuže pomocí Thomsonova dvojitého můstku.

Dominantní frekvence ukazuje změny v signálu odezvy a je hlavním kritériem pro určení vývoje koroze železobetonové výztuže. V článku jsou prezentovány výsledky měření získané po 24 měsících kontrolované degradace ve vodném roztoku chloridu sodného. Výsledné hodnoty byly naměřeny na železobetonovém nosníku s průměrem ocelové výztuže 8 mm. Napěťový impulz byl přiveden na střed podélné strany betonového nosníku ve směru příčné osy a detekovány na protilehlé straně tohoto vzorku.

Frekvenční spektrum bylo sledováno během 24 měsíců degradace. Dominantní frekvence i koeficient útlumu vykazují patrné změny. Pro názornost jsou uvedeny výsledky získané na konkrétním vzorku č. 8. Tento vzorek ukazuje změnu frekvence z $f_1 = 6792$ Hz na hodnotu $f_2 = 7127$ Hz, to znamená změnu $\Delta f = 335$ Hz, což je 4,9%. Koeficient útlumu se změnil z $\lambda_1 = 20,7 \text{ s}^{-1}$ na $\lambda_2 = 23,5 \text{ s}^{-1}$, to je $\Delta \lambda = 2,8 \text{ s}^{-1}$, tzn. změna o 13,5%.

Měření elektrického odporu ocelové výztuže bylo použito jako srovnávací metody s akustickou metodou Impact-Echo. Hodnota odporu výztuže na vzorku č. 8 ukazuje změnu z $R_1 = 1,12 \text{ m}\Omega$ na hodnotu $R_2 = 1.23 \text{ m}\Omega$. Během 24 měsíců degradace se elektrický odpor betonářské oceli zvýšil o $\Delta R = 0,11 \text{ m}\Omega$, tj. 9,8%. Měření byla prováděna s použitím Thomsonova dvojitého můstku, který umožňoval měření velmi malých odporů.

Po vyhodnocení výsledků získaných z předchozích měření, můžeme říci, že metodu Impact-echo jako metodu frekvenční inspekce lze doporučit jako účinný nástroj pro zhodnocení stavu koroze ocelové výztuže v železobetonu.

Akustické nedestruktivní zkušební metody je možné použít pro včasnou identifikaci vzniku a rozvoje vady v materiálu a tím odvrátit selhání nebo dokonce zhroutilí strukturních jednotek stavby, které jsou mechanicky nebo tepelné namáhány nebo ovlivněny korozi. Je zřejmé, že metoda Impact-echo je citlivá metoda pro posouzení stavu koroze výztuže v železobetonových konstrukcích.

Poděkování

Tento výzkum byl proveden jako součást projektu Interní projekty VUT - projekt FAST-J-14-2179 a FAST-S-13-2149 a IRP 9042100200.

Literatura

- [1] Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method ASTM C1383-04(210).
- [2] I. Kusak, M. Lunak and P. Schauer: Tracing of Concrete Hydration by Means of Impedance Spectroscopy (New Tool for Building Elements Testing). *Applied Mechanics and Materials*, 2013(248), 2013, pp. 370-378, ISSN 1660-9336.

- [3] L. Pazdera, J. Smutny, L. Topolar, M. Korenska and V. Bilek: Non Destructive Testing during Concrete Hardening. *NDT Welding Bulletin* (special issue), 2010, pp. 18, ISSN 1213-3825.
- [4] I. Plšková, Z. Chobola and M. Matysík: Assessment of Ceramic Tile Frost Resistance by Means of The Frequency Inspection Method. *Ceramics-Silikáty* 55 (2), 2011, pp. 176-182, ISSN 0862-5468.
- [5] M. Kořenská, Z. Chobola, R. Sokolář, P. Mikulková and J. Martinek: Frequency Inspection as An Assessment Tool for The Frost Resistance of Fired Roof Tiles. *Proc. of Ceramics-Silikáty* 50, (3), 2006, pp. 185-192, ISSN 0862-5468.
- [6] T. Ficker, L. Topolář and I. Kusák: Is Componential Strength Analysis of Concrete Possible?. In *Magazine of Concrete Research*, England, 2013, ISSN 0024-9831.
- [7] M. Luňák, I. Kusák, L. Pazdera, L. Topolář and V. Bilek: Monitoring of Cement-based Material Solidification, Focusing on Electrical Properties. In *ESA 2010*. 1. CZ: Palacky University. 2010, pp. 233-240. ISBN: 978-80-244-2533-7.
- [8]. L. Pazdera, L. Topolář, V. Bilek, J. Smutný, I. Kusák and M. Luňák: Measuring of Concrete Properties during Hardening. In *ESA 2010*. 1. CZ: Palacky University, 2010, pp. 311-318, ISBN 978-80-244-2533-7.
- [9] P. Mazal, L. Pazdera and J. Dvořáček: Application of Acoustic Emission Method. In *Contact Damage Identification. International Journal of Materials & Product Technology*, 41(1), 2011, pp. 140-152, ISSN: 0268-1900.
- [10] J. Smutný and L. Pazdera: New Techniques in Analysis of Dynamic Parameters Rail Fastening. *INSIGHT*. Vol 46(No 10), 2004, pp. 612-615, ISSN: 1354-2575.
- [11] M. Jaśniok: Examining and modelling the influence of lengths of rebars in concrete to shapes of impedance spectra. In *Cement, Wapno, Beton*, Special Issue, 2012, pp. 30-34, ISSN: 1425-8129
- [12] G. Epasto, E. Proverbio and V. Venturi: Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method. *Materials and Structures*. Volume 43, Numbers 1-2, 2010, pp. 235-245, ISSN: 1359-5997.



DEFEKTOSKOPIE PRO KONSTRUKTÉRY A TECHNOLOGY NONDESTRUCTIVE TESTING FOR ENGINEERS AND TECHNOLOGISTS

Petra TUROŇOVÁ

PTS Josef Solnař s.r.o.

turonova@ptsndt.com

Abstrakt

Obecné povědomí středního technického managementu ve výrobních podnicích o NDT a jeho možnostech je různé úrovně.

V mém příspěvku jsem se zaměřila na představení nového vzdělávacího projektu, určeného především pro tuto skupinu specialistů, napříč celým průmyslem - železničním, automobilovým, stavebním, hutním, leteckým a podobně. Cílem projektu je seznámit tuto cílovou skupinu s možnostmi a limity aplikace NDT kontroly, které využijí, již při tvorbě návrhů technologických celků a výrobků.

Klíčová slova: nedestruktivní zkoušení, NDT vzdělávání, NDT kontrola, aplikace NDT

Abstract

General awareness of middle technical management in manufacturing companies about NDT and its possibilities differs.

In my contribution I concentrated on the introduction of new educational project intended especially for this group of specialists through the whole industry - railway, car, building, iron and steel and the like. The aim of the project is to acquaint this target group with possibilities and limits of the application NDT check, which will be applied already during the formation of designs of technological units and products.

Key words: non destructive testing, NDT education, NDT check, application NDT

Jak jsem již uvedla v abstraktu, znalosti středního technického managementu ve výrobních podnicích o nedestruktivní kontrole jsou na nevyvážené úrovni, přesto jsou tito specialisté přímo napojeni na procesy rozhodování o zavádění a předepisování nedestruktivních zkoušek, nebo navrhují technické a konstrukční řešení produktů, což může v následných etapách životního cyklu výrobku zapříčinit to, že nebude možné předepsanou a nebo požadovanou metodu NDT testování zákazníkem provést, například z důvodů technických vlastností a nebo konstrukčního řešení výrobku (nevhodný tvar a nebo velikosti výrobku atd.).

Dle mého názoru existují dvě hlavní příčiny tohoto „problému“:

1. Ucelená problematika nedestruktivního testování je na veřejných technických středních a vysokých školách vyučována okrajově.
2. Tato úzce specializovaná školení jsou velmi časově a finančně náročná a v současné době neexistuje komplexní vzdělávací program obsahující veškeré metody.

Jsme si vědomi tohoto nedostatku, a proto jsme pro touto cílovou skupinu připravili speciální vzdělávací program, který obsahuje komplexní informace- znalosti z oboru defektoskopie a technických oborů. Školící program vznikl ve spolupráci s předními českými experty na defektoskopickou kontrolu a technickými pracovníky, kteří zkoncipovali teoretickou a praktickou výuku do čtyř vzdělávacích modulů:

Modul 1:

- Úvod do NDT
- Seznámení s certifikačním procesem, normy,
- Vizuální kontrola
- Kapilární kontrola

Modul 2:

- Magnetická kontrola
- Ultrazvuková kontrola

Modul 3:

- Rentgenová kontrola
- Vířivoproudá kontrola
- Akustická emise

Modul 4:

- Měření rozměrů
- Měření povlaků
- Měření tvrdosti
- Měření tloušťky ultrazvukem
- Měření teploty pyrometry (bezkontaktní)

Tento kurz má v časově omezené době (8 dnů), seznámit cílovou skupinu s ucelenou problematikou nedestruktivního zkoušení. Abychom vyřešili nastavený omezený časový rozsah výuky, inovovali jsme metody výuky. Prezenční výuka bude doplněna o instruktážní filmy a o e-learningovou aplikaci, která byla speciálně vytvořena pro tento projekt.

E-learningová aplikace obsahuje: prezentace výuky, doplňkové učivo, skripta, instruktážní videa, fotografie základních vad, základy fyziky a matematiky pro defektoskopii, seznamy aktuálních norem používaných v jednotlivých defektoskopických metodách, výklady z těchto norem, vzorové příklady protokolů o zkoušce materiálů, testové otázky.

Instruktážní videa: jedná se o krátké filmy, které zaznamenávají praktickou výuku lektorů v teorii a v terénní praxi. Témata jednotlivých filmů kopírují program jednotlivých modulů.

Realizace výuky – vyučování je koncipováno tak, aby účastníci získali teoretické vědomosti a praktické dovednosti, a aby je byli schopni aplikovat do praxe. Cílová skupina absolvuje 4 moduly po dvou dnech výuky, každé téma bude mít svou teoretickou a praktickou část. Mezi jednotlivými moduly bude muset frekventant studovat informace a zpracovávat zadání obsažené v e-learningové aplikaci. Tuto aplikaci budou mít absolventi k dispozici i po ukončení kuru, mohou se podílet i na její aktualizaci.

E-learningová aplikace bude pravidelně aktualizována na základě požadavků lektorů, odborných garantů, cílové skupiny a zaměstnavatelů, aby teoretické informace i praktické ukázky byly co nejaktuálnější a odrážely aktuální vývoj v oblasti nedestruktivní kontroly a vývoj potřeb trhu.

Absolvent po ukončení kurzu získá ucelený přehled o jednotlivých nedestruktivních metodách, bude umět navrhnout vhodnou NDT metodu na daný výrobek a dokáže naopak navrhnout výrobek tak, aby byl pro danou metodu zkoušení vhodný, bude se orientovat v normách, dokáže rozlišit typické vady materiálů pro jednotlivé výrobní a technologické operace, bude umět pracovat s protokoly.

HODNOCENÍ RANÝCH STÁDIÍ ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE V OBLASTI ENERGETICKÉHO PRŮMYSLU ASSESSMENT OF EARLY FATIGUE OF POWER PLANT MATERIAL USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

František VLAŠIČ *, Denisa BÁRTKOVÁ *, Pavel MAZAL *

* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství; Technická 2, Brno
e-mail: vlasic@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Práce se zabývá aplikací metody akustické emise za účelem detekce a hodnocení raných stádií cyklického poškození. Jedná se zejména o různé projevy cyklické plastické deformace, která vede k tvorbě skluzových pásem a mikrotrhlin. Pro účely této práce byla vybrána reaktorová Cr-Ni-Mo-V nízkolegovaná ocel. Signál akustické emise byl korelován s mechanismy plastické deformace a změnami zatěžovací (rezonanční) frekvence zkušebního vzorku zatěžovaného na únavovém zařízení RUMUL. Práce je také zaměřena na analýzu signálu akustické emise při otevírání a zavírání trhliny.

Klíčová slova: hodnocení únavového chování, akustická emise, iniciace trhliny, reaktorová ocel

Abstract

This work presents the application of the acoustic emission technique for detection and characterization of early fatigue damage. Specifically various manifestations of the localized plastic deformation that is the precursor of microcrack formation. A nuclear Cr-Ni-Mo-V low-alloy steel has been chosen for this study. The acoustic emission signal has been correlated with the defect formation mechanisms and the registration of loading (resonant) frequency changes of the tested specimen taken by RUMUL fatigue machine. The work is focused on the analysis of the acoustic emission signal during opening and closure half-cycle.

Key words: fatigue behaviour assessment, acoustic emission, crack initiation, power plant material

1. Úvod

Zkušenosti s dlouhodobým provozováním elektráren ukazují, že až 40% havárií různých energetických zařízení je spojeno s pittingem, únavou nebo korozí [1]. To je důvod, proč je nezbytné studovat mechanismy korozního a únavového chování těchto komponent, a to zejména v jaderných elektrárnách. Tato práce je zaměřena na únavové chování nízkolegované oceli 15Ch2NMFA, která se používá od roku 1975 jako materiál pro tlakové nádoby. Tlaková nádoba reaktoru je jednou z nejdůležitějších částí jaderné elektrárny, která musí splňovat nejpřísnější bezpečnostní, spolehlivostní a provozní požadavky. Nejdůležitější vlastnosti materiálů

pro tlakové nádoby jsou - odolnost proti křehkému porušení, únavě, růstu trhlin a metalografická čistota [2].

Jak již bylo uvedeno, provozuschopnost tlakových nádob závisí na mechanických vlastnostech použitého materiálu, který musí splňovat přísné požadavky na odolnost proti růstu únavové trhliny základního materiálu a jeho svarových spojů. Při změnách teploty z pracovní úrovně (250 – 300 °C) na úroveň přechodových režimů - teplot (např. při odstávkách nebo spouštění reaktoru) se mohou korozní procesy velmi urychlovat. Při 30 až 40 letech provozování tlakové nádoby se v důsledku radiace a hydrogenace sice zvyšují pevnostní vlastnosti, ale na úkor těch plastických. To je důvod, proč stoupá pravděpodobnost křehkého porušení.

Současné náročné spolehlivostní a bezpečnostní požadavky nejsou realizovatelné bez účinných prostředků nedestruktivního zkoušení (NDT), které mohou být použity ke sledování stavu materiálů tlakových nádob, aby byl zaručen jejich bezpečný provoz. Důležitým faktorem je také posouzení zbývající životnosti a výměny komponenty, což vede k výraznému snížení přímých a nepřímých nákladů. V této souvislosti je velmi důležité sledovat růst defektů, jako jsou trhliny nebo korozní produkty, a odhadnout jejich velikost tak přesně, jak je to jen možné [3, 4]. Nejvhodnější metodou NDT pro studium degradace materiálu při únavovém zatěžení je akustická emise (AE). Jedná se o velmi užitečný nástroj pro detekci úniků a po filtraci šumu i pro detekci vzniku trhlin a jejich růst za provozu [5]. Většina publikovaných prací je zaměřena na oblast projevů plastické deformace a vzniku a šíření trhlin [6, 7].

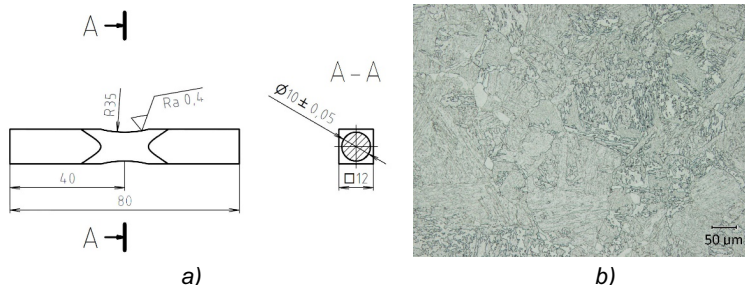
Různé vědecké týmy se také snaží vyvinout nové identifikační metody pro separaci signálů AE do různých typů. Například v [8] signály AE jsou pomocí nové metody rozděleny do různých skupin: emitované dislokacemi a mikro a makro-trhlinami. Na základě algoritmu („k-means“ cluster) v [9], jsou zdroje AE rozděleny do tří clusterů. Výsledky ukazují, že se různé zdroje AE, jako jsou plastická deformace, iniciace trhlin nebo martenzitická transformace, významně liší, což by mohlo výrazně pomoci při analýze a posuzování stádií únavového procesu.

Většina týmů, která se zabývá výzkumem únavového chování s využitím AE, pracuje v nízkocyklové oblasti (LCF). Tato práce popisuje výzkumný program, ve kterém byla AE studována ve vysokocyklové oblasti (HCF). Ve srovnání s LCF, stádium iniciace mikrotrhlin ve HCF oblasti je mnohem výraznější a může trvat i několik desítek procent celkové únavové životnosti. Nicméně analýza AE ve HCF představuje některé specifické problémy. Rychlost růstu trhliny je relativně nízká, což se projevuje ve slabé intenzitě AE. Proto je nesmírně důležitá filtrace šumu a rušivého pozadí [10].

Ze všech sledovaných parametrů AE jsou dle [11] nejcitlivější na mikrostrukturní změny county a kumulativní události AE. U countů se předpokládá, že jsou přímo úměrné počtu aktivních mikroskopických událostí, jako jsou např. dislokace, lomy inkluzí a dvojčatění. V poslední době se detailně zkoumá počáteční část hitu AE hodnotou RA, která je definována jako poměr doby nárůstu ku amplitudě (měřeno v $\mu\text{s/V}$ nebo ms/V), jak je navrženo dle příslušných doporučení [12]. Pro výzkum vývoje únavového poškození oceli 15Ch2NMFA byl v této práci použit systém Dakel-IPL, dodaný firmou ZD Rpey – DAKEL. Práce se také zaměřuje na analýzu signálu AE pomocí identifikačních metod, které separují signály do různých skupin, a to při rostoucí fázi síly/napětí (otevírání trhliny) a klesající fázi (uzavírání trhlin).

2. Materiál a zkušební zařízení

Pro únavové zkoušky byla v této práci použita reaktorová nízkouhlíková ocel, známá pod označením GOST 15Ch2NMFA. Hladká zkušební tělesa (obr. 1a) byla vyrobena z velkých CT50, které byly odebrány z kovaných prstenců tlakové nádoby reaktoru. Mikrostruktura studovaného materiálu v důsledku použitého tepelného zpracování (dvoustupňové kalení s následným popuštěním) obsahovala směs heterogenního bainitu a martenzitu (obr. 1b). Minimální průměr zkušebního tělesa byl 10 mm.

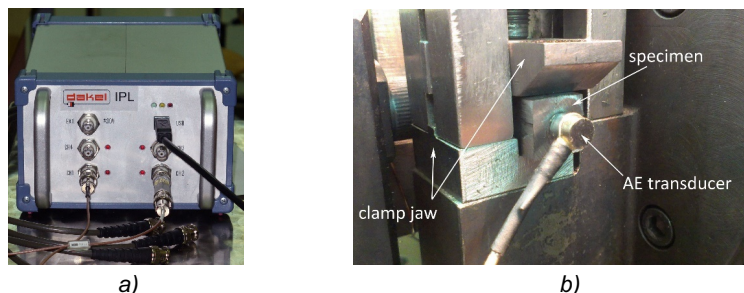


Obr. 1 Geometrie zkušebního tělesa (a), mikrostruktura oceli 15Ch2NMFA (b)
Fig. 1 Shape of the test specimen (a), microstructure of 15Ch2NMFA steel (b)

Únavové zkoušky v ohybu byly provedeny na elektrozonačním pulzátoru RUMUL Cracktronic 8204/160 ve vysokocyklové oblasti na různých úrovních amplitudy napětí v rozmezí 407 až 590 MPa. Únavový cyklus byl sinusový s frekvencí asi 113 Hz a $R = -1$.

3. Měření signálu akustické emise

AE byla monitorována systémem Dakel-IPL s celkovým ziskem 80 dB. Na obou koncích zkušebního tělesa byly upevněny dva piezoelektrické snímače (Dakel, typ: MIDI, pasivní), viz obr. 2. Čtyřkanálový měřicí systém IPL pokrývá frekvenční pásmo od cca 20 do 800 kHz s konstantní vzorkovací frekvencí 2 MHz a rozlišením ADC 12 bitů (rozsah měření ± 2048 ADC). Data byla ukládána a zpracována pomocí dodaného softwaru Dakel-UI.

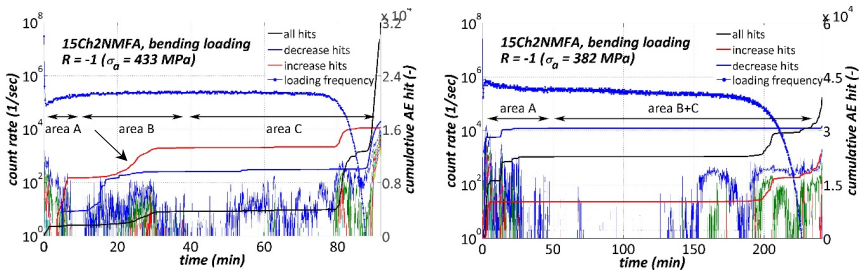


Obr. 2 Diagnostický systém AE – Dakel-IPL (a), umístění snímačů na tělese (b)
Fig. 2 AE measurement system IPL (a), location of the sensors on the specimen (b)

Záznam síly/napětí jako funkce času byl realizován za použití pátého kanálu systému IPL, který slouží zejména pro sběr pomocných veličin (teplota, síla, deformace, atd.). Průměrná rychlost šíření vln v tělese (4,8 mm/μs) byla stanovena před zkouškami prostřednictvím Pen-testu (Hsu-Nielsenův zdroj). Tato hodnota byla pak použita pro lokalizaci zdrojů AE.

4. Výsledky měření signálu AE při únavového zatěžování

Záznamy signálu AE byly na všech úrovních amplitudy napětí velmi podobné a byly charakterické třemi společnými rysy, které odpovídají různým stádiím únavového poškození. Obrázek 3 ukazuje nejtypičtější grafy kumulace hitů AE (černá čára), countů (různé barvy) a zatěžovací frekvence (modrá čára) na dvou úrovních napětí, které jsou rozděleny na tři oblasti. Vysoká aktivita AE v první části únavové životnosti je způsobena pohybem a interakcemi dislokací a tvorbou perzistentních skluzových pásem - "oblast A". Stádium nukleace trhliny se vyznačovalo nízkou aktivitou signálu AE s občasnými špičkami. Poté následovalo pozvolné zvyšování aktivity AE emitované růstem a spojováním mikrotrhlin - "oblast B". Ostrý nárůst aktivity těsně před únavovým lomem byl charakteristický pro růst makrotrhliny - "oblast C".



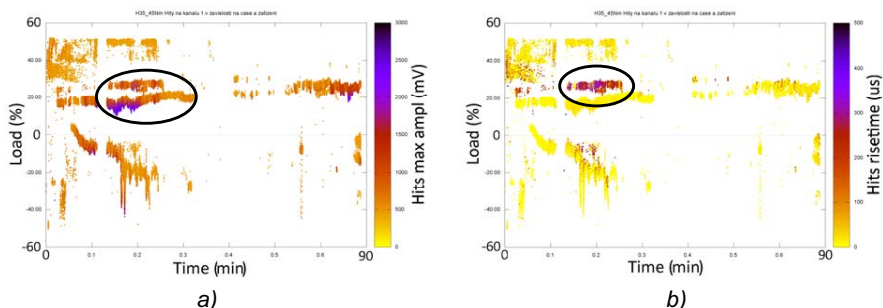
Obr. 3 Časový průběh kumulace hitů AE, countů a zatěžovací frekvence během únavové zkoušky

Fig. 3 Time history of AE hit accumulation, count rate and loading frequency during fatigue test to failure

Vysoká aktivita každého typu ze zdrojů AE nebyla po celou dobu únavové zkoušky konstantní. Průběh změn zatěžovací (rezonanční) frekvence zkušebního tělesa ze zařízení RUMUL bylo užitečné zejména k určení počátku růstu makrotrhliny (modrá čára). Tento okamžik je znázorněn na obr. 3 od cca 75. min., resp. 170. min. Stádium nukleace bylo charakteristické náhlým zvýšením max. amplitudy a doby náběhu v horní polovině zatěžovacího cyklu. Po iniciaci se objevila výrazná pásma AE s jasnými hranicemi (viz obr. 4). Signály AE mohou být v tomto pásmu způsobeny třením povrchů při uzavírání trhliny.

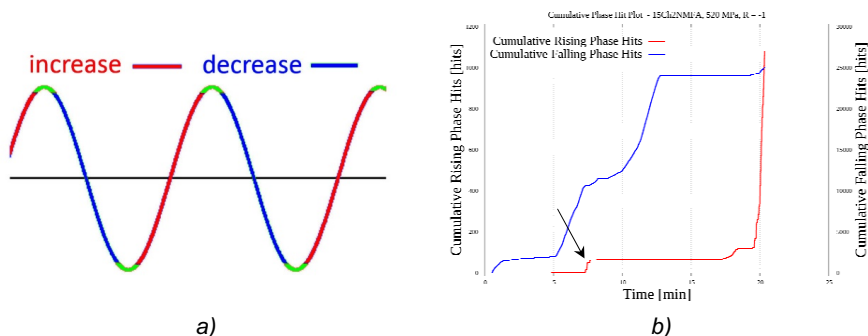
Barevné rozdělení fází cyklu síly (viz obr. 5a) bylo navrženo ke studiu chování AE při otevírání a zavírání trhliny. Rostoucí fáze je vždy označena červeně a klesající modře. Většina signálů AE je generována během poklesu síly (uzavírání trhliny), zejména v blízkosti nulového zatížení. Na všech úrovních amplitudy napětí byl pozorován prudký nárůst událostí AE během fáze růstu síly. To může být výstražný signál upozorňující na únavové porušení (na obr. 3 v 80., resp. 200. min). Hity AE

generované během klesající fáze jsou většinou před lomem konstantní. Nicméně byly také pozorovány změny při nárůstu síly během stádia iniciace (viz obr. 3a a 5b, značeno šipkou).



Obr. 4 Časový průběh amplitudy hitu AE (a) a doby náběhu (b) v závislosti na poloze síly (napětí)

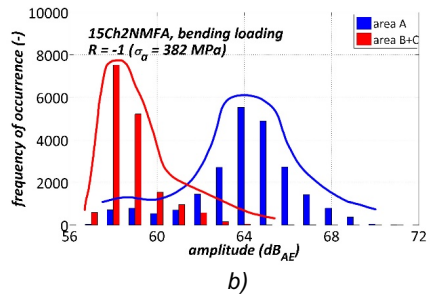
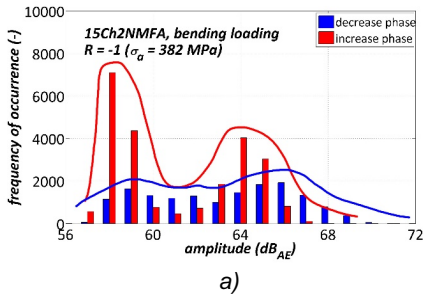
Fig. 4 Time history of hit amplitude (a) and rise time (b) depending on the stress amplitude (load)



Obr. 5 Barevné rozložení fází cyklu síly (a) a kumulativní četnost hitů AE při nárůstu (poklesu) síly při amplitudě napětí 520 MPa (b)

Fig. 5 Definition and colorful distribution of the load phases (a) and cumulative AE hits at increasing and decreasing phase under 520 MPa (b)

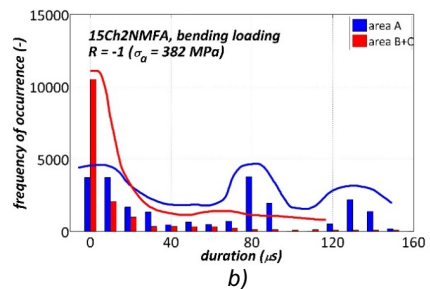
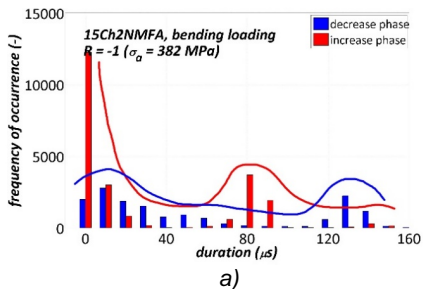
Při kvalitativním posuzování parametrů AE se ukázal velmi výrazný a jasný trend. Proto byla provedena u všech stádií únavového procesu analýza rozložení četnosti výskytu amplitudy a délky trvání. Nejtypičtější grafy jsou uvedeny na obr. 6. Jak je patné z grafu, nejčastější výskyt amplitudy AE během klesající fáze byl kolem 59 a 66 dB_{AE}. Během fáze růstu síly to bylo kolem 58 a 64 dB_{AE}. Nejvýznamnější rozdíly jsou ve stádiích únavy. Nízké amplitudy kolem 58 dB_{AE} pocházejí z oblasti nukleace a růstu mikrotrhlin - "oblast B+C", zatímco vyšší amplitudy kolem 64 dB_{AE} byly emitovány pohybem a interakcemi dislokací a tvorbou skluzových pásem v prvním období únavové životnosti - "oblast A". Detekované špičky (vrcholy) mohou ukazovat na tvorbu různých mechanismů únavového poškození.



Obr. 6 Histogram amplitudy AE při nárůstu (poklesu) síly (a), a v různých stádiích únavového procesu (b)

Fig. 6 AE amplitude histogram at increasing / decreasing phase (a) and in different stages of fatigue damage (b)

Obrázek 7 zase prezentuje distribuci délky trvání. Velmi krátké doby trvání (< 5 μ s) se vyskytují nejčastěji v rostoucí fázi a v poslední polovině únavového zatěžování (růst a šíření makrotrhliny), zatímco délka trvání kolem 80 μ s se nejčastěji vyskytuje (sekundárně) při nárůstu síly a v první periodě zatěžování.

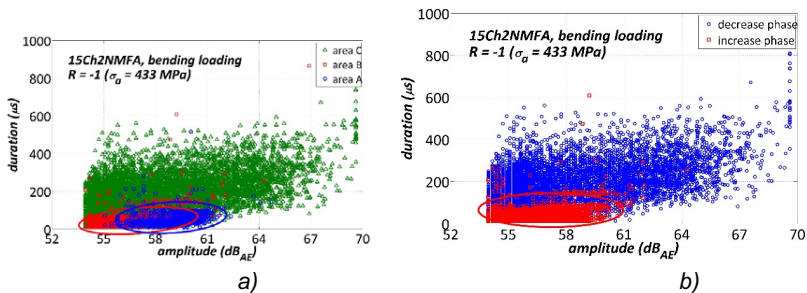


Obr. 7 Histogram délky trvání při nárůstu (poklesu) síly (a), a v různých stádiích únavového procesu (b)

Fig. 7 AE duration histogram at increasing / decreasing phase (a) and in different stages of fatigue damage (b)

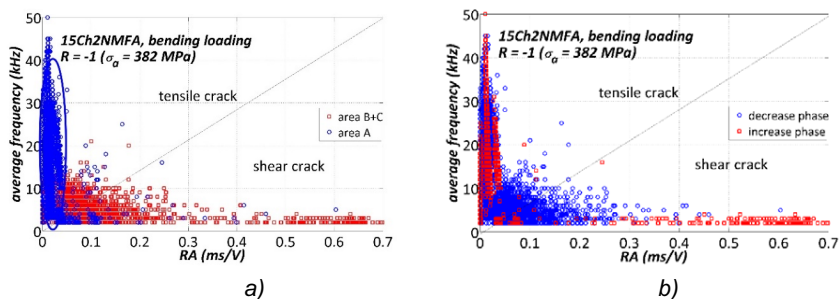
Vztah mezi hodnotami max. amplitudy a délky trvání AE v obou fázích cyklu síly a v různých fázích procesu únavy je uveden na obr. 8. Je zřejmé, že AE signály s amplitudou 54 až 61 dB_{AE} a délkou trvání od 0 do 100 μ s jsou jasně ohraničeny od signálů přicházejících ze stádia růstu makrotrhliny ("oblast C") a klesající fáze.

Hodnota RA a průměrná frekvence generovaných signálů AE při únavových zkouškách (až do lomu) byly stanoveny na základě kódu [12]. Vyšší hodnota RA je známkou toho, že smykové trhliny dominují únavovému procesu (obr. 9). Je třeba podotknout, že stejné typy trhlin se vyskytují na každé úrovni amplitudy napětí a v různých stádiích únavového procesu. Nicméně, tahové trhliny se staly více dominantní pro "oblast A".



Obr. 8 Vztah mezi amplitudou a délkou trvání v různých stádiích únavy (a) a při poklesu (nárůstu) síly (b)

Fig. 8 Relationship between amplitude vs. duration in different stages (a) and at increasing/decreasing phase (b)



Obr. 9 Vztah mezi hodnotou RA a průměrnou frekvencí cyklicky zatěžovaných těles v různých stádiích únavy (a) a při poklesu (nárůstu) síly (b)

Fig. 9 Example of relationship between RA value and average frequency of fatigued specimen in different stages (a) and at load decreasing / increasing phase (b)

5. Závěr

Jedním z cílů tohoto výzkumu bylo vyšetřit možnosti selekce stádií únavového poškození a navrhnout metodiku pro posuzování raných projevů únavové degradace v materiálech používajících se v elektrárenském průmyslu. Únavový proces byl nejlépe popsán pomocí AE dat zobrazujících počet překmitů (countů) a kumulativní četnost hitů AE v čase, jak je znázorněno na obr. 3. Signál AE zpočátku ukazuje nárůst v důsledku pohybu a interakce dislokací a tvorby skluzových pásem ("oblast A"), po kterém následuje klidné stádium, ve kterém dochází k nukleaci trhliny ("oblast B"). Celý únavový proces končí růstem a spojováním mikrotrhlin do velikosti makrotrhliny ("oblast C") a únavovým lomem. Nukleace a růst mikrotrhlin jsou doprovázeny nízkou aktivitou AE. Proto je velmi obtížné odhalit jejich genezi (viz obr. 8). Nicméně kvalitativní analýza parametrů AE (jako jsou délka trvání či amplituda) ukázala velmi jasný trend. Zejména bylo zjištěno, že na všech úrovních amplitudy napětí docházelo k ostrému nárůstu hitů AE při nárůstu síly (otevírání trhliny), což může být ukazatel nukleace a růstu mikrotrhlin (viz obr. 5b, 8b). Závěrem

může být konstatováno, že vybrané parametry AE jsou velmi citlivé na únavové procesy v materiálu (na rozdíl od celkové aktivity AE) a měly by být dále detailně studovány za účelem včasného varování před potenciální hrozbou náhlého únavového lomu.

Poděkování

Tato práce je výstup výzkumu a vědecké činnosti v rámci projektu číslo FR-T14 / 602 "Diagnostický komplex pro detekci úniků tlakových médií a materiálových defektů tlakových komponent jaderných elektráren", podporované Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR a dále byl také podpořen NETME Centrem (Nové technologie pro strojírenství), reg. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a ve fázi udržitelnosti NETME Centrem Plus (LO1202) finančními prostředky z Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci "Národního programu udržitelnosti I".

Literatura

- [1] B. T. Timofeev, T. A. Chernaenko, Corrosion and Mechanical Strength of Russian Light Water Reactors, In *Mechanika 2006*, Proceedings of the 11th International Conference, April 6 - 7, 2006, Kaunas University of Technology, Lithuania, 2006. p 346.
- [2] T. Riha, Radiation damage of VVER-440 based Dukovany NPP reactor pressure vessel investigation, *Diploma thesis*, Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2011, p. 109. Diploma thesis supervisor: Ing. Hugo Sen.
- [3] P. J. Shull, *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*, New York: Marcel Dekker, 2002.
- [4] G. Sposito, *Advances in Potential Drop Techniques for Non-destructive Testing*, Imperial College London, January 2009.
- [5] L. M. Rogers, *Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications*, Lloyd's Register, Technical Investigation Department, London, p. 80. 2001.
- [6] T. M. Roberts, M. Talebzadeh, Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, pp. 695–712, 2003.
- [7] D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas, Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, Issue 2, pp. 106–110, 2011.
- [8] O. V. Bashkov, S. V. Panin, N. A. Semashko, V. V. Petrov and D. A. Shpak, Identification of sources of acoustic emission during deformation and destruction began to be steel 12Cr18Ni10Ti, *Factory Laboratory, Materials diagnostic*, No. 10, 2009, pp. 51-57.
- [9] A. O. Amer, A. – L. Gloanec, S. Courtin, C. Touze, Characterization of fatigue damage in 304L steel by an acoustic emission method, *Procedia Engineering*, Vol. 66, 2013, pp. 651 – 660.
- [10] S. Smith, T. M. Morton, Acoustic-emission Detection Techniques for High-cycle-fatigue Testing, *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 5, 1973, pp. 193-198.
- [11] A. Berkovits, D. Fang, Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 3, pp. 401-416, 1995.
- [12] RILEM Technical Committee 212-ACD (M Ohtsu), Acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete, *Materials and Structures*, Vol. 43, 2010, pp. 1187-1189.

Název

Defektoskopie 2014

Editor

Marta Kořenská, Luboš Pazdera, Pavel Mazal

Vydal

Vysoké učení technické v Brně
ve spolupráci s Českou společností pro NDT

Tisk

Betis s.r.o. Praha
Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice

Vyšlo

říjen 2014

Vydání

první

Náklad

200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-5035-6



45th International Conference and Exhibition



DEFEKTOSKOPIE 2015

NDE FOR SAFETY 2015

Brno, Czech Republic • November 3-5, 2015

This event will be organized by Czech Society for NDT as an international annual meeting and exhibition in the town Brno (South Moravia). The conference is aimed to all topics of non-destructive testing and evaluation of materials and structures in all areas of technical activities. It is an opportunity to meet together all people interested in research, development, as well as in practice, standardization and application of NDT/NDE methods. All interested persons are invited to participate at the conference, and to contribute by papers in both oral and poster sections. Manufacturers and suppliers of NDT instruments, software, literature, and service providers are invited to present their products and innovations.

Main Conference Topics:

- Acoustic emission
- Magnetic and inductive methods
- Radiography
- Surface and optical methods
- Tomography
- Ultrasonic methods
- Leak detection
- NDT corrosion damage monitoring
- NDT in material and structure testing
- Industrial standards and innovations
- Functional and operational testing, reliability and safety assurance
- Education, standardisation, certification and accreditation



Brno

Brno is the capital of the South Moravian Region with a population of almost 400.000 people. It has a strategic geographic position within Central Europe (120 km from Vienna, 200 km from Prague) with excellent transport accessibility by rails and buses, including an international airport. Brno is a modern, dynamic and fast growing centre of industry, trade, science, information technology, research and innovation with business incubators and centres of excellence in science, a city of universities.

Hotel

The accommodation of participants will be reserved at comfort **Holiday Inn Hotel Brno**. The hotel is located in close vicinity to the trade fair and exhibition compound of Veletrhy Brno. The hotel is easily accessible both by car and by public transport. The Holiday Inn Brno Hotel is therefore a perfect choice for all types of events from small seminars to large international conferences. The hotel provides the events with a wide scale of services ranging from accommodation and catering, organization of interpretation services, to meeting any specific needs the event organizers may have. The hotel has modern and comfortable furniture. All rooms are equipped with their own sanitary facilities, TV etc.

Preliminary Conference Time Schedule:

Deadline for abstracts submission:	June 30, 2015
Limit date for payment of reduced fees:	September 15, 2015
Deadline for papers delivery:	September 15, 2015
Detailed information with program:	September 30, 2015
Conference opening:	November 03, 2015 at 10 a.m.

Conference Language

All technical papers at the conference will be presented in English, Czech or Slovak languages.

More info: www.cndt.cz

E-mail: cndt@cndt.cz

ISBN 978-80-214-5035-6