

Česká společnost pro nedestruktivní testování  
Czech Society for Nondestructive Testing



# DEFEKTOSKOPIE 2013

**NDE for Safety**

## **SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS**

**43. mezinárodní konference  
43<sup>rd</sup> International Conference**



5.–7. listopad 2013  
November 5 - 7, 2013

Olomouc, Czech Republic

**43. mezinárodní konference  
DEFEKTOSKOPIE 2013 /  
NDE for Safety**

**je sponzorována:**

**hlavní sponzoři / main sponsors**

**AQUACHEMIE** 

 **DEKRA**

**OLYMPUS®**

Your Vision, Our Future

**sponzoři / sponsors**

**DEFEKTA**

  
*since 1921*

**RAP** S.R.O.  
*eo*



Czech Society for Nondestructive Testing  
Česká společnost pro nedestruktivní testování



# **NDE for Safety DEFEKTOSKOPIE 2013**

**43<sup>th</sup> International Conference and NDT Exhibition  
43. mezinárodní konference a výstava NDT techniky**

## **PROCEEDINGS SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ**

**November 5 to 7, 2013  
5. až 7. listopadu 2013**

**Olomouc, Czech Republic**

Edited by Luboš Pazdera and Pavel Mazal

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

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

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal

Copyright © 2013  
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 978-80-214-4799-8

## CONTENTS / OBSAH

<b>Jiří BROŽOVSKÝ</b>	<b>1</b>
K PROBLEMATICE ZKOUŠENÍ VÁPENOPÍSKOVÝCH CIHEL ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU THE TESTING ISSUES LIME-SAND BRICKS ULTRASONIC PULSE METHOD	
<b>Zbyněk BUNDA, Josef VOLÁK</b>	<b>9</b>
VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK SMALL PUNCH V KOMBINACI S METODAMI NDT USE OF THE SMALL PUNCH TEST RESULTS IN COMBINATION WITH NDT METHODS	
<b>Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, Michal KOLEGA, František VLAŠIC, Petr LIŠKUTÍN</b>	<b>17</b>
MECHANISMUS ÚNAVOVÝCH PROCESŮ MECHANISM OF FATIGUE PROCESSES	
<b>Karel HÁJEK, Valeria NENAKCHOVA</b>	<b>23</b>
DETEKCE INTERMODULAČNÍHO SIGNÁLU PRO NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVOU SMĚŠOVACÍ IMPULSNÍ SPEKTROSKOPII DETECTION OF INTERMODULATION SIGNAL FOR NONLINEAR ULTRASONIC MIXING IMPULSE SPECTROSCOPY	
<b>Karel HÁJEK, Valeria NENAKCHOVA</b>	<b>31</b>
PRINCÍPY LOKALIZACE DEFEKTU V NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SMĚŠOVACÍ IMPULSNÍ SPEKTROSKOPII PRINCIPLES OF A DEFECT LOCALISATION IN NONLINEAR ULTRASONIC MIXING IMPULSE SPECTROSCOPY	
<b>Helena HIKLOVÁ, Hana CHMELÍČKOVÁ, Martina HAVELKOVÁ, Lenka ŘIHÁKOVÁ</b>	<b>39</b>
VYUŽITÍ KONTAKTNÍHO PROFILOMĚRU K MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH ZMĚN KOVOVÝCH VZORKŮ PO LASEROVÉM OPRACOVÁNÍ USING THE CONTACT PROFILOMETER TO MEASURE THE DIMENSIONAL CHANGES OF METAL SAMPLES AFTER LASER TREATMENT	
<b>Andrzej KATUNIN</b>	<b>45</b>
DETECTION AND LOCALIZATION OF INTERNAL VOIDS AND IMPERFECTIONS IN THE COMPOSITE STRUCTURES USING MODAL DATA AND SPATIAL WAVELET TRANSFORM	
<b>Jaroslav KMOCH</b>	<b>53</b>
TERMOKAMERY TESTO PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ TESTO THERMAL IMAGERS FOR NON DESTRUCTIVE TESTING	

<b>Jan KOLÁŘ</b>	<b>61</b>
VYUŽITÍ PHASED ARRAY PRO ZKOUŠENÍ HETEROGENNÍCH SVARŮ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK PHASED ARRAY APPLICABILITY FOR THE INSPECTION OF DISSIMILAR WELDS ON THIN-WALLED PIPES	
<b>Bernard KOPEC</b>	<b>65</b>
K ČEMU NORMY! WHAT STANDARDS!	
<b>Marta KOŘENSKÁ, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Monika MANYCHOVÁ, Veronika RODRIQUEZOVÁ, Michal JANKŮ</b>	<b>71</b>
EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE PRO TESTOVÁNÍ KOLEJNIC ZA PROVOZU THE POSSIBILITIES OF ACOUSTIC EMISSION TESTING OF RAILS DURING EXPLOITATION	
<b>Ivo KUSÁK, Miroslav LUŇÁK</b>	<b>77</b>
ELEKTRICKÉ PARAMETRY TEPELNĚ NAMÁHANÝCH VZORKŮ NA CEMENTOVÉ BÁZI BUILDING MATERIALS PROPERTIES CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD	
<b>Monika MANYCHOVÁ, Marta KOŘENSKÁ, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Michal JANKŮ</b>	<b>87</b>
POČÁTEČNÍ VÝZKUM POUŽITELNOSTI AKUSTICKÝCH METOD PRO DETEKCI DEFEKTŮ NA BEZSTYKOVÝCH KOLEJOVÝCH TRATÍCH AN INITIAL INVESTIGATION ON THE POTENTIAL APPLICABILITY OF ACOUSTIC METHODS FOR CONTACTLESS RAIL TRACK FAULT DETECTION	
<b>Pavel MAZAL, Bernard KOPEC, Emilio ROMERO</b>	<b>93</b>
PROJEKT PROQUALINDT PROJECT PROQUALINDT	
<b>Josef NEUGEBAUER</b>	<b>99</b>
JAKÉ POŽADAVKY BY MĚL SPLŇOVAT UCHAZEČ O VSTUP DO SYSTÉMU NDT WHAT REQUIREMENTS SHOULD MEET THE ENTRANT TO THE NDT	
<b>Adelajda PALA</b>	<b>103</b>
INVESTIGATIONS OF MOISTURE CONTENT IN SALINE LIME MORTAR BY NONDESTRUCTIVE DIELECTRIC METHOD	
<b>Sun-Jong PARK, Hong Jae YIM, Hyo-Gyoung KWAK</b>	<b>111</b>
NONLINEAR RESONANCE CHARACTERISTIC MEASUREMENT FOR EVALUATION OF THERMALLY DAMAGED CONCRETE	



<b>Jan PATERA</b>	117
PROBLEMATIKA NDE BETONU V OBLASTI JADERNÉ ENERGETIKY CONCRETE NDE PROBLEMS IN THE FIELD OF NUCLEAR INDUSTRY	
<b>Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Vlastimil BILEK, Jaroslav SMUTNÝ, Marta KORENSKA, Veronika RODRIGUEZOVA</b>	125
PREDIKCE CHOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE PREDICTION OF BEHAVIOUR OF CONCRETE MIXTURE USING ACOUSTIC EMISSION METHOD	
<b>Michal PÖSCHL, Vlastimil HABRCETL</b>	129
FLEXIBILNÍ MANIPULÁTOR "RICHARD" PRO NDE APLIKACE FLEXIBLE MANIPULATOR "RICHARD" FOR NDE APPLICATION	
<b>Miloslav PROCHÁZKA</b>	135
VÝHODY ULTRAZVUKOVÝCH METOD PŘI INTERPRETACI VÝSLEDKŮ THE ADVANTAGE OF ULTRASONIC METHODS WHEN INTERPRETING THE RESULTS	
<b>Maciej ROSKOSZ, Krzysztof FRYCZOWSKI</b>	147
USING BARKHAUSEN NOISE TO DEVELOP A METHOD OF STEEL S235 HARDNESS MEASUREMENT	
<b>Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Daniela ŠTEFKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA</b>	153
IMPACT-ECHO METHOD EASY TOOL FOR MONITORING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE CORROSION	
<b>Břetislav SKRBK, David BÍLEK</b>	159
AKUSTICKÁ A METALOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA GRAFITU LITIN ACOUSTIC AND METALLOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF CAST IRON GRAPHITE	
<b>Miroslav ŠMELKO, Dušan PRASLIČKA, Norbert FLACHBART, Josef BLAŽEK</b>	165
MAGNETICKÉ MIKRODRÔTY AKO NÁHRADA ODPOROVÝCH TENZOMETROV MAGNETIC MICROWIRES AS A STRAIN GAUGE SUBSTITUTION	
<b>Daniela ŠTEFKOVÁ, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA</b>	173
NON – DESTRUCTIVE TESTING OF HIGH – TEMPERATURE – DEGRADED CEMENT – BASED COMPOSITE BY ACOUSTIC METHODS	

- Jaromír TLAČBABA, Michal ČERNÝ, Petr DOSTÁL** 181  
 SLEDOVÁNÍ VLIVU ZHORŠENÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK  
 PŮSOBÍCÍCH NA APIS MELLIFERA ZAZNAMENÁVANOU AKUSTICKOU  
 EMISÍ  
 OBSERVING THE IMPACT OF THE DETERIORATED CLIMATIC  
 CONDITIONS ON APIS MELLIFERA BY THE MONITORED ACOUSTIC  
 EMISSION
- Libor TOPOLÁŘ, Vlastimil BÍLEK, Hana ŠIMONOVÁ,  
 Barbara KUCHARCZYKOVÁ, Ivana HAVLÍKOVÁ, Luboš PAZDERA,  
 Zbyněk KERŠNER** 191  
 PREDIKCE INICIACE LOMU JEMNOZRNNÝCH CEMENTOVÝCH  
 KOMPOZITŮ S PŘÍMĚSEMI POMOCÍ MĚŘENÍ AKUSTICKÉ EMISE  
 PREDICTION OF STABLE CRACK INITIATION IN FINE-GRAIN CEMENT-  
 BASED COMPOSITES WITH ADDITIVES BY ACOUSTIC EMISSION  
 MEASURING
- Libor TOPOLÁŘ, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Daniela ŠTEFKOVÁ,  
 Luboš PAZDERA** 199  
 MONITOROVÁNÍ CEMENTOVÝCH PAST BĚHEM JEJÍ ŽIVOTNOSTI  
 POMOCÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE A IMPACT ECHO METODY S  
 POUŽITÍM VLNOVODŮ  
 MONITORING CEMENT PASTE LIFETIME BY MEANS OF IMPACT-ECHO  
 AND ACOUSTIC EMISSION METHODS WITH THE APPLICATION  
 OF WAVEGUIDES
- Václav TRÍSKA, Tomáš CHLEBEČEK** 205  
 MOŽNOSTI NEDESTRUKTIVNÍ PROHLÍDKY LETECKÉ TECHNIKY  
 POMOCÍ AKTIVNÍ TERMOGRAFICKÉ METODY UŽÍVAJÍCÍ  
 KONTAKTNÍHO ELEKTRICKÉHO OHŘEVU  
 POSSIBILITIES OF AIRCRAFT NON-DESTRUCTIVE INSPECTION USING  
 ACTIVE THERMOGRAPHIC METHOD BASED ON CONTACT ELECTRIC  
 RESISTANCE HEATING
- Miroslav VARNER, Václav KOULA, Hana KRAUSOVÁ** 213  
 SPT RESULTS EVALUATION
- Miroslav VARNER, Václav KOULA, Josef VOLÁK** 221  
 VLIV IMPERFEKČÍ INSTRUMENTACE NA VÝSLEDKY SPT  
 INFLUENCE OF INSTRUMENTATION IMPERFECTIONS ON SPT  
 RESULTS

PAPERS AFTER DEADLINE, ABSTRACTS AND  
PAPERS OUT OF INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

- Petr BOHÁČ, Jan TOMÁŠTÍK, Václav KOULA, Martin DRÁB,  
Lubomír JASTRABÍK** 231  
VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE K VYHODNOCOVÁNÍ MECHANICKÉ  
ODOLNOSTI TENKÝCH VRSTEV  
APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION FOR THIN LAYER  
MECHANICAL TOUGHNESS EVALUATION
- Miloslav PROCHÁZKA, Martin PROCHÁZKA, Roman BENEŠ** 239  
KONTROLY METODOU IRIS PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI  
INSPECTION BY MEANS OF IRIS TECHNIQUE PRACTICE EXPERIENCE
- František VLAŠIČ, Václav KOULA, Pavel MAZAL, Denisa BÁRTKOVÁ** 247  
STUDIUM VYSOKOCYKLOVÉHO CHOVÁNÍ Cr-Ni-Mo-V OCELI  
S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE  
STUDY OF HIGH-CYCLE BEHAVIOUR OF CR-NI-MO-V STEEL USING  
ACOUSTIC EMISSION METHOD
- Libor NOHÁL, Lukáš KOMENDA, Pavel MAZAL** 255  
VYUŽITELNOST METODY AKUSTICKÉ EMISE V LOŽISKOVÉM  
PRŮMYSLU  
APPLICABILITY OF ACOUSTIC EMISSION METHOD IN BEARING  
INDUSTRY
- Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ** 261  
LOKALIZACE ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE NA GEOMETRICKY ŘÍDKÝCH  
KONSTRUKCÍCH  
LOCATION OF ACOUSTIC EMISSION SOURCES IN GEOMETRICALLY  
SPARSE STRUCTURES
- Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Petr SLADKÝ** 269  
VYUŽITÍ POLOHOVÝCH PROFILŮ PRO LOKALIZACI ZDROJŮ SPOJITÉ  
AKUSTICKÉ EMISE  
UTILISING OF POSITION PROFILES FOR LOCATION OF CONTINUOUS  
ACOUSTIC EMISSION SOURCES
- Václav SVOBODA, František ŽEMLIČKA, A.A. DUBOV** 277  
INSPEKCE KONSTRUKCÍ METODOU MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU  
INSPECTION OF STRUCTURES BY MAGNETIC MEMORY METHOD
- Václav SVOBODA** 285  
CO NÁS STOJÍ SELHÁNÍ KONSTRUKCE (LOM) - ANEB RIZIKO  
HAVÁRIE?  
WHAT IS THE COST OF FAILURE OF STRUCTURE BY THE CRITICAL  
CRACKS?

<b>Michal KUBÍNYI</b>	<b>293</b>
ZMĚNY V NORMÁCH PRO PRŮMYSLOVOU RADIOGRAFII SVARŮ CHANGES IN STANDARDS FOR A WELD RADIOGRAPHY	
<b>Lukáš PINDOR, Štěpán HEFNER, Renata SIKOROVÁ, Jiří KRUMPHOLZ, Vojtěch DUDEK</b>	<b>296</b>
ANALÝZA MIKROSTRUKTURY ČLÁNKU ŘETĚZU POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY USING OF ULTRASONIC TESTING FOR MICROSTRUCTURE ANALYSIS OF CHAIN LINK	
<b>Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Jan KOBER, Josef KROFTA, Milan CHLADA</b>	<b>297</b>
NEDESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ A MONITOROVÁNÍ OCELOVÝCH A BETONOVÝCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND MONITORING OF STEEL AND CONCRETE CIVIL STRUCTURES	
<b>Vladimír A. SYASKO, Irina V. PILATOVA, Adam POLÁČEK</b>	<b>298</b>
K OTÁZCE JEDNOBODOVÉ KALIBRACE FÁZOVÝCH VÍŘIVOPROUDÝCH TLOUŠŤKOMĚŘŮ KOVOVÝCH POVLAKŮ ON THE ONE-POINT CALIBRATION OF EDDY CURRENT PHASE METALLIC COATING THICKNESS GAUGES	
<b>Lubomír SODOMKA</b>	<b>299</b>
POTENCIÁLNÍ NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY NANOVLÁKEN A NANOTEXTILÍ POTENTIAL NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR DIAGNOSTIC OF NANOFIBRES AND NANOTEXTILES	



## AUTHORS INDEX / INDEX AUTORŮ

Bartkova D.	247	Kwak H. G.	111
Benes R.	239	Liskutin P.	17
Bilek D.	159	Lunak M.	77
Bilek V.	125	Manychova M.	71,87
Bilek V.	191	Mazal P.	17,93,247,255
Blazek J.	165	Nenakchova V.	23,31
Bohac P.	231	Nohal L.	255
Brozovsky J.	1	Neugebauer J.	99
Bunda Z.	9	Pala A.	103
Cerny M.	181	Park S. J.	111
Chlada M.	261,269, 297	Patera J.	117
Chlebecek T	205	Pazdera L.	71,87,125,191,199
Chmelickova H.	39	Pilatova I.V.	298
Chobola Z.	153,173	Pindor L.	296
Dostal P.	181	Polacek A.	298
Dubov A. A.	277	Poschl M.	129
Dudek V.	296	Praslicka D.	165
Drab M.	231	Prevorovsky Z.	261,269, 297
Fiala J.	17	Prochazka M.	135,239
Flachbart N.	165	Prochazka Ma.	239
Fryczowski K.	147	Rihakova L.	39
Habrcetl V.	129	Rodriguezova V.	71,125
Hajek K.	23,31	Romero E.	93
Havelkova M.	39	Roszkosz M.	147
Havlikova I.	191	Samarkova K.	153,173,199
Hefner S.	296	Sikorová R.	296
Hiklova H.	39	Simonova H.	191
Janku M.	71,87	Skrbek B.	159
Jastrabik L.	231	Sladky P.	269
Katunin Z.	45	Smelko M.	165
Kersner Z.	191	Smutny J.	125
Kmoch J.	53	Sodomka L.	299
Kober J.	297	Stefkova D.	153,173,199
Kolar J.	61	Syasko V.A.	298
Kolega M.	17	Svoboda V.	277,285
Komenda L.	255	Tlabcaba J.	181
Kopec B.	65,93	Tomastik J.	231
Korenska M.	71,87,125	Topolar L.	71,87,125,191,199
Koula V.	213,221,231,247	Triska V.	205
Krausova H.	213	Varner M.	213,221
Krofta J.	297	Vlasic F.	17,247
Krumpholz J.	296	Volák J.	9,221
Kubinyi M.	293	Yim H. J.	111
Kucharczykova B.	191	Zemlicka F.	277
Kusak I.	77		





## OmniScan SX

### Menší, lehčí ... přesto stále OmniScan

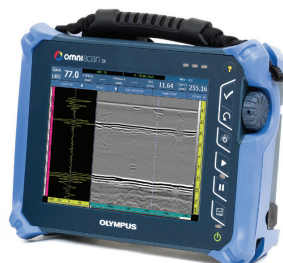
Nový OmniScan SX těží z více než 20 let zkušeností s technologií PhasedArray a je nejnovějším přírůstkem rodiny OmniScan. Ve srovnání s OmniScan MX2 je OmniScan SX o 33% lehčí a o 50 % menší a nabízí kromě nevídané mobility také ekonomickou efektivitu.

OmniScan SX pracuje s jednou skupinou/sondou a je vybaven záznamem dat ve dvou osách, stejně jako moderním ovládáním dotykovým displejem pro obě vyráběné verze:

- SX PA: 16:64PR PA konfigurace plus samostatný UT kanál pro metody P/E, P-C, nebo technologii TOFD.
- SX UT: samostatný UT kanál pro metody P/E, P-C, nebo technologii TOFD.



OmniScan SX PA



OmniScan SX UT



# WELCOME TO CONFERENCE

**11<sup>th</sup> ECNDT**

PRAGUE 2014

October 6 - 10, 2014

Czech Republic

in Prague,  
Czech Republic

EF European Federation for  
Non-Destructive Testing  
NDT



Czech Society  
for NDT.

 **GUARANT**  
INTERNATIONAL

**11<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing**

**Better NDT  
- Warranty of Quality,  
Reliability  
and Safety**

[www.ecndt2014.com](http://www.ecndt2014.com)



## NOTES / POZNÁMKY

# PAPERS / PŘÍSPĚVKY



## K PROBLEMATICE ZKOUŠENÍ VÁPENOPÍSKOVÝCH CIHEL ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU THE TESTING ISSUES LIME-SAND BRICKS ULTRASONIC PULSE METHOD

Jiří BROŽOVSKÝ

Vysoké učení technické v Brně  
Contact e-mail: brozovsky.j@fce.vutbr.cz

### **Abstrakt**

*Nedestruktivní metody zkoušení jsou ve stavební praxi využívány především pro hodnocení kvality betonu. pro ostatní materiály jsou využívány v podstatě menším rozsahu, zpravidla jako doplňkové metody při hodnocení jejich trvanlivosti. V příspěvku jsou uvedeny poznatky z využití ultrazvukové impulsové metody pro zkoušení vápenopískových cihel. Je hodnocen jednak vliv vlhkosti a směru prozvučování na rychlost šíření ultrazvukového impulsu, jednak využitelnost této metody pro zjišťování pevnostních charakteristik vápenopískových cihel. Získané poznatky umožnily definovat podmínky měření, aby byla zachována jeho reprodukovatelnost a opakovatelnost; současně byl zpracován prakticky využitelný kalibrační vztah pro predikci pevností vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.*

**Klíčová slova:** vápenopískové cihly, ultrazvuková impulsová metoda, rychlost šíření ultrazvukového impulsu, pevnost, vlhkost

### **Abstract**

*Non-destructive testing methods are in construction practice used mainly for the evaluation of quality of concrete. For other materials are used basically to a lesser extent, usually as complementary methods in the evaluation of their durability. The paper presents the findings from the use of ultrasonic pulse testing methods for lime-sand bricks. It is evaluated by the impact of moisture and the way transmission the ultrasonic pulse velocity, both the usability of the method for determining the strength characteristics of sand-lime bricks. The acquired knowledge to define the measurement conditions in order to maintain its reproducibility and repeatability were processed at the same time practically usable calibration equation for predicting the strength of lime-sand bricks from the ultrasonic pulse velocity.*

**Key words:** lime-sand brick, ultrasonic pulse method, ultrasonic pulse velocity, strength, moisture

### **1. Úvod**

Ultrazvuková impulsová metoda je při hodnocení stavebních materiálů nejčastěji využívána pro beton a betonové konstrukce, především pro zjišťování modulů pružnosti v tlaku/tahu, homogenity betonu a také pro zjišťování tloušťky trhlin nebo pevnosti betonu. Postupy zkoušení jsou kodifikovány v českých technických normách, ČSN EN 12504-4, ČSN 731371, ČSN 732011. Dále je využívána jako

podpůrná metoda pro hodnocení trvanlivosti stavebních materiálů např. pro mrazuvzdornost betonu (ČSN 731 322, ČSN 731380).

Vápenopískové cihly (VCP) jsou vyráběny směsí křemičitého písku, nehašeného vápna a vody. Z této směsi jsou lisováním vytvářeny výrobky, které jsou následně umístěny do na určitou dobu do autoklávu, kde při tlaku vodní páry 16 barr a při teplotě 195°C dochází k jejich vytvrzení (uvolňuje se oxidu křemičitý z povrchu zrn písku, který reaguje s pojivem vápenným hydrátem za vzniku velmi pevné CSH-fáze. Struktura vápenopískové cihly tvořena konglomerátem písku spojeného produkty hydratace vápna. Zjednodušeně lze vápenopískovou hmotu charakterizovat jako necementový jemnozrný beton, který má však oproti obyčejnému betonu podstatně vyšší nasákavost.

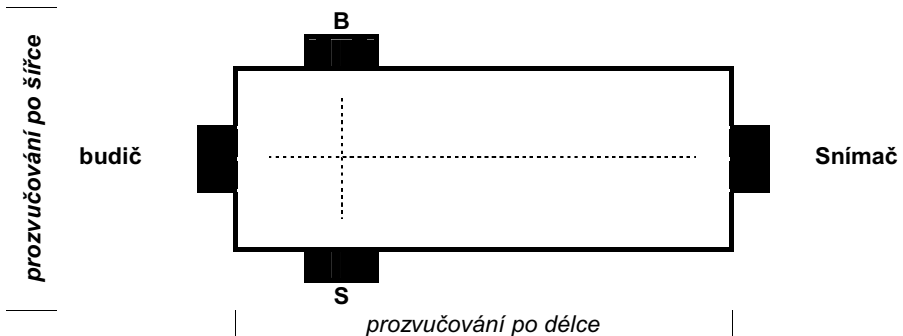
V článku jsou uvedeny jednak poznatky o vlivu vlhkosti a směru prozvučování na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou, jednak vztah pro predikci pevnosti v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu

## 2. Metodika zkoušení a zkušební vzorky

**Ultrazvuková impulsová metoda.** Měření bylo prováděno ultrazvukovým přístrojem TICO a byly použity sondy s vlastní frekvencí sond 82 kHz. Uvedená frekvence sond byla zvolena z důvodu dosažení poměru délky vlny ( $\lambda$ ) k nejmenšímu rozměru vzorku ve směru prozvučování ( $d_{\min}$ ) < 1, aby bylo eliminováno případné snižování rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu měřených vzorků se pohybovala v rozmezí 1,9 až 3,3 km/s, těmito hodnotám odpovídá poměr mezi délkou vlny a nejmenším rozměrem vzorku ve směru prozvučování 0,36 až 0,62 - z uvedeného vyplývá, že tato podmínka byla splněna.

Měření byla prováděna přímým prozvučováním po délce a šířce zkušební vzorku (cihly) – viz obr. 1.



Obr. 1 Schématické znázornění prozvučování vápenopískových cihel

Fig. 1 Scheme of Transmissions of lime-sand bricks

Při prozvučování po délce byla měření prováděna v 5 měřicích bodech a po šířce v 8 měřicích bodech. Pro dosažení dobré akustické vazby byl využíván indiferentní gel používaný ve zdravotnictví. Délka měřicí základny byla zjišťována s přesností

na 1 mm a doba průchodu ultrazvukového impulsu s přesností 0,1  $\mu$ s. Rychlost šíření ultrazvukového impulsu byla vypočítána dle vztahu (1) a dynamický modul pružnosti dle vztahu (2) :

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

$$E_U = V^2 D \quad (2)$$

kde:  $V$ -rychlost šíření ultrazvukového impulsu,  $L$ -délka měřicí základny,  $T$ -doba průchodu ultrazvukového impulsu,  $D$ -objemová hmotnost,  $E_U$ -dynamický modul pružnosti v tlaku/tahu.

Měření v každém měřicím bodu bylo prováděno dvakrát. V případě, že se naměřené hodnoty v jednotlivých měřicích bodech se od sebe nelišily o více jak 4 %, vztaženo k menší naměřené hodnotě, bylo měření považováno za vyhovující. Jestliže se lišily naměřené hodnoty o více jak 4 % bylo provedeno další měření a použily se hodnoty, které od sebe nelišily o více jak 4 %. Nebyla-li tato podmínka splněna zkoušený vzorek byl z hodnoceného souboru vyloučen.

**Pevnost v tlaku.** Byla zjišťována na celých cihlách zatěžováním do porušení v souladu s ustanoveními CSN EN 772-1.

**Zkušební vzorky.** Měření bylo prováděno plných vápenopískových cihlách o rozměru 290x140x65mm. Objemová hmotnost  $e$  pohybovala v rozmezí 1641 až 1894 kg/m<sup>3</sup> a pevnost v tlaku v rozmezí 16,5 až 54,1 MPa.

**Podmínky měření.** Cihly byly před zkouškou vysušeny do konstantní hmotnosti, pro sledování vlivu vlhkosti byly uloženy ve vlhkém prostředí, aby došlo k absorpci vlhkosti a nakonec nasyceny vodou.

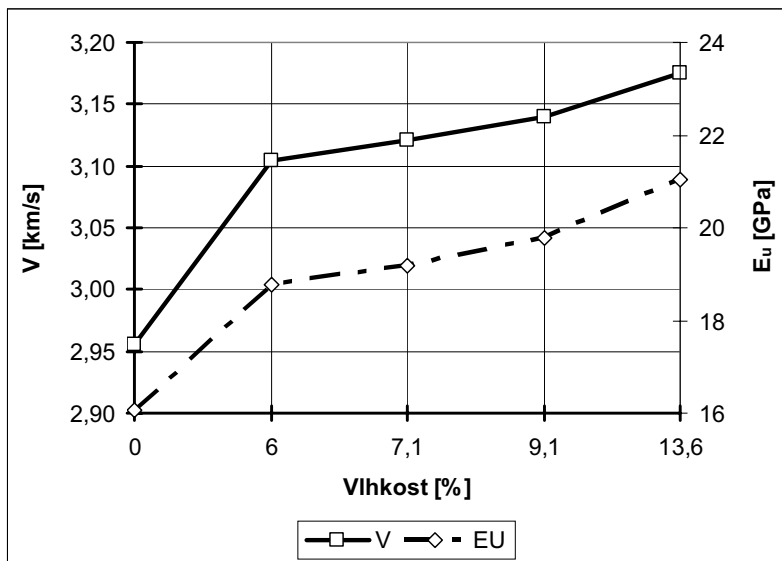
### 3. Výsledky měření

**Vliv vlhkosti na rychlost šíření ultrazvukového impulsu a dynamický modul pružnosti v tlaku/tahu.** Výsledky měření a rozdíly  $\Delta$  pro  $V$  a  $E_U$  jsou uvedeny v tabulce 1. (jsou uvedeny průměrné hodnoty z měřené sady o 24 vzorcích; rozdíly ve sledovaných parametrech jsou vztaženy k vysušeným vzorkům. V obrázku 2 je znázorněna změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu v závislosti na vlhkosti VCP.

Tab.1 Výsledky měření ze sledování vlivu vlhkosti

Tab.1 Summary results of measurement of monitoring the effect of moisture

Vlhkost	$V_w$	$\Delta V_w$	$\Delta V_w$	$E_{Uw}$	$\Delta E_{Uw}$	$\Delta E_{Uw}$
[%]	[km/s]	[km/s]	[%]	[GPa]	[GPa]	[%]
0	2,956	-	-	16,070	-	-
6,0	3,104	0,148	5,0	18,778	2,708	16,9
7,1	3,121	0,165	5,6	19,181	3,111	19,4
9,1	3,140	0,184	6,23	19,774	3,704	23,0
13,6	3,175	0,219	7,40	21,041	4,972	30,9



Obr. 2 Změna rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a dynamického modulu pružnosti v závislosti na vlhkosti cihel

Fig. 2 Changing the ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity in relation to moisture of bricks

### Vliv směru prozvučování na rychlost šíření ultrazvukového impulsu.

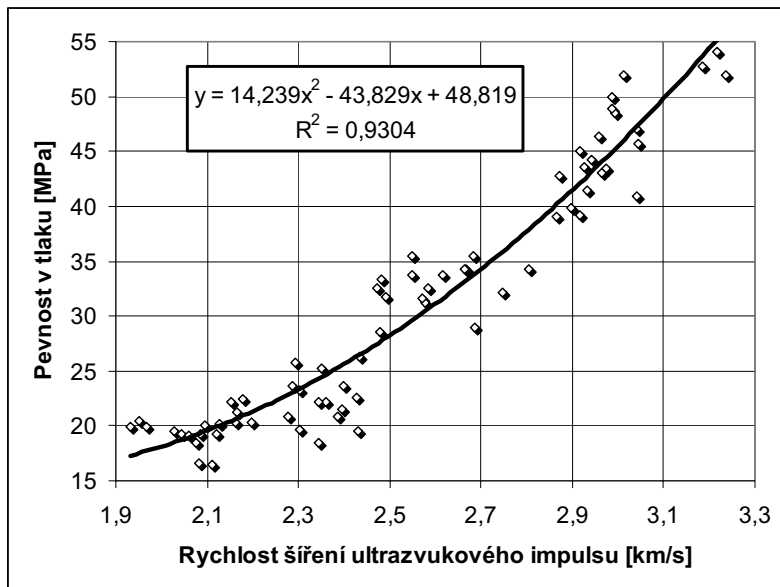
V tabulce 2 jsou uvedeny souhrnné výsledky z měření prováděných na souboru 30 vápenopískových cihel pro sledování vlivu směru prozvučování na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou. Rozdíly v rychlostech jsou vztaženy k rychlosti šíření ultrazvukového impulsu při měření po délce cihly.

Tab. 2 Souhrnné výsledky měření ze sledování vlivu směru prozvučování cihel

Tab. 2 Summary results of measurement of the influence of direction transmission

Způsob prozvučování	$V_{\text{průměrná}}$	$V_{\text{min}}$	$V_{\text{max}}$	
	[km/s]			
po délce cihly	2,317	2,018	2,885	
po šířce cihly	2,435	2,030	2,938	
Rozdíl mezi V při prozvučování po délce a po šířce cihly	Jedn.	$\Delta V_{\text{průměrná}}$	$\Delta V_{\text{min}}$	$\Delta V_{\text{max}}$
	[km/s]	-0,114	-0,011	-0,289
	[%]	-4,9	-0,5	-13,1

**Vztah pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.** Vztah pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu byl zpracován na základě zkoušek 70 vzorků, pevnost v tlaku se pohybovala v rozmezí 16,5-54,1MPa. Výsledky zkoušek jsou znázorněny v obr.3.



Obr. 3 Závislost mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností v tlaku  
 Fig. 3 The relationship between ultrasonic pulse velocity and compressive strength

Pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu byl z výsledků zkoušek zpracován vztah (3) :

$$f_{VCP,UZ} = 14,239V^2D - 43,829V + 48,819 \quad (3)$$

$V \in \{1,9; 3,2 \text{ km/s}\}$ ; reziduální směrodatná odchylka  $S=0,64$

kde :

$f_{VCP,UZ}$ - pevnost v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [MPa]

$V$ - rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s].

#### 4. Diskuse k dosaženým výsledkům

V dalším je uvedena analýza získaných poznatků k vlivu vlhkosti a směru prozvučování na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou a zhodnocení vztahu pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

**Vlhkostní stav vzorků.** Vlhkost v pórovitých materiálech ovlivňuje výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou, míra jejího vlivu závisí pórovitosti zkoušeného materiálu a obsahu vody ve zkoušeném materiálu. Toto lze vysvětlit tím, že voda v pórové struktuře materiálu nahrazuje vytěsněný vzduch a to má za následek zvýšení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu (rychlost ultrazvuku ve vodě je cca 3,5 vyšší než ve vzduchu), např. Pavlík [2] pro obyčejné betony uvádí, že při změně vlhkosti betonu o 1% se rychlost šíření ultrazvukového impulsu změní o 0,120 km/s.

Z analýzy výsledků měření prováděných na vápenopískových cihlách vyplývá, že při změně vlhkosti o 1% se rychlost šíření ultrazvukového impulsu změní v průměru o 0,021 km/s, což vyjádřeno v procentech je 0,71%. a dynamický modul pružnosti se změní v průměru o 0,42 GPa, což vyjádřeno v procentech činí 2,6%.

Vzhledem k tomu, že vápenopísková hmota má nasákavost kolem 13%, je třeba považovat vliv vlhkostního stavu při měření ultrazvukovou metodou za významný, a proto pro zajištění opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření je nezbytné jednoznačně definovat vlhkostní podmínky měření, např. měření na vysušených vzorcích.

**Směr prozvučování.** Měřením prováděným přímým prozvučováním po délce a po šířce vápenopískových cihel byly zjištěny rozdílné rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu na vzorcích, které vizuálně nevykazovaly poškození, byly při prozvučování po délce cihly nižší v průměru o 4,9% ve srovnání s rychlostí šíření ultrazvukového impulsu stanovené z měření po šířce vzorku. Zjištěný rozdíl v rychlostech lze vysvětlit tím, že vápenopísková hmota ze podstaty technologie výroby je jednak do určité míry nestejnorodá, jednak obsahuje vnitřní defekty. Toto se ve svém důsledku projevuje i na výsledcích měření; při měření na kratší měřicí základně je pravděpodobnost výskytu imperfekcí vnitřní struktury menší, a proto je jí menší vliv na rychlost šíření ultrazvukového impulsu, tj. rychlost je vyšší.

**Vztah pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.** Pro praktické použití jsou vhodné kalibrační vztahy u kterých je reziduální směrodatná odchylka menší než 0,12. Zpracovaný vztah pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se vyznačuje vysokou těsností vazanosti mezi proměnným o čemž svědčí hodnota reziduální směrodatné odchylky  $S=0,62$ , což je cca o 50% méně než je požadované maximální hodnota. Uvedený vztah (3) je prakticky využitelný pro určení pevnosti v tlaku vápenopískových cihel o rozměru 290 x 140 x 60 mm.

Základní podmínkou pro využití tohoto vztahu je provádění měření na cihlách vysušených do konstantní hmotnosti při 105°C.

## 5. Závěr

Byl prokázán jednoznačný vliv vlhkosti a směru prozvučování vápenopískových cihel na výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou.

Vliv vlhkosti se projevuje jak na hodnotách rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, tak i na hodnotách dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu, zde je tento vliv podstatně výraznější, protože do výpočtu dynamického modulu vstupuje druhá mocnina rychlosti šíření ultrazvukového impulsu a objemová hmotnost vápenopískové hmoty, která se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem vody nahrazující vzduch v pórové struktuře.



Rychlosti šíření ultrazvukového impulsu (při stejné vlhkosti vápenopískové hmoty) je ovlivňována imperfekcemi ve vnitřní struktuře a s prodlužující se měřicí základnou se zvyšuje.

Prakticky využitelný je i zpracovaný vztah pro predikci pevnosti v tlaku vápenopískových cihel z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

Byla prokázána využitelnost ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevností i dynamických modulů pružnosti v tlaku/tahu vápenopískových cihel.

## 6. Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu GAČR P104/12/0810 s názvem „Studium vlastností vápenopískových zdících prvků nedestruktivními metodami zkoušení“ a za podpory projektu „SUPMAT – Podpora pracovníků center pokročilých stavebních materiálů“. Registrační číslo projektu CZ.1.07./2.3.00/20.0111-tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

## 7. Literatura

- [1] Brožovský, J. Nedestruktivní zjišťování pevnosti lehkého betonu s keramickým kamenivem LIAPOR odrazovými tvrdoměry systému Schmidt. BETON -TKS, č. 6/2009, ISSN 1213-3116.
- [2] Brožovský, J., Brožovská Onderková, J. Zjišťování pevností cihel plných pálených v historických stavbách. Zprávy památkové péče, ročník 71, č. 2/2011, ISSN 1210-5538
- [3] Pavlík A. Doležel, J. Nedestruktivní vyšetřování stavebních konstrukcí, SNTL Praha, 1977
- [4] ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu
- [5] ČSN 731371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu
- [6] ČSN 731370 Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení
- [7] ČSN 731380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury
- [8] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí
- [9] ČSN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu
- [10] ČSN 731380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřní struktury

Poštovní adresa: Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.  
Veveří 95  
602 00 Brno



## VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK SMALL PUNCH V KOMBINACI S METODAMI NDT USE OF THE SMALL PUNCH TEST RESULTS IN COMBINATION WITH NDT METHODS

Zbyněk BUNDA\*, Josef VOLÁK

\*Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Contact e-mail: [bunda@vzuplzen.cz](mailto:bunda@vzuplzen.cz), [volak@vzuplzen.cz](mailto:volak@vzuplzen.cz)

### **Abstrakt:**

*Tato práce vychází ze současných moderních trendů, které lze zaznamenat jak na poli energetiky, tak v průmyslu obecně. Mezi tyto trendy spadá mimo jiné také zefektivnění stávajících diagnostických metod, případně nalezení nových procesů, které by přispěly ke zpřesňování výsledků zejména při stanovení úrovně degradace, či odhadu zbytkové životnosti energetických zařízení. Dalším dlouhodobým trendem je zvýšení kvality prováděných inspekčních prohlídek a také snaha eliminovat prostoje nutné pro kontrolu součástí, zejména odstávky elektráren a tepláren. Jednou z inspekčních technik, která vychází z těchto trendů je metoda „nedestruktivní“ metalografie doplněná výsledky z dalších zkoušek. Především se jedná o zkoušky tečení a nově vyvíjenou metodu small punch creep test. Hlavním cílem je využití poznatků a zkušeností získaných při řešení této práce v energetickém průmyslu a uchopitelnost výsledků v praxi. Tyto výsledky mohou být dále zpřesňovány např. dalšími nově zaváděnými moderními NDT metodami. Spolu s využitím dosud známých poznatků o degradaci a odhadu zbytkové životnosti dílů energetických zařízení se tato práce snaží přiblížit procesy probíhající v oceli pro použití v praxi. Cílem práce je také rozšířit spektrum diagnostických metod a vedle běžně používaných způsobů inspekce využívat také nekonvenčních způsobů.*

**Klíčová slova:** *Small punch test, Small punch creep test, NDT, Larson-Millerův parametr, zbytková životnost*

### **Abstract:**

*This dissertation results from the modern trends observable not only in power engineering but in industry in general. One of these trends is, among others, efforts to make existing diagnostic methods more effective, or eventually discovering new processes, which could contribute to a better approximation of the results especially in the assessment of degradation degree or an improvement in residual lifetime determination. Another long-term trend is to increase the quality of inspection and also efforts to eliminate interruption of operation, which is necessary for supervision. This results into lower costs and ensuring quality of inspection. One of the inspection methods emerging from these trends is "non-destructive" metallography. This method is correlated with results of further tests, especially the creep test and the new small punch test. The main aim is to apply the knowledge and the experiences, which were gained while solving this thesis, in practice. These results could be refined thanks to new and modern NDT methods. Along with the current knowledge of material degradation and residual lifetime assessment of parts of energetic components, this thesis is trying to describe processes in the materials for use in practise. The literature overview in the introduction looks at the problem of residual lifetime and degradation of the materials. This is followed by a description of what happens in the material during the power*

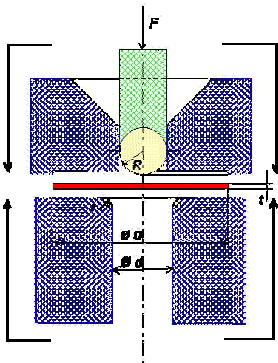
plant operation. The next section describes technologies for material inspection complemented with modern nondestructive and semi-destructive techniques or those being currently developed.

**Key words:** Small punch test, Small punch creep test, NDT, Larson-Miller parameter, residual lifetime

## 1. Úvod

Lomová houževnatost materiálu určuje přípustnost defektů provozovaných zařízení. V řadě případů není lomová houževnatost materiálu známa, protože nebyla buď měřena vůbec, nebo není znám vliv provozních podmínek na lomové chování materiálu v průběhu dlouhodobého provozu na pracovní teplotě. Jako příklad lze uvést stárnutí nízkolegovaných ocelí rotorů parních turbín, pracujících při zvýšených teplotách. Použití standardizovaných postupů pro stanovení aktuálního lomového chování provozovaných komponent energetických zařízení může způsobit jejich značné poškození při odběru zkušebního materiálu, nebo následných opravách prováděných nejčastěji svařováním. Potřebu velkého množství zkušebního materiálu, především pro stanovení lomové houževnatosti pomocí standardizovaných postupů, lze eliminovat pomocí „nedestruktivního“ odběru malého množství zkušebního materiálu z povrchu součásti a stanovením mechanických charakteristik pomocí penetračních testů [1].

Tato metoda používá zkušební tělesa ve tvaru malého disku, obvykle o průměru 3 – 10 mm a tloušťce 0,25 – 0,5 mm, upevněného podél jeho obvodu a zatěžovaného kulovým vnikacím tělískem – indentorem do porušení. Podpora po obvodu disku může existovat jako pouhé podepření nebo je disk po obvodu pevně upnutý (vetknutý) tlakovou přitlačnou silou.



Obr. 1 Schema přípravku pro SPT, Scheme of the SPT machine [7]

Základním cílem výzkumu zkušební metody SP je její aplikace pro hodnocení integrity konstrukcí v rozsahu provozní degradace a odhadu zbytkové životnosti ocelových komponent energetických zařízení [5].

Hlavní výhody SP testu mohou být shrnuty takto:

- nedestruktivní hodnocení mechanických vlastností materiálu,

- hodnocení nových materiálů či slitin, u kterých je k dispozici jen omezené množství materiálu,
- hodnocení svařenců včetně svaru a oblastí ovlivněných teplem uvnitř základního kovu,
- hodnocení mechanických vlastností keramických materiálů v širokém rozmezí teplot,
- hodnocení mechanických vlastností povlaků a povlakovaných materiálů,
- analýza příčin lomů součástí, u nichž je omezena dostupnost materiálů.

Přes intenzivní výzkum v této oblasti však existuje řada negativních aspektů:

- SP technologie se stále soustřeďuje v několika laboratořích, pouze na klíčových univerzitách a výzkumných ústavech.
- V současné době nelze spolehlivě vysvětlit, jak výsledky testu závisí na konkrétních zkušebních podmínkách. Současně existuje potřeba vývoje univerzálně platné a méně empirické zkušební metodiky a rovněž studia konkrétních materiálových korelací umožňujících analýzu získaných výsledků.
- Testovací standardy neexistují (pouze v Japonském kódu pro speciální testy, speciální materiály).
- Všechna použití v předchozích letech zvažovala pouze feritické a martenzitické oceli. Tyto metody nebyly nikdy aplikovány na austenitických ocelích. Použití pro svarové spoje je též nedostatečně prozkoumáno.

## 2. Odběr vzorků pro small punch test

Odběr zkušebního tělesa představuje nevhodný zásah do celistvosti hodnocené součásti, ať už se jedná o odběr strojním obráběním, tepelným dělením nebo dalšími způsoby. Uvedené destruktivní metody vyžadují následnou opravu odebraného místa. Většinou se jedná o opravu navařováním, včetně tepelného ošetření a řady nedestruktivních kontrol. Toto místo se často stává zdrojem dalších potíží včetně možnosti vzniku trhlin při dalším provozu.

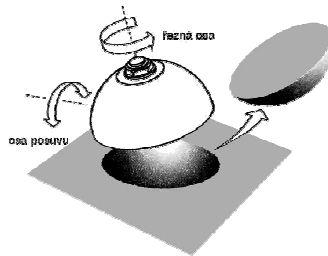
Klíčovým problémem u zkoušek typu small punch je odběr vzorků materiálu z rozhodujících součástí (s možnou životností 20 a více let) takovým způsobem, aby nedošlo k ovlivnění součásti, ani aby vlastnosti materiálu zkušebních vzorků nebyly ovlivněny procesem odběru.



Obr. 2 Detail trhliny ve vzorku po SPT, Detail of the fracture in the sample after SPT

Pro odebrání malých vzorků bylo vyvinuto zařízení SSam – 2, (Obr. 3). Odběr vzorku je založen na odbroušení mezivrstvy mezi vzorkem a součástí pomocí rotujícího nástroje tvaru kloboučku o tloušťce 0,7 mm a průměru 50 mm, který je vodou chlazený a pomalu se zavádí do základního materiálu a odebírá kulovité vzorek materiálu. Celý proces odběru, trvající asi 1 – 3 hod., umožní získat vzorek ve tvaru kulového vrchlíku o poloměru 25 mm a výšce 3 – 4 mm. Z tohoto segmentu se posléze vyrábějí (obvykle elektroerozivní metodou) malá válcovitá zkušební tělíska, přičemž je nutno pečlivě kontrolovat jejich výslednou tloušťku. Z takto odebraného vzorku zařízením SSam – 2 ve tvaru kulového vrchlíku je možno připravit až čtyři vzorky [3].

Používání SSam – 2 se rozšířilo do celé Evropy a to jak díky prodeji licencí na přístroj pro odběr vzorků, tak i poskytováním služeb na odběr vzorků. V současné době je přístroj na odběr vzorků dostupný v následujících evropských společnostech: Ansaldo (I), Rolls Royce Ltd. (GB), Vítkovice (ČR), na Technické univerzitě v Krakově (PL) a nově také ve výzkumném centru Comtes FHT (ČR) [4].



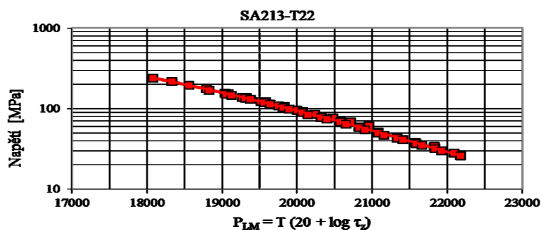
Obr. 3 Princip odběru vzorků pro SPT, Sampling principle for SPT [5]

Absence tepelného a deformačního ovlivnění u odebraného vzorku i testované součásti je zajištěna vysokou obvodovou rychlostí odbrušovacího nástroje a pomalým posuvem do záběru za současného intenzivního chlazení kapalinou. Zařízení SSam umožňuje provádět odběry jak na vnějším povrchu testovaných dílů, tak v jejich dutinách (tlakové nádoby, potrubí atd.) [5].

### 3. Hodnocení zbytkové životnosti

Hodnocení pomocí creepových zkoušek a LM parametru

Při výrobě elektrické energie a v chemickém průmyslu jsou materiály zařízení podrobena působení vysokých teplot a vysokých tlaků. Jedná se především o kotle a turbíny. Materiálová degradace se vyskytuje během provozu následkem koroze, přehřátí, creepu a únavy. V důsledku toho dochází k značným ekonomickým ztrátám. Hodnocení zbytkové životnosti je možné provádět také pomocí krátkodobých creepových zkoušek [6].



Obr. 4 Křivka závislosti napětí a Larson-Millerova parametru pro ocel SA213-T22, Stress – Larson Miller parameter curve for the steel SA213-T22

Křivka (Obr. 4) vyznačuje napětí v závislosti na době do lomu při různých teplotách pro ocel SA213-T22 (15 313) Tato křivka se může snadno transformovat do jediného vztahu vyjadřující Larson-Millerův parametr, který je definován následovně [6]:

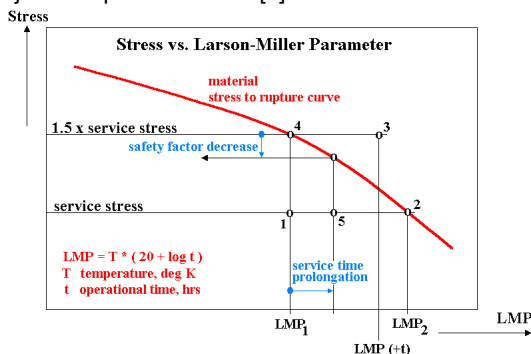
$$P_{LM} = T(C + \log \tau_z) \quad (1)$$

- T ... provozní teplota vyjádřena v Kelvinech
- C ... konstanta obecně používaná pro oceli tohoto typu.
- t ... provozní čas struktury nebo komponenty

Skutečné napětí součásti a odpovídající hodnota Larson-Millerova parametru určují pracovní bod (např. bod 1, Obr. 5) v závislosti na velikosti Larson-Millerova parametru. V tomto bodě je možné říci, že životnost není ještě vyčerpána. Dalším posunem podél horizontální čáry dané provozním napětím (zvýšení doby provozu při stejné teplotě) se dostáváme ke křivce porušení (bod 2, Obr. 5). Koeficient bezpečnosti zde není zohledněn [6].

Zbývající životnost může být stanovena z rozdílu Larson-Millerova parametru mezi body 1 a 2 (Obr. 5 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Také procentuální podíl vyčerpané životnosti může být vypočten jako podíl času v místech 1 a 2 (Obr. 5). Součinitel bezpečnosti (obvyklé hodnoty  $k = 1,5$  až  $1,7$ .) je používán pro bezpečné vyhodnocení životnosti [6].

Přesto součinitel bezpečnosti by měl být zahrnut a měly by být uvažovány vyšší výpočetní teploty. Po provozním napětí je zvětšen součinitel bezpečnosti z původní hodnoty  $1,5$  a Larson-Millerův parametr je přepočítán pro teplotu  $T+70$ , což ukazuje bod 3 v Obr. 5. Tento bod se může nacházet pod i nad křivkou tečení, což ve druhém případě představuje nebezpečnou situaci [6].



Obr. 5 Schema odhadu zbytkové životnosti, Residual lifetime assessment scheme [6]

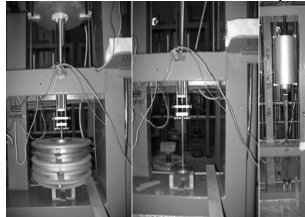
Při správně navržené součásti můžeme říci, že stav reprezentující reálnou situaci např. v bodě 1 se nachází pod křivkou a tudíž nemá vyčerpanou životnost. V případě započítání koeficientu bezpečnosti se dostáváme do bodu 4, který leží na křivce. Součást je v tomto okamžiku u konce svojí životnosti. Prodlužování životnosti komponent je možné pouze za předpokladu snížení koeficientu bezpečnosti. Toto snížení vyžaduje častější kontroly provozních podmínek, materiálových vlastností a pečlivou kontrolu teploty a dalších provozních parametrů [2] [6].

Hodnocení pomocí small punch creep testu

Zkouška se provádí při konstantním tahovém zatížení. Součástí zařízení jsou specifická táhla, která mění směr působící síly z tahové na tlakovou. V průběhu zkoušky tlačí na vzorek keramická kulička vyrobená z materiálu na bázi  $Al_2O_3$  o průměru  $2,5$  mm [5].

Pro provedení zkoušky SP creep se používá shodný přípravek jako pro SP test za pokojové teploty. Přípravek je uchycen mezi 2 táhla zařízení pro zkoušky tečení.

Elektrická odporová pec je nastavena tak, aby byl přípravek umístěn v jejím středu. Následuje zaizolování pece izolačním materiálem. Na ovládacím zařízení pece se nastaví požadovaná teplota pro zkoušku. Měření deformace provádí kapacitní snímače, které přes měřící ústřednu měří deformaci s přesností na 0,001 mm [5].



Obr. 6 Přístroj pro small punch creep test, Small punch creep test machine [5]

Z těchto dat je poté možno zpracovat křivku tečení, popř. Larson – Millerův diagram. Teplota je v průběhu zkoušky regulována termoregulátorem a kontrolním termočlánkem, který je v blízkosti vzorku. Tento termočlánek (Pt - PtRh10 %, neboli typ S), průměru 5 mm, ověřuje, zda nastavená teplota odpovídá teplotě v peci. Průběh teplot v peci je v průběhu zkoušky zaznamenáván za použití tzv. zapisovacího termočlánku [5].

Po provedené zkoušce SP creep je možné ze znalosti teploty a doby do lomu vypočítat Larson-Millerův parametr. Výsledky této zkoušky je třeba korelovat s ověřenými postupy zjišťování životnosti (např. zkoušky tečení na vzorcích standardní velikosti). Na základě těchto korelací pro určitou ocel, bude možné dále určit zbytkovou životnost i pomocí SP creep testu.

#### 4. Závěr

V současné době je v celosvětovém měřítku stále nejrozšířenější technika hodnocení zbytkové životnosti na základě zkoušek žáropevnosti. I přes svoji relativní přesnost a zejména bohaté zkušenosti při hodnocení různých typů materiálů, zůstávají její zásadní nevýhodou podstatně vyšší náklady, které je nutné vynaložit na vyřezání dostatečného objemu zkoumaného materiálu. K tomu se mohou vázat náklady související s dobou odstávky energetického zařízení a také náklady na opravu po vyřezání materiálu určeného k výrobě vzorků vhodných pro zkoušky tečení.

Mezi parametry ovlivňující zejména ekonomickou stránku metod hodnocení životnosti patří zejména nutnost odstávky zařízení po dobu nezbytně nutnou k provedení defektoskopických šetření a materiálových analýz. Pro snížení doby odstávky, a tím i ekonomických ztrát, je nutné zabývat se možnostmi hodnocení materiálu především pomocí nedestruktivních a semidestruktivních technik. Mezi tyto metody jsou zahrnuty také způsoby hodnocení pomocí metalografických replik, či zavedení nové metody small punch creep test.

V dalším výzkumu je třeba se zaměřit na zpřesňování výsledků uvedených diagnostických metod a doplnit je dalšími inspekčními metodami (např. akustická emise) pro přesnější odhad zbytkové životnosti kritických energetických zařízení. V současné době je mimořádně aktuální zavádění metody small punch creep testů jako náhrady za standardní creepové testy. Praktické uplatnění této metody je však podmíněno znalostí korelačních koeficientů pro daný materiál.

#### 5. Literatura



- [1] MATOCHA, Karel, FILIP, Miroslav, PURMENSKÝ, Jaroslav. *Hodnocení aktuálních křehkolomových vlastností energetických zařízení pomocí penetračních testů*. Korozie a ochrana materiálů. 2007, s. 59-63. ISBN 51(3) 59-63.
- [2] MENTL, V.: *Integrity inspection assessment and life-time extension report VYZ/TZ53/001/2007*, Škoda Výzkum s.r.o., Plzeň 2007.
- [3] BICEGO, V.: *Suggested parts to be put in the ECCC WG1.1 report on miniature creep testing*, CESI, 2003.
- [4] KUBOŇ, Z.: *Small sampling test Metod*, Vítkovice-Research and Development Ltd., 2005
- [5] VOLÁK, J.: *Využití klasických a netradičních mechanických vlastností při hodnocení zbytkové životnosti energetických zařízení*, Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2008.
- [6] MENTL, V.: *Integrity inspection assessment and life-time extension report, boiler No. 63, SWCC AL Jubail Power Plant*, Technická zpráva VYZ/TZ 53/001/2007, Škoda Výzkum s.r.o., Plzeň, 2007.
- [7] MILICKA K., DOBEŠ F.: *Small punch testing of a magnesium alloy and its composite*, 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10), Brugge, Belgium 2002.





## MECHANISM OF FATIGUE PROCESSES MECHANISMUS ÚNAVOVÝCH PROCESŮ

**Jaroslav Fiala, Pavel Mazal\*\* , Michal Kolega, František Vlašic\*\* , Petr Liškutín\*\***  
\*University of West Bohemia Plzeň CZ  
\*\*Brno University of Technology

### **Abstrakt**

*Rtg difrakční analýzou bylo zjištěno, že mikrostruktura (oceli, duralu) se účinkem cyklického zatěžování mění. Tyto změny bývají často rytmické, ale někdy mají i jiný ráz. Definice fázového prostoru, tj. prostoru, jehož souřadnice charakterizují sledované mikrostrukturní procesy a příslušné bifurkace s dostatečnou citlivostí, je klíčem k identifikaci mechanismu únavy materiálu. Citlivost rtg difrakce na strukturní změny cyklicky zatěžovaného polykrystalického materiálu závisí na jeho dispersi a textuře. Velmi také záleží na uspořádání difrakčního experimentu, které dlužno aktuální mezoskopické struktuře materiálu přizpůsobit.*

**Klíčová slova:** *únavy, rentgenová difrakce, mezipovrchová energie, parakrystalické distorce*

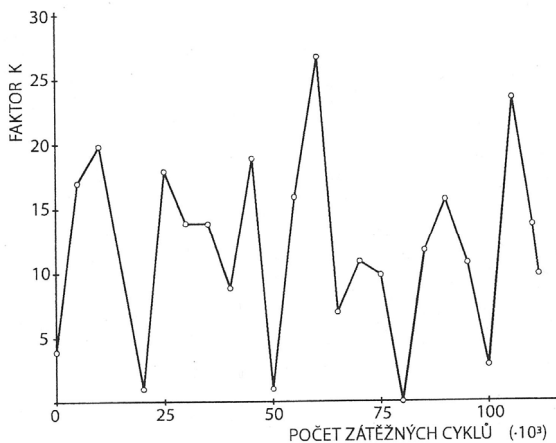
### **Abstract**

*X-ray diffraction analysis proved that cyclic loading results in microstructural changes (of steel and duralumin). These changes are frequently rhythmical but sometimes they may have another nature, too. Defining the phase space, i.e. the space, whose coordinates characterize the microstructural processes under investigation as well as the relevant bifurcations with sufficient sensitivity, is the key to the identification of fatigue mechanism. The response of X-ray diffraction to the structural changes of the cyclic loaded polycrystalline material depends on its dispersion and texture. Much depends also on the arrangement of the diffraction experiment, which should be adjusted to the actual material's mesoscopic structure.*

**Key words:** *fatigue, X-ray diffraction, interface energy, paracrystalline distortions*

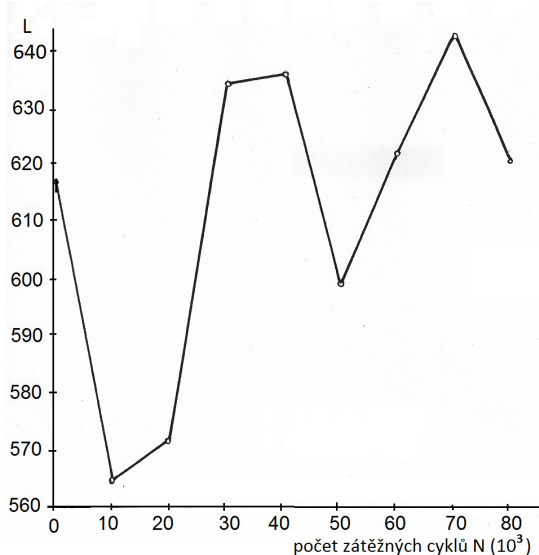
### **1. Achilles a želva**

„Achilleus nedohoní želvu, protože by musel urazit nejdříve polovinu té dráhy, pak zase polovinu až do nekonečna; a takovou řadu hodnot nelze sečíst“ míní teoretik Zénon [1]. Prakticky bylo však ověřeno, že atleticky zdatný Achilles želvu nakonec přece dohonal.



**Obr. 1.** Závislost veličiny  $K$ , charakterizující směrovou distribuci (disorientaci) mozaikových bloků duralu, na počtu zátěžných cyklů  $N(10^3)$ .

**Fig. 1.** Dependence of  $K$  (characteristics of the disorientation of mosaic blocks) of dural on the number  $N(10^3)$  of loading cycles.

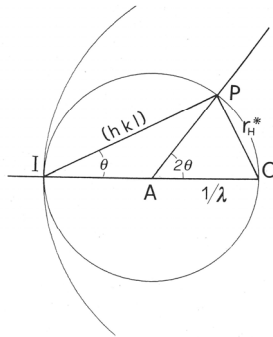


**Obr. 2.** Závislost šířky  $L$  difrakční linie (211)  $Fe-\alpha$ , charakterizující velikost mozaikových bloků oceli 15CH2NMFA, na počtu zátěžných cyklů  $N(10^3)$ .

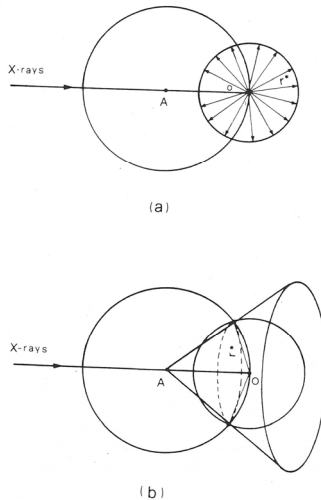
**Fig. 2.** Dependence of the width  $L$  of diffraction line (211)  $Fe-\alpha$ , characterizing the size of the mosaic blocks of steel 15CH2NMFA, on the number  $N(10^3)$  of loading cycles.

## 2. Únava materiálu

Podobně je tomu s únavou materiálu: teoreticky by materiál, zatěžovaný pod mezí kluzu, „neměl jevit známky únavy“. Prakticky je však ověřeno, že při opakovaném zatěžování pod mezí kluzu se může materiál po určitém počtu zátěžných cyklů „unavit“ natolik, že praskne. Ba co více, že 90% všech poruch strojních dílců a konstrukcí vzniká právě tímto způsobem. Spekuluje se, že únavový lom vzniká (nukleuje) postupným hromaděním porušení v jednom „nejslabším“ místě [2], které je těžko nalézt pod mikroskopem a tím se vysvětluje proč o nukleaci únavového lomu víme dodnes tak málo (koncepte mikroplastické deformace, o které v Československu psal nejvíce A. Puškár [3,4]). Tato koncepte však nedokáže vysvětlit



**Obr. 3. Ewaldova konstrukce.**  
**Fig. 3. Ewald construction.**

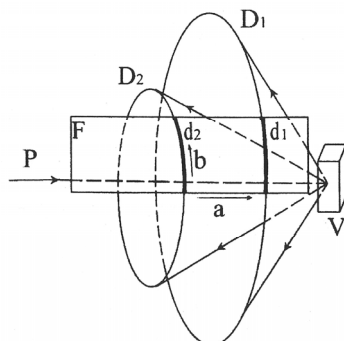


**Obr. 4. Paprsky rtg záření, difraktované polykrystalickým tělesem, vytvoří kuželovou plochu.**  
**Fig. 4. X-ray beams, diffracted by a polycrystalline body, define a diffraction cone.**

bistabilní charakter únavových procesů, který manifestují rentgenografická difrakční a elektrochemická měření [5 – 8]. Ty dvě fáze, mezi kterými stav materiálu osciluje, se liší dispersí jeho strukturních, tzv. mosaikových bloků. Stabilizačním faktorem nízkodisperzní fáze je mezipovrchová energie, zatímco stabilizačním faktorem vysokodisperzní fáze je objemová energie parakrystalických distorzí. Destabilizačním činitelem je pak pro obě fáze teplo a kumulující se energie anelastické (viskoelastické) deformace vnášená do tělesa každým zatěžovacím cyklem (obr. 1 a 2). Během opakovaného rozpadu a opětného růstu (rekrytalizace) mozaikových bloků se zvětšuje pravděpodobnost, že ve struktuře polykrystalického agregátu vznikne nadkritická necelistvost a její (nestabilní) růst následně způsobí prasknutí cyklicky zatěžovaného tělesa únavovým lomem.

### 3. Rtg difrakce

Při monitorování metamorfos (bifurkací) mosaikové struktury cyklicky zatěžovaného tělesa pomocí rtg difrakce [9 – 12] se vychází z Ewaldovy konstrukce (obr. 3). K difrakci rtg záření ve směru AP na určitém krystaliku ležícím v bodě O dojde, když nějaký uzel P jeho reciproké mřížky (o radiusvektoru  $OP = r_H$ ) leží na Ewaldově sféře, která má střed A a jejíž poloměr

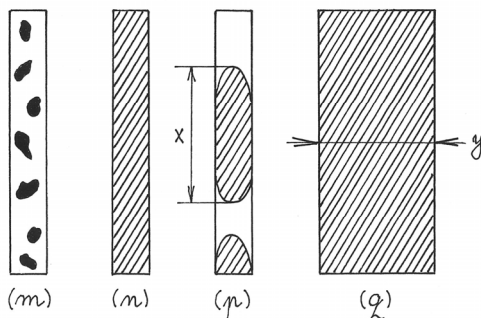


**Obr. 5.** Difraktogram, tj. dvojrozměrná mapa směrové distribuce intenzity  $I$  rentgenového záření difraktovaného na vzorku V a zaregistrovaného na filmu F ve formě difrakčních čar (difrakcí)  $d_1$  a  $d_2$ , nese informaci o struktuře materiálu vzorku. Závislost  $I = I(a)$  nazýváme radiální profil příslušné difrakční linie, zatímco  $I = I(b)$  jest její azimutální čili laterální profil.  $P$  je primární paprsek rtg záření,  $D_1$  a  $D_2$  jsou kuželové plochy tvořené paprsky difraktovaného záření.

**Fig. 5.** Diffraction pattern, which is a two-dimensional map of the directional distribution of the X-ray intensity  $I$  diffracted by sample V and registered on film F in the form of diffraction lines (diffractions)  $d_1$  and  $d_2$ , brings information on the structure of the material of the sample under consideration.  $I = I(a)$  defines the so-called radial profile of the respective diffraction line, while  $I = I(b)$  is its azimuthal or lateral profile.  $P$  is the primary X-ray beam,  $D_1$  and  $D_2$  are cones of diffracted beams.

AO o velikosti převrácené hodnoty vlnové délky  $\lambda$  je orientován proti směru dopadajícího rtg záření. Je-li difraktující těleso agregátem (náhodně) orientovaných krystalů (krystalitů, mosaikových bloků), vytvoří příslušné uzlové body  $r^*$  jejich recipročných mřížek sféru se středem v bodě O. Ta protne Ewaldovu sféru v kružnici, jíž procházejí difraktované paprsky, které vytvoří kuželovou plochu s vrcholem ve středu Ewaldovy

sféry (obr.4). Kuželové plochy difraktovaných paprsků jsou pak na registračním mediu detekovány jako difrakční linie (obr. 5). Difrakční linie jsou tvořeny difrakčními stopami od jednotlivých mosaikových bloků [13]. Je-li materiál hrubozrný, tj. jsou-li ty mosaikové bloky velké, vejde se jich do difraktujícího objemu málo a jejich difrakční stopy se nepřekrývají. Z počtu difrakčních stop resp. z jejich velikosti lze potom vypočítat velikost mosaikových bloků (obr.6m). Jsou-li však mosaikové bloky malé, bude jich v difraktujícím objemu mnoho a jejich difrakční stopy se překrývají: difrakční linie je spojitá, nestrukturovaná a velikost mosaikových bloků nelze z difraktogramu určit (obr.6n). Výjimku představuje případ, kdy směrové rozložení mosaikových bloků je nerovnoměrné – pak mluvíme o textuře; difrakční linie je tvořena oddělenými segmenty difrakčních stop krystalitů, jejichž orientace jsou si blízké. Míru disorientace mosaikových bloků lze pak vypočítat z šířky segmentů  $x$  (obr. 6p). Je-li materiál velmi jemnozrný (mají-li jeho bloky koloidní dispersi), dojde k rozšíření difrakčních linií a velikost mosaikových bloků lze určit z radiální rozlehlosti  $y$  (obr.6.q).



**Obr. 6.** Velikost mosaikových bloků resp. jejich disorientaci lze určit z laterálního (azimutálního) nebo radiálního profilu difrakčních linií.

**Fig. 6.** Size or directional distribution of the mosaic blocks can be deduced from the lateral (azimuthal) or radial profile of the diffraction lines.

#### 4. Jiné techniky monitorování bifurkací únavového procesu

Na bifurkace únavového procesu citlivě reaguje rtg difrakce a hodnota elektrochemického potenciálu [5 – 8]. Možná, že by se mohlo uplatnit také monitorování hysterese smyčky závislosti napětí – deformace [14] resp. vnitřního útlumu [15], neboť oba tyto jevy jsou také strukturně velmi citlivé.

#### 5. A co ještě zbývá?

Odhadnout variabilitu počtu bifurkací únavového degradačního procesu strojního dílce (daného složení a vyrobeného určitou technologií při stejném režimu zatěžování) od montáže do lomu.

## Poděkování

Výsledky prezentované v tomto příspěvku vznikly v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR TIP č. FR-T14/602 "Diagnostický komplex pro detekci tlakového média a materiálových defektů tlakových komponent jaderných elektráren a projektu NETME Centre v rámci Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (reg. č. CZ. 1.05/2.1.00/01.0002) podporovaném Evropským fondem pro regionální rozvoj.

## Literatura

- [1] Zénón z Eleje, žák Paramenidův z 5. stol. př.n.l.
- [2] M. Klesnil, P. Lukáš: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha 1975, 56 – 77.
- [3] A. Puškár, S. A. Golovin: Fatigue in Materials: Cumulative Damage Processes, Elsevier, Amsterdam 1985, 274 – 287.
- [4] A. Puškár: Mezní stavy materiálů a součástí, Veda, Bratislava 1989, 39 – 55.
- [5] E. M. Gutman: Mechanochimija metallov i zaščita ot korozii, Metallurgija, Moskva 1981, 246 – 252.
- [6] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega, P. Liškutín: Rentgenografické zkoumání únavového procesu. In Proceedings of NDE for Safety/ Defektoskopie 2010, P. Mazal, L. Pazdera (eds), Brno University of Technology, Brno 2010, 49 – 56.
- [7] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega: Cycle induced microstructural changes, International Journal on Microstructure and Materials Properties **6** (2011), 259 – 272.
- [8] 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.
- [9] A. Guinier: Théorie et technique de la radiocristallographie, Dunod, Paris 1956, 307 – 313, 329 – 339, 462 – 488.
- [10] I. Kraus: Úvod do strukturní rentgenografie, Academia, Praha 1985, 194 – 209.
- [11] H. S. Peiser, H. P. Rooksby, A. J. C. Wilson (eds): X-ray Diffraction by Polycrystalline Materials, Chapman & Hall, London 1960, 409 – 429, 454 – 480.
- [12] R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge (eds): Defect and Microstructure Analysis by Diffraction, Oxford University Press, New York 1999, 59 – 81, 346 – 364, 405 – 519.
- [13] J. Fiala, I. Schindler, R. Foret, S. Němeček: Sledování struktury konstrukčních materiálů a její degradace rtg difrakcí, Strojnícky časopis **53** (2002), 1 – 23.
- [14] R. W. Hertzberg: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley and Sons, New York 1989, 489 – 511.
- [15] A. Puškár: Vnútročné tmenie materiálov, Vysoká škola dopravy a spojov, Žilina 1995, 267 – 357.





---

# DETEKCE INTERMODULAČNÍHO SIGNÁLU PRO NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVOU SMĚŠOVACÍ IMPULSNÍ SPEKTROSKOPII

## DETECTION OF INTERMODULATION SIGNAL FOR NONLINEAR ULTRASONIC MIXING IMPULSE SPECTROSCOPY

Karel HÁJEK, Valeria NENAKCHOVA

Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně

Contact e-mail: [karel.hajek@unob.cz](mailto:karel.hajek@unob.cz)

### Abstrakt

*Nelineární ultrazvuková směšovací impulsní spektroskopie (NUMIS) má velké potenciální výhody této metody v porovnání s jinými nelineárními ultrazvukovými metodami, a to především z hlediska citlivosti. Využívá k tomu analogovou lineární předfiltraci, která podstatně zvyšuje možnou relativní dynamiku signálu. Příspěvek rozpracovává pro tuto metodu následnou číslicovou filtraci a detekce obálky impulsu signálu s intermodulačním kmitočtem pro získání co nepřesnějšího času počátku tohoto impulsu. Zpracované algoritmy dokáží získat dostatečně přesné výsledky detekce tohoto impulsu až pro dynamiku měřeného signálu 80 dB v číslicové části řetězce takže spolu s analogovou předfiltrací může být rozdíl mezi budicími a měřenými signály až 120 dB.*

**Klíčová slova:** nelineární ultrazvuková směšovací spektroskopie, citlivost, impulsní buzení, kmitočtová filtrace.

### Abstract

*Nonlinear ultrasonic mixing impulse spectroscopy (NUMIS) has great potential advantages in comparison with other nonlinear ultrasonic methods. It is first of all from the point of view of sensitivity. It uses analog linear pre-filtration which essentially increases relative possible dynamic range. This paper elaborates on the subsequent digital filtration and detection of the impulse envelope for obtaining the most accurate time of the impulse start for this method. Created algorithms enables to obtain sufficiently accurate results of impulse detection to the dynamic range of measured signal 80 dB in the digital part of signal chain. Therefore a difference of exciting end detected signal can be 120 dB with the analog pre-filtration.*

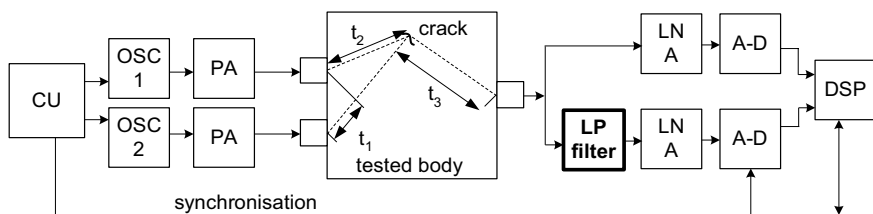
**Key words:** nonlinear ultrasonic mixing spectroscopy, sensitivity, impulse excitation, frequency filtration.

### 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 ultrazukovými 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 dostatečné přenos lokalizaci.



Obr. 1. Principiální blokové schéma nelineární ultrazukové směšovací impulsní spektroskopické metody [8].

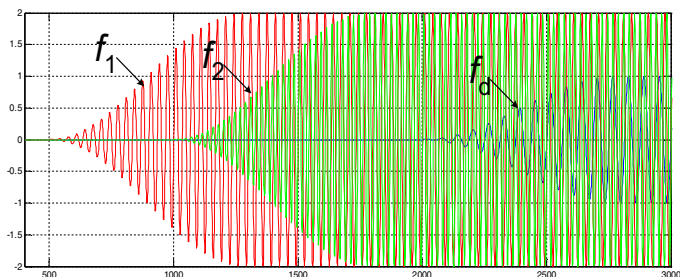
Fig. 1 Principal block diagram of nonlinear ultrasonic mixing impulse spectroscopic method [8].

Jedním z hlavních momentů ovlivňující citlivost navrhovaného systému je schopnost detekovat signál s rozdílovým kmitočtem i při co nejnižší úrovni vzhledem k budícím a rušícím signálům a navíc s dostatečnou přesností zjistit časový okamžik začátku tohoto burstového impulsu. K tomu je nutno zabezpečit při číslicovém zpracování měřeného signálu dostatečnou kmitočtovou filtraci pro potlačení jak budících signálů, které byly jen částečně potlačeny analogovou předfiltrací, tak i dalších šumů a rušivých signálů. Dalším problémem je vliv filtrace na deformaci a zpoždění detekovaného impulsu. Následným problémem je pak detekce obávkové funkce přijatého impulsu a především jeho čela, protože to rozhoduje o přesnosti měření časových intervalů.

## 2. Modelování signálů pro filtrace a detekci impulsu

Pro celý proces filtrace a detekce času počátku byl vytvořen model tohoto problému s možnostmi variace parametrů a hledání optimálního řešení v programu Matlab. Nejprve byly pro vzorkovací kmitočet  $F_v = 50$  MHz generovány budící signály

$f_1 = 1,5 \text{ MHz}$ ,  $f_2 = 2,3 \text{ MHz}$  a  $f_d = 800 \text{ kHz}$  s časovým zpožděním  $10 \mu\text{s}$ ,  $20 \mu\text{s}$  a  $40 \mu\text{s}$  (500, 1000 a 2000 vzorků). Testovaný signál rozdílového kmitočtu má amplitudu 1 a budící signály mají amplitudu nastavitelnou. Má smysl uvažovat maximální amplitudy budících signálů 10000 (dynamický rozsah 80 dB). Tyto tři signály (viz, obr. 2, budící signály mají pro názornost amplitudou jen 2, ve skutečnosti 1000 až 10000) jsou sečteny jako model přijímaného signálu. Cílem je dosažení spolehlivé detekce čela rozdílového signálu pro maximální úroveň budících signálů.

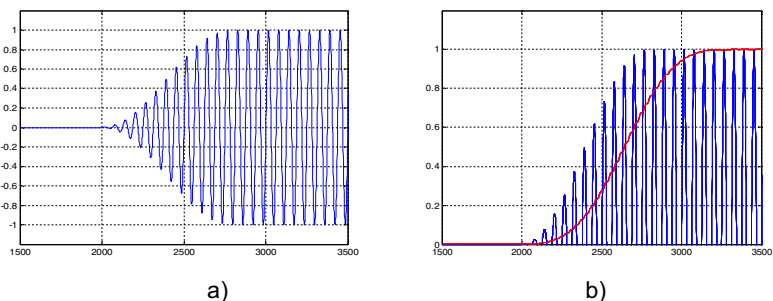


Obr. 2. Modely všech tří signálů ( $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_d$ , amplitudy budících signálů jsou 2).

Fig. 2 Models of all three signals ( $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_d$ , amplitude of exciting signals is 2).

### 3. Detekce obálky počátku impulsu

Idealizovaný průběh počátku detekovaného impulsu je ukázán na obr. 3a). Je zřejmé, že získávat obálku klasickými postupy jako je např. hledání maxim je problematické obzvláště pro počátek impulsu. Proto se zde ukazuje jako výhodné použít zde princip výpočtu první harmonické složky v DFT, čili hledat korelaci s kosinovým a sinovým harmonickým signálem shodného kmitočtu. Tento výpočet se postupně opakuje pro posun vždy o jeden vzorek signálu. Tím způsobem získáváme informaci o amplitudě (a fázi) pro každý vzorek signálu.



Obr. 3. a) Základní model testovaného signálu s rozdílovým kmitočtem, b) demodulace jeho obálky metodou výpočtu modulu a fáze 1. harmonické složky kmitočtového spektra.

Fig. 3 a) Basic model of tested signal with differential frequency, b) demodulation of its envelope by method of computation of modulus and phase of 1<sup>st</sup> harmonic component of frequency spectrum.

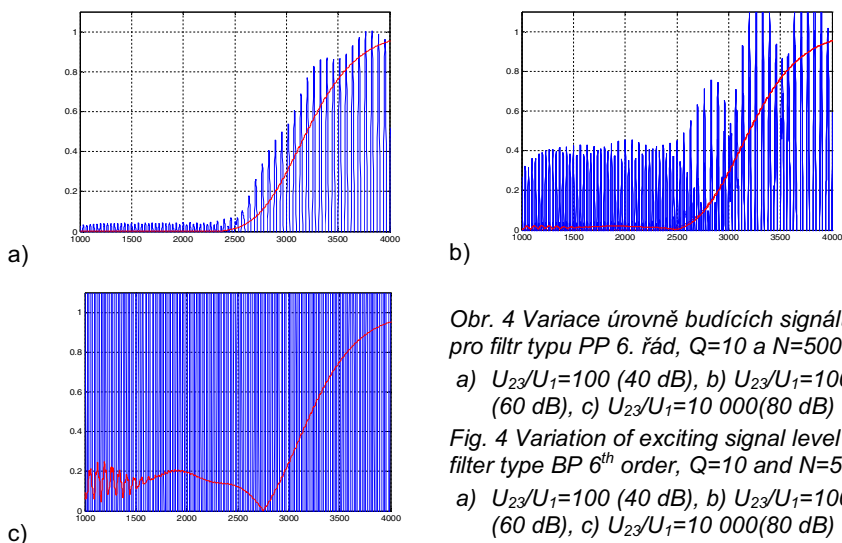
Výhodou je i efekt kmitočtové filtrace. Jde vlastně o FIR filtr s nulami přenosu na vyšších harmonických kmitočtech, což nám do značné míry vyhovuje, protože to odpovídá přibližně budícím signálům. Na druhou stranu je nutno pro výpočet použít definovaný interval o  $N$  vzorcích signálu a odpovídajícím počtem period. S prodloužením intervalu se sice zvyšuje přesnost a schopnost filtrace, ale na druhou stranu dochází k časovému posuvu a deformaci impulsu. Samotný časový posuv není zásadní problém, protože je konstantní, ale lze ho ve výsledku adekvátně korigovat. Pro příklad  $F_v = 50$  MHz,  $f_d = 800$  kHz a  $N = 500$  je ukázán výsledek na obr. 3b). Je též vhodné hledat optimální délku intervalu  $N$ , a to i v souvislosti s kmitočtovou filtrací

#### 4. Potlačení budících signálů číslicovou filtrací

Druhým krokem tohoto modelu je blok filtrace, kde lze uvažovat různé varianty číslicových filtrů. Zvolili jsme filtry typu IIR vzhledem k tomu, že mají rychlou časovou odezvu s definovaným zpožděním, které lze korigovat. Pro snadnost experimentálního modelování byla zvolena technologie kaskádního řazení bloků PP nebo DP 2. řádu s volbou činitele jakosti  $Q$  a shodným rezonančním kmitočtem  $f_0$ . Tento kmitočet byl nastaven na hodnotu  $f_d$ , tudíž 800 kHz.

Třetím krokem celého modelu je výše zmíněná demodulace obálky technologií výpočtu amplitudy a fáze s postupným posouváním.

Prvními experimenty s tímto modelem v programu Matlab byly získány následující výsledky. Pro variaci úrovně budících signálů pro filtr typu PP 6. řád,  $Q=10$  a  $N=500$ , na obr. 4 je signál po filtraci a červeně výsledná obálka. Z obr. 4 je zřejmé, že při této volbě parametrů lze dosáhnout téměř spolehlivé detekce počátku impulsu i pro požadovaných 80 dB. Dále je zřejmý význam využití principu spektrální detekce amplitudy (a fáze) signálu pro filtrace, která účinně potlačuje budící signály pro vyšší dynamické rozsahy.



Obr. 4 Variace úrovně budících signálů pro filtr typu PP 6. řád,  $Q=10$  a  $N=500$

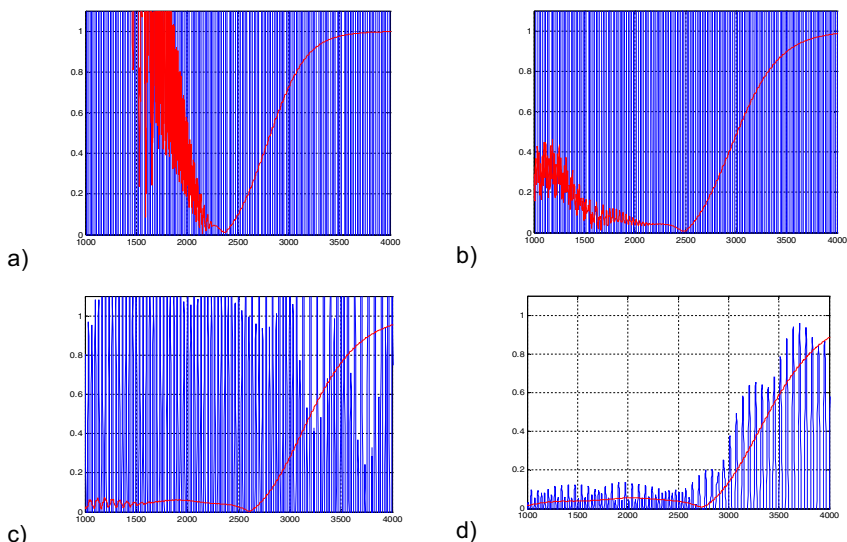
a)  $U_{23}/U_1=100$  (40 dB), b)  $U_{23}/U_1=1000$  (60 dB), c)  $U_{23}/U_1=10\ 000$ (80 dB)

Fig. 4 Variation of exciting signal level for filter type BP 6<sup>th</sup> order,  $Q=10$  and  $N=500$

a)  $U_{23}/U_1=100$  (40 dB), b)  $U_{23}/U_1=1000$  (60 dB), c)  $U_{23}/U_1=10\ 000$ (80 dB)

Z obr. 4 je zřejmé, že při této volbě parametrů lze dosáhnout téměř spolehlivé detekce počátku impulsu i pro požadovaných 80 dB. Dále je zřejmý význam využití principu spektrální detekce amplitudy (popř. i fáze) signálu pro filtraci, která účinně potlačuje budící signály pro vyšší dynamické rozsahy.

Další možností je variace řádu filtru. Na obr. 5 jsou ukázány výsledky pro volbu 2.-8. řádu pro poměr signálů 3000 (70 dB). Jak je zjevné, volba 6. řádu je dostačující, použití 8. řádu již další potlačení rušivých signálů v obálce rozdílového impulsu nepřináší a jen zbytečně dále časově zpožďuje a deformuje impuls.

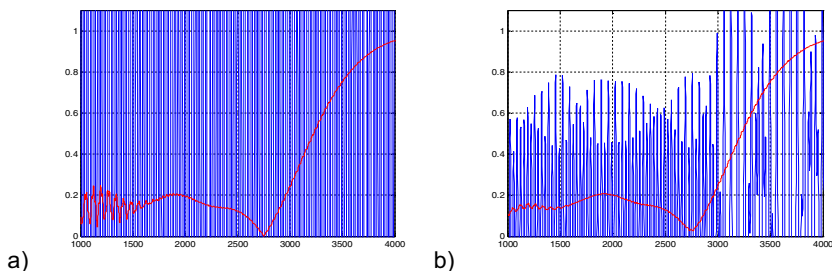


Obr. 5 Variace řádu pro filtr typu PP,  $Q=10$  a  $N=500$ :

a) 2. řád, b) 4. řád, c) 6. řád, d) 8. řád

Fig. 5 Variation of order for filter type BP,  $Q=10$  and  $N=500$ :

a) 2<sup>nd</sup> order, b) 4<sup>th</sup> order, c) 6<sup>th</sup> order, d) 8<sup>th</sup> order.

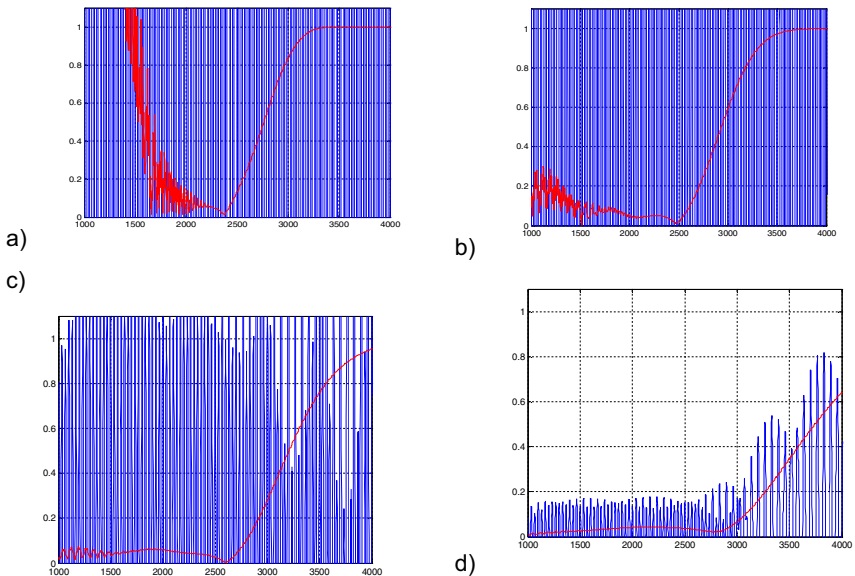


Obr. 6 Porovnání typu filtru, 6. řád,  $Q=10$ ,  $N=500$ ,  $U_{23}/U_1=80$  dB: a) PP, b) DP.

Fig. 6 Comparison of filter type, 6<sup>th</sup> order,  $Q=10$ ,  $N=500$ ,  $U_{23}/U_1=80$  dB: a) BP, b) LP.

Volba filtru typu DP se na první pohled jeví jako výhodnější než PP protože více potlačuje složky budících signálů. To sice potvrzuje obr. 6 pro úroveň signálu před detekcí obálky. Ale na výsledný tvar obálky to zásadní vliv nemá, naopak počátek impulsu se jeví trochu lépe odlišitelný pro filtr typu PP.

Obr. 7 ukazuje variaci hodnoty Q. Zde je vidět, že hodnota Q = 10 se jeví jako optimální, další zvýšení hodnoty Q nezvyšuje podstatně potlačení nežádoucích signálů ve výsledné obálce impulsu a naopak podstatně opoždjuje impuls a deformuje jeho tvar.



Obr. 7 Variace hodnoty Q pro filtr typu PP 6. řád,  $N=500$ ,  $U_{23}/U_1=70$  dB:

a)  $Q=2$ , b)  $Q=5$ , c)  $Q=10$ , d)  $Q=20$

Fig. 7 Variation of Q value for filter type BP 6<sup>th</sup> order,  $N=500$ ,  $U_{23}/U_1=70$  dB:

a)  $Q=2$ , b)  $Q=5$ , c)  $Q=10$ , d)  $Q=20$

## 5. Závěr

Článek řeší zvyšování citlivosti nelineární ultrazvukové směšovací impulsní spektroskopie. Ukázal možnosti demodulace počátku obálky impulsu s rozdílovým kmitočtem, přičemž řeší potlačení budících signálů, které mají podstatně vyšší amplitudu. Využívá k tomu kombinace číslicové kmitočtové filtrace filtry IIR 6. řádu a získávání informace o amplitudě rozdílového signálu principem DFT pro první harmonickou složku.

Celý problém byl modelován programem Matlab pro typické průběhy signálů. Toto cestou byla dosažena spolehlivá detekce počátku impulsu pro poměr úrovní budících signálů k detekovanému signálu 80, dB což se jeví jako dostačující vzhledem k maximálně použitelnému 16-ti bitovému AD převodníku. Lze předpokládat, že při praktickém použití budou mít snímané signály složitější průběhy (vliv odrazů a pod.), takže bude vhodné provést další optimalizaci.

Tato práce byla podpořena prostředky projektu pro rozvoj organizace PRO K217.

## Literatura

- [1] K. E.-A. Van Den Abeele, P. A. Johnson, A. Sutin: 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, <http://www.lanl.gov/orgs/ees/ees11/geophysics/nonlinear/2000/NWMS.pdf>
- [2] Dos Santos, S. Vejvodova S., Prevorovsky, Z.: Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy in Symbiosis with Time Reversal for Localization of Defects : Tr-News, [http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/DosSantos\\_10.pdf](http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/DosSantos_10.pdf)
- [3] K. Hajek, M. Korenska, J. Sikula: Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Fired Roof Tiles, 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), <http://www.ndt.net/article/ndcm2011/papers/A-03-1.pdf>
- [5] L. Pieczonka, W. J. Staszewski, F. Aymerich, T. Uhl: Analysis of Nonlinear Vibro-Acoustic Wave Modulations Used for Impact Damage Detection in Composite Structures, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM 2012, Materials and Qualification <http://www.ndt.net/article/ewshm2012/papers/th2a2.pdf>
- [6] Zaitsev, V., Matveev, L. and Matveev, A.: On the ultimate sensitivity of nonlinear modulation method of crack detection, *NDT&E International*, 2009, Vol. 42. [http://vladimir.zaitsev.net/articles/2006\\_nmod\\_NDT\\_zaits.pdf](http://vladimir.zaitsev.net/articles/2006_nmod_NDT_zaits.pdf)
- [7] V. Kazakov, P. A. Johnson: Modulation Acoustic Method of Crack Location. 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics Moscow, Russia August 2002
- [8] Hajek, K., Sikula, J., New possibilities to increase sensitivity of the ultrasound non-linear modulation methods. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, Vol. 6, Nos. 3/4, 2011.







# PRINCIPY LOKALIZACE DEFEKTU V NELINEARNÍ ULTRAZVUKOVÉ SMĚŠOVACÍ IMPULSNÍ SPEKTROSKOPII PRINCIPLES OF A DEFECT LOCALISATION IN NONLINEAR ULTRASONIC MIXING IMPULSE SPECTROSCOPY

**Karel HÁJEK, Valeria NENAKCHOVA**

Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně  
Contact e-mail: karel.hajek@unob.cz

## **Abstrakt**

*Dosud publikované principy nelineární ultrazvukové směšovací impulsní spektroskopie (NUMIS) ukazují velké potenciální výhody této metody v porovnání s jinými nelineárními ultrazvukovými metodami, a to jak z hlediska citlivosti, tak i pro možnosti rychlé, jednoduché a přesné lokalizace poruch. Příspěvek rozpracovává pro tuto metodu principy a algoritmy výpočtu místa defektu za předpokladu bodové idealizace vysílačů a přijímačů ultrazvukového signálu. Při postupném zvyšování zpoždění druhého budícího impulsu tak lze získat během několika sekund obraz rozložení defektů na testovaném tělese v 2D rovině.*

**Klíčová slova:** nelineární ultrazvuková směšovací spektroskopie, citlivost, impulsní buzení, lokalizace

## **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. This paper elaborates on the principles and algorithms of calculation of the defect place for this method. The point idealization of ultrasonic transducers and receivers are supposed for this aim. A gradual increase in delay of the second excitation pulse can to obtain the image distribution of defects on the tested body in a 2D plane in few seconds.*

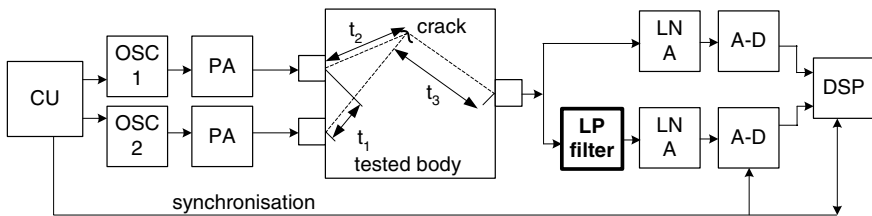
**Key words:** nonlinear ultrasonic mixing spectroscopy, sensitivity, impulse excitation, localization.

## **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 následné přesné lokalizace.

Rozborem těchto problémů a porovnání jednotlivých principů se věnoval článek [8], který ukázal nesporné potenciální výhody směšovacích 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 vln i dostatečně přesnou lokalizaci.



Obr. 1. Principiální blokové schéma nelineární ultrazvukové směšovací impulsivní spektroskopické metody [8].

Fig. 1 Principal block diagram of nonlinear ultrasonic mixing impulse spectroscopic method [8].

Další rozbor principů této metody ukázal potřebu podrobné analýzy časových a geometrických poměrů rozmístěných vysílačů a přijímačů na testovaném tělese (zatím uvažována 2D deska) a v návaznosti na to i způsobů výpočtů souřadnic defektu pro potřeby lokalizace, což je předmětem tohoto článku.

## 2. Geometrické a časové relace v systému lokalizace

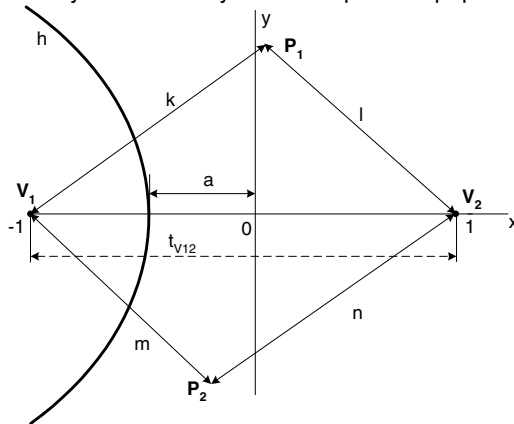
Základní geometrické uspořádání rovinné 2D úlohy s bodovým zjednodušením míst ultrazvukových snímačů a vysílačů je naznačeno na obr. 2. Dva vysílače ultrazvukové měniče jsou umístěny v bodech  $V_1$  a  $V_2$ . Oproti původnímu článku [8] jsou uvažovány dva ultrazvukové přijímače  $P_1$  a  $P_2$ , protože použití pouze jednoho přijímače neumožňuje jednoznačnou lokalizaci místa. Pro jednoduchost jsou geometrické rozměry normalizovány tak, aby vysílače  $V_1$  a  $V_2$  byly umístěny na x-ové ose v hodnotách  $-1$  a  $1$ . Jejich normované geometrické vzdálenosti 2 odpovídá doba  $t_{V12}$  šíření ultrazvuku mezi oběma vysílači (naznačeno na obr. 1).

Jak již bylo řečeno, základní princip metody spočívá v tom, že jsou vysílány z obou vysílačů dva burstové impulsy s kmitočty  $f_1$  a  $f_2$  se zpožděním  $t_2$  impulsu  $V_1$  oproti  $V_2$ , které lze normovat podle vztahu

$$2a = t_2 / (2t_{V12}), \quad (1)$$

viz obr. 3 a, b). Geometrické místo bodů setkání čel vln obou vyslaných impulsů pak vytváří hyperbolu  $h$ , jak je to naznačeno na obr. 2. Tato hyperbola má ohnisko v bodě vysílače  $V_1$  (normovaná souřadnice 1) a poloosu  $a$ . V případě opačného vzájemného

časového posuvu mezi vysílači  $V_1$  a  $V_2$  bude řešením druhá větev hyperboly v pravé polorovině a řešení úlohy bude zcela symetrické k prvnímu případu.



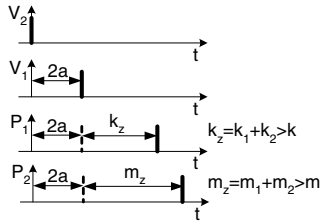
Obr. 2 Základní normované geometrické poměry mezi ultrazvukovými vysílači a přijímači.  
Fig. 2 Basic normalized geometrical relations between ultrasonic transmitters and receivers.

Dále je důležité vyjádření souřadnic bodů přijímačů  $P_1$  a  $P_2$ , které získáme z měření doby šíření ultrazvuku z vysílačů do přijímačů. Jejich podělením základní dobou  $t_{V12}/2$  získáme normované vzdálenosti  $k$ ,  $l$ ,  $m$  a  $n$ . Z definovaných souřadnic obou vysílačů  $(-1;0$  a  $1;0)$  a znalosti normovaných délek  $k$ ,  $l$  (trojúhelník  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $P_1$ ) a normovaných délek  $m$ ,  $n$  (trojúhelník  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $P_2$ ) získáme normované souřadnice obou přijímačů.

### 3. Analýza geometrických a časových relací pro body defektů

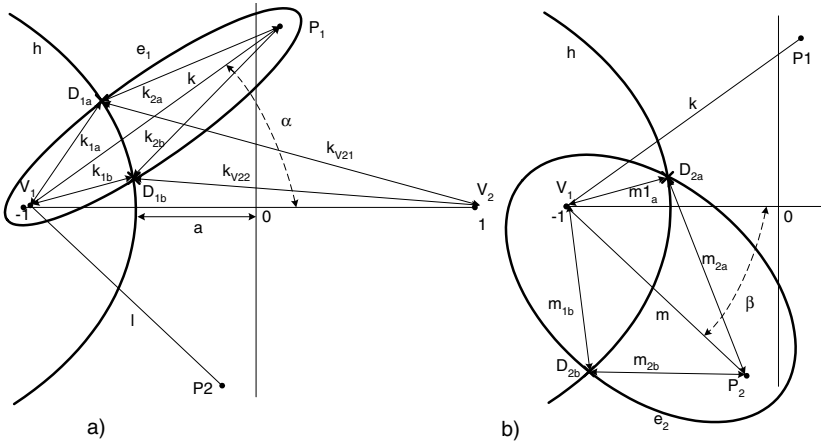
Nyní uvažujme, že se obě postupující vlny setkaly v bodě defektu na dané hyperbole. Proto se tento bod stane zdrojem ultrazvukového signálu rozdílového kmitočtu  $f_d$ , který se šíří všemi směry. Přijímači  $P_1$  a  $P_2$  pak naměříme po odpovídajícím čase šíření začátky impulsů s intermodulačním kmitočtem, jak je to znázorněno v časové ose na obr. 3 c) a d). Potenciální místa bodů defektu  $D_{1a}$  a  $D_{1b}$  z hlediska přijímače  $P_1$  jsou ukázány na obr. 4a). Je zřejmé, že stačí uvažovat dobu šíření signálu z vysílače  $V_1$  do přijímače  $P_1$ , čemuž na obr. 2 c) odpovídá úsek  $k_2 = k_1 + k_2$ . To vychází z úvahy, že v místech možného defektu na hyperbole  $h$  vždy bude časový rozdíl mezi signály z vysílačů  $V_1$  a  $V_2$  odpovídat normované hodnotě  $2a$ . Při tom pro dobu šíření z  $V_1$  přes defekt  $D_{1a}$  nebo  $D_{1b}$  (a tím i vznik rozdílového kmitočtu) do přijímače  $P_1$  platí

$$k_2 = k_1 + k_2 \geq k. \quad (2)$$



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

V případě rovnosti  $k_z = k$  by místo defektu muselo být na průsečíku spojnice  $V_1 - P_1$  s hyperbolou. Při podmínce  $k_z > k$  tvoří geometrická místa možných defektů definičně elipsu  $e_1$  s ohnisky  $V_1$  a  $P_1$  a body potenciálního defektu  $D_{1a}$  a  $D_{1b}$  se musí nacházet na průsečíku této elipsy  $e_1$  s hyperbolou  $h$ . Shodné jsou doby šíření signálu přes bod  $D_{1a}$  resp.  $D_{1b}$  jak z vysílače  $V_1$  ( $k_{1a} + k_{2a} = k_{1b} + k_{2b}$ ), tak i z vysílače  $V_2$  ( $k_{V21} + k_{2a} = k_{V22} + k_{2b}$ ).



Obr.4 Normované geometrické poměry pro možná místa defektů:  
a) řešení pro přijímač  $P_1$ , b) řešení pro přijímač  $P_2$ .  
Fig.4 Normalized geometrical relations for potential places of defects:  
a) solution for receiver  $P_1$ , b) solution for receiver  $P_2$ .

Řešení potenciálních míst defektu z hlediska přijímače  $P_2$  jsou ukázány na obr. 4b) a je analogické předchozímu případu. V tomto případě doba šíření signálu z vysílače  $V_1$  do přijímače  $P_2$  odpovídá úseku  $m_z = m_1 + m_2$  (obr. 2 d) a tento úsek musí být roven či větší základní době šíření  $m$ . Proto v tomto případě geometrická místa možných defektů vytvářejí elipsu  $e_2$  s ohnisky  $V_1$  a  $P_2$  a body potenciálního defektu  $D_{2a}$  a  $D_{2b}$  se musí tedy nacházet na průsečíku této elipsy  $e_2$  s hyperbolou  $h$ .

Výsledná poloha skutečného místa defektu musí odpovídat oběma případům signálů do přijímačů  $P_1$  a  $P_2$  (obr. 3 c,d). V případě, že jde o setkání čel obou vln v místě defektu, získáme jediné řešení, které odpovídá těmto oběma výsledným

signálům z přijímačů  $P_1$  a  $P_2$ . V diskutovaném případě na obr. 4 jde o bod  $D_{1b}$ , protože je totožný s bodem  $D_{2a}$ . Protože impulsy nejsou nekonečně krátké, může dojít v místě defektu k setkání čelní vlny od jednoho vysílače s dalšími vlnami již probíhajícího druhého impulsu druhého vysílače. V tom případě ale nebudou platit výše uvedené podmínky pro oba signály a nenalezneme bod defektu společný pro oba přijímače.

#### 4. Řešení souřadnic potenciálních míst defektů $D_a$ a $D_b$

Vstupními údaji pro toto řešení jsou základní normované vzdálenosti mezi jednotlivými senzory ( $k, l, m, n$ ), normovaný časový posuv mezi oběma signály  $2a$  a naměřené intervaly  $k_z$  resp.  $m_z$  (viz obr. 3 c,d). Úhel natočení elipsy  $\alpha$  vyjádříme podle kosinové věty

$$\alpha = \arccos \frac{4 + k^2 - l^2}{4k} . \quad (3)$$

Hodnoty parametrů hyperboly jsou dané, když  $e_h = 1$ ,  $a_h = a$ . Parametry elipsy vyjádříme ze vztahů

$$e_e = k/2 , \quad (4)$$

$$a_e = k_z/2 , \quad (5)$$

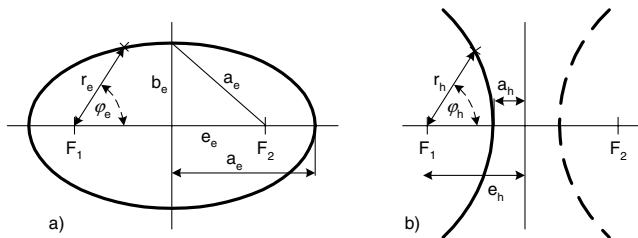
Jádrem řešení je hledání souřadnic bodů průsečíků hyperboly a elipsy. Vzhledem k tomu, že elipsa i hyperbola mají společné jedno ohnisko a hlavní osa elipsy je natočená oproti hyperbole o úhel  $\alpha$ , je vhodné použít pro vyjádření hyperboly a elipsy polární souřadnice. Pro elipsu podle obr. 5 a) lze použít rovnici

$$r_e = \frac{b_e^2}{a_e - e_e \cos \varphi_e} = \frac{a_e^2 - e_e^2}{a_e - e_e \cos \varphi_e} . \quad (6)$$

Pro vyjádření hyperboly (obr. 5 b) lze použít rovnici v tvaru

$$r_h = \frac{b_h^2}{a_h + e_h \cos \varphi_h} = \frac{a_h^2 - e_h^2}{a_h + e_h \cos \varphi_h} , \quad (7)$$

kde v našem modelu je  $e_h = 1$ .



Obr. 5 Základní popis elipsy a hyperboly.

Fig. 5 Basic description of ellipse and hyperbola.

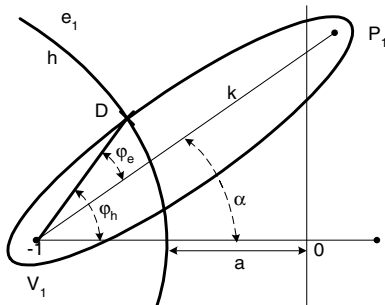
V případě neotočené elipsy oproti hyperbole ( $\alpha = 0$ ) platí pro body průsečíků rovnost vzdáleností a úhlů  $r_e = r_h$  a  $\varphi_e = \varphi_h$ . V tomto případě z rovnic (3) a (4) za předpokladu  $e_h = 1$  vyplývá

$$\varphi = \arccos \frac{a_c(1 - a_h^2) - a_h(a_c^2 - e_c^2)}{a_c^2 - e_c^2 + a_c(1 - a_h^2)} \quad (8)$$

Pro elipsu potočenou o úhel  $\alpha$  podle obr. 6 její rovnice (6) přechází v tvar

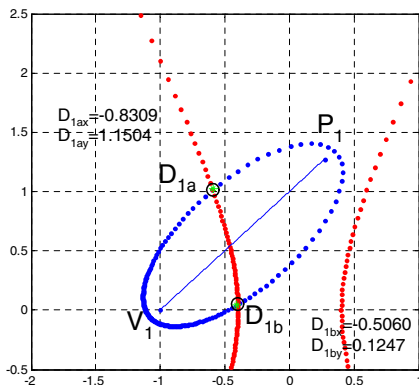
$$r_c = \frac{a_c^2 - e_c^2}{a_c - e_c \cos(\varphi_h - \alpha)} \quad (8)$$

V tom případě ale soustava rovnic (4) a (6) nemá jednoduché explicitní řešení a je výhodné použít numerické iterační řešení, kde  $\varphi_h$  měníme v intervalu  $(-\pi, \pi)$ .



Obr. 6 Definice úhlů pro řešení průsečíku hyperboly a potočené elipsy.  
Fig. 6 Definition of angles for solution of intersection of hyperbola and ellipse.

Algoritmus takového řešení byl sestaven v programu Matlab a příklad řešení pro  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_e = 1$ ,  $e_e = 0,9$  a  $a_h = 0,5$  s nalezením obou průsečíků je ukázán na obr. 7.



Obr. 7 Příklad řešení průsečíku hyperboly a potočené elipsy pro  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_e = 1$ ,  $e_e = 0,9$  a  $a_h = 0,5$ .  
Fig. 7 Example of solution of intersection of hyperbola and shifted ellipse for  $\alpha = 60^\circ$ ,  $a_e = 1$ ,  $e_e = 0,9$  a  $a_h = 0,5$ .

## 5. Závěr

Článek ukázal principy a výpočetní algoritmy pro řešení místa defektu pro nově vyvíjenou NDT metodu nelineární ultrazvukové směšovací impulsní spektroskopie (NUMIS), která by měla mít vyšší citlivost a jednoduchý způsob lokalizace poruch v porovnání s jinými metodami NUS.

Je ale nutno konstatovat, že dané řešení bylo odvozeno za zjednodušujících podmínek bodových zdrojů ultrazvukových signálů a přijímačů a za předpokladu bodového defektu. Pro praktickou aplikaci bude nutno algoritmy jednak doplnit o vymezení reálných oblastí splnění podmínek existence defektu a analyzovat vlivy všech faktorů na přesnost lokalizace.

Tato práce byla podpořena prostředky projektu pro rozvoj organizace PRO K217.

## Literatura

- [1] K. E.-A. Van Den Abeele, P. A. Johnson, A. Sutin: 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, <http://www.lanl.gov/orgs/ees/ees11/geophysics/nonlinear/2000/NWMS.pdf>
- [2] Dos Santos, S. Vejvodova S., Prevorovsky, Z.: Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy in Symbiosis with Time Reversal for Localization of Defects: Tr-News, [http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/DosSantos\\_10.pdf](http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/DosSantos_10.pdf)
- [3] K. Hajek, M. Korenska, J. Sikula: Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Fired Roof Tiles, 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), <http://www.ndt.net/article/ndcm2011/papers/A-03-1.pdf>
- [5] L. Pieczonka, W. J. Staszewski, F. Aymerich, T. Uhl: Analysis of Nonlinear Vibro-Acoustic Wave Modulations Used for Impact Damage Detection in Composite Structures, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM 2012, Materials and Qualification <http://www.ndt.net/article/ewshm2012/papers/th2a2.pdf>
- [6] Zaitsev, V., Matveev, L. and Matveev, A.: On the ultimate sensitivity of nonlinear modulation method of crack detection, *NDT&E International*, 2009, Vol. 42. [http://vladimir.zaitsev.net/articles/2006\\_nmod\\_NDT\\_zaits.pdf](http://vladimir.zaitsev.net/articles/2006_nmod_NDT_zaits.pdf)
- [7] V. Kazakov, P. A. Johnson: Modulation Acoustic Method of Crack Location. 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics Moscow, Russia August 2002
- [8] Hajek, K., Sikula, J., New possibilities to increase sensitivity of the ultrasound non-linear modulation methods. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, Vol. 6, Nos. 3/4, 2011.







## VYUŽITÍ KONTAKTNÍHO PROFILOMĚRU K MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH ZMĚN KOVOVÝCH VZORKŮ PO LASEROVÉM OPRACOVÁNÍ

### USING THE CONTACT PROFILOMETER TO MEASURE THE DIMENSIONAL CHANGES OF METAL SAMPLES AFTER LASER TREATMENT

Helena HIKLOVÁ, Hana CHMELÍČKOVÁ, Martina HAVELKOVÁ,  
Lenka ŘIHÁKOVÁ

Společná laboratoř optiky, 17. listopadu 50a, 772 07 Olomouc  
Contact e-mail: [helena.hiklova@upol.cz](mailto:helena.hiklova@upol.cz)

#### **Abstrakt**

*V posledních desetiletích jsme svědky narůstajících požadavků na kvalitu nejrůznějších výrobků. S tím souvisí bouřlivý rozvoj metod, které umožňují spolehlivou kontrolu součástí bez jejich sebemenšího poškození. V současnosti existují desítky metod, které jsou schopny bezkontaktně měřit, zkoušet a následně zobrazovat, vyhodnocovat a odkrývat vady nejen na povrchu, ale i uvnitř výrobku. V této záplavě možností se může zdát, že kontaktní zařízení patří mezi zastaralé přístroje, které brzy zcela vymizí. V mnoha odvětvích lidské činnosti však mají stále své místo a i nyní jsou často nenahraditelné. I ony prošly dlouhým vývojem a některé jejich vlastnosti jako rozlišení nebo rozsah měření jsou takové, že mohou často konkurovat bezkontaktním přístrojům nebo jsou alespoň v mnohých případech více než dostatečné. K dalším přednostem kontaktních zařízení patří jednoduchost obsluhy, rychlost měření a vyhodnocování a schopnost snímat povrch pevných těles bez nutnosti jakékoli úpravy kontrolovaného povrchu. V příspěvku je uvedeno několik konkrétních příkladů využití kontaktního profiloměru firmy Taylor Hobson pro mapování povrchu kovových vzorků zpracovaných moderními technologiemi laserového kalení a přetavování, kdy vlivem změn původní krystalografické struktury dojde k objemovým změnám v místě interakce laserového svazku s materiálem. Pro přesné měření těchto rozměrových a objemových změn se ukazuje kontaktní profiloměr jako nejlepší řešení.*

**Klíčová slova:** kontaktní měření, drsnost povrchu, mapování povrchu, laserové opracování

#### **Abstract**

*In recent decades we have witnessed the increasing demands on the quality of various products. The rapid development of related methods that enable reliable control components without the slightest damage is closely related. At present, there are dozens of methods that are capable of non-contact measured, tested, and subsequently displayed, analyzed and reveal defects not only at the surface but also inside the product. In this abundance of options it may seem that contact equipments are obsolete devices that will soon disappear*

*altogether. In many sectors, however, they still have their place and they are often irreplaceable. Contact devices have undergone a long evolution similar to other non-contact devices and methods and some of their characteristics such as resolution and measurement range achieve such value they can often compete non-contact devices, or they are sufficient at least. Another advantage of the contact facilities includes ease of use, velocity of measurement and evaluation, and the ability to scan the solid product without any surface treatment. The paper presents several specific examples of the use of contact profilometer Taylor Hobson. It is used here for mapping of the metal surface samples after laser hardening and remelting. There is a change in the volume of the sample after laser material processing. The contact profilometer seems to be the best choice for measuring of modification of volume and dimensions.*

**Key words:** Contact measuring, Surface roughness, Surface mapping, Laser treatment

## 1. Úvod

Topografie povrchu pevných těles, konkrétněji průmyslových komponent, je velice důležitá při specifikaci jejich funkce. Selhání funkčních součástí je ve většině případů zapříčiněno buď narušením povrchu již ve výrobě průmyslovým zpracováním nebo postupnými změnami mechanických vlastností povrchu v důsledku opotřebení.

Důraz je kladen na životnost, spolehlivost ale i vzhled prvku. Proto je stále snahou konstruktérů, techniků, výzkumných pracovníků i uživatelů získat co nejpodrobnější a nejspolehlivější obraz povrchu pevných těles, především funkčních ploch. Vhodně vytvořený obraz povrchu vypovídá nejen o rozměrové správnosti ale i o dalších vlastnostech prvku, ve strojírenské praxi například o pevnosti, průběhu opotřebení, tuhosti spojenj, hlučnosti nebo odolnosti proti korozi.

Důležitou roli proto hraje kontrola jakosti vyrobených součástí, která je podmíněna kvalitní metrologií, konkrétně tvaru, vlnitosti a drsnosti jejich povrchů. Měřicí přístroje, kterých je k tomuto účelu nabízena celá řada, lze rozdělit na bezkontaktní neboli optické využívající interferometrii, laserového fokusovaného záření apod. a kontaktní, které pomocí hrotu snímají povrch tělesa. K nim přísluší i kontaktní profilometr Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson.

## 2. Přístroj

Form Talysurf Series 2 (FTS2) představuje hardwarový a zároveň softwarový nástroj pro kontaktní, induktivní měření tvaru, vlnitosti a drsnosti povrchů pevných těles.

Fakt, že přístroj je kontaktní profilometr, znamená, že snímání povrchu se uskutečňuje hrotem, který přejíždí po určené dráze. Hrot je tak jediným aktivním kontaktem mezi přístrojem a povrchem a je proto velmi důležitou částí systému. Jeho rozměry a tvar jsou faktory, které mají zásadní vliv na informace, jež přístroj shromažďuje. Zde užívaný hrot je jeden z doporučených standardní normou ISO pro měření drsnosti, je to konický hrot s vrcholovým úhlem 90° a sférickým vrcholem o poloměru 2 $\mu$ m. Pro takové hroty se vždy volí co nejtvrdší materiály s nízkým koeficientem otěru, v přístrojích Talysurf jsou pro naše účely z diamantu, popřípadě rubínu či slitiny s velkým stupněm tvrdosti. Hrot je umístěn na raménku indukčního snímače a vyvážený tak, aby síla, kterou se hrot opírá o povrch, byla jen nezbytně nutná k tomu, aby při měření hrot neztratil ani na okamžik kontakt s měřeným povrchem. Konkrétně by neměla být podle výrobce větší, než 2 mN.

Naše konfigurace je vhodná pro měření přibližně rovinných předmětů, jelikož maximální vertikální rozsah je 0,8 mm. Pro vertikálně členitější povrchy máme

k dispozici tři raménka s větším rozsahem (27,8 mm), jejich použití je omezeno na stanovení tvaru zkoumaného předmětu [1].

Pro následnou analýzu, což je vyhodnocení parametrů drsnosti, vlnitosti nebo přímosti povrchu přístroj, řízený programem ULTRA Surface V5.0.1, sejme pomocí hrotu profil povrchu v horizontálním směru zvolené délky v rozsahu 0,1 mm – 120 mm. K dispozici jsou i posuvy v kolmém horizontálním směru, měřením zvoleného počtu paralelních řezů dostaneme názorný trojrozměrný obraz povrchu. K vyhodnocení trojrozměrného obrazu pak slouží program 3D Surface Topography Software Talymap V2, který je rovněž součástí naší softwarové vybavy.

Celé zařízení je umístěno na antivibračním stole a je spolehlivě možno na něm měřit při teplotách 15 až 30 °C a relativní vlhkosti 10 % až 80 %.

### 3. Možnosti přístroje

Z uložených naměřených dat lze získat libovolné parametry jak drsnosti, tak vlnitosti a přímosti, takže se jich uživateli nabízí několik desítek. Stačí si pak už jen vybrat takové, které potřebujeme v konkrétní aplikaci.

Parametry drsnosti mají prefix R, vlnitosti W, základní analýza přímosti P. Dělíme je na amplitudové, definované naměřenými daty ve vertikálním směru, distanční, definované daty v horizontálním směru a hybridní, ty jsou kombinací předchozích.

Nejprve si popíšeme analýzu drsnosti povrchu.

Drsností rozumíme ty nejdrobnější, často mikroskopické, odchylky od základního tvaru, způsobené buďto použitým nástrojem nebo brusivem při finálním opracování, nebo přímo molekulární strukturou materiálu.

Pro ilustraci uvedme alespoň definice nejužívanějších parametrů drsnosti. Parametr  $R_a$  je amplitudový, je definován jako střední aritmetická úchylnka profilu v rozsahu základní délky. Dalším z nejčastěji používaných amplitudových parametrů je  $R_q$ , někdy značen jako  $R_{ms}$ . Je definován jako střední kvadratická úchylnka profilu.

V nabídce parametrů jsou i takové, které se užívají jen ve speciálních případech, např. parametr  $R_{HSC}$  užívaný někdy v automobilovém průmyslu pro cylindrické povrchy, parametr  $R_{pc}$  používaný v tiskařském průmyslu pro výběr správného papíru pro tisk, resp. správného určení optimální hustoty barev a inkoustů pro daný papír. Z dalších uvedme ještě alespoň parametr  $R_{dq}$ , užívaný pro extrémně hladké povrchy optické nebo elektronické, kde jsou důležité i velmi malé změny na povrchu. Výrobce udávána nepřesnost stanoveného amplitudového parametru je  $2\%+4\text{nm}$ , což je ve shodě s normou ISO.

Příklad využití měření drsnosti v defektoskopii je například při kontrole vrchní vrstvy kloubních náhrad, kde je nutno přísně sledovat drsnost povrchu z důvodu optimální adheze a tím správné práce implantátů. Další případ, kdy se kontroluje, zda parametry drsnosti spadají do daného intervalu, je například u povrchu součástek před provedením nátěru.

Vlnitostí povrchu nazveme část textury povrchu, ze které teprve vystupují nerovnosti, zahrnuté pod pojem drsnost. Často mívá periodický charakter, je zapříčiněna vibracemi pracovního nástroje, jeho nevyváženým upevněním, nebo napětím v materiálu. Analýzu použijeme, chceme-li odhalit a eliminovat tyto nedostatky ve výrobě.

Tvarem rozumíme celkový tvar objektu bez ohledu na nerovnosti, spadající do uvedených předchozích dvou kategorií.

Z naměřených dat lze provádět distanční měření, stanovit úhel, popřípadě odchylku dvou rovin, poloměr kulového povrchu, tloušťku tenké vrstvy apod. Z mnoha aplikací uveďme třeba měření tloušťky nanosených spojů nebo leptaných drážek a vrstev na plošných spojích, kde se pečlivě hlídá množství použitých drahých kovů. Další využití je při kontrole tvaru krytu reflektorů, kde se zkoumá poloměr válcovitých úseků pro kontrolu správné fokusace světla.

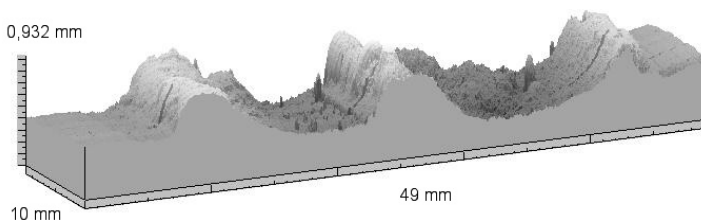
#### 4. Příklady měření

Nyní se již budeme věnovat dvěma konkrétním případům využití kontaktního profiloměru FTS2 při vyhodnocování zkoušek prováděných na ocelových vzorcích zpracovaných moderními technologiemi laserového kalení a přetavování. Vlivem změn původní krystalografické struktury dojde k objemovým změnám v místě interakce laserového svazku s materiálem. Laserové kalení a přetavování řadíme ke skupině metod povrchového opracování s cílem změnit mikrostrukturu v oblasti o hloubce několika milimetrů pod povrchem vysoce namáhaných kovových strojních součástek a zvýšit tak jejich mechanickou a chemickou odolnost. Na rozdíl od metod konvenčních (plamen, indukce, elektrický oblouk) jsou rychlosti dosažení transformační resp. tavicí teploty a následného ochlazování odvodem tepla do objemu materiálu velmi vysoké. Vstup tepla je omezen pouze na přesně definovanou oblast, určenou rozměry laserového svazku, výkon kalení je v průběhu procesu modulován pomocí pyrometru v reálném čase tak, aby nedocházelo k nadměrnému tepelnému ovlivnění v částech s menším objemem materiálu. Protože rozměry příčného profilu laserového svazku jsou pro aplikace povrchového opracování upraveny optickou soustavou většinou na obdélníkový tvar o rozměrech např. 23 mm x 5 mm, je pro opracování souvislých ploch potřeba aplikovat několik rovnoběžných stop s optimální mírou překrytí. Při tomto procesu dochází k opětovnému ohřevu okrajové části již jednou přetaveného materiálu. Dalším jevem je proudění v generované tavenině ve směru ze středu stopy k okrajům a dále ke dnu s návratem do středu nebo naopak od okrajů do středu stopy v závislosti na znaménku gradientu povrchového napětí, v důsledku kterého dochází při zpětné krystalizaci materiálu k deformacím povrchu.

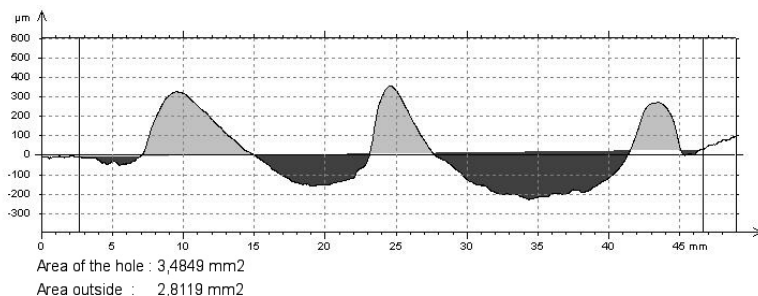
Vliv materiálových vlastností na výslednou mikrostrukturu a tvrdost jak v jednotlivých stopách tak v oblasti překrytí byl ověřován na vzorcích tří různých druhů materiálů (litina s kuličkovým grafitem, nelegovaná konstrukční ocel a zušlechťená nástrojová ocel) při konstantních parametrech procesu [2]. Ve všech třech vzorcích se v přetavené zóně byl identifikován martenzit (přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ ), další fáze byly zastoupeny v závislosti na procentuálním obsahu uhlíku v základním materiálu, měření mikro-tvrdosti potvrdila nárůst mechanické odolnosti.

Pro správnou funkci strojní součástky je rovněž důležitá informace o deformaci povrchu, tedy informace o rozměrových i objemových změnách vzniklých v důsledku výše popsaného opracování. Pro ilustraci je uveden alespoň jeden příklad určení objemových změn. Na Obr. 1 je část přetaveného povrchu vzorku nástrojové oceli v xonometrickém zobrazení vytvořeném postupným skenováním povrchu hrotem profiloměru. Uvedený obrázek vznikl naskenováním 501 profilů. Na Obr. 2 je černá křivka vypočítaný průměrný profil z oněch 501 profilů. Šedé plochy pak představují změny tvaru povrchu oceli po kalení vzhledem k původnímu povrchu. Údaje pod grafem zde udávají velikost ploch oblastí pod původním povrchem vzorku („Area of the hole“ - tmavší plochy) a nad původním povrchem vzorku („Area outside“ –

světřejší plochy). Z uvedených údajů vyzovujeme, že při popsaném přetavování nástrojové oceli došlo k mírnému úbytku materiálu.



*Obr. 1 3D zobrazení povrchu přetavené stopy nástrojové oceli*  
*Fig. 1 3D image of the tool steel remelted surface track*

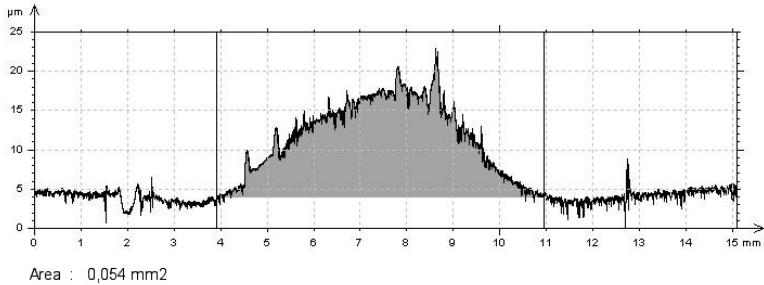


*Obr. 2 Střední profil přetavené stopy nástrojové oceli*  
*Fig. 2 Mean profile of the tool steel remelted track*

Druhým obdobným příkladem je mapování povrchu ocelových vzorků kalených laserem ve firmě MATEX PM. Při kalení oceli (v našem případě šlo konkrétně o ocel 1.2311 a 12050) dochází ke strukturálním změnám ovlivněné oblasti a ty mají za následek i změnu objemu [3]. Při hledání zařízení, které by měření bylo schopné provést, se právě kontaktní profiloměr ukázal jako nejlepší řešení. Jelikož bylo potřeba zmapovat úsek dlouhý nejméně 7 mm, pro mnoho optických přístrojů je takový rozměr za hranicemi velikosti jejich zorného pole. Kontaktní měření s přístrojem, jehož posuv může být až 120 mm, krok měření je 0,25 μm a rozlišení ve vertikálním směru v našem případě bylo 16 nm, bylo velmi rychlé a vzhledem u vedeným parametrům i dostatečně přesné. Několik lineárních měření a následné vyhodnocení v programu TalyMap zmíněném už dříve dalo jasné a rychlé odpovědi na otázky nárůstu výšky kaleného materiálu i změny objemu. Na Obr. 3 je pro ilustraci příkladu fotografie jednoho ze vzorků a Obr. 4 je jeden z vybraných profilů i uvedenou hodnotou plochy řezu zakalené oblasti.



*Obr. 3 Vzorek oceli s laserově zakalenou stopou*  
*Fig. 3 Sample of the tool steel with hardened track*



*Obr. 4 Plocha řezu kolmého k zakalené stopě*  
*Fig. 4 Cross-section of the hardened track*

### Závěr

Pro vysoké rozlišení, velký rozsah a rychlost měření se kontaktní induktivní profilometrie ukázala jako vhodný nástroj pro měření profilů pevných povrchů, například laserem přetavených stop. Vzorky není nutno pro měření nijak upravovat a edochází k jejich mechanickému poškození. Ze získaných dat je možno díky kvalitnímu software vytvářet nejrůznější plošná i prostorová zobrazení profilu povrchu, od reálného zobrazení po grafické průběhy profilu v libovolném řezu. Z dat je možno provést výpočet drsnosti povrchů, metrologické výpočty, zde konkrétně potvrdit úbytek popřípadě nárůst objemu materiálu při rekrystalizaci povrchové vrstvy kovových vzorků ovlivněných laserovým svazkem.

### Reference:

- [1] HAVELKOVÁ, M., HIKLOVÁ, H. Historie a současnost mapování pevných těles. *Jemná mechanika a optika*. 2013, No. 4, s. 114-117. ISSN 0447-6441.
- [2] CHMELÍČKOVÁ, H.; TOMÁŠTÍK, J.; ČTVRTLÍK, R.; ŠUPÍK, J.; NĚMEČEK, S.; MÍŠEK, M. High power diode laser remelting of metals. In *Book of Abstracts of 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13)*, July 15-19, 2013, Prague, Czech Republic, p. 46.
- [3] ŠEBESTOVÁ, H.; NOŽKA, L.; CHMELÍČKOVÁ, H.; ŘIHÁKOVÁ, L. Spektroskopické monitorování procesu svařování pulsním laserem. In NĚMEČEK, S. (ed.) *Využití laseru v průmyslu*, 18.-20.3. 2013, Plzeň. Plzeň: 2013, Tribun EU s. r. o., pp. 59-66. ISBN 978-80-263-0359-6.



## **DETECTION AND LOCALIZATION OF INTERNAL VOIDS AND IMPERFECTIONS IN THE COMPOSITE STRUCTURES USING MODAL DATA AND SPATIAL WAVELET TRANSFORM**

**Andrzej KATUNIN \***

\* Institute of Fundamentals of Machinery Design, Silesian University of Technology,  
Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, Poland  
Contact e-mail: [andrzej.katunin@polsl.pl](mailto:andrzej.katunin@polsl.pl)

### **Abstract**

*Polymeric composites are widely used in the engineering design, primarily in aircraft, aerospace and automotive industries, due to the attractive properties, e.g. high strength and simultaneously low weight, resistance to the corrosion and some chemical environments. However, during the manufacturing process and further operation of the composite structural elements several imperfections may occur. During the manufacturing process the technology fault may cause the occurrence of internal voids in the manufactured structures, which will be undetectable by vision inspection. In the operation processes the internal damages in the form of delaminations may occur during impacts or fatigue loadings. Therefore it is suitable to develop the non-destructive methods for the monitoring and quality control of such structures, which allow for detection and precise localization of the internal imperfections. The proposed damage detection and localization method is based on non-destructive and non-contact modal analysis, during which the deflections of modal shapes are collected. Then, the acquired modal shapes were analyzed using discrete wavelet transform in order to identify non-monotonocities in the deflection signals. The presence of the damage results in the local decrease of the stiffness of a structure and thus influences on the deflections distributions in the modal shapes. The study was carried out on the numerical model of a laminated composite plate. The analysis of the damage position as well as damage size along the thickness direction of a structure was performed. The influence of the measurement noise was also considered and analyzed. The great sensitivity to the damages and simplicity of measurements allow to apply the method in the industrial problems of monitoring and inspection.*

**Key words:** *composite structures, damage detection and localization, spatial wavelet transform, modal analysis*

### **1. Introduction**

An intensive application of the wavelet analysis in the structural diagnostic problems became popular within the last decade due to the outstanding properties of the wavelet transform, i.e. its sensitivity to even smallest changes in the analyzed signal of displacements caused by macroscopic imperfections, both external and internal. Several damage detection algorithms in 2D structures using the spatial wavelet

transform were presented to-date [1-4]. The authors of these studies used continuous wavelet transform (CWT) with various types of wavelets for the damage detection and localization. The application of separable wavelets during the analysis allows to obtain their 2D analogues by the tensor product of all combinations of scaling and wavelet functions, which results in one 2D scaling function and three 2D directional wavelet functions. However, previous studies show [5] that the discrete wavelet transform (DWT) is more computationally efficient without the loss of sensitivity and accuracy, while the B-spline wavelet were applied. Continuing the development of the proposed algorithm [5] it is suitable to apply the tensor product B-spline wavelets of fractional order developed by Unser and Blu [6]. The application of such wavelets allows for tuning the wavelet order in the manner that the detectability of the damages will be the highest.

In the present study the numerical models of composite plates with multiple internal defects were used in order to analyse the damage detection and localization efficiency of the proposed algorithm. Several case studies were considered, i.e. the different locations of the simulated damages both in spatial dimensions and in the thickness direction, different sizes of damages and the analysis of influence of the measurement noise to the detectability of the damages. Basing on the selected case of the damaged structure the parameters of 2D B-spline wavelet of fractional order were tuned in order to obtain the most suitable results of the damage detection and localization.

## 2. Description of the analysis procedure

The finite element (FE) model of a composite square plate was prepared in MSC Marc/Mentat FE commercial software. The dimensions of a plate were as follows: the length of 0.3 m and the total thickness of 0.015 m. The composite consisted of 12 polymer layers reinforced by unidirectional fiberglass of the same thickness oriented following the structural formula:  $[0/60/-60]_{2,5}$ . The material properties were defined as transversal isotropic with the following element values of stiffness matrix:  $C_{11} = 48.01$  GPa,  $C_{12} = 19.98$  GPa,  $C_{13} = 6.592$  GPa,  $C_{33} = 11.42$  GPa,  $C_{44} = 3.533$  GPa,  $C_{66} = 14.01$  GPa and the mass density  $\rho = 1794$  kg/m<sup>3</sup>. Fixing boundary condition was defined on the boundaries of a plate. The spatial damages were modelled following the scheme presented in Fig. 1.

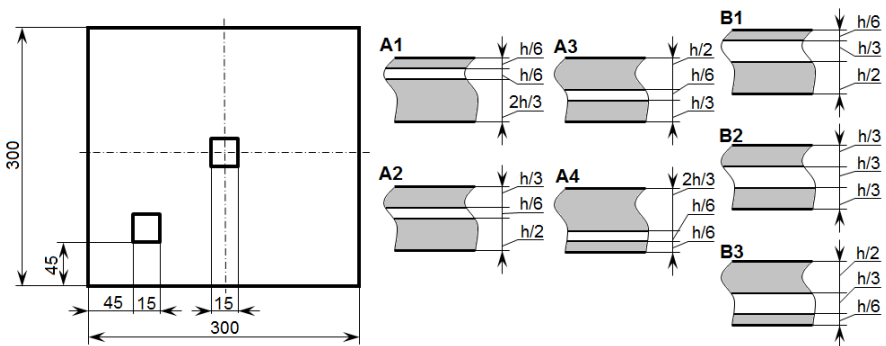


Fig. 1. Location of the internal damages and investigated case studies.



The numerical analysis was performed in order to evaluate first four modes of vibration. For further studies the nodal displacements of modal shapes in the direction of thickness axis of the plate were collected. The analyzed cases consisted of 64x64 measurement points.

The wavelet transform was performed using Matlab routines. The two-scale relations of the complex fractional B-spline scaling  $\beta$  and wavelet  $\psi$  functions are defined as follows:

$$\frac{1}{2} \beta_r^\alpha \left( \frac{x}{2} \right) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_r^\alpha [k] \beta_r^\alpha (x - k), \quad (1)$$

$$\psi_r^\alpha \left( \frac{x}{2} \right) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^k}{2^\alpha} \sum_{l \in \mathbb{Z}} \binom{\alpha + 1}{l} \beta_0^{2\alpha+1} (l + k - 1) \beta_r^\alpha (x - k), \quad (2)$$

where  $\alpha$  is the wavelet order and  $r$  is a shift parameter. Applying the permutation of tensor products to the 12 complex one-dimensional wavelets one can obtain 6 two-dimensional complex wavelets of fractional order (for instance see [7]).

Besides the analytic form the applied DWT could be expressed in the form of set of high-pass  $\tilde{h}$  and low-pass  $\tilde{g}$  filters. In the case of 2D DWT the selected pairs of filters were applied along the  $x$  and  $y$  directions. As a result of a single-level decomposition the four subbands could be obtained, namely  $\mathbf{a}(n)$  and  $\mathbf{d}^N(n)$ , where  $1 \leq n \leq 4$  and  $N = H, V, D$ , which denote horizontal, vertical and diagonal subbands, respectively. In order to consider all orientations sensitive to the singularities in the damage identification problem obtained the real parts of complex subbands  $\mathbf{w}^P$  are normalized:

$$\mathbf{W} = \sqrt{\sum_P \Re(\mathbf{w}^P)^2}, \quad (3)$$

The scheme of the damage identification algorithm was presented in Fig.2.

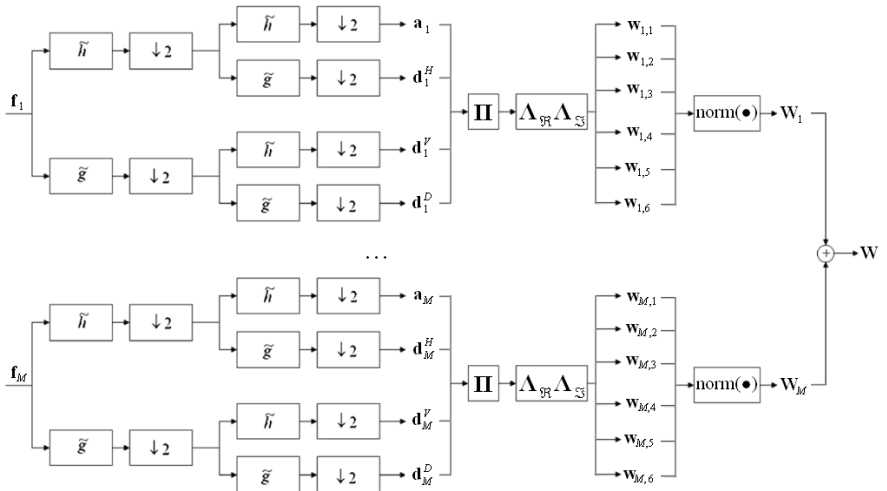
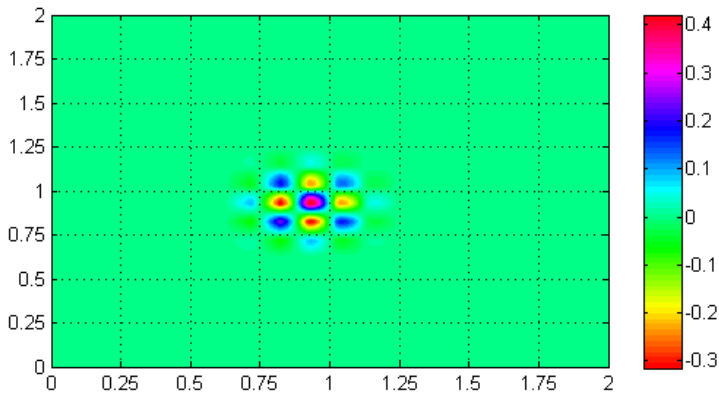


Fig.2. Scheme of the damage identification algorithm.

The symbol  $\downarrow 2$  denotes downsampling operation, which cause that the obtained subbands are twice smaller in each direction and  $M$  denotes the number of considered modal shapes.

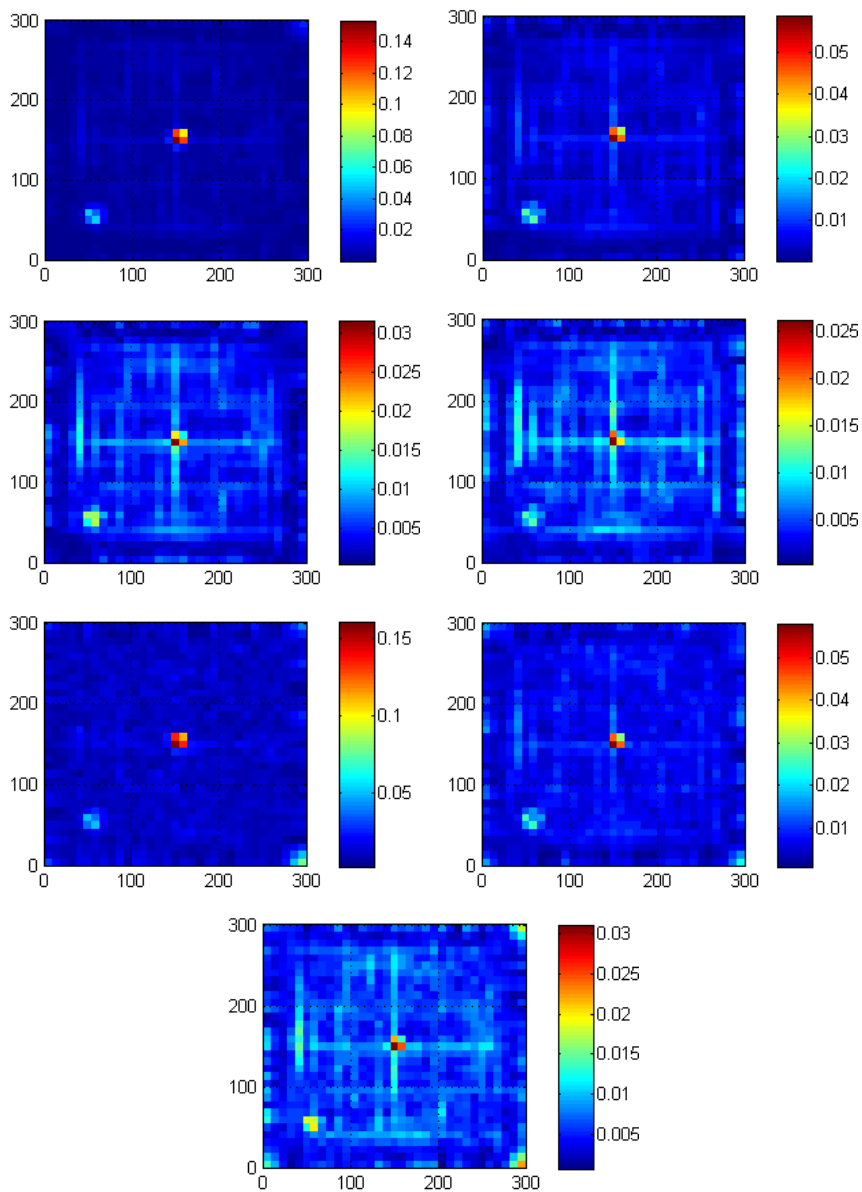
In order to select the most suitable wavelet order and shift parameter the depth-first search algorithm for  $\alpha = 1 \div 2$  and  $\tau = 0 \div 12$  (both with a step of 0.01) was executed. The ranges for  $\alpha$  and  $\tau$  were chosen following to the previous studies [8,9]. As criterion a simple heuristic measure was used, which included the ratio between maximal values of the coefficients (location of damages) and minimal values of noise. Obtained values used for the further analysis were as follows:  $\alpha = 1.46$  and  $\tau = 0.12$ . The 2D fractional B-spline wavelet with above parameters was presented in Fig.3.



*Fig.3. 2D fractional B-spline wavelet used in the damage detection studies.*

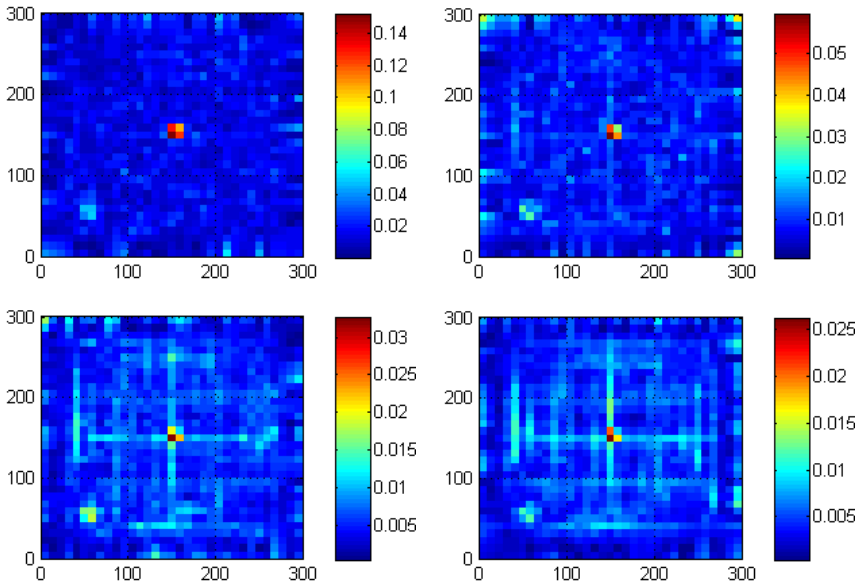
### 3. Results and discussion

The cases of numerical models of damaged plates presented in Fig.1 were tested using the Matlab routine. Obtained results were presented in Fig.4. It could be noticed that the damage located in the centre of a plate is clearly identified in all investigated cases, while the damage in the lower left corner is almost undetectable (i.e. its magnitude is on the level of noise) in the case A4 (see Fig.1) and not clearly detectable in the cases A3 and B3. This phenomenon is caused by the strong dependence of magnitudes of displacements in modal shapes with wavelet coefficients obtained after decomposition. The measurement points in the location of a central damage in all cases of considered modal shapes achieves extrema, while the location of the second damage not always achieves them. Therefore, the consideration of several modal shapes, especially higher ones, which have more extrema, is crucial for the effectiveness of an algorithm. Basing on the results presented in Fig.4 it could be observed that the position of a damage in the thickness direction influences on its detectability. It could be explained by a fact that the deeper the damage from the investigated surface the more difficult to detect and localize it. This fact is conducted by the comparison of cases A and B, which are very similar for the similar depth of the damages.



*Fig.4. Results of the damage detection and identification following the order of the investigated cases.*

In order to analyze the influence of measurement noise to the detectability of simulated damages the numerical data was noised with various noise levels. The cases A1÷A4 were noised by adding the pseudo-random white noise to the modal shapes. The noise level was defined as a signal-to-noise (SNR) ratio and the levels for each investigated case, when both of the simulated damages were detectable, were determined. The critical values of the noise levels were as follows: A1 – 37 dB, A2 – 44 dB, A3 – 51 dB, A4 – 58 dB. The results of detection of the damages of noised modal shapes were presented in Fig.5.



*Fig.5. Results of the damage detection for noised signals.*

The results on noised modal shapes and the critical values of noise levels show that the internal damages could be effectively detected and localized experimentally with use of high-precise measurement equipment (e.g. fiber Bragg gratings, laser vibrometers) and even medium-precise sensors (e.g. accelerometers or strain gauges).

#### **4. Conclusions**

The presented method of detection and localization of internal imperfections in composites seems to be an effective tool, which could be successfully applied in the industrial conditions. The main advantage of this method is an ability of performing the tests without any reference diagnostic knowledge, i.e. it is not necessary to compare of obtained results of damaged structures with results of healthy one. The main difficulty of the signal processing is an appropriate selection of analyzing wavelets for ensuring the best sensitivity, therefore the further studies of

development new wavelets and wavelet transforms for the structural diagnostics needs are planned. It is also planned to validate the method experimentally on different types of composite structures and with various manufacturing and operation damages.

### **Acknowledgements**

The research project was financed by the National Science Centre Poland granted according the decision no. DEC-2011/03/N/ST8/06205. The author acknowledges a possibility of carrying out computations on the IBM BladeCenter HS21 in the Academic Computer Centre CYFRONET AGH under the computational grant No. MNiSW/IBM\_BC\_HS21/PŚląska/012/2013.

### **References**

- [1] Chang, C.-C., Chen, L.-W., Damage detection of a rectangular plate by spatial wavelet based approach. *Appl. Acoust.* 65 (2004) 819–832.
- [2] Loutridis, S. Douka, E., Hadjileontiadis, L. J., Tochidis, A., A two-dimensional wavelet transform for detection of cracks in plates. *Eng. Struct.*, 27 (2005) 1327–1338.
- [3] Rucka, M., Wilde, K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *J. Sound Vib.* 297 (2006) 536–550.
- [4] Fan, W., Qiao, P., A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures. *Int. J. Solids Struct.* 46 (2009) 4379–4395.
- [5] Katunin A., Holewik F., Crack identification in composite elements with non-linear geometry using spatial wavelet transform. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 13 (2013) 287–296.
- [6] Unser, M., Blu, T., Fractional splines and wavelets. *SIAM Rev.* 42 (2000) 43–67.
- [7] Chaudhury, K.N., Unser, M., Construction of Hilbert transform pairs of wavelet bases and Gabor-like transforms. *IEEE T. Signal Proces.* 57 (2009) 3411–3425.
- [8] Katunin A., Crack identification in composite beam using causal B-spline wavelets of fractional order. *Model. Eng.* 15 (2013) 57-63.
- [9] Katunin A., Przystałka P., Structural diagnostics of composite beams using optimally selected fractional B-spline wavelets. In: *Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics*, Korbicz J., Kowal M., Eds., *Advances in Intelligent Systems and Computing* 230 (2014) 475-486.





## **TERMOKAMERY TESTO PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ**

### **TESTO THERMAL IMAGERS FOR NON DESTRUCTIVE TESTING**

**Jaroslav KMOCH**

Testo, s.r.o.

Contact e-mail: [kmocho@testo.cz](mailto:kmocho@testo.cz)

#### **Abstrakt**

*Termokamery umožňují zobrazení rozložení povrchových teplot a tím pomáhají rozpoznat hrozící poruchu. Například je možné detekovat poškozená ložiska, nedostatek maziva, nebo nedostatečnou justáž. Vznikající tření způsobuje zahřívání a to má za následek změnu povrchové teploty. Další často užívanou aplikací termokamer testo je kontrola elektrických spojů. Přechodový odpor v elektrickém obvodu se začne projevovat zvýšenou teplotou spoje. Při diagnostice strojů ve velkém provozu vzniká velké množství snímků. Pro archivaci a řízení snímků z termokamery je zapotřebí značná práce obsluhy. Při ní hrozí chyba v zatřídění snímků a špatné přiřazení snímku k danému stroji. Tuto problematickou úlohu řeší termokamery společnosti Testo funkcí SiteRecognition. Termokamera díky identifikačním štítkům rozpozná místo měření a pořízený termogram je tak správně přiřazen do databáze snímků přímo v místě měření. Snímky jsou pak v počítači archivovány v podobě databáze. To umožňuje přehledné sledování snímků z jednotlivých měřených zařízení a databáze také umožňuje vyhledávání snímků podle zadaných kritérií.*

**Klíčová slova:** termokamery, termogram, aplikace termografie

#### **Abstract**

*Thermal imagers allow you to view the distribution of surface temperatures and thus help detect impending failure. For example, it is possible to detect defective bearings, lack of lubrication, lack of readjustment. Emerging friction causes heat and it causes a change in surface temperature. Another much used application Testo thermal imagers is checking electrical connections. The contact resistance in an electrical circuit begins to show raised temperature connection.*

*In diagnostics of machines in a large operation occurs to a large number of images. For archiving and classification of images from the imager is needed a lot of work service. There are risks of error in the classification of images and poor image assignment to a given machine. This problematic task is solved by the thermal imager Testo with function SiteRecognition. Thanks identification labels the thermal imager recognizes measuring point and taken picture is saved into database directly on measuring site. Thermal images are archived in PC in form database. This allow user to easy to observe thermal image and there is also function search for thermal image according to specified criteria.*

**Key words:** thermal imager, thermal image, application of thermal imager

## 1. Preventivní údržba pomocí termokamer

Bezkontaktní měření a zobrazování tepelných polí se osvědčilo jako nástroj preventivní údržby. Termokamery pracují na fyzikálním principu, který je založen na skutečnosti, že každý objekt s teplotou vyšší než absolutní nula vyzařuje dlouhovlnné infračervené záření. Termokamera toto infračervené záření absorbuje a z jeho hodnoty vypočítá povrchovou teplotu.

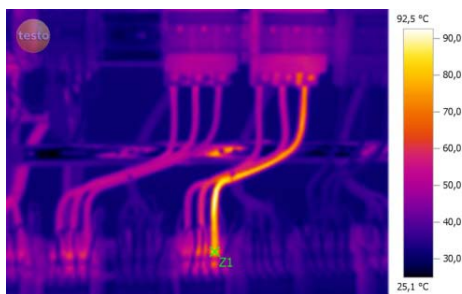
## 2. Typické aplikace termokamer při preventivní údržbě

Hlavní aplikací termokamer v preventivní údržbě jsou například:

- a) Hledání a kontrola přechodových odporů v elektrických rozvaděčích
- b) Kontrola nadměrného zahřívání mechanických částí, například ložisek
- c) Kontrola odlučovačů kondenzátu v rozvodech páry
- d) Kontrola naplnění uzavřených nádob na kapaliny
- e) Rozložení teplot na výrobních páscech
- f) Odhalení lokálního přehřátí vlivem dynamického namáhání
- g) Prověření tepelných izolací na pecích, nebo energetických rozvodech
- h) Kontrola rozložení teploty na fotovoltaických modulech

Termokamery mají zpravidla velmi vysokou teplotní citlivost. Například testo 885 má teplotní citlivost 0,03 K. Díky tomu je možné nalézt téměř všechny závady, které se projeví i nepatrnou změnou povrchové teploty.

V průmyslové praxi se velice osvědčily dvě základní aplikace termokamer. První z nich je kontrola elektrických spojení, kde přechodový odpor spoje způsobuje lokální zahřátí. Zvýšení teploty také zvyšuje samotný přechodový odpor. Tato kladná zpětná vazba způsobuje, že se teplota začne nekontrolovatelně zvyšovat a dojde k zahorení nebo k požáru.

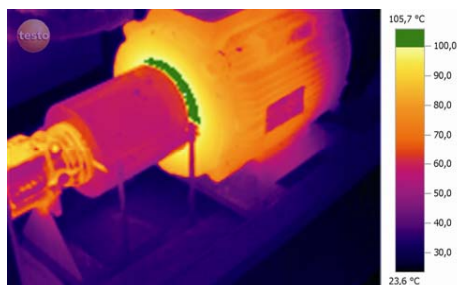


*Obr. 1 Termogram elektrického rozvaděče s přechodovým odporem v místě označeném Z1. Teplota v bodě Z1 je 92,5°C*

*Fig. 1: Thermal image of electric switch cabinet with contact resistance in point Z1. Temperature in point Z1 is 92,5°C*

Další velice osvědčenou aplikací je kontrola elektrických motorů, nebo kompresorů. Ložiska, která mají vůli nebo nedostatek maziva se začínou přehřívat. Tato zvýšená teplota se vedením tepla v konstrukci motoru rozšíří i na jeho povrch a tím je možné poškození detekovat na povrchu.

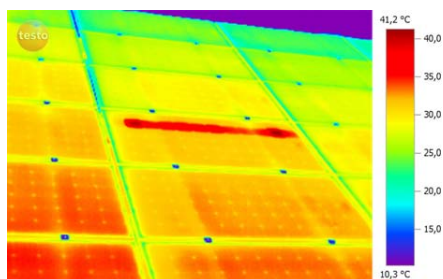




*Obr. 2: Termogram elektrického motoru. Povrchové teploty nad 100°C jsou zvýrazněny zelenou barvou.*

*Fig. 2: Thermal image of electric motor. Surface temperatures above 100°C are highlighted green.*

Další novou aplikací termokamer je kontrola fotovoltaických modulů a přilehlých elektroinstalací. Termokamera se použije jako nástroj pro rychlé nalezení potenciálně poškozených fotovoltaických modulů. Následným elektrickým měřením jeho charakteristiky je zjištěno, zda fotovoltaický modul dosahuje deklarovaných výkonnostních charakteristik.



*Obr. 3: Termokamerou se velice snadno nalezne potenciálně vadný FV modul*  
*Fig. 3: With thermal imager is very easy to find potentially defective PV module*

### 3. Organizace údržby při měření s termokamerou

Náhodná kontrola výrobních strojů pomocí termokamer není příliš efektivní. Dochází totiž k tomu, že některé stroje nebudou vůbec kontrolovány a může dojít k postupnému zhoršování jejich stavu. Dalším důležitým faktorem je, aby kontrola strojů probíhala při jejich zatížení. Pokud stroj nebo elektrický spoj není zatížen alespoň na 70 % nominálního výkonu, může se stát, že se závada nebude vůbec projevat.

Z těchto dvou aspektů vychází nutnost pro daný výrobní proces definovat:

- a) Místa a stroje, kde by měla být prováděna kontrola pomocí termokamery a z toho vyplývající naplánování pochůzkové měřicí trasy.
- b) Podmínky měření, kdy je potřeba stanovit dobu měření, kdy budou měřené objekty dostatečně zatíženy.

#### 4. Definování podmínek měření v průmyslovém provozu

Existují dva možné přístupy. V prvním přístupu se definuje, že měření nesmí být prováděno pokud není stroj nebo elektrický spoj řádně zatížen. Ve druhém přístupu je přesně definováno zatížení stroje během měření a tím zadokumentování jeho daného stavu. Při následné další analýze pořízených termogramů je možné porovnávat pouze stroje, které jsou řádně zatížené.

K zaznamenání aktuálního stupně zatížení je velice užitečné využití možnosti hlasového komentáře ke každému termogramu. Tento komentář zajistí, že právě snímaný termogram bude obsahovat informaci o stupni zatížení. Později ve vyhodnocovacím softwaru je možné tento zvukový komentář přepsat do textové poznámky, která bude uložena v souboru daného termografického snímku.

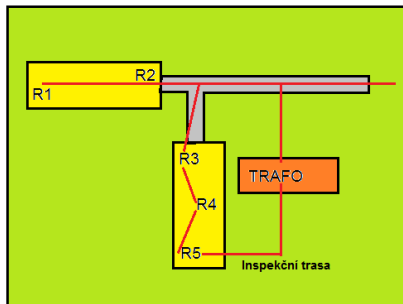


*Obr. 4: Záznam zvukových poznámek, které jsou velice vhodné pro dokumentaci aktuálního stupně zatížení měřeného objektu*

*Fig. 4: Record audio notes, which are very useful for documenting the current degree of load of the object*

#### 5. Plánování měřicích tras v průmyslovém provozu

Definice příslušných míst měření začíná podrobnou znalostí výrobní technologie. Je nutné definovat rozmístění všech elektrických rozvaděčů a elektrických spojů, elektrických motorů, jejich ložisek a podobně.



*Obr. 5: Příklad jak by mohla být naplánovaná inspekční cesta přes rozvaděče R1 až R5 a přes trafostanici.*

*Fig. 5: Example of how it could be scheduled inspection trip through the switch cabinet R1 to R5 and through the transformer.*

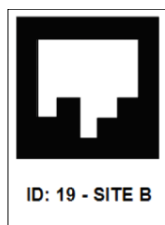
Pro snadné určení místa měření vyvinula firma Testo dvě funkce termokamer, které velice usnadňují práci v terénu.

- a) Adresářová struktura pro pořízené termogramy. (Složky, podsložky a ...)
  - b) Automatické rozpoznání místa měření díky speciálním značkám
- Stává se totiž velice často, že podobně vypadajících měřených objektů je často několik. Aby mohlo být ihned zjistitelné, ve kterém místě bylo měření provedeno je nutné pořízený termogram přiřadit ke správnému místu měření.

### 6. Automatické rozpoznání místa měření

Termokamery bývají vybaveny také digitálním fotoaparátem. Digitální fotografie místa měření je uložena společně s naměřeným termogramem. Tato fotografie primárně slouží k lepší orientaci a rozpoznání místa měření.

Automatické rozpoznání místa měření funguje tak, že se na měřený objekt nalepí značka, která je unikátní pro každé místo měření. Digitální fotoaparát zaznamená tuto značku a přiřadí jí do správného adresáře. Díky tomu nehrozí termodiagnostikovi, že by došlo ke špatnému přiřazení pořízeného termogramu.



*Obr. 6: Příklad značky pro rozpoznání místa měření*  
*Fig. 6: An example of the identification label for measurement*

### 6. Plánování měřicích tras při kontrole fotovoltaických modulů

Aby bylo dosaženo optimálního provozu fotovoltaické elektrárny, je dobré provést měření na všech fotovoltaických modulech. Vzhledem k velké ploše fotovoltaických elektráren je velice vhodné použití adresářové struktury pořízených termogramů v kombinaci se zvukovým komentářem. Adresářová struktura pomůže v identifikaci řady panelů a zvukový komentář pomůže při identifikaci přesného místa.

Měření by mělo být provedeno krátce po instalaci. Vadné moduly mohou být ihned reklamovány u výrobce. Panely s nižším výkonem mohou být přemístěny do jedné oblasti a tam může být jejich stav lépe monitorován. Při prvním měření vzniknou termogramy pro budoucí porovnání.

Další měření by mělo být provedeno těsně před koncem záruční doby FV modulů. Při každém měření by mělo být provedeno zaznamenání intenzity slunečního záření. Termokamery testy jsou pro tuto aplikaci vybaveny speciální měřicí funkcí.

### 7. Příklady vad zjistitelných termokamerou na FV modulech

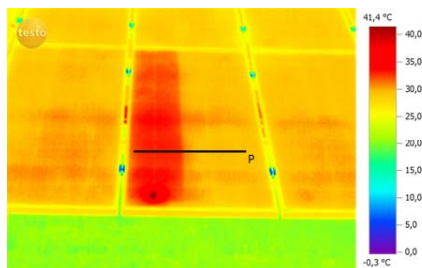
Důležité je si uvědomit, že FV moduly pracují s velmi malou účinností. Přibližně 18% dopadající energie je přeměněno na elektrický proud a zbytek je přeměněn na teplo. Pokud je modul odpojen, je 100 % dopadající energie transformováno na teplo.

Termokamerou je možné nalézt například tyto závady na FV modulech.

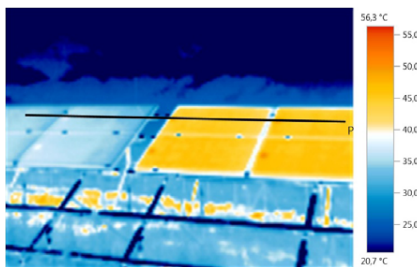
- a) Zkratovaný modul. Projevuje se tzv. „mozaikovým vzorem“
- b) Odpojený modul. Je o několik stupňů teplejší než okolní moduly
- c) Zkrat bypasové diody. Část modulu má mozaikový vzor
- d) Odpojení části modulu. Část modulu je o několik stupňů teplejší než zbytek panelu, nebo okolní moduly.

- e) Vadná buňka. V případě, že jedna z buněk má nižší výkon než okolní, dojde k jejímu přepólování a přeměňuje se zde velké množství energie na teplo. Mohou vzniknout teploty i přes 100°C!

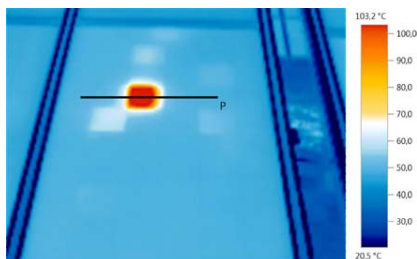
Příklady termogramů fotovoltaických modulů:



Obr. 7: Vadné vnitřní propojení FV modulu. Část modulu je odpojená a veškerý výkon prochází bypassovou diodou umístěnou v dolní části modulu.  
 Fig. 7: Faulty internal wiring of the PV module. Part of the module is disconnected and all the power passes through the bypass diode disposed on the bottom of the module.



Obr. 8: Některé fotovoltaické moduly nejsou připojeny a veškeré dopadající záření se mění v teplo.  
 Fig. 8: Some PV modules are not connected and all incident radiation is converted into heat.



Obr. 9: Vadná buňka. Došlo k jejímu přepólování, a proto se velice zahřívá. Její teplota je vyšší než 100°C!  
 Fig. 9: Faulty cell. To result in a reverse polarity, and are therefore very hot. The temperature is higher than 100 °C!

## 8. Závěr

Termokamery se staly velice užitečným nástrojem pro kontrolu výrobních strojů a zařízení. Velmi zjednodušeně lze říci, že každá anomálie, nebo defekt, který se projevuje změnou povrchové teploty, je možné detekovat pomocí termokamer.

Díky rychlosti odhalení závad a v současnosti velmi příznivé ceně se termokamery stávají velice obvyklým nástroje preventivní údržby.

Samotným měřením však práce nekončí. Každý termogram je možné zpracovávat ve vyhodnocovacím softwaru, kde lze vytvořit termografickou zprávu pro zákazníka. Pro třídění termogramů se velice osvědčila správa inspekčních cest pomocí adresářové struktury pořízených termogramů. Automatické rozpoznání místa měření také velice usnadní orientaci v pořízených termogramech.

Kontrola fotovoltaických modulů slunečních elektráren vede k vyšší bezpečnosti a optimalizaci výkonu. Moduly s nižším výkonem jsou přemístěny do jednoho stringu a jsou pak lépe pod „dohledem“. V případě, že výkon modulu poklesne pod specifikaci výrobce, může být hned reklamován a vyměněn.

## 9. Nabídka společnosti Testo

Společnost Testo AG se sídlem v Německu se zabývá vývojem a výrobou termokamer již řadu let. Historie společnosti ve vývoji a výrobě elektronických měřicích přístrojů je delší než 55 let.

- a) Zvažujete-li nákup jakéhokoliv přístroje z naší nabídky nabízíme Vám osobní předvedení, popřípadě zapůjčení pro vyzkoušení ve Vašich podmínkách.
- b) K termokamerám a k dalším přístrojům také nabízíme možnost individuálních nebo skupinových školení. Pro termografii nabízíme školení podle dané aplikace. Například semináře zaměřené na stavební termografii, průmyslovou termografii, anebo termografii zaměřenou na kontrolu FV elektráren.
- c) V případě jakýchkoliv problémů můžeme nabídnout přímo české servisní oddělení a akreditovanou kalibrační laboratoř.

**V případě jakýchkoliv dotazů nás neváhejte kontaktovat.**

**Kontaktní údaje:**

Ing. Jaroslav Kmoch

Testo, s.r.o.

Jinonická 80, 158 00 Praha 5

Tel.: 733 734 686, Fax.: 257 290 410, E-mail: [kmoch@testo.cz](mailto:kmoch@testo.cz)



## VYUŽITÍ PHASED ARRAY PRO ZKOUŠENÍ HETEROGENNÍCH SVARŮ TENKOSTĚNNÝCH TRUBEK

### PHASED ARRAY APPLICABILITY FOR THE INSPECTION OF DISSIMILAR WELDS ON THIN-WALLED PIPES

Jan KOLÁŘ

ČEZ, a.s.

Contact e-mail: jan@kolar.cz

#### **Abstrakt**

*V příspěvku jsou prezentovány výsledky ověření použitelnosti ultrazvukové zkoušky Phased Array na heterogenním svaru potrubí  $\phi 32 \times 3$  mm. Svary těchto rozměrů jsou zpravidla kontrolovány prozařováním a EN normy uvádí použití ultrazvukových zkoušek na svarech s tloušťkou materiálu větší než 6 mm. Účelem experimentu bylo ověření schopnosti detekce a stanovení rozměrů korozních trhlin iniciovaných z vnitřního povrchu potrubí na rozhraní svaru a feritického základního materiálu. Pro ověření metody zkoušení bylo využito zkušební těleso se shodnými rozměry a materiálem jako skutečná inspekční oblast a obsahovalo umělé necelistvosti tvaru kruhové úseče. Zkouškou bylo potvrzeno, že za použití optimálních zkušebních parametrů a provedením zkoušky ze strany feritického základního materiálu je možné v oblasti zájmu spolehlivě detekovat plošné defekty o výšce 0,5 mm a délce 5 mm.*

**Klíčová slova:** zkouška ultrazvukem, Phased Array, heterogenní svar, tenkostěnná trubka

#### **Abstract**

*In the contribution results of Phased Array applicability verification are being presented for the ultrasonic inspection of dissimilar weld on pipes  $\phi 32 \times 3$  mm. Welds of these dimensions are commonly tested by radiographic methods and EU standards specifies the applicability of welds ultrasonic testing with the thickness of material greater than 6 mm. The purpose of the experiment was to verify detection and sizing capability of corrosion cracks initiated from the inside surface on the boundary between the weld and ferritic base metal. For the method of testing verification was used a test specimen with the same geometry and material as the real inspection area and contained artificial flaws with the circle segment shape. The experiment confirmed that using optimal test parameters and performing from the ferritic base metal side is possible in the area of interest to reliably detect planar defects with a height of 0,5 mm and a length of 5 mm.*

**Key words:** ultrasonic inspection, Phased Array, dissimilar weld, thin-walled pipe

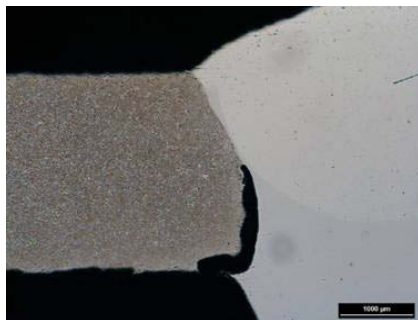
## 1. Úvod

U heterogenních svarových spojů dochází po určité době ke vzniku korozních trhlin na rozhraní mezi svarovým kovem a feritickým základním materiálem. Proto je nutné tyto svarové spoje pravidelně sledovat prostřednictvím nedestruktivních zkoušek. V případě potrubí malých rozměrů (vnější průměr a tloušťka) je pro identifikaci případného poškození běžně používána zkouška prozářením. Provedení této zkoušky je však podmíněno nejen dodržением předepsaných parametrů jako jsou druh zdroje, vzdálenost zdroje od předmětu a geometrie prozařování, ale i naplnění požadavků na kvalitu radiogramu. Aby bylo možné zajistit dostatečnou citlivost, je nutné provádět zkoušku prozářením bez přítomnosti kapalného provozního média. To však může přinášet problémy spojené s drenáží dotčeného potrubního systému, a pokud jsou svary umístěny v oblasti, kde se není oddělovací armatura i časové prostoje spojené s vyprázdněním celého tlakového celku. V takovýchto případech je vhodné aplikovat takovou metodu zkoušení, kterou je možné posoudit stav zařízení i za přítomnosti provozního media.

Jednou z možností zajištění spolehlivé detekce korozních trhlin iniciovaných z vnitřního povrchu je provedení ultrazvukové zkoušky. Pokud je však tloušťka základního materiálu menší než 6 mm, dostáváme se mimo rozsah standardního postupu definovaného příslušnými normami. V takovém případě je nutné zkušební postup průkazně ověřit na reprezentativním vzorku.

## 2. Zkušební svarový spoj

Předmětem ověření aplikace ultrazvukové zkoušky byl heterogenní obvodový svar potrubí  $\phi 32$  mm s tloušťkou stěny 3 mm. Svarového spoj byl zhotoven dle původní projektové dokumentace a do oblasti zájmu byly provedeny dvě umělé necelistvosti tvaru kruhové úseče o rozměrech, které je nutné spolehlivě detekovat. Umístění umělých necelistvostí bylo provedeno tak, aby odpovídalo výskytu reálné korozní trhliny nalezené provozními kontrolami prozářením viz obr. 2.1.



Obr. 2.1 Skutečná korozní trhlina

Fig. 2.1 Real corrosion crack

Použité umělé necelistvosti:

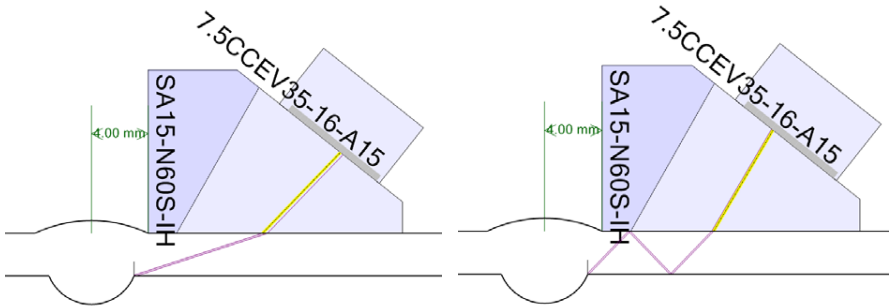
Defekt 1      délka 10 mm, výška 1,5 mm

Defekt 2      délka 5 mm, výška 0,5 mm



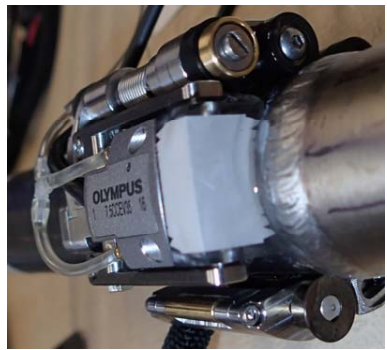
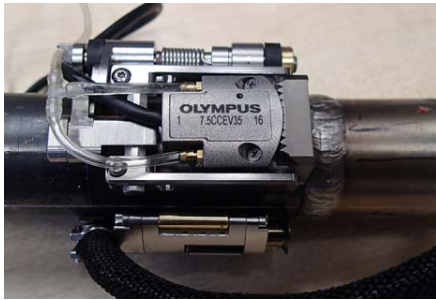
### 3. Provedení ultrazukové zkoušky

Pro provedení zkoušky byl zvolen COBRA Phased Array systém se sondou o frekvenci 7,5 MHz a klínem upraveným pro přiložení na vnější průměr 32 mm. Zkušební systém byl zvolen na základě jeho ověření na svarech malého průměru s tloušťkou stěny 5 mm viz literatura [1]. Potřebná pozice ultrazukové sondy byla ověřena na grafickém modelu se zobrazením předpokládaného průběhu ultrazukového svazku dle obr. 3.1



Obr. 3.1 Návrh zkoušky  
Fig. 3.1 Scan plan design

Z modelu vyplynulo, že předpokládané necelistvosti je možné detekovat jak přímým svazkem pod úhlem  $70^\circ$ , tak i po odraze úhlem  $45^\circ$ . Proto bylo nutné pro provedení zkoušky zvolit rozsah, který odpovídá min. pětinašobku tloušťky materiálu.

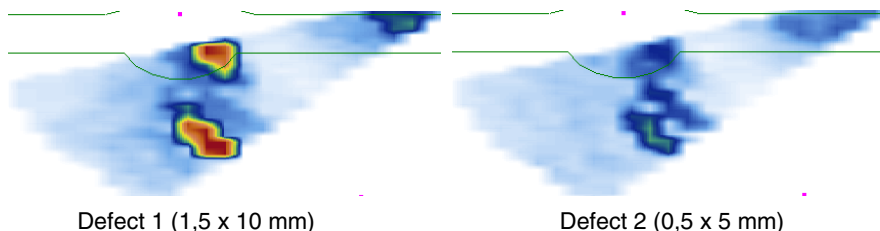


Obr. 3.2 Umístění systému COBRA na zkušební vzorku  
Fig. 3.2 COBRA system placement on the specimen

Zkouškou byla potvrzena spolehlivé detekce obou umělých necelistvostí. Z vyobrazení záznamu na C-skenu viz obr. 3.3 je zřetelný odstup signálu od šumu a rozdílné intenzity signálu v závislosti na velikosti umělé vady. Záznam rovněž nevykazuje indikace od převýšení kořene, přestože činilo až 2 mm. Dále jsou na obr. 3.4 zobrazeny záznamy z D-skenu pro vyhodnocení rozměrů necelistvostí.



Obr. 3.3 Záznam C zobrazení  
Fig. 3.3 C-scan record



Obr. 3.4 Záznam D zobrazení  
Fig. 3.4 D-scan record

Analýzou dat byl potvrzen soulad skutečných výsledků s modelovými předpoklady. Případné zjištění obdobných indikací při zkoušce skutečného svaru by tento nález vedl jednoznačně k opravě. Přesto byla prověřena přesnost určení rozměrů umělých necelistvostí. Sumarizace výsledků je uvedena v níže uvedené tabulce:

	S/N ratio [dB]	Real sizes [mm]	Measured sizes [mm]
Defect 1	18	1,5 x 10	1,3 x 12
Defect 2	10	0,5 x 5	0,7 x 7

#### 4. Závěry a doporučení

Provedením ultrazvukové zkoušky Phased Array systémem COBRA je možné zajistit detekci korozních trhlin na rozhraní svarového kovu a základního materiálu i v případě, kdy tloušťka základního materiálu činí 3 mm. Vzhledem k malým rozměrům materiálu je třeba použít krok změny úhlu ultrazvuku max. 0,5°. Pokud je sonda přikládána těsně k vnějšímu svarovému převýšení, je nutné zajistit přístupnost pro aplikaci zkušebního systému min. v délce 60 mm od hranice svaru. Systém COBRA lze použít na rozsah průměrů potrubí od 21 do 114 mm.

#### Literatura

- [1] Lamarre, A. *Improved Ultrasonic Phased Array Inspection of Small Diameters Pipes*. Toronto: 4<sup>th</sup> International CANDU In-service Inspection Workshop and NDT, June 2012



## K ČEMU NORMY! WHAT STANDARDS!

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

### **Abstrakt**

*Normalizaci leckdo chápe jako zlo nebo drahou zbytečnost. Málokterý podnikatel nebo manažer si uvědomuje, že ze spolupráce při tvorbě norem může pro firmu získat poznatky, se kterými se ve výrobě nebo obchodě setká až za několik let., kdy začnou platit a zákazníci budou vyžadováni nové technické normy. Technická norma v demokratické společnosti s tržním hospodářstvím už není nějaká direktiva, ale dobrovolně přijatý prospěšný dokument vytvořený na základě potřeby a dohody. Příspěvek je sondou do historie technických norem z oblasti nedestruktivního zkoušení a úvahou kam bychom došli v případě nedodržování některých norem.*

**Klíčová slova:** *technická norma, mezinárodní norma, nedestruktivní zkoušení, mezinárodní obchod, ISO*

### **Abstract**

*Standardization some may be seen as evil or expensive futility. Hardly any entrepreneur or manager realizes that the cooperation in the development of standards for the company can gain knowledge with which the manufacture or business meets for several years, which will apply and customers will be required of new technical standards. Technical standards in a democratic society with a market economy it is not a directive, but voluntarily adopted a beneficial document created on the basis of need and agreements. The probe into the history of technical standards in the field of non-destructive testing and reasoning where we have come, in the case of non-compliance with certain standards.*

**Key words:** *technical standard, international standard, non-destructive testing, international trade, ISO*

### **1. Úvod**

Obvykle nepřemýšlíme o normách, pokud jejich neexistence nezpůsobí nějaké nepříjemnosti – ve skutečnosti by bylo velmi obtížné představit si každodenní život bez norem. Vezměte jakýkoliv scénář a budete překvapeni, kolik norem podporuje daný aspekt každodenního života. Od okamžiku, kdy se probudíte, po celý den normy v nějaké formě pomáhají utvářet váš den, činí ho snadnějším, příjemnějším, bezpečnějším a příznivějším. Představte si na příklad, že nejste schopni získat peníze z bankomatu, protože vaše bankovní karta je příliš velká, aby se vešla do štěrbin, představte si baterie, které se nehodí do vašeho elektrického přístroje, obchody bez čárových kódů, které kvantifikují a oceňují zboží, představte si internetové stránky bez normalizovaných názvů domén.

Skutečností je, že den bez norem je nepředstavitelný. V dnešním světě, kde očekáváme rychlé a efektivní komunikace, požadujeme kompatibilitu a funkční součinnost mezi elektronickými spotřebiči a chceme, aby naše pracovní nástroje, naše spotřebiče a naše výrobky byly levné, snadno dostupné a nejvyšší kvality. Mezinárodní normy jsou tím absolutně potřebné – i když po většinu doby jsou neviditelné, jako by byly dány. Když normy plní svou funkci jste rádi, že existují, ale stěží vás napadne, že jste „chráněni“ mezinárodními normami. A přece jste.

V myšlení běžného člověka se norma týká „měřítka“, které bylo vybráno jako model, ke kterému předměty nebo činnosti mohou být srovnávány. Normy poskytují konečnému uživateli kritérium pro posouzení, měření kvality a určitou záruku slučitelnosti a funkční součinnosti. Ať jsou to normy pro zajištění globálního propojení telefonních sítí, normy pro zajištění elektromagnetické slučitelnosti záchranného lékařského zařízení v nemocnici, nebo normy, které pomáhají společnosti při poskytování služeb, a které jsou „řízenou kvalitou“ a berou ohled na životní prostředí, pak tyto normy jsou skutečnou páteří denního života. Podporují lepší kvalitu života tím, že přispívají k bezpečnosti, lidskému zdraví a k ochraně životního prostředí.

## **2. Pojem technické normalizace**

Podle definice v EN 45020 (ISO/IEC Guide 2:1996) je normalizace činností, kterou se zavádějí ustanovení pro všeobecné a opakované použití, zaměřená na dosažení optimálního stupně pořádku v dané souvislosti s ohledem na aktuální nebo potenciální problémy. Tato činnost se sestává zejména z vypracování, vydávání a zavádění norem. Důležitým přínosem normalizace je zlepšení vhodnosti výrobků, procesů a služeb pro zamýšlené účely, předcházení překážkám v obchodu a usnadnění technické spolupráce.

Pokud bychom chtěli co nejstručněji charakterizovat smysl technické normalizace, postačilo by k tomu jediné slovo a to dorozumění. Technická normalizace totiž od samého počátku své existence přímo nebo nepřímo sloužila a slouží právě tomuto účelu, tzn. dorozumění partnerů v oblasti techniky.

Technické normy jsou tedy dokumentované dohody, které obsahují technické specifikace nebo jiná určující kritéria používaná jako pravidla, směrnice, pokyny nebo definice charakteristik zajišťující, že materiály, výrobky, postupy, služby nebo systémy vyhovují danému účelu. Jejich používání je dobrovolné.

Za technické normy se nepovažují výrobní normy nebo technické podmínky sjednané mezi výrobcem a odběratelem.

## **3. Pohled do historie technické normalizace**

Za normalizační se dají označit už předpisy edilského úřadu v antickém Římě o rozměrech a připojovacích zařízeních k veřejnému vodovodu. Také v Pompejích, které byly v srpnu roku 79 zasypány vrstvou sopečného tufu, se při odkrývání zasypaného města našly normalizované otvory městského vodovodního rozvodu, kanalizace, tlak v potrubí byl také sjednocen, aby byla umožněna poměrná úhrada pro napojené spotřebitele vody. Můžeme však v důsledném historickém ohlednutí jít ještě před římskou civilizací, protože první počátky normalizace lze doložit už

v prastarých kulturách Chaldeje, Asýrie, Babylonu, Egypta a Číny. Vyrobení jednotných stavebních kamenů pro pyramidy starého Egypta, hlíněných tabulek s klínovým písmem v Babylónii a Asýrii, starodávné měrové soustavy, soustavy platidel, mincí – to všechno byly technické normalizační kroky. Nejstarší známý stavební zákon sjednocující bezpečnostní postupy a zodpovědnost konstruktérů je znázorněn na obelisku s vytesaným Chammurapiho zákoníkem: „Kdo postaví dům, který se zřítí a zabije majitele, bude také připraven o život.“ Rozvoj obchodu si žádal sjednocení hlavních měr a vah. O významu, který v minulosti přikládaly národy normalizačním prvkům, svědčí i to, že etalony měr bývaly uloženy v chrámech pod ochranou bohů.

První historicky doložený technický předpis – technická norma – vstoupil v Čechách v platnost před více než 700 léty. Důkaz je uveden v „Kronice Země České“, vytištěné v roce 1698 švabachem. Tato kronika, s graficky krásně vypracovaným titulem, obsahuje technický předpis vydaný králem Přemyslem Otakarem II., který se týká měr a vah. Tato technická norma stanovila druhy, velikost a názvy jednotek pro měření délek, ploch a objemů (měrných nádob na obilí a kapaliny), jednotek pro měření hmotnosti (závaží), stejně jako jednotek pro určování velikosti vojenských jednotek, pověřovala vyměřováním polností jen úředníky pod přísahou, předepisovala cejchování dutých měr na obilí, určovala trestní sankce za používání dutých měr, popř. závaží jiných, než je předepsáno.

Technická normalizace byla na národní úrovni zorganizována na začátku 20. století. Roku 1919 byla založena první celostátní společnost Elektrotechnický svaz československý (ESČ). V roce 1920 byly vydány první normy jako soubor předpisů a normálíí ESČ. Československé elektrotechnické normy přispěly k rozvoji elektrotechnického průmyslu, firem a živností – vytvořily všeobecně uznávanou technickou základnu, pro výrobu a také pro dozorovou činnost. Roku 1922 byla založena celorepubliková společnost pro všeobecnou normalizaci ČSN, měla statut všeobecně prospěšné, neziskové organizace. Společnost vytvářely výrobní podniky, profesní svazy, komerční organizace apod. Členové platili členské příspěvky a podle svých zájmů a na své náklady se podíleli na aktivitách společnosti. Návrhy technických norem zpracovávali odborníci z různých průmyslových podniků, výzkumných ústavů, vysokých škol atd. Československé normy byly dobrovolné, ale přesto měly nepochybnou autoritu díky vysoké úrovni technických řešení a jejich normalizačnímu zpracování. Tvořily základ předpisů profesních svazů, byly hojně využívány v soutěžích o veřejné zakázky a svůj význam uplatňovaly i v pojišťovnictví. Společnost ČSN byla jedním z iniciátorů založení mezinárodní normalizační společnosti, která byla pod názvem Mezinárodní federace normalizačních organizací – ISA, ustavena v Praze roku 1928.

#### **4. Technická normalizace v oboru NDT v České republice dnes**

První československou normou v oboru nedestruktivního zkoušení, zařazena do soustavy českých technických norem byla norma ČSN 01 5020: Zkoušení materiálů a výrobků ultrazvukem. Názvosloví, vydaná 28.02.1967. Je třeba se zmínit, že ještě před vydáním této normy tehdejší Celostátní defektoskopické středisko (CDS) při Státním výzkumném ústavu materiálu v Praze vydalo celou řadu tzv. Směrnic, které byly základem pro další vydání ČSN z oboru NDT.

Tvorbou a vydáváním českých technických norem (ČSN) je Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví (ÚNMZ) pověřen od roku 2009 na základě zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, ve znění pozdějších předpisů, který stanoví podmínky pro tuto činnost.

ÚNMZ jako národní normalizační organizace je plnoprávným členem Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), Mezinárodní elektrotechnické komise (IEC), Evropského výboru pro normalizaci (CEN), Evropského výboru pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC) a dále zabezpečuje úkoly národní normalizační organizace v Evropském ústavu pro telekomunikační normy (ETSI). Hlavním cílem těchto organizací je přispívat tvorbou mezinárodních nebo evropských norem, které jsou dobrovolné, k odstraňování technických překážek obchodu. Prostřednictvím ÚNMZ se čeští odborníci v současné době ve velice malé míře podílejí v pracovních orgánech těchto organizací na tvorbě mezinárodních a evropských norem.



V poradních orgánech ÚNMZ působí přes 2 000 odborníků zastupujících komerční, spotřebitelskou, akademickou sféru a státní správu. ÚNMZ má vytvořenou síť spolupracujících subjektů, **Center technické normalizace (CTN)**. Povinností těchto CTN je zajišťování normalizačních činností v celém rozsahu tvorby technické normy, tj. od účasti na tvorbě normy od etapy schváleného projektu v rámci mezinárodních a evropských normalizačních organizací až po zpracování textu normy při jejím přejímání do soustavy českých technických norem. **CTN pro oblast nedestruktivního zkoušení je od roku 2009 Česká společnost pro nedestruktivní testování**, která prostřednictvím Technické normalizační komise (TNK) koordinuje normalizační proces.

TNK jsou odbornými normalizačními orgány s celostátní působností, registrovanými, metodicky řízenými a koordinovanými ÚNMZ. Většina TNK svým zaměřením navazuje na rozsah působnosti pracovních orgánů mezinárodních a evropských normalizačních organizací. Jejich činnost je založena na dobrovolném principu a zájmu na dosažení vzájemně prospěšných výsledků řešení normalizačních úkolů, a to formou účasti pověřených zástupců. V současnosti pracuje pro ÚNMZ 113 TNK, některé z nich mají oblast působnosti, která v podstatě odpovídá oblasti působnosti jedné technické komise evropské, respektive mezinárodní, oblast působnosti jiných TNK pokrývá až 47 technických komisí evropských a mezinárodních včetně organizací spolupracujících v oblasti technické normalizace.

Pro zpracování českých verzí norem ISO a EN z oboru nedestruktivního zkoušení je ustavena **TNK 80 – Nedestruktivní zkoušení**, složená z odborných komisí pro každou z metod NDT. TNK 80 zajišťuje celý normalizační proces od připomínkování do vydání technické normy z oblasti NDT.

Pokud je v mezinárodních (ISO) a evropských normalizačních organizacích schválena a vydána nová norma, nebo vydána změna normy, příp. oprava normy, je ÚNMZ, jako člen těchto organizací normu převzít do soustavy národních norem České republiky (ČSN).

Evropské normy (EN nebo EN ISO) a mezinárodní normy (ISO) jsou v České republice zaváděny tak, že se:

- normě přizná status národní normy vydáním identického textu, nebo
- norma schválí k přímému používání jako národní norma; a
- zruší všechny národní normy, které jsou s ní v rozporu.

V prvním případě se jedná o zavedení překladem ratifikovaného textu příslušné EN nebo ISO. Výchozí evropskou normou pro překlad se obvykle používá text v anglickém jazyce. Na zpracování a překladech evropských nebo mezinárodních norem se podílejí technické normalizační komise (TNK) ustavené při ÚNMZ, pro obor NDT je to TNK 80. Členy TNK 80 jsou odborníci v příslušné metodě NDT. V druhém případě, „převzetí k přímému používání“ se může převzetí normy realizovat buď vydáním samostatného listu, nebo oznámením v oficiálním věstníku dotyčného člena. Pokud se norma převezme k přímému používání (tj. bez překladu) je obvykle vydána v anglickém znění a pouze titulní strana (případně doplněna vysvětlivkami) je uvedena v českém jazyce.

**ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)** byla založena v roce 1947, členství ČR je od roku 1947, sídlem je Ženeva.

V rámci ISO pracuje několik technických komisí (TC) zabývajících se určitou oblastí normalizace. Tak například technická komise TC 176 je komisí pro zabezpečení kvality a připravila dobře známou řadu mezinárodních norem managementu kvality pro certifikaci těchto systémů ISO 9000.

Všeobecnou problematikou nedestruktivního zkoušení se zabývá technická komise TC 135. V této komisi pracují pracovní skupiny (WG):

- WG 1 – všeobecné termíny a definice;
- WG 2 – směrnice pro školení; a dále subkomise;
- SC 2 – povrchové metody;
- SC 3 – akustické metody;
- SC 4 – metody vířivých proudů;
- SC 5 – radiační metody;
- SC 6 – metody pro detekci těsnosti;
- SC 7 – kvalifikace personálu;
- SC 8 – infračervená termografie pro nedestruktivní zkoušení.

Organizace ISO dává také podnět pro revizi norem, zpravidla každých pět let.

**CEN – Evropský výbor pro normalizaci** (European Committee for Standardization), zkratka je odvozena z francouzského názvu **Comité Européen de Normalisation**, sídlem je Brusel, založena 1975, členství ČR od roku 1997.

V roce 1987 byla při organizaci CEN vytvořena technická komise TC 138 se zaměřením na nedestruktivní zkoušení.

Komise TC 138 – nedestruktivní zkoušení, má sedm pracovních skupin (WG) podle jednotlivých metod NDT a každé skupině je určena koordinační země:

- WG 1 – ionizující záření;
- WG 2 – ultrazvukové metody;
- WG 3 – vířivé proudy;
- WG 4 – kapilární metody;
- WG 5 – magnetické metody;
- WG 6 – zkoušení těsnosti;
- WG 7 – akustická emise;
- WG 8 – vizuální metody.

Normalizační činnost Evropské komise pro normalizaci (CEN) v oblasti nedestruktivního zkoušení pokrývá oblast terminologie jednotlivých metod, oblast metodickou a oblast pro hodnocení vad a jejich přípustnost. V mnoha případech jsou evropské normy vydávány ve spolupráci s Mezinárodní organizací pro normalizaci ISO. Takto zavedené normy do soustavy evropských norem jsou označeny jako EN ISO a doplněny původním číslem normy ISO.

## 5. Závaznost českých technických norem

Zákon č.22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky včetně změn a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů stanoví, že české technické normy (ČSN) **nejsou obecně závazné**. Obecnou závazností se rozumí povinnost dodržovat ČSN obecně, bez jakéhokoliv omezení, tj. všemi právníckými nebo fyzickými osobami. Povinnost postupovat při určité činnosti v souladu s ČSN však může vzniknout, a to různými způsoby, především pak na základě ustanovení právního předpisu, který stanoví, že ve vztazích upravených tímto právním předpisem je nutno ČSN dodržovat.

## 6. Závěr

Normy jsou tak užitečné a vhodné pro denní život, protože jsou založeny na samotných zkušenostech každodenního života a vytvořené z pochopitelných potřeb účastníků z různých sfér a oblastí, oblast nedestruktivního zkoušení nevylučuje. Normy jsou proto materiálními výsledky těchto zkušeností stanovujícími uskutečnitelný kompromis mezi nejmodernější technologií a ekonomickými zábranami.

Mezinárodní normy jsou dokumenty postavené na konsenzu, které jsou přijaty národně nebo regionálně na dobrovolném základu. ISO, CEN a ostatní normalizační organizace, jejichž předměty normalizace se vzájemně doplňují, tvoří komplexní systém pro předkládání dobrovolných mezinárodních technických dohod. Tyto dohody, uveřejňované jako mezinárodní normy, napomáhají zajistit slučitelnost technologie na celém světě. Jestliže stroje, systémy nebo zařízení spolupracují, a je to v mnoha případech díky mezinárodním normám – i když si to málokdo uvědomuje.





## **EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE PRO TESTOVÁNÍ KOLEJNIC ZA PROVOZU THE POSSIBILITIES OF ACOUSTIC EMISSION TESTING OF RAILS DURING EXPLOITATION**

**Marta KOŘENSKÁ\*, Luboš PAZDERA\*, Libor TOPOLÁŘ\*,  
Monika MANYCHOVÁ\*, Veronika RODRIQUEZOVÁ\*, Michal JANKŮ\*\***

\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, \*\*Centrum dopravního výzkumu  
korenska.m@fce.vutbr.cz

### **Abstrakt**

*V textu je prezentována experimentální studie o použitelnosti akustické emise pro diagnostiku defektů železniční trati. Uvedené výsledky jsou součástí rozvíjení nedestruktivních metod akustické emise pro hodnocení integrity povrchu železniční trati. Snímány byly akustické vlny, které byly v kolejnicích generovány jednak mechanickým impulsem na povrchu kolejničky a jednak při přejezdu vlaku. Mechanický impuls byl realizován v několika vzdálenostech od stanoveného počátku měření na jeho pravé i levé straně. Pozornost byla věnována zejména vlivu dilatačního spoje kolejničky na pravé straně na akustickou odezvu.*

**Klíčová slova:** bezстыková kolej, metoda akustické emise, akustické signály, defekty

### **Abstract**

*An experimental study of the acoustic emission method applicability for defects detection in rail track is introduced in the paper. The presented results are a part of non-destructive methods elaboration for evaluation of rail track integrity. Acoustic waves, which were generated by mechanical impulse and by train crossing, were recorded. Mechanical impulse was realized in several distances from measurement starting point on the right and the left site. The attention was focused on the impact of right hand side joint rail dilatation on the acoustic response.*

**Key words:** rail line, acoustic emission method, acoustic signals, defects

### **1. Úvod**

Posouzení mechanické integrity železničních tratí je velmi důležité pro bezpečnost železniční dopravy. Proto jsou intenzivně hledány nedestruktivní metody, které by umožnily nalézt poruchy a vady v raném stadiu, snížit tak náklady na jejich odstranění a prodloužit jejich životnost. V posledním desetiletí jsou v zahraničí publikovány výzkumné práce, které se zabývají studiem metody akustické emise pro tyto účely. Převážně se jedná o laboratorní experimentální práce, které naznačují výhody metody akustické emise pro řešení dané problematiky [1-5]. Předností metody akustické emise je jednak skutečnost, že se jedná o metodu pasivní, při které

Ize využít zatížení kolejnic provozem vlaků, čímž jsou náklady na kontrolu podstatně nižší než při použití aktivních nedestruktivních metod. Dalším přínosem této metody je možnost monitorování objektu a to jak v cyklických intervalech, tak i kontinuální.

## 2. Metoda akustické emise

Metoda akustické emise a její přístrojové vybavení se začíná využívat pro monitorování a detekci celé řady procesů, jež iniciují vznik akustických vln šířících se tělesem. Pracuje s cílem „odposlechu“ akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoj mikrotrhlin a trhlin, svírání a rozevírání trhlin, únikem média přes průchozí trhlinu). Detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu defektů právě a pouze v jejich průběhu. Pro iniciaci aktivity defektu je nutné aplikovat zatížení konstrukce. Akustická emise monitoruje skutečnou aktivitu a tím reálnou závažnost defektu v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, úrovni a orientaci napětí, teplotních pnutí, při reálném stavu materiálu a degradace v místě defektu, působení média a pod. Naše pracoviště má dlouholetou tradici ve využívání metody akustické emise pro studium stavebních látek a stavebních dílců a konstrukcí [6-8].

## 3. Experimentální část

Při počátečním výzkumu jsme navázali na naše dosavadní poznatky s aplikacemi metody akustické emise a zaměřili jsme se na sestavení vhodné měřicí aparatury. Testována byla zejména odolnost akustické vazby snímačů s kolejnicí při přejezdu vlakových souprav. Měření bylo realizováno v prostoru železniční stanice Dolní Loučky, na bližší koleji k nástupišti využívané pro vlaky jedoucí do Brna, obr. 1. Signály akustické emise byly snímány jednak v okamžiku mechanického impulsu, realizovaného za účelem ověření dosahu snímačů akustické emise a jednak při projíždění vlakových souprav. Signály byly snímány pomocí tří snímačů označených AE0, AE1, AE2, umístěných dle obr. 2.



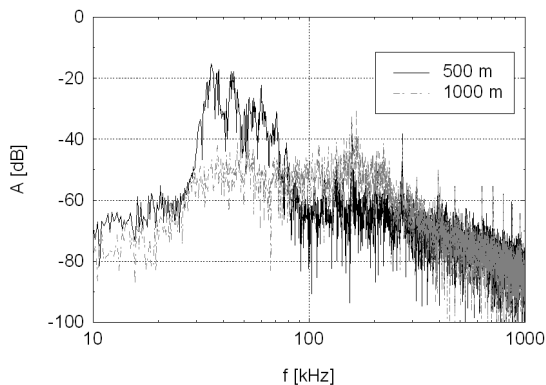
Obr. 1 Železniční stanice Dolní Loučky  
Fig. 1. Railway station Dolni Loucky



Obr. 2 Umístění snímačů AE na kolejnici  
 Fig. 2 Location of sensors AE on the rail

#### 4. Výsledky měření

Vyhodnocovány byly jednak četnosti signálů akustické emise zaznamenané jednotlivými snímači a dále frekvenční spektra jednotlivých signálů akustické emise. Prezentovány jsou výsledky zaznamenané snímačem AE1. Frekvenční spektrum na obr. 3 odpovídá signálům akustické emise zaznamenaným při realizaci mechanického impulsu ve vzdálenosti 500 m a 1000 m od snímače AE1. Ve frekvenčním spektru odpovídajícím vzdálenosti 500 m je dominantní amplituda na frekvenci 37 kHz, avšak při realizaci impulsu ve vzdálenosti 1000 m se vliv dopadu kuličky ve frekvenčním spektru zaznamenaného signálu již neprojevuje.



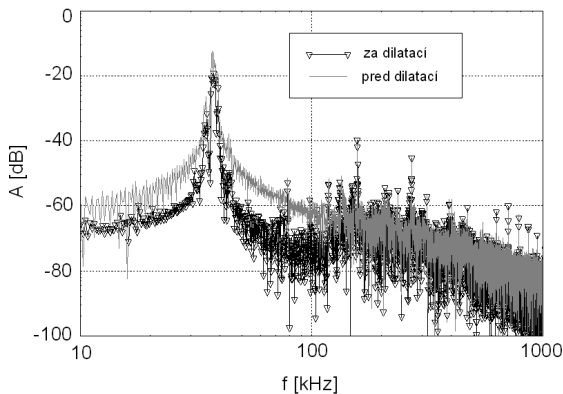
Obr. 3 Frekvenční spektra signálů akustické emise  
 Fig. 3 Frequency spectra of acoustic emission signals

Zkoumán byl také vliv dilatačního spoje kolejnice na signál akustické emise. Dilatační spoj se nacházel na pravé straně kolejnice, ve vzdálenosti ~ 460 m od snímače AE1. Detail dilatačního spoje je zobrazen na obr. 4.



*Obr. 4 Detail dilatačního spoje kolejnice*  
*Fig. 4 Detail of rail dilatation joint*

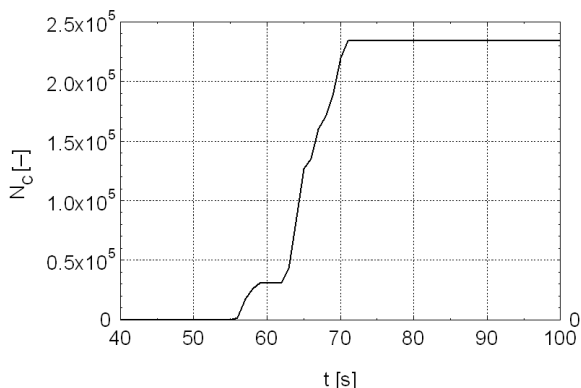
Mechanický impuls byl realizován před a za dilatačním spojem. Výsledná frekvenční spektra signálů zaznamenaných snímačem AE1 jsou zobrazena na obr. 5. Z jejich porovnání je zřejmé, že dilatační spoj podstatně neovlivnil akustickou odezvu na mechanický impuls. Frekvenční spektrum odezvy za dilatačním spojem vykazuje pouze pokles amplitud v oblasti frekvenčních složek do 100 kHz, v oblasti nad 100 kHz je patrný mírný nárůst amplitud frekvenčních složek.



*Obr. 5 Frekvenční spektra signálů AE, mechanický impuls před a za dilatačním spojem*

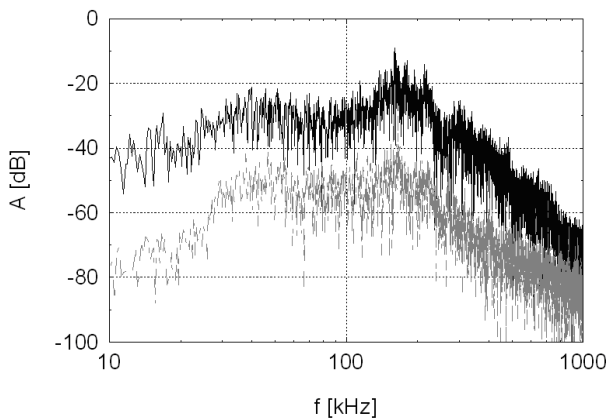
*Fig. 5 Frequency spectra of acoustic emission signals, mechanical impulse was realized before and behind the dilatation joint*

Výsledky měření získané při zatížení kolejnice přejezdem vlaku opět reprezentují signály akustické emise zaznamenané snímačem označeným AE1. Na obr. 6 je graficky zobrazen nárůst počtu signálů akustické emise v závislosti na čase. Z grafu je patrné, že nejvyšší nárůst počtu signálů byl zaznamenan v intervalu 55 až 71s.



Obr. 6 Časová závislost nárůstu počtu zaznamenaných signálů AE  
 Fig. 6 Time relation of growing of acoustic emission signals

Frekvenční spektrum na obr. 7 (horní křivka) odpovídá signálu AE zaznamenanému v 70. sekundě, viz graf na obr. 6. Spodní křivka odpovídá frekvenčnímu spektru signálu sejmutému na železnici bez provozního zatížení. Z porovnání obou křivek je patrný nárůst amplitud v celém frekvenčním rozsahu bez výskytu nových frekvenčních složek, které by informovaly o vzniku či růstu trhliny.



Obr. 7 Frekvenční spektra signálů akustické emise, horní křivka odpovídá železnici zatížené přejezdem vlaku, spodní křivka odpovídá nezatížené železnici  
 Fig. 7 Frequency spectra of acoustic emission signals, upper line corresponds to loaded railway by train crossing, lower line corresponds to unloaded railway

## 5. Závěr

Experimentální studie je zaměřena na ověření použitelnosti metody akustické emise pro diagnostiku defektů bezстыkových kolejnic, což představuje monitorování stavu kolejnic za provozu. Použití akustické emise v tomto konkrétním případě je ojedinělé.

Na základě provedených měření in situ byla navržena měřicí sestava s magnetickými snímači. Bylo prokázáno, že magnetické snímače akustické emise, umístěné na boční i spodní straně kolejnice jsou schopny detekovat akustické vlny iniciované do vzdálenosti 500 m od snímače akustické emise. Dilatační spoj kolejnice podstatně neovlivnil akustické vlny generované mechanickým impulsem.

Bylo potvrzeno, že napětí a deformace způsobené hmotností projíždějícího vlaku jsou dostatečné pro sledování kolejnic pomocí metody akustické emise. První testy tak ukázaly, že metoda akustické emise je perspektivní pro detekci trhlin u poškozených kolejnic za provozu. Při dalším výzkumu je třeba se zaměřit zejména na úroveň zesílení a vhodné filtrační metody v případech, kdy průběhy křivek akustické emise souvisí s hlukem vytvořeným valením kola. Přínosné by rovněž bylo doplnit měřicí systém o detekci příjezdu vlaku, t.z. optimalizovat systém spouštění měření. Práce prokázala potenciál uplatnění metody akustické emise na detekci poškození železniční trati.

### Poděkování

Tato práce vznikla za podpory GA ČR projektu č. P104/10/1430.

### 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., Papaelias, 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] Korenska M., Pazdera L., Pospíšil K., Stryk J., Vyroubal P.: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3. September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5.
- [7] M. Korenska, L. Pazdera, L. Ritickova: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184, ISBN 961–90610-1-3.
- [8] M. KORENSKA, (2011): Non-destructive evaluation of the concrete structure damage. In Proc. 41<sup>st</sup> International Conference Defektoskopie 2011 / NDE for Safety, Ostrava November 9-11, 2011, p. 65-70.



## ELEKTRICKÉ PARAMETRY TEPELNĚ NAMÁHANÝCH VZORKŮ NA CEMENTOVÉ BÁZI

### BUILDING MATERIALS PROPERTIES CHARACTERISED BY ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Ivo KUSÁK\*, Miroslav LUŇÁK\*

\*Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,  
Veveří 95, 60200 Brno, Czech Republic  
Contact e-mail: kusak@dp.fce.vutbr.cz, lunak@dp.fce.vutbr.cz

#### **Abstrakt**

*Beton se pro svoji vysokou schopnost odolávat působení tlakových sil a pro svoji trvanlivost je široce používán 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 byt' jen lokálně překročena, může dojít ke katastrofě, a to bez předchozího varování, tj. bez plastické deformace předcházející zřícení. Působení zvýšených teplot tento problém umocňuje. 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.*

*Na základě Debyeovy teorie vznikly modely dielektrika, jejich aplikací a obdrženými parametry dielektrika je charakterizován měřený materiál a diskutována jednoznačnost určení hodnot parametrů modelu. Vývoj elektrických parametrů a permitivity v jednotlivých teplotních oblastech spolehlivě poukazuje na tyto strukturní změny a tedy i konstrukční spolehlivost.*

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

#### **Abstract**

*The concrete is for its high ability to resist the action of compressive force and for its durability widely used as the main structural material in modern construction. Concrete, however, has some shortcomings. One of them is limited toughness, or brittleness, due that the concrete structure can collapse suddenly or even explosively. This problem increases with the size and strength of concrete structures. If is the breaking limit locally exceeded, can result in disaster, without prior warning, ie without plastic deformation prior to collapse. Effects of high temperatures amplifies this problem. There are a number of large concrete structures such as television towers, dams, bridges, protective covers nuclear power plants that are at risk of exposure to high temperatures, whether as a result of fire, nuclear accident or terrorist attack. Exposure to high temperatures can be a shock (rapid heating or rapid cooling) or long term. If the concrete is exposed to high temperatures, changing its*

mechanical and chemical behavior, especially holiday tensile and compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio, and more. These changes depend on the rate of change of temperature, extremes of temperature, duration of the fire and the type of concrete.

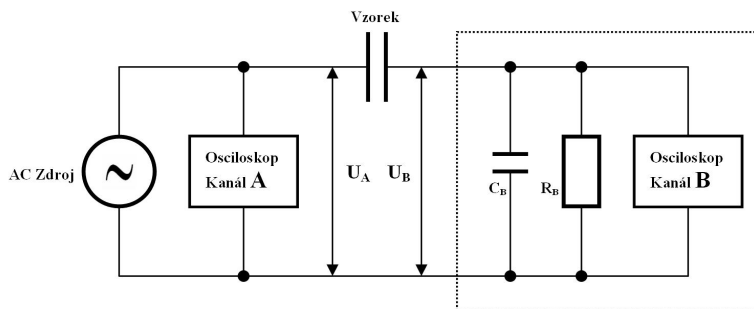
The monitoring of structural changes in the thermal stress is very important, for example for determining the reliability of the whole structure. The method that was used for this monitoring is called impedance spectroscopy.

Based on the Debye theory of dielectric the models were created, their applications and received parameters measured dielectric material is characterized and discussed the uniqueness of determining the values of model parameters. Development of electrical parameters and permittivity at each temperature areas reliably show this structural changes and thus the structural reliability.

**Keywords:** impedance spectroscopy, dielectric losses, loss factor, conductivity losses, polarization losses

## 1. Úvod

Impedanční spektroskopie je nedestruktivní testovací metoda využívající impedančních charakteristik k analýze vlastností látky. Frekvenční závislosti vyhodnocovaných veličin poskytují kvalitní obraz o sledované látce. Testovaná soustava je tvořena přechodem kov-stavební látka-kov, přičemž elektrody jsou u tuhých látek přitlačovány k testovaným vzorkům vhodným přípravkem. Tato metoda je využívána pro stavební materiály nízké vodivosti. Železobetonové výrobky mohou sloužit jako příklad. Princip metody spočívá ve studiu dielektrických ztrát, které poskytují kvalitní obraz o sledované látce. Dielektrické ztráty kompozitních materiálů a plastů mohou nabývat několikanásobně vyšších hodnot, než je tomu v případě většiny materiálů běžně používaných ve stavebnictví.



Obr. 1 Detailní zapojení přístrojů: zdroj střídavého napětí, testovaný vzorek, dvoukanálový osciloskop

Fig. 1 Equipment set up: the AC Source, test sample, two-channel oscilloscope

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. 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 kOhm), lze považovat (za určitých zjednodušujících předpokladů) za dielektrika. Pro popis chování homogenní materiálů ve střídavém elektrickém poli byl vytvořen model „Debye“. Nicméně, experimenty prováděné na reálných materiálech a ukázaly nesoulad příslušných závěrů se základními teoriemi. Nejvhodnější se tedy zdá popis pomocí modelu „Havriliak-Negami“, který popisuje chování materiálu komplexněji. Díky těmto modelům jsme schopni určit například relaxační dobu  $\tau$ , případně komplexní hodnotu permitivity  $\epsilon^*$  (včetně jejich složek).

Příčinou dielektrických ztrát v materiálech ve střídavém elektrickém poli jsou následující tři procesy:

Polarizace dipólová relaxační se vyskytuje se u polárních látek (solné roztoky, hydratující beton) a je doprovázena energetickými ztrátami v dielektriku. Je závislá na teplotě a frekvenci střídavého pole.

Polarizace iontová relaxační se vyskytuje o iontových látek (anorganické sklo, keramika) a je opět doprovázena energetickými úbytky. Je tepelně a frekvenčně závislá.

Proces elektrické vodivosti. Tyto ztráty vznikají jak v DC, tak AC elektrickém poli. Fyzikální podstata ztráty spočívá ve srážkách volných částic s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky. Uvolněné energii říkáme Joulovo teplo.

## 2. Testované materiály

Testovaná tělesa o rozměrech 40x40x160 mm byla připravena z cementové malty s vodním součinitelem  $w/c=0,46$ . Směs pro výrobu malty obsahovala cement CEM I 42,5 R z Českomoravského cementu, a.s. v Mokrém a křemenný písek pro přípravu malt z Filtrační písky, s.r.o. v poměru 1:3 a v souladu s normou ČSN 721200, kdy byly použity vždy 3 frakce písku o velikosti zrn 0-1, 1-3, a 3-4 mm, které byly míchány v hmotnostním poměru 1:1:1.

Všechna tělesa vyrobená z cementové malty byla odformována po 24 hodinách zrání při teplotě 22°C a 55% relativní vlhkosti. Dále byla tělesa uložena na dalších 27 dní do vody. Pak byla tělesa sušena 2 dny při teplotě 60°C. Pro zjištění vlivu vysokých teplot na sledované vzorky byly tyto zahřívány v peci na teploty 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C a 1200°C rychlostí 5°C/min s výdrží na maximální teplotě 60 minut. Po výpalu byly vzorky samovolně ochlazeny na laboratorní teplotu.



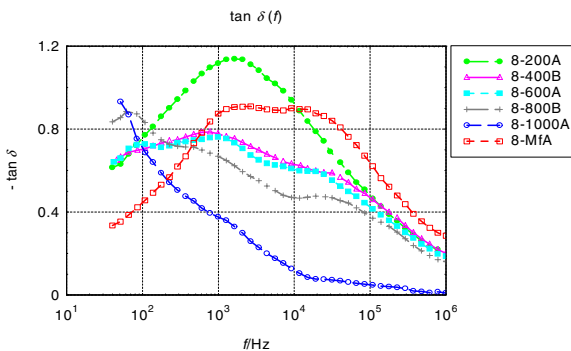
Obr. 2 Uchycení vzorku v přípravku mezi mosazné elektrody o ploše 7x3,5 cm  
 Fig. 2 Fixation of the sample in the brass electrodes with an area of 7x3,5 cm

### 3. Experimentální výsledky

V grafu závislosti ztrátového činitele na frekvenci (Obr. 3) je znázorněno 6 křivek odpovídající stupňům namáhání vzorků (0 – 1000 °C).

Křivka pro vorek 8-200A odpovídající zahřívání na 200 °C se vyznačuje jedním maximem při frekvenci 2 kHz a dosahuje v celé frekvenční oblasti ze všech křivek nejvyšší hodnoty ztrátového činitele. Tvar křivky současně ukazuje přítomnost polarizačních ztrát v materiálu.

Vzorek ohříváný na 400 °C vykazuje menší maximum při frekvencích 70 Hz, dále při 800 Hz a objevuje se plytké maximum při frekvenci 30 kHz. Celkové hodnoty grafu výrazně poklesly oproti vzorku předchozímu (200 °C). Výrazně se zmenšily polarizační ztráty, což odpovídá odpařené vodě (dehydrataci) a rozkladu některých složek tmelu za uvolnění vodní páry.



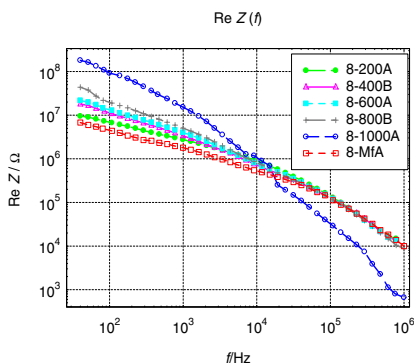
Obr. 3 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci  
 Fig. 3 Dielectric loss factor versus frequency dependence

Podobný tvar spektra dosahuje vzorek 8-600A (600 °C) v oblasti nižších frekvencí však vystupuje lokální maximum při frekvenci 90 Hz. Ve zbylé části spektra jsou hodnoty ztrátového činitele jen o málo nižší než u vzorku 8-400B.

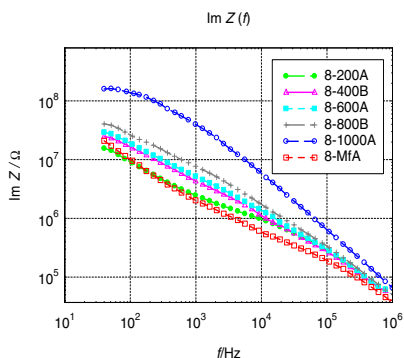
Vzorek 8-800B žíhaný při teplotě 800 °C vykazuje výraznější maximum při frekvenci 80 Hz, přičemž hodnoty ztrátového činitele do frekvence 100 Hz dosahují vyšších hodnot, než u předchozích vzorků. Nad frekvencí 100 Hz pozorujeme výraznější pokles všech hodnot ztrátového činitele. Zřejmě dochází k poklesu polarizačních ztrát, ale současně k tvorbě trhlinek.

Charakter křivky odpovídající vzorku 8-1000A (1000 °C) nasvědčuje dominanci vodivostních ztrát v materiálu (klesající charakter v celé oblasti frekvenčního spektra). Absence vody a přítomnost trhlinek značně zvýšily odpor vzorku v celé oblasti frekvenčního spektra.

U referenčního vzorku 8-MfA (bez tepelného namáhání) pozorujeme ve spektru ztrátového činitele dvě lokální maxima, také u frekvence 2 kHz a 20 kHz, ale právě do frekvence 20 kHz dosahuje nižších hodnot ztrátového činitele než vzorek 8-200A.



Obr. 4 Graf závislosti reálné složky impedance na frekvenci  
Fig. 4 Real part of impedance versus frequency of electric field



Obr. 5 Graf závislosti imaginární složky impedance na frekvenci  
Fig. 5 Imaginary part of impedance versus frequency spectra

Vzorek 8-1200A (žíhaný při teplotě 1200 °C) nebylo možné zařízením změřit, neboť odpor tohoto vzorku je mimo rozsah měřících přístrojů (signál je příliš utlumen).

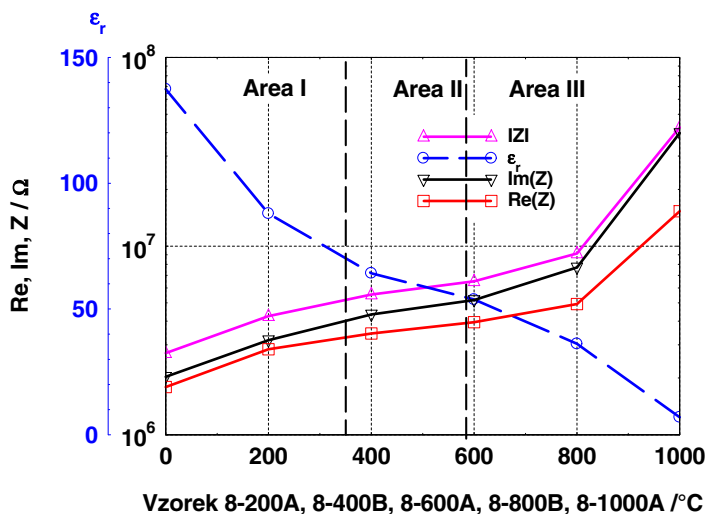
V grafu závislosti reálné složky impedance na frekvenci Obr. 4 (log-log) se spektra všech šesti vzorků prolínají u frekvence 10 kHz. Do této frekvence má nejvyšší hodnoty reálné složky impedance vzorek 8-1000A a postupně dochází k logickému klesání až k nejnižší hodnotě u vzorku 8-MfA (bez tepelného namáhání). Významná část spektra je v rozsahu 40-10 kHz. Za frekvencí 10 kHz hodnoty reálné složky impedance splývají (pro vzorky 0-800 °C), pouze vzorek 8-1000A (1000 °C) vykazuje nečekaný pokles až k hodnotě 1 kΩ (pro frekvenci 1 MHz).

V grafu závislosti imaginární složky impedance na frekvenci Obr. 5 (log-log) je vidět, že u vzorků podrobených namáhání vyšší teplotou jsou hodnoty  $\text{Im}Z$  vyšší v celé oblasti frekvenčního spektra. Kapacita pro jednotlivé vzorky s teplotou žíhání klesá (pro určitou referenční frekvenci). Křivka pro vzorek bez tepelného namáhání 8-MfA se prolíná s křivkou 8-200A v oblasti 40-300 Hz. Následně se odchyľují. Referenční vzorek 8-MfA má ve zbylém frekvenčním rozsahu nejnižší hodnoty imaginární složky impedance.

sample	$\text{Re}(Z)/\Omega$	$\text{Im}(Z)/\Omega$	$\text{Abs } Z/\Omega$	$CF$	$\epsilon_r$
8-MfA	1,79e+6	2,03e+6	2,71e+6	7,84e-11	137,38
8-200A	2,84e+6	3,17e+6	4,26e+6	6,45e-11	112,98
8-400B	3,44e+6	4,34e+6	5,54e+6	3,67e-11	64,20
8-600A	3,95e+6	5,18e+6	6,51e+6	3,07e-11	53,80
8-800B	4,93e+6	7,70e+6	9,14e+6	2,07e-11	36,17
8-1000A	1,53e+7	3,98e+7	4,26e+7	0,40e-11	7,00

Tab. 1 Hodnoty impedance, kapacity a relativní permittivity při referenční frekvenci 1 kHz

Tab. 1 Values of the impedance, capacity and relative permittivity of the reference frequency 1 kHz



Obr. 5 Změna hodnot permittivity a složek impedance pro všechny vzorky (měřeno při frekvenci 1 kHz)

Fig. 5 Permittivity values and Impedance parts for all samples (for 1 kHz)

V grafu na obrázku 5 pozorujeme narůstající hodnoty reálné, imaginární a absolutní hodnoty impedance u všech vzorků pro frekvenci 1 kHz, pro vzorky žíhané do teploty 600  $^{\circ}\text{C}$  je nárůst hodnot složek pozvolný, prudceji se zvedá průběh až u vzorků žíhaných nad 800  $^{\circ}\text{C}$ . U všech vzorků dosahovala  $\text{Re}(Z)$  nižších hodnot než u  $\text{Im}(Z)$ . V rozmezí teplot 400 až 600  $^{\circ}\text{C}$  dochází ke změně charakteru křivek

z konkávního na konvexní. Oblast této změny koresponduje s další vyšetřovanou křivkou permitivity vzorků při frekvenci 1 kHz, kde ve stejné oblasti dochází k převrácenému charakteru změn. Křivka permitivity přechází z konvexní na konkávní. V grafu jsou vyznačeny tři oblasti, ve kterých se snažíme vystihnout strukturní přeměny materiálů při daných teplotách (fázích) žhání. Separování je vyznačeno do teploty 400 °C a 573°C. V tomto intervalu se také nachází inflexní body všech křivek.

Výrazný pokles permitivity v oblasti I nastává při dehydrataci a rozkladu některých složek tmelu, za uvolnění vodní páry, případně CO<sub>2</sub>.

V oblasti II nedochází k výrazným změnám permitivity, při těchto teplotách dochází k fázové přeměně křemene (573 °C), (β-křemen na α-křemen). [rovnaník], rozklad CSH gelu způsobí tlakovou deformaci pojiva a tím dojde k nárůstu pórizity.

V oblasti III nastává strmý pokles permitivity, což může souviset se vznikáním nových krystalických fází a velmi nízkou pevností materiálu.

Během vypalování dochází k poklesu objemových hmotností sledovaných vzorků. Při výpalu vzorků dochází k jeho dehydrataci a rozkladu některých složek tmelu za uvolnění vodní páry, případně CO<sub>2</sub>. K největšímu poklesu objemové hmotnosti dochází v počátku zahřívání (do teplot 400 °C). Při vyšších teplotách již nedochází k tak výrazným změnám.

U vzorků dochází k poklesu pevnosti v tahu, který souvisí s dehydratací a rozkladem CSH gelu, ale také s fázovou přeměnou křemene při 573 °C (β-křemen na α-křemen). Rozklad CSH gelu způsobí tlakovou deformaci pojiva a tím dojde k nárůstu pórovitosti. Při teplotě nad 1000°C vznikají nové krystalické fáze.

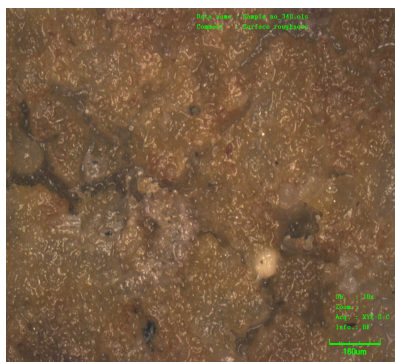
Na obr. 6 a 7 jsou prezentovány obrázky povrchů vzorků o ploše 1 mm<sup>2</sup> získaných pomocí konfokálního mikroskopu LEXT 3100.

Vzorek referenční (Obr. 6) představuje vizuálně povrch relativně homogenní a s postupným zvyšováním teplot se tato homogenita viditelně narušuje (Obr. 7).



Obr. 6 Povrch vzorku o ploše 1 mm<sup>2</sup> bez tepelného namáhání

Fig. 6 1 mm<sup>2</sup> surface reference sample, without stress increased temperature



Obr. 7 Povrch vzorku o ploše 1 mm<sup>2</sup> namáhaného teplotou 1200 °C

Fig. 7 Surface of 1 mm<sup>2</sup> sample after stress temperature of 1200 °C

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 explosivního odprýskávání. 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  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . Při teplotě 573 °C dochází ke změně krystalové fáze z  $\beta$  na  $\alpha$  v kamenivu a písku. Při teplotě 600 °C dochází ke druhé fázi rozkladu CSH gelů a tvorbě  $\beta$ -C2S. Při teplotách okolo 700 °C dochází k rozkladu uhlíčitanu vápenatého  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Při silné endotermické reakci dochází k uvolňování oxidu uhličitého. V okolí teplot 800 °C se začíná uplatňovat keramická vazba, která nahrazuje vazby hydraulické. Při teplotách v rozmezí 1100 °C až 1200 °C dochází ke tvorbě Wollastonitu  $\beta$  ( $\text{CaO} \rightarrow \text{SiO}_2$ ). V oblasti teplot 400 °C až 1200 °C pozorujeme vzrůstající výskyt trhlin. Při teplotách okolo 1300 °C dochází k celkovému rozkladu betonu a tavení některých složek.

#### 4. Závěr

Teplým namáháním konkrétních vzorků bylo dosaženo strukturální změny materiálu. Tyto změny byly pozorovány vizuálně a byly prokázány související změny v impedančních spektrech vzorků.

Byly vyhodnoceny hodnoty elektrických parametrů vzorků, zejména elektrická kapacita a permitivita při frekvenci 1kHz a dány do vztahu se strukturálními událostmi pro tři oblasti tepelné zátěže. Reálná hodnota permitivity s rostoucí mírou žíhání klesá.

Povrch vzorků podle fotografií pořízených konfokálním mikroskopem se mění z cementově šedé pro nevyžíhaný vzorek až po hnědě skleněnou barvu u nejvíce žíhaného vzorku.

#### Poděkování

Tento výzkum byl proveden jako součást projektu GAČR **P104/11/0734** “Využití elektromagnetické emise ve výzkumu moderních kompozitních materiálů pro konstrukční aplikace”. Autoři článku děkují za tuto podporu.

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

## Literatura

- [1] Kusák, I.; Luňák, M., *Tracking of concrete by means of impedance spectroscopy - electrical properties and porosity*, contribution at Proceedings of the 5th International Conference on dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering, ISBN 978-80-554-0354-0, University of Žilina, 2011
- [2] Plšková, I.; Chobola, Z.; Matysík, M., *Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method*, Ceramics-Silikáty 55 [2] 2011, 176-182, ISSN 0862-5468, 2011
- [3] Luňák, M.; Kusák, I., *An application for the impedance spectroscopy method and building material testing*, Ministry of transport, ISSN 1802-971X, Brno, 2010
- [4] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Determination of the performance factor of a heat pump* (in Czech), paper in Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [5] Kusak, I.; Lunak, M.; Schauer, P. *Tracing of Concrete Hydration by Means of Impedance Spectroscopy (New Tool for Building Elements Testing)*. Applied Mechanics and Materials. 2013. 2013(248). p. 370 - 378. ISSN 1660-9336
- [6] Pazdera, L.; Topolář, L.; Bílek, V.; Smutný, J.; Kusák, I.; Luňák, M., *Measuring of Concrete Properties during Hardening*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7, 2010
- [7] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera L.; Topolář, L., Bilek V., *Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties*, In ESA 2010. 1. CZ, Palacky University. Pages 233-240. ISBN: 978-80-244-2533-7, 2010
- [8] Cabeza, M.; Merino, P.; Miranda, A.; Novoa, X.R. and Sanchez, I., 2002. "*Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste*", Cement and Concrete Research, 32 881-91.
- [9] Christensen, B.J.; Coverdale, R.T.; Olson, R.A.; Ford, S.J.; Garboczi, E.J.; Jennings, H.M. and Mason, T.O., 1994. "*Impedance spectroscopy of hydrating cement based materials: measurement, interpretation, and application*", Journal of the American Ceramic Society, 77 2789-804.
- [10] Luňák, M.; Kusák, I.; Pazdera, L., *Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy*, presented at the 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Desructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [11] Kusák, I.; Luňák, M.; Pazdera, L., *Impedance spectroscopy of self-compactible concrete during the setting process* in: NDT Welding Bulletin 2/2008, Volume 18, 22-25, issued in 10/2008, ISSN 1213-3825, 2008
- [12] Luňák, M.; Kusák, I.: *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, ISBN 978-83-926896-0-7, 2008
- [13] Mentlík, V: *Dielektrické prvky a systémy*, BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-189-6.
- [14] Macdonald, J., R.: *Impedance spectroscopy, emphasizing solid materials and systems*, bibliography, Canada 1987.







## POČÁTEČNÍ VÝZKUM POUŽITELNOSTI AKUSTICKÝCH METOD PRO DETEKCI DEFECTŮ NA BEZSTYKOVÝCH KOLEJOVÝCH TRATÍCH

### AN INITIAL INVESTIGATION ON THE POTENTIAL APPLICABILITY OF ACOUSTIC METHODS FOR CONTACTLESS RAIL TRACK FAULT DETECTION

Monika MANYCHOVÁ\*, Marta KOŘENSKÁ\*, Luboš PAZDERA\*,  
Libor TOPOLÁŘ\*, Michal JANKŮ\*\*

\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,

\*\*Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.  
manychova.m@fce.vutbr.cz

#### **Abstrakt**

*Bezстыková kolej je kolej, ve které jsou kolejnice spojovány svařováním. Vynecháním montovaných kolejnicových styků s dilatačními mezerami vznikne hladká jízdní dráha. Při jízdě vozidla po bezстыkové koleji nevznikají rázy na kolejnicových stykách, což zvyšuje komfort jízdy a snižuje dynamické namáhání pojezdu i kolejnice. To má příznivý vliv na opotřebení a poruchovost vozidel i dopravní cesty. Praxe ovšem ukazuje, že při nevhodných podmínkách navařování vznikají v materiálu defekty typu trhlin. Článek se zabývá počátečním výzkumem zaměřeným na detekci defektů pomocí akustických metod. Konkrétně se jedná o zjištění dosahu snímačů s využitím metody impakt echo.*

**Klíčová slova:** bezстыková kolej, metoda impakt echo, mechanický impuls, akustická odezva

#### **Abstract**

*It is possible to achieve a smooth rail track by contactless rails which are connected by welding. A train ride on contactless rail increases the ride comfort and decreases dynamic strain of the travel and the rail. It has a favourable effect on wastage and failure of trains and traffic track. The practice shows that defects in forms of cracks arise in material in consequence of surfacing in bad conditions. The paper deals with an initial investigation which is focused on defects detection by use acoustic methods. Namely, it deals with detecting the range of sensors by using impact echo method.*

**Key words:** contactless rail, impact echo method, mechanical impulse, acoustic response

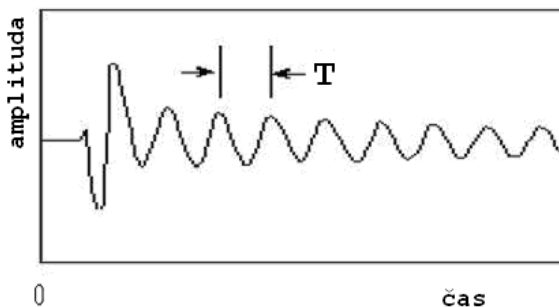
#### **1. Úvod**

Při nevhodných podmínkách navařování kolejnic mohou v materiálu vznikat různé malé trhlinky a podobné vady, které se při dalším namáhání budou snadno šířit dále. Navíc u materiálu s vysokou tvrdostí je mez kluzu mnohem vyšší než u materiálu původního, takže všechna napětí se sčítají. Je možné, že po navařování vznikne

v oblasti návaru více trhlin různé velikosti. Některé z těchto trhlin mohou proniknout až na povrch a mohou tak být zjištěny a opraveny. Avšak některé ze zbývajících skrytých trhlin se mohou rozrůst až při podbíjení kolejnic kdy dochází ke zvýšení celkového napětí a některé tak mohou dosáhnout kritické velikosti až po dlouhé době běžného provozu. Skryté trhliny se mohou postupně zvětšovat i při poměrně malém střídavém namáhání (při průjezdech vozidel za běžného provozu), a to v důsledku únavy materiálu. Nebezpečnost skrytých trhlin je tak závažným problémem [1]. Jejich včasná identifikace pomocí vhodné nedestruktivní metody by byla přínosem pro zvýšení bezpečnosti provozu na železnici. Jako perspektivní metoda pro řešení tohoto problému se jeví metoda akustické emise [2-3]. Experimentální studium této metody z hlediska její využitelnosti pro řešení daného problému bylo v první fázi zaměřeno na zjištění dálkového dosahu snímačů akustické emise na železnici. Ověřovací měření byla realizována pomocí metody impakt-echo.

## 2. Metoda impact-echo

Základem metody impact-echo je mechanická vlna, která vzniká elastickým impulsem. Krátkodobý mechanický impuls, způsobený poklepem malého ocelového kulovitěho 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 vyslanou a odraženou vlnou je zachycen snímačem, který zobrazuje časový průběh signálu (obr. 1). Tento signál popisuje přechodné lokální vibrace, způsobené násobným odrazem mechanické vlny uvnitř struktury. Dominantní frekvence těchto vibrací referují o hloubce poruchy uvnitř 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 rezonační frekvence v průběhu křivky a mohou se používat pro výpočet tloušťky nebo hloubky poruch.



Obr. 1 - Typický tvar signálu pro metodu impact echo

Fig. 1 Typical shape of signal for impact-echo method

## 3. Experiment

Měření byla realizována na železniční stanici, na bližší koleji k nástupišti. Stanovena byla místa pro realizaci mechanického budícího impulsu v obou směrech od počátku měření 0 (vpravo, vlevo). Umístění snímačů a označení směru vedení budících

impulsů zobrazuje obr. 2. Použity byly magnetické snímače, akustická vazba s kolejnicí byla zajištěna pomocí vazelíny. Odezva kolejnice na mechanický impuls, vyvozený pádem ocelové kuličky z výšky 1 m, byla snímána současně dvěma snímači označenými  $IE_p$  a  $IE_l$ . Pro realizaci budícího impulsu byly stanoveny vzdálenosti 0,6 m, 10 m, 50 m, 100 m, 200 m, 500 m, 1 km a 2 km.

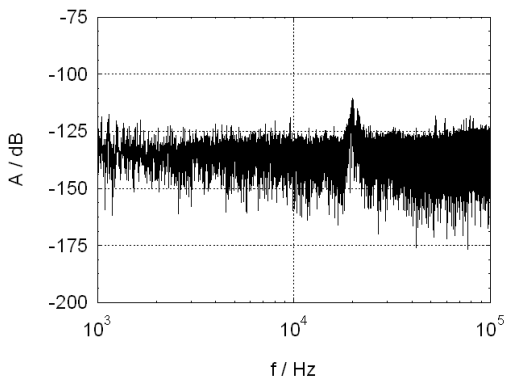


*Obr. 2 Umístění snímačů na kolejnici včetně označení směru realizace mechanických impulsů*

*Fig. 2 Location of sensors on the rail including the direction of mechanical impulse realization*

#### 4. Výsledky měření

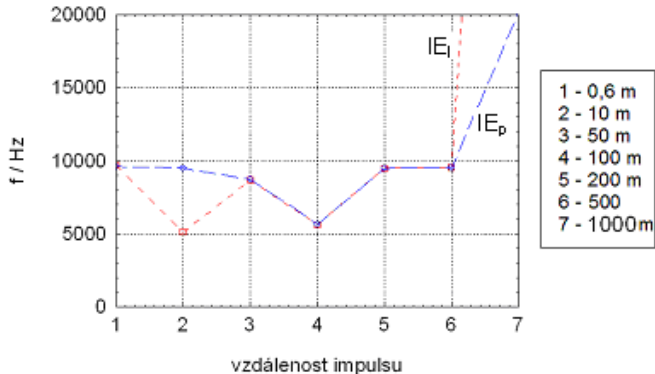
Prezentovány jsou výsledky měření na levé straně kolejnice, která se v celé proměřované délce nachází na rostlém terénu. Vyhodnocována byla frekvenční spektra odezvy kolejnice na mechanický impuls realizovaný ve výše uvedených vzdálenostech. Odezva na budící impuls byla měřitelná do vzdálenosti 500 m, při vyšších vzdálenostech (od 1 km) splývala se šumovým pozadím jak dokumentuje frekvenční spektrum odezvy na obr. 3.



Obr. 3 Frekvenční spektrum odezvy na mechanický impuls ve vzdálenosti 1 km, vlevo

Fig. 3 Frequency spectrum of mechanical impulse response in 1 km distance, on the left

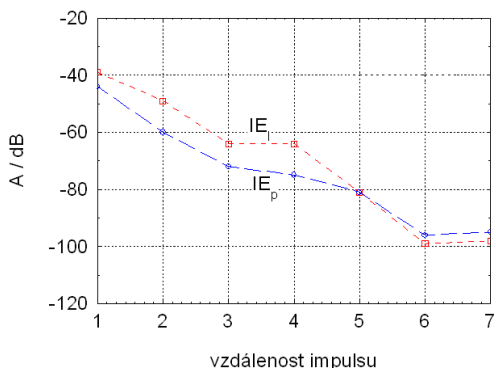
Výsledky měření ve všech vzdálenostech budícího impulsu s měřitelnou odezvou jsou porovnány na následujících grafech. Obr. 4 zobrazuje dominantní frekvence odezvy v závislosti na vzdálenosti budícího impulsu.



Obr. 4 Dominantní frekvence odezvy na mechanický impuls realizovaný vlevo

Fig. 4 Dominant frequencies of response to mechanical impulse realized on the left

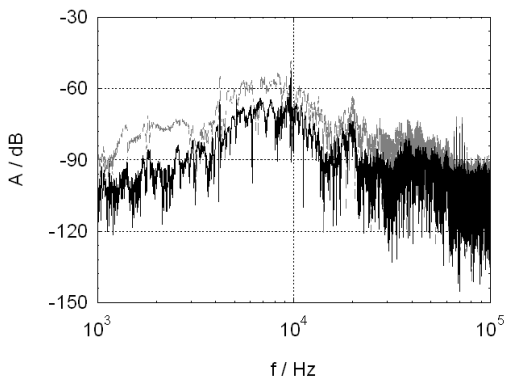
Dominantní frekvence odezvy na mechanický impuls realizovaný ve vzdálenostech do 500 m se všechny nacházejí ve frekvenčním rozsahu 5 kHz až 10 kHz. Ve vzdálenosti impulsu 1 000 m dosahuje dominantní frekvence v případě IE<sub>p</sub> hodnoty 20 kHz a v případě IE<sub>i</sub> hodnoty 80 kHz. Na obr. 5 jsou analogicky porovnány hodnoty amplitud výše uvedených dominantních frekvencí. Hodnoty pro vzdálenosti budících impulsů (1 až 7) jsou uvedeny v tabulce na obr. 4.



Obr.5 Amplitudy dominantních frekvencí odezvy na mechanický impuls realizovaný vlevo

Fig. 5 Amplitudes of dominant frequency response of mechanical impulse realized on the left

Z grafu je patrný pokles amplitud s rostoucí vzdáleností budícího impulsu pro oba snímače. Linearitu poklesu amplitud jsme hodnotili pomocí druhé mocniny korelačního koeficientu. Pokud je pokles naměřené závislosti lineární, hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu se blíží 1. Čím méně je pokles lineární, tím více se tato hodnota blíží nule. Pro IE<sub>p</sub> snímač byla vypočtena hodnota  $r^2 = 0,996$  a pro IE<sub>I</sub> snímač  $r^2 = 0,886$ . V našem případě tedy vyšší linearitu poklesu amplitud vykazuje snímač IE<sub>p</sub>. Pozornost byla věnována rovněž reprodukovatelnosti výsledků měření. Na stejném místě byl mechanický impuls veden ze dvou výšek a současně byla frekvenční spektra zkoumána z hlediska výskytu nelineárních efektů, které jsou projevem strukturních poruch, obr.6.



Obr. 6 Frekvenční spektra odezvy na mechanické impulsy realizované ve vzdálenosti 10 m, vlevo

Fig. 6 Frequency spectra of response, mechanical impulse was realized in 10 m distance on the left

Pokud je porušena strukturní celistvost materiálu, při zvýšené intenzitě budícího signálu dochází k posunu dominantních frekvencí [7]. V grafu na obr. 6 jsou zobrazena frekvenční spektra odezvy zaznamenané snímačem  $IE_p$ , budící impulsy byly realizovány ve vzdálenosti 10 m. Spodní křivka odpovídá pádu ocelové kuličky z výšky 0,5 m, horní křivka odpovídá pádu z výšky 1 m. Z porovnání obou křivek je patrné, že v proměřovaném úseku kolejnice k posunu dominantních frekvencí nedošlo, pouze amplitudy frekvencí odpovídajících vyšší intenzitě mechanického impulsu dosahují vyšších hodnot.

## 5. Závěr

Experimenty byly zaměřeny na ověření dálkového dosahu snímačů akustické emise na železniční trati. Pro měření byla využita metoda impakt echo. Akustické vlny byly generovány mechanickým impulsem na povrchu kolejnice ve zvolených vzdálenostech od stanoveného počátku měření. Na základě analýz výsledků měření byly jako vyhovující vybrány piezoelektrické širokopásmové snímače akustické emise s magnetickou stykovou plochou. Akustická vazba mezi snímači a kolejnicí byla zajištěna pomocí vazelíny. Reprodukovatelnost výsledků měření byla ověřena budícím impulsem realizovaným ze dvou různých výšek. Odezva na mechanický impuls byla uvedenými snímači měřitelná do vzdálenosti 500 m.

## Poděkování

Tato práce vznikla za podpory GA ČR projektu č. P104/10/1430.

## Literatura

- [1] Beneš L., Šmidová E., Menčík J. Analýza příčin lomů u podbíjených tramvajových kolejnic navařených austenitickým materiálem typu 18%Cr-8%Ni-6%Mn. Scientific papers of the University of Pardubice, Series B – The Jan Perner faculty of Transport 5 (1999), s.75-86.
- [2] Wanek, M.: Listening for cracks in steel bridges RT and S: Railway Track and Structures, (2003), 99 (4), pp. 38-42.
- [3] Judge, T.: Sound bridge-inspection practices. RT and S: Railway Track and Structures, (2004)100 (4), pp. 27-28.
- [4] Korenska M., Pazdera L., Pospíšil K., Stryk J., Vyroubal P.: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3. September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5.
- [5] Manychova M.: Evaluation of the Concrete Structure Integrity by Frequency Inspection, In Proc. 41<sup>st</sup> International Conference Defektoskopie 2011 / NDE for Safety, Ostrava November 9-11, 2011, p. 87-92.
- [6] Korenska M., Chobola Z., Sokolar R., Mikulkova P., Martinek J.: *Frequency Inspection as an Assessment Tool for the Frost Resistance of Fired Roofing Tiles*, 2006, Ceramics-Silikáty 50 [3], pp. 185-192.
- [7] Korenska M. and Matysik M.: *Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy as an Assessment Tool for the Structure Integrity of Concrete Specimens*, (2010), Transactions on Transport Sciences, Vol. 3, No. 1, pp. 17-21.



## **PROJEKT PROQUALINDT**

## **PROJECT PROQUALINDT**

**Pavel MAZAL\*, Bernard KOPEC\*, Emilio ROMERO\*\***

\*Česká společnost pro NDT, Technická 2, 61669 Brno, Czech Rep.

\*\*Spanish Society for NDT (AEND), Madrid, Spain

cndt@cndt.cz

### **Abstrakt**

*V roce 2011 bylo schváleno financování vzdělávacího projektu, zaměřeného na rozšíření využití učebních textů, zaměřených na hlavní metody NDT. Projekt je řízen španělskou agenturou a jsou v něm zapojeny NDT společnosti ze Španělska, Portugalska, Maďarska, Chorvatska a Česka. Základním úkolem je aktualizovat "evropské" výukové texty, které vznikly v rámci podobného projektu EU v letech 2005-2006 a převést je do dalších národních jazyků.*

**Klíčová slova:** NDT metody, učebnice, vzdělávání, projekt

### **Abstract**

*In 2011 was approved the financing of educational project aimed at extension of the use of textbooks, focused on principal NDT methods. The project is managed by the Spanish Agency and is implemented by NDT companies from Spain, Portugal, Hungary, Croatia and Czech. The basic task is to update "European" textbooks, which arose from a similar project in the EU 2005-2006 and translate them into other national languages.*

**Key words:** NDT methods, textbooks, education, project

### **1. Projekt Leonardo da Vinci**

Česká společnost pro NDT byla společně s dalšími menšími evropskými NDT společnostmi v roce 2010 oslovena kolegy ze španělské NDT společnosti (AEND) s nabídkou na účast ve vzdělávacím projektu EU Leonardo da Vinci, který patří již k tradičním vzdělávacím projektům EU.

První fáze programu Leonardo byla schválena rozhodnutím rady ministrů Evropské unie dne 6. prosince 1994. Program přijatý po dobu pěti let (1995-1999) si za hlavní cíl kladl podporu rozvoje inovačních akcí v členských státech, podporou projektů v rámci nadnárodních partnerství a zahrnoval různé organizace, které působí v oblasti vzdělávání. Přijetí programu Leonardo da Vinci představovalo racionalizaci činnosti EU v oblasti odborného vzdělávání. Rozpočet této etapy programu byl 620 milionů ECU na pět let a byl otevřen pro členské státy EU a postupně pro Kypr, Českou republiku, Estonsko, Maďarsko, Litvu, Lotyšsko, Rumunsko, Polsko

a Slovenskou republiku. Program byl zahájen v době, kdy tzv. „Bílá kniha růstu, konkurence-schopnosti a zaměstnanosti" výrazně zdůrazňovala zásadní význam odborného vzdělávání jako klíčového faktoru v boji proti nezaměstnanosti a pro posílení konkurenceschopnosti evropských podniků.

Druhá fáze programu Leonardo da Vinci následovala v období 2000 až 2006 a vycházela přímo z cílů stanovených pro první fázi programu, tato druhá fáze podporovala a doplňovala akce uskutečňované členskými státy při plném respektování jejich odpovědnosti za obsah a organizaci odborného vzdělávání a jejich kulturní a jazykovou rozmanitost. Podporovala projekty nadnárodní spolupráce v oblasti odborného vzdělávání. Tato druhá fáze se soustředila na dovednosti a zaměstnatelnost mladých lidí. Bylo podpořeno 21.000 projektů, z nichž cca 19.000 souviselo s mobilitou mladých lidí. Rozpočet programu již byl 1,45 miliardy EUR.

V roce 2007 byla spuštěna již třetí etapa programu, která má trvat do konce roku 2013. Také tato třetí etapa tvoří součást tzv. Celoživotního vzdělávacího programu EU (společně s projekty Comenius, Erasmus, Gruntvig, Jean Monnet atd.). Program Leonardo da Vinci má za cíl vybudovat systém kvalifikované a mobilní pracovní síly po celé Evropě. Program usiluje o posílení konkurenceschopnosti evropského trhu práce tím, že pomáhá evropským občanům získávat nové dovednosti, znalosti a kvalifikaci a jejich uznávání přes hranice jednotlivých zemí. Program financuje celou řadu akcí, včetně nadnárodní mobility a evropských projektů zaměřených na rozvoj a přenos inovací. Všechny projekty financované v rámci programu Leonardo da Vinci jsou zaměřeny na spolupráci evropských partnerů.

## **2. Projekty v oblasti NDT vzdělávání**

Oblasti kvalifikace a certifikace pracovníků provádějících nedestruktivní zkoušky je věnována evropská norma EN 473, která byla vydána v roce 1993, její revize byla provedena v roce 2000. V současnosti byl realizován další důležitý krok, kterým bylo vydání EN ISO 9712, která spojuje normy EN 473 a ISO 9712. Tato norma stanoví, že kvalifikační osvědčení, vydaná nezávislými certifikovanými orgány mají být harmonizovány a tedy i uznávány ve všech zemích EU. Je však nutno dát odpověď na nedostatek dostupných a jednotných výukových metodik, jakož i sjednotit výukové texty, které by měly obsahovat a definovat nezbytné minimum znalostí.

### **2.1 První projekt**

V průběhu let 2004 - 2006 byl realizován první program PROQUALINDT (Programme for the qualification of NDT personnel), který představoval zásadní pokrok v odborné přípravě NDT pracovníků v různých vzdělávacích oblastech a který předpokládal zásadní inovaci vzdělávání v řadě aspektů.

Projekt byl založen na myšlence vytvoření jednotných vzdělávacích materiálů a systémů, které by vyloučily pochybnosti o znalostech absolventů z různých školicích středisek jednotlivých zemí, která si své texty připravovala do jisté míry autonomně. V případě posílení vztahů, zajištění přenosu informací a vzájemného konsenzu mezi certifikačními orgány by pak bylo možné výrazné zjednodušení vzájemného uznávání certifikátů.

Nositelem projektu byla organizace CNFPO (Národní centrum odborného vzdělávání) Cartagena (Španělsko) a jeho vzdělávací centrum Servicio Regional de



Empleo y Formación v autonomním regionu Murcia. Organizátor projektu poskytl své zkušenosti s řešením evropských projektů, koordinaci všech jeho fází, ale zároveň i zkušenosti v oboru NDT (Centro Nacional de Control de calidad) při přípravě didaktiky v rámci metodik týkajících se odborné přípravy.

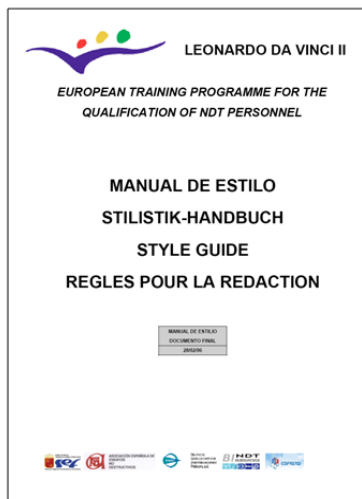
Řešitelský kolektiv pro tento první projekt tvořily společnosti: AEND (Španělsko), COFREND (Francie), BINDT (Velká Británie) a DGZfP (Německo), které představují v jednotlivých zemích vrcholné orgány ve všech oblastech souvisejících s NDT (vzdělávání, certifikace, normalizace atd).

V prvním projektu byla každá spolupracující odborná společnost pověřena vytvořením podkladů pro vybranou NDT metodu. Podklady pak byla vzájemně posuzovány a jejich obsah byl koordinován.

Cílem projektu byla příprava jednotného evropského programu pro vzdělávání odborníků, kteří vykonávají NDT v úrovních 1, 2 a 3, pro pět základních metod NDT. Práce byla rozdělena do tzv. pracovních balíčků.

Pracovní balíček 1: Project management - skládá se z vedení, koordinaci a průběžné monitorování projektu po celou dobu realizace, zavádění systému managementu jakosti dle projektu.

Pracovní balíček 2: Příprava jednotného stylu manuálu - zahrnuje přípravu stylu manuálu. Jsou stanovena pravidla a požadavky na psaní, včetně terminologie, symbolů, zkratek, typografií a tak dále. Jeho použití je povinné pro všechny partnery, a proto každý generovaný dokument musí tomuto stylu přizpůsoben.



Pracovní balíček 3: Aktualizace znalostí o současném stavu v daném oboru. Byl vytvořen unikátní dotazník pro sběr dat pro každého z partnerů, ze výsledků dotazníkové akce byl připraven závěrečný dokument, který umožnil poznat aktuální stav. Na základě těchto znalostí byl charakterizován „průměrný typ posluchače i vzdělávacího pracoviště“.

Obr. 1 Titulní strana manuálu stylu  
Fig. 1 Front page of Manual of Style

Pracovní balíček 4: Didaktický průvodce vzdělávání - úkolem byla příprava kvalitních didaktických pokynů a příruček pro všechny metody, které vycházely z výsledku pracovního balíčku 3.

Pracovní balíček 5: Studijní příručky - podle směrnic z pracovního balíčku 4 byly připraveny studijní příručky, které splňují veškeré požadavky na obsah pro metody a úrovně vzdělání, které jsou předmětem projektu.

Pracovní balíček 6: Vydávání a tisk. Každý partner připravoval odpovídající materiály ve svém vlastním jazyce a následně pak každý z ostatních partnerů přeložil do vlastního jazyka podklady připravené ostatními partnery.

Tímto způsobem byly připraveny jednotné vzdělávací podklady pro pět základních NDT metod v angličtině, francouzštině, španělštině a němčině.

## 2.2 Druhá etapa projektu PROQUALINDT – současný stav

Druhá etapa projektu Transferring European Training for the Qualification of NDT Personnel (PROQUALINDT) byla schválena roku 2011 a oficiálně zahájena v listopadu tohoto roku. Vzhledem k určitým byrokratickým postupům ve Španělsku však byly práce na jeho řešení zahájeny až v lednu 2012. V únoru 2012 se konala první schůzka zástupců řešitelských organizací v Cartageně ve Španělsku.



*Obr. 2 Logo projektu PROQUALINDT*

*Fig. 2 Logo of the project PROQUALINDT*

Úvodní etapa projektu je zaměřena na přezkum a aktualizaci didaktických materiálů získaných v předchozím projektu, které budou v hlavní části tohoto projektu přeloženy do národních jazyků všech zúčastněných partnerů. Tím by tento projekt měl přispět k další harmonizaci vzdělávání v rámci EU.

Promotérem projektu je opět CNFPO - Národní centrum pro odborné vzdělávání Cartagena (Španělsko). Jeho hlavním úkolem v projektu je opět koordinace, řízení a kontrola projektu, ale také se aktivně podílí na všech pracovních programech zahrnutých do projektu.

V první fázi CNFPO spolupracoval s AEND a dalšími partnery při přezkumu všech materiálů vzniklých v předchozím projektu PROQUALINDT, které byly použity jako výchozí bod, a ve druhé fázi se podílí na úpravách, šíření a propagaci projektu a jeho výsledků. Dále zodpovídá za rozvoj a udržování webové stránky projektu.

Partnery druhé etapy projektu jsou:

*ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (AEND)*

Úloha AEND v tomto projektu je základní, neboť je spojovatelem mezi referenčním a současným projektem. Jako aktivní partner projektu provádí přezkoumání a aktualizaci referenčních materiálů ve španělštině, stejně jako jejich anglický překlad.

*CZECH SOCIETY FOR NON DESTRUCTIVE TESTING (CNDT)*

*HRVATSKO DRUŠTVO ZA KONTROLU BEZ RAZARANJA (CrNDT)*

*MAGYAR RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI SZÖVETSÉG (MAROVISZ)*

*ASSOCIAÇÃO DE LABORATÓRIOS ACREDITADOS DE PORTUGAL (RELACRE)*

Tyto národní NDT organizace se podílí na aktualizaci studijních materiálů a zejména odpovídají za překlad anglických textů do národních jazyků. Významnou úlohou bude samozřejmě i propagace výsledků projektu a zavedení výukových materiálů do praxe.



Obr. 3 Partneri projektu

Fig. 3 Project Partners

## LEONARDO DA VINCI II

TOI Project n°: 2011-1-ES1-LEO05-35751

### “TRANSFERING EUROPEAN TRAINING PROGRAMME FOR THE QUALIFICATION OF NDT PERSONNEL”

<b>Duration</b>	:	<b>24 months</b>
<b>Total Budget</b>	:	<b>302.240 Euros</b>
<b>Maximum EU Funded</b>	:	<b>211.265,76 Euros (69,9%)</b>
<b>Own Resources</b>	:	<b>90.974,24 Euros (30,1%)</b>
<b>Start</b>	:	<b>01.10.11</b>
<b>End</b>	:	<b>30.09.13</b>

Obr. 4 Přehled projektu PROQUALINDT

Fig. 4 Overview of PROQUALINDT project

V aktualizovaných didaktických zásadách dochází na základě technické zprávy CEN ISO / TR 25107 IN k několika zásadním změnám ve struktuře didaktických jednotek. Nová struktura znalostí je pro všechny metody rozdělena na 12 didaktických jednotek, z nichž některé jsou společné pro všechny metody. Důsledně je dbáno i na soulad studijních materiálů s požadavky nejnovějších norem v oblasti NDT vzdělávání.

Postup řešení projektu a nutné změny byly posuzovány na druhém setkání řešitelů v září 2012 v Lisabonu a v březnu 2013 v Praze. Bylo konstatováno, že řešení projektu je částečně opožděno oproti harmonogramu a představitelé vedení programu Leonardo byli požádáni o prodloužení termínu dokončení projektu až do konce roku 2013. Této žádosti bylo vyhověno.

### 3. ZÁVĚR

Materiály získané v rámci tohoto projektu, kterými budou didaktické pokyny a studijní příručky pro základní NDT metody, budou navazovat na učebnice v základních světových jazycích, které byly vydány v roce 2006. V aktualizované podobě budou jednotné ve španělštině, angličtině, portugalštině, chorvatštině, maďarštině a češtině. Tyto moderní učebnice tak mohou být významným vkladem pro další rozvoj NDT vzdělávání v celém prostoru Evropské unie. Tato aktivita je současně významná pro zachování kontinuity prací, které se již provádějí za účelem harmonizace norem, technických zpráv, dohod o vzájemném uznávání, atd.. Projekt odpovídá požadavkům na vytváření společného základu znalostí, které by měli mít všichni NDT odborníci.

Účast ČNDT v tomto projektu nám poskytuje určitý náskok v rámci menších evropských zemí. Bohužel situace v oblasti certifikace a vzdělávání se však v naší zemi za poslední tři roky výrazně zkomplikovala. V současné poněkud neklidné situaci bude samozřejmě základním problémem uvedení těchto materiálů do výukové praxe. Zde je samozřejmě odlišná situace v jednotlivých zúčastněných zemích. Věříme však, že i v České republice se najdou školící střediska, případně školy, které budou mít zájem podílet na dalším rozvoji této formy evropské integrace.

#### Poděkování

Příspěvek souvisí s řešením projektu EU Leonardo da Vinci II **2011-1-ES1-Leo05-35751** Transferring European training programme for the Qualification of NDT Personnel (2011 – 2013) a navazují na práce hlavního autora v projektu NETME Centre v rámci Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (reg. č. CZ. 1.05/2.1.00/01.0002) podporovaném Evropským fondem pro regionální rozvoj.

#### Literatura

Web page: <http://www.proqualindt.com/index.php>

E. Romero, R. Rodríguez: Transferring European Training Programme for the Qualification of NDT Personnel "Transfer PROQUALINDT" In: Application of Contemporary NDT in Engineering, Portoroz, p. 427 - 440, SSNDT, Slovenia, 2013. 427 – 440.



## **JAKÉ POŽADAVKY BY MĚL SPLŇOVAT UCHAZEČ O VSTUP DO SYSTÉMU NDT**

### **WHAT REQUIREMENTS SHOULD MEET THE ENTRANT TO THE NDT**

**Josef NEUGEBAUER**

PTS Josef Solnař s.r.o.  
[neugebauer@ptsndt.com](mailto:neugebauer@ptsndt.com)

#### **Abstrakt**

*Příspěvek se zabývá požadavky na uchazeče o vstup do systému NDT. Zaměřuje se na požadavky, které nejsou obsaženy primárně v normách. Tyto požadavky na vlastnosti a znalosti uchazečů jsou porovnány s požadavky praxe. Je zde rozebráno úsměvné tvrzení, že uchazeč musí umět číst. Proč musí mít znalosti matematiky a fyziky. A proč je přehnané sebevědomí nebezpečné.*

**Klíčová slova:** uchazeč o certifikaci a kvalifikaci, ČSN EN ISO 9712, zraková způsobilost, morálně volní vlastnosti

#### **Abstract**

*This paper deals with requirements for candidates to join a NDT. It focuses on the requirements that are not contained primarily in the standards. These property requirements and knowledge of applicants are matched with practical requirements. There is dismantled funny statement that the candidate must be able to read. Why must have knowledge of mathematics and physics. And why is it dangerous hubris*

**Key words:** aspirants for the certification and qualification, DIN EN ISO 9712, visual character, morally free features

## Úvod

Odborná veřejnost neustále diskutuje téma, školení a zkoušení uchazečů o práci v NDT. V této diskuzi zanikl ovšem podstatný aspekt celého vzdělávacího a zkušebního procesu. Tímto podstatným aspektem je lidský faktor. Tímto lidským faktorem není ovšem míněn školitel nebo zkušební komisař. Tímto lidským faktorem je uchazeč sám.

Tento článek se zamýšlí převážně nevázně nad vlastnostmi a dovednosti, kterými by měl být obdařen uchazeč o vstup do systému NDT. Tyto uchazečovy vlastnosti a dovednosti jsou srovnány s požadavky budoucí praxe.

### **Morálně volní vlastnosti uchazeč o vstup do systému NDT**

Co jsou to vlastně morálně volní vlastnosti člověka? Jsou to vlastnosti podmíněné vůlí člověka. Vyjadřují záměrné, cílevědomé úsilí směřující k dosažení vědomě vytyčeného cíle, které je vlastní jen člověku.

Proč se jimi zabývat? Na tuto otázku je jednoduchá odpověď. Pokud uchazeč není dostatečně vnitřně (pomijím finanční stránku věci) motivován, pokud je i přes svůj odpor vyslán, aby absolvoval školení a zkoušky, pak jeho záměrné a cílevědomé úsilí směřující k dosažení cíle bude značně oslabeno.

Takovýto uchazeč, který i přes nechuť a se skřípěním zubů absolvuje celý proces školení a zkoušek (většinou ne na první pokus) bude svoji práci vykonávat s nechutí a laxně.

Dobrá tedy, vybereme člověka se zájmem o věc, ovšem tzv. puntičkáře. Tito lidé jsou v procesu školení a zkoušek dostatečně známí. Jejich neustále dotazy na, ve většině případů nepodstatné věci, vedou pouze ke zdržování ostatních a silně testují trpělivost lektorů. Po absolvování všech povinných kvalifikačních a certifikačních podmínek se z nich stanou defektoskopové. Tito lidé jsou naprosto nevhodní. Pro stromy nevidí les. Řeší, tak jako při školení detaily, a podstatné jim uniká. Výsledek: vedení společnosti není zrovna nadšeno z člověka, kterému práce trvá neúměrně dlouho, který se k vyzkoušenému neustále vrací.

Takže puntičkář také ne. Vyberme tedy silně sebevědomého uchazeče. Zdá se, že ani toto řešení není zrovna nejlepší. Tento člověk postrádá brzdu sebereflexe. Bez této vlastnosti je pro práci defektoskopce naprosto nevhodný.

Jak tedy z toho ven. Myslím, že stačí tak jako v té pohádce od všeho přiměřeně a k tomu dodat dávku nebojácnosti.

Proč nebojácnost? V praxi běžný jev: Po sdělení nadřízeným o výsledku zkoušky, která odhalila nepřipustné indikace na výrobku za statisíce, se strhne lavina přemlouvání, vyhrožování,... Bojácný uchazeč podlehne tomuto tlaku a v tom okamžiku poruší etický kodex, který se zavázal dodržovat. A norma ISO 9712 jasně říká, že při prokázaném porušení etického kodexu bude odebrán certifikát.

## **Další dovednosti a znalosti uchazeče o vstup do systému NDT**

Každý z nás a tedy i uchazeč by měl umět číst i psát. Na první pohled se jedná o úsměvnou podmínku. Ale pod pojmem číst, se rozumí číst a chápat složitý odborný text. V současnosti jsou nově vydávané normy plné perel, u kterých je nutno se zastavit a popřemýšlet o co se vlastně jedná. Jako např. věta: „Žádná z používaných metod nesmí diskontinuity fyzicky modifikovat.“ Nebo dalším příkladem je oblíbená definice rozlišující lineární a nelineární indikace nebo indikace souvislá.

Ve světle těchto příkladů se požadavek na čtení přestává jevit jako úsměvný.

Psát. Pod tímto pojmem opět není chápáno psaní písmen, ale schopnost jasně a čitelně převést na papír své myšlenky. Především při psaní postupu či instrukce.

Základní orientace v matematice a fyzice. Sčítat a odčítat umí snad každý. Ale probůh, když je po některých požadován výpočet procent anebo nedej bože goniometrických funkcí! Přitom tyto dovednosti jsou nezbytná například pro hodnocení plechů (řada norem EN 10163). V ultrazvukovém zkoušení se bez znalosti použitých goniometrických funkcí také neobejdeme.

Co proto můžeme udělat? Všichni NDT pracovníci by se měli při styku s laickou veřejností (personalisty) zaměřit na osvětu a vysvětlování. U zaměstnavatelů převládá názor, že obsah školení a jeho přesah do praxe je pouhé spiknutí teoretiků.

Uvedli jsme si, že defektoskop by měl tedy umět číst a psát a to bez pejorativního kontextu. Co takhle, ale zdravotní způsobilost?

Vidí tento náš uchazeč? Norma ISO 9712 říká, že uchazeč musí před kvalifikační zkouškou splňovat minimální požadavky na zrakové schopnosti. Aktivní pracovník musí splnění těchto požadavků dokládat jedenkrát ročně a musí být ověřeny zaměstnavatelem. Zde má norma ISO 9712 velkou slabinu. Nepředepisuje, kdo a jak toto ověření zdravotní způsobilosti provádí. Rozmáhá se varianta ověření zrakové způsobilosti přímo zaměstnavatelem. Jenž on není nestranný orgán a zde vznikají určité pochybnosti, při odpovědi na otázku uvedenou v záhlaví tohoto odstavce. Papírově je určité všechno v pořádku, ale fyzicky...?

## **Závěr**

V předešlých dvou kapitolách jsem se pokusil shrnout, jaké vlastnosti, znalosti a dovednosti by měl mít nejen uchazeč o práci defektoskopce, ale i stávající pracovníci. Požadavky na defektoskopce jsem vyjádřil ve vztahu k normám a praktickým úkolům, které je třeba dnes a denně řešit. Vážný problém vidím v přesouvání některých povinností ve vztahu ke způsobilosti pracovníků NDT na zaměstnavatele. Tento však není nestranným orgánem a navíc disponuje prostředky jak si zjednat svou i proti vůli pracovníka. Řešení vidím jen a pouze v osvětě. Je nezbytné se zaměřit na zaměstnavatele a neustále dokola vysvětlovat, že defektoskopce nemůže být ten jarda, který toho ve firmě moc neudělá. Že se jedná o pracovníky, kteří musí splňovat jisté nemalé nároky a to jak na znalosti a dovednosti, tak i na zdravotní způsobilost. Toto je myslím téma, které je dlouhodobě podceňováno a které by mělo zajímat všechny pracovníky v NDT. Ano všechny, protože i na nás záleží, jak budou vypadat naši kolegové, se kterými budeme léta spolupracovat a kteří po nás převezmou nelehký úděl defektoskopců.







## **INVESTIGATIONS OF MOISTURE CONTENT IN SALINE LIME MORTAR BY NONDESTRUCTIVE DIELECTRIC METHOD**

**Adelajda PALA**

Wroclaw University of Technology, Institute of Building Engineering

Contact e-mail: [adelajda.pala@pwr.wroc.pl](mailto:adelajda.pala@pwr.wroc.pl)

### **Abstract**

*This paper presents investigations of the mass moisture content in saline lime mortar carried out using the dielectric method. Lime mortar samples placed in respectively a nitrate, chloride and sulphate water medium with a different ionic concentration and in a reference water medium devoid of salt were investigated. After they were saturated to a constant mass, the samples were investigated using the nondestructive dielectric method by means of a UNI1 dielectric moisture meter and subsequently placed in a climatic chamber and subjected to multistage drying to a constant mass. After each drying stage the samples were weighed and their moisture content was determined using the dielectric moisture meter and the salinity of the mortar was determined for selected samples. It was found that due to salinity the lime mortar moisture content evaluated by the nondestructive dielectric method significantly differed from the real moisture content value. Dependences between mass moisture content  $W_m$  and reading  $X$  of the dielectric meter used in the investigations were determined for the different salt concentrations in the lime mortar. It is shown that the influence of the different salt concentrations in the lime mortar on the dielectric meter readings is similar. Having in mind building practice, the obtained results have been generalized in the form of correlations between mass moisture content and dielectric meter readings.*

**Key words:** dampness, salinity, mortar, moisture meter

### **1. Introduction**

Moisture and salts dissolved in water are the main causes of damage arising in the masonry walls of buildings having no vertical and horizontal damp-proof courses or when this insulation is ineffective [1, 3, 4, 6]. In practice, walls are nearly always in contact with a water environment polluted with salts in low, medium or high concentrations [1, 4]. When the damp-proof courses fail to perform their function, the building masonry walls become damp and saline as a result of the capillary rise of ground water containing salts (nitrates, chlorides and sulphates) harmful to the masonry structure [2, 11].

The moisture content in brick walls is often determined using nondestructive techniques since the latter are noninvasive, quick and can be repeatedly used in the same place. The techniques are particularly useful in cases where one cannot interfere into the building structure. Nondestructive moisture-content tests are frequently conducted using electric techniques, such as the dielectric technique and

the electric resistance technique. It should be noted that the manufacturer or the tester calibrates the electric meters in laboratory conditions, using samples damp with water devoid of salt. The problem of the reliability of determining moisture content by means of meters calibrated in this way has been reported in [1, 3, 4, 5, 7] while in [8, 9, 10] it has been experimentally demonstrated how big the measuring error can be in the case of solid brick moisture content measurements.

This paper presents the results of investigations showing how large error can be made when measuring the moisture content in lime mortar – a component of numerous historic buildings – by means of a dielectric moisture meter.

## 2. Tests and their results

Class M 0.5 lime mortar characterized by a density of  $1.82 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ , a moisture absorption of 13.0% and a porosity of 27.0%, was tested. Sixty  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  specimen cubes (fig. 1a), divided into 10 groups designated with the letters: W-W, W-AM, W-AS, W-AD, W-CM, W-CS, W-CD, W-SM, W-SS, W-SD, each comprising six cubes, were used in the tests. All the specimens were dried to a constant mass at a temperature of  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Fig. 1. View of: a) lime mortar cubes prepared for testing, b) lime mortar tested using dielectric technique.

Table 1. Concentration  $r$  [%] of solution in which tested lime mortar cubes were stored and concentration  $c$  [%] of salts in mortar.

Solution concentration (r) and concentration (c) [%] of salts in lime mortar and their symbols in fig. 6-8.	Type of medium							
	Water (symbol: “+”)		Nitrate		Chloride		Sulphate	
	(r)	(c)	(r)	(c)	(r)	(c)	(r)	(c)
low – M (symbol: “.”)	0	0	0.05	0.05	0.10	0.39	0.21	0.80
medium - S (symbol: “o”)	0	0	0.19	0.20	0.37	0.78	0.61	1.20
high – D (symbol: “Δ”)	0	0	0.37	0.50	0.68	1.20	1.02	1.60

The first group of lime mortar cubes, designated with the letters W-W, was placed in distilled water devoid of salt. The next three groups, designated with the letters: W-AM, W-AS, W-AD, were placed in nitrate medium A with a different  $\text{NO}_3^-$  ion concentration (low – M, medium – S, high – D). Then three groups, designated with

the letters: W-CM, W-CS, W-CD, were placed in chloride medium C with a different  $\text{Cl}^-$  ion concentration (low – M, medium – S, high – D). The last three groups, designated with the letters: W-SM, W-SS, W-SD, were placed in sulphate medium S with a different  $\text{SO}_4^{2-}$  ion concentration (low – M, medium – S, high – D). The mass concentrations [%] of the solutions, in which the specimens were kept at a temperature of 20°C until their mass stabilized, are shown in table 1.

Subsequently, the lime mortar specimens were removed from the solutions and from water and tested using the dielectric technique. Dielectric meter Uni1 with ball probe B50 (photo 1b), which is commonly used in building practice, was used for this purpose.

The mortar was subjected to multistage drying until its mass stabilized. In the first stage, the specimens were dried at an air temperature of 20°C and a relative air humidity of 75%. Then the humidity was reduced to 50% while the air temperature was left unchanged. In the third stage, the specimens were dried at a relative air humidity of 20% and a temperature of 30°C. Subsequently, the temperature was increased to 50°C while the relative air humidity was left unchanged. Finally, the specimens were dried at a temperature of 75°C and a relative air humidity of 0%. After each drying stage, the mortar was tested using the dielectric technique and its actual mass moisture content was determined by weighing.

### 3. Analysis of tests results

The test results are presented in figures 2-5, which also show the correlations between mass moisture content  $W_m$  and reading  $X$  of the dielectric meter used in the tests, for lime mortar cubes kept in water (fig. 2) and in the nitrate medium (fig. 3), the chlorine medium (fig. 4) and the sulphate medium (fig. 5), with a different salt content. All the correlations were described with mathematical exponential functions. In figures 2-5, numbers from 0 to 3 were assigned to the correlations, i.e. 0 to the water medium, 1 to the medium with the low ion concentration, 2 to the medium with the medium ion concentration and 3 to the medium with the high ion concentration. It should be noted that the values of correlation coefficient  $R^2$  calculated for all the correlations are high, ranging from 0.8676 to 0.9560, which is evidence of a very good fit between the correlations and the test results.

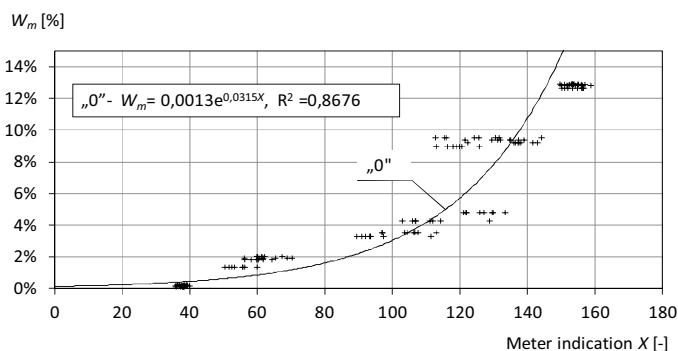


Fig.2. Correlation between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water.

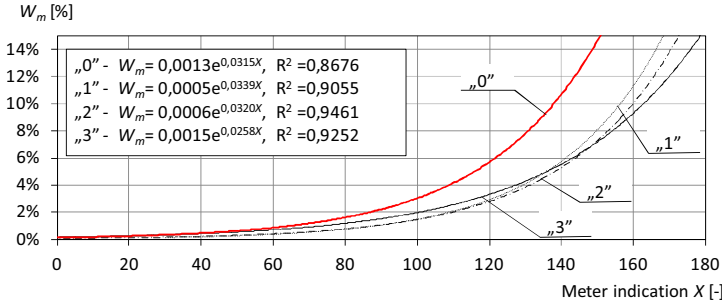


Fig. 3. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $\text{NO}_3$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

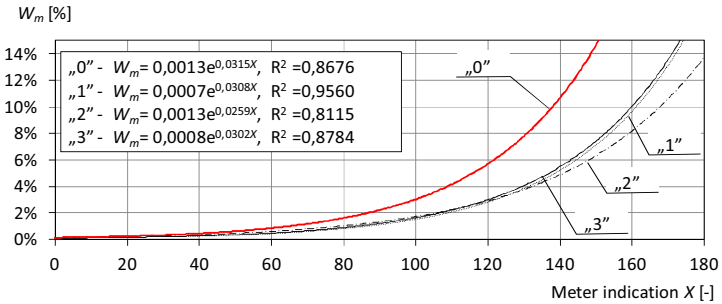


Fig. 4. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $\text{Cl}^-$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

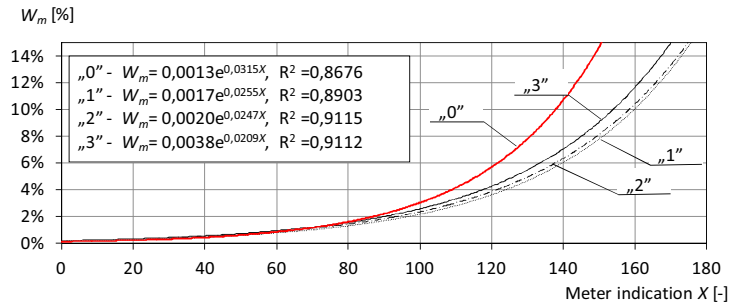


Fig. 5. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $\text{SO}_4^{2-}$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

It follows from figs 3-5 that, similarly as demonstrated for ceramic brick in [8, 9], the effect of salinity on the results of the measurements of the moisture content in the lime mortar only slightly depends on the concentration of the salt contained in the mortar, i.e. similar results are obtained for both the low and high concentrations. It should be noted that correlations  $W_m$ - $X$  designated with numbers from 1 to 3 quite significantly differ from the correlation  $W_m$ - $X$  designated with 0. Having in mind the use of the results in building practice, generalized correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter reading  $X$  for lime mortar kept in aqueous solutions containing respectively  $\text{NO}_3^-$  (fig. 6),  $\text{Cl}^-$  (fig. 7) and  $\text{SO}_4^{2-}$  (fig. 8) ions have been developed.

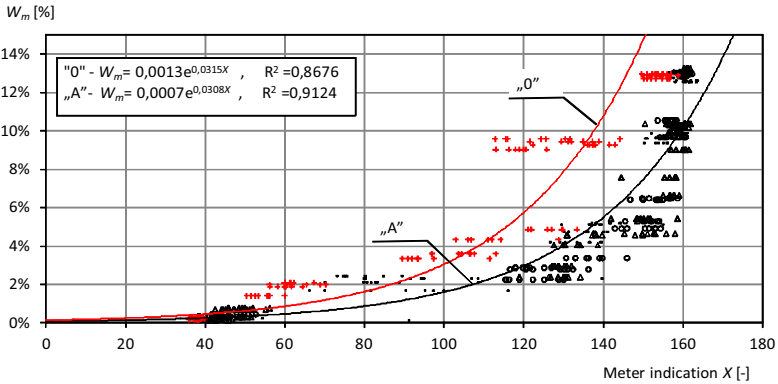


Fig. 6. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $\text{NO}_3^-$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

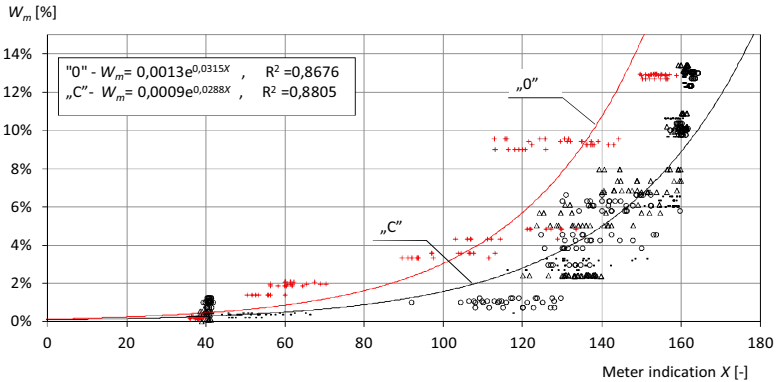


Fig. 7. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $\text{Cl}^-$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

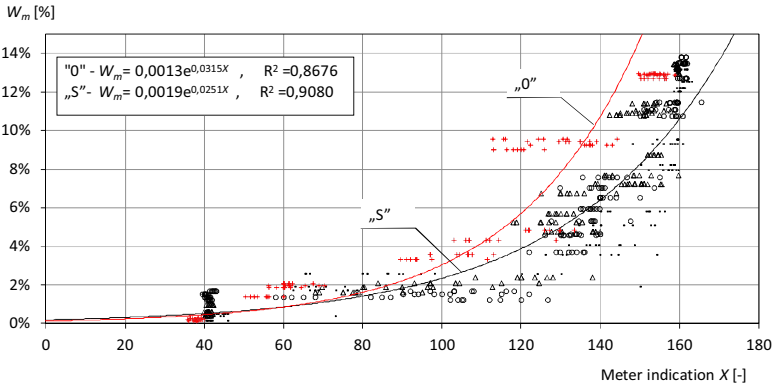


Fig. 8. Correlations between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water (correlation 0) and with water solution containing different mass concentrations [%] of  $SO_4^{2-}$  ions: low concentration – correlation 1, medium concentration – correlation 2 and high concentration – correlation 3.

Figure 9 shows the generalized correlations and the clearly different correlation for the water medium devoid of salt, which was the reference.

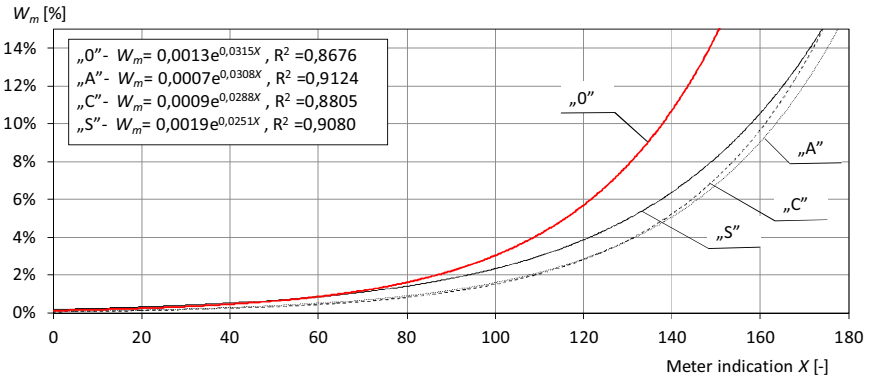


Fig.9. Correlation between mass moisture content  $W_m$  and dielectric meter indication  $X$  for saline lime mortar damp with water.

Therefore, it can be concluded that regardless of the kind of (nitrate, chloride and sulphate) medium in which the tested lime mortar cubes were kept and its concentration of  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  ions, salinity has a significant effect on readings  $X$  of the dielectric meter used in the tests. Table 2 shows how this significant effect can translate into an erroneous evaluation of the moisture content in saline lime mortar.

Table 2. Comparison showing possible errors in estimating mass moisture content  $W_m$  of salt-affected lime mortar by dielectric method.

Brick mass moisture content $W_m$	Meter indication X read from correlation "0" for $W_m$ given in column 1 [-]	Type of correlation	Meter indication X read from correlation "A", "C", "S" for $W_m$ given in column 1 [-]			Mass moisture content $W_m$ read from correlation "0" for indications X given in columns 4, 5 and 6			Relative error in estimate of moisture content $W_m$		
			A	C	S	A	C	S	A	C	S
Type of medium											
	W	-	A	C	S	A	C	S	A	C	S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4%	109	"1"	129	131	124	7,6%	8,1%	6,4%	90,7%	103,6%	60,8%
		"2"	131	132	121	8,1%	8,4%	5,9%	102,9%	109,8%	48,3%
		"3"	127	130	113	7,2%	7,7%	4,5%	79,0%	92,3%	12,9%
6%	122	"1"	131	132	121	8,1%	8,2%	6,0%	103,6%	106,2%	48,8%
		"2"	141	145	140	11,1%	12,3%	10,6%	85,3%	105,5%	76,9%
		"3"	144	148	138	12,1%	13,7%	9,9%	101,6%	129,0%	65,8%
8%	131	"1"	143	143	132	11,7%	11,7%	8,3%	95,8%	95,7%	38,7%
		"2"	145	146	138	12,3%	12,8%	9,9%	105,5%	114,1%	65,0%
		"3"	150	154	151	14,5%	16,5%	15,1%	81,5%	106,8%	89,3%
10%	138	"1"	153	159	149	16,1%	19,5%	14,4%	100,7%	143,7%	79,5%
		"2"	154	152	146	16,7%	15,9%	12,8%	108,6%	98,1%	60,4%
		"3"	154	156	149	16,5%	17,6%	14,2%	106,8%	120,0%	77,6%
12%	144	"1"	156	161	160	17,9%	20,8%	19,9%	78,7%	107,9%	99,5%
		"2"	160	168	158	20,0%	25,6%	19,1%	100,0%	155,7%	90,8%
		"3"	163	160	156	21,9%	20,0%	18,0%	119,2%	100,0%	79,7%
12%	144	"1"	161	164	158	20,8%	22,5%	18,8%	107,9%	124,6%	88,0%
		"2"	162	167	167	21,2%	25,0%	25,0%	76,4%	108,7%	108,2%
		"3"	166	175	166	23,9%	31,9%	24,1%	99,5%	166,0%	100,7%
12%	144	"1"	170	166	165	27,4%	24,2%	23,6%	128,2%	101,6%	97,1%
		"2"	167	170	165	25,0%	27,4%	23,6%	108,7%	128,5%	96,9%

#### 4. Conclusion

The test results show that salinity has a significant effect on the results of the measurement of moisture content in lime mortar by the dielectric method. The determined correlations between moisture content  $W_m$  and reading X of the dielectric meter for the lime mortar kept in respectively the nitrate, chloride and sulphate medium with a different ion concentration are very similar, but significantly differ from correlation  $W_m - X$  determined for the lime mortar kept in water devoid of salt.

A similar conclusion as the one reached in [8, 9, 10] emerges from the investigations, i.e. in order to properly determine the moisture content in saline brick walls by the dielectric method, before measuring moisture content one should calibrate the dielectric meter in the building to be tested. The calibration consists in determining correlation  $W_m - X$  or selecting a correlation  $W_m - X$  from the correlations previously determined for other material- and age-wise similar brick walls being in service in similar environmental conditions. It should be noted that if one uses a correlation determined, for example, by the meter manufacturer for masonry samples damp with water devoid of salt, one can make a significant error in the evaluation of the moisture content in the tested saline wall. The derived generalized correlations between mass moisture content and dielectric meter reading can help to minimize errors in the evaluation of the mass moisture content in saline brick walls in building practice.

## References

- [1] Adamowski J., Hoła J., Matkowski Z.: Probleme und Lösungen beim Feuchtigkeitsschutz des Mauerwerks von Baudenkmälern am Beispiel zweier großer Barockbauten in Wrocław. *Bautechnik* Vol. 82, Issue 7, 06/2005, 426-433.
- [2] Alsabry A.: Dynamics of the capillary rise in building walls (in Polish). *Przegląd Budowlany* 9/2010, 46-48.
- [3] Franzoni E., Sandrolini F., Bandini S.: An experimental fixture for continuous monitoring of electrical effects in moist masonry walls. Elsevier. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2023-2029.
- [4] Hoła J., Matkowski Z.: Wybrane problemy dotyczące zabezpieczeń przeciwwilgociowych ścian w istniejących obiektach murowanych. *Mat. XXIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 2009, s.73-92.*
- [5] Karyś J., Zwierzyniecki K.: Specification of the measurement of the moisture content in building partitions by electrical methods (in Polish). *Materiały Budowlane* 10/2006 (No. 410), 60-61.
- [6] Koniorczyk M., Wojciechowski M.: Wpływ soli na stan wilgotnościowy zaprawy cementowej. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce* Tom V, Nr 1-2010, 35-40.
- [7] Pala A.: Comparative analysis of nondestructive brick wall dampness assessments based on hypothetical dependence and correlational dependence. 42nd International Conference "Defektoskopie 2012", Sec u Chrudimi, Czech Republic, 2012, s.181-188.
- [8] Pala A.: Testing moisture content of salt-affected ceramic brick by nondestructive dielectric method (in polish). *Materiały Budowlane* 6/2013, s.60-62.
- [9] Pala A., Hoła J.: Determination of moisture content in salt-affected ceramic brick by nondestructive resistivity method (in polish). *Materiały Budowlane* 7/2013, s.85-87.
- [10] Pala A.: The influence of salinity on ceramic brick moisture content test results obtained using the nondestructive dielectric method. *Proceedings of International Interdisciplinary PhD Workshop 2013, Brno, Czech Republic, 2013, s.156-160.*
- [11] Rirsch E., Zhang Z.: Rising damp in masonry walls and the importance of mortar properties. *Construction and Building Materials* 24 (2010), 1815-1820.





## Nonlinear Resonance Characteristic Measurement for Evaluation of Thermally Damaged Concrete

Sun-Jong Park\*, Hong Jae Yim\*, Hyo-Gyoung Kwak\*

\*291 Daehak-ro (373-1 Guseong-dong), Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea

Contact e-mail: [kwakhg@kaist.ac.kr](mailto:kwakhg@kaist.ac.kr)

### Abstract

*Since thermally damaged concrete structure accompanies the formation of micro-defects according to physicochemical changes in concrete, the adoption of a suitable evaluation method is required. This paper concentrates on the characterization of thermally damaged concrete on the basis of amplitude-dependent resonance characteristic of concrete specimens, which is the nonlinear resonance frequency shift. The nonlinear resonance characteristic is related with the nonlinear strain-stress relationship of material, and then it can be used as a direct measure for thermal damage of concrete from the imperceptible defects to the perceptible defects. Experiments were performed on thermally damaged concrete specimens, and the test results were represented as nonlinearity parameter, the representative of nonlinear resonance characteristic. Based on the test results, the proposed method is proper to evaluate sensitively thermal damage, while taking into account of different thermal damages. In addition, the comparative study between the proposed method and the measurement of linear resonance frequency confirms the suitability of the proposed method.*

**Key words:** "nonlinear acoustic", "amplitude-dependent", "resonance frequency shift", "thermal damage of concrete", "micro-defects", "impact vibration"

### 1. Introduction

Due to the safety and reliability issues, there has been an increase in the demand of evaluation methods for damage in concrete structure. Also, concrete is recognized as fire-resistance material, but it undergoes severe damages such as the shrinkage of cement paste matrix, the spalling of concrete, and the delamination of concrete (Bazant and Kaplan 1996). Therefore, the assessment of thermally-damaged concrete necessarily includes the micro-scale evaluation to determine the damage state and the reuse of concrete. A variety of nondestructive evaluation (NDE) techniques have been developed for evaluating thermal damage of concrete, including the inspection through the average response of the concrete surface (Schmidt rebound hammer, Windsor probe, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), etc.), the inspection through the point-by-point response of small concrete samples extracted at different regions (small-scale mechanical testing, differential thermal analysis, thermogravimetric analysis, colorimetry, chemical analysis, scanning electron microscopy, thermoluminescence analysis, etc.), and the inspection of overall concrete using some special interpretation methods (UPV indirect method,

impact echo, modal analysis of surface waves, electric resistivity, etc.) [1-3]. Some of these methods are appropriate to in-situ test, but represent lack of accuracy (e.g. UPV, impact echo, rebound hammer, etc.). The other methods can evaluate the damage accurately by point-by-point inspection, but the experimental process is time-consuming, and is able to cover only specific damaged point.

To overcome these drawbacks, extensive researches have been performed to develop NDE methods. Among them, evaluating methods based on nonlinear acoustic have been proposed to enhance the accuracy; which evaluate the damage to measure the distortions of the propagating wave through concrete. In this study, a NDE method is proposed for evaluating the thermally-damaged concrete that uses nonlinear resonance characteristic of concrete, which has sufficient sensitivity for the characterization of thermally-induced micro-defects in concrete. In order to establish the validity of the method, tests were performed on 30 samples, which were exposed to different high temperatures. The test results represent that the proposed method can sensitively characterize thermal damage on various high temperatures. Furthermore, the sensitivity of the proposed method is compared with measurement of linear resonance frequency.

## 2. Nonlinear Resonance Characteristic

The measurement nonlinear resonance characteristic focuses on the frequency difference between the input and the output signals. This phenomenon is mainly related interactions of the large amplitude input signal and micro-discontinuities, which directly effects on nonlinear elastic behavior of material. Therefore, evaluation techniques based on nonlinear resonance characteristic show the remarkable sensitivity for various materials when compared to the conventional evaluation techniques [4]. According to the previous researches, concrete also has the following nonlinear resonance characteristics: nonlinear change of attenuation parameter and modal damping ratio, and nonlinear resonance frequency shift [5-7]. In this study, the nonlinear resonance frequency shift is mainly used for the evaluation of thermally-damaged concrete. The relationship between resonance frequency shift and strain amplitude ( $\Delta\varepsilon$ ) can be expressed as follows [5];

$$\frac{f_0 - f}{f_0} = \alpha_h \Delta\varepsilon \quad (1)$$

where  $f_0$  is the linear resonance frequency, and  $f$  is the measured resonance frequency including the amplitude-dependent effect. The hysteretic nonlinearity parameter,  $\alpha_h$ , is a damage indicator which is measured by amplitude-dependent resonance frequency shift.

## 3. Experiments

The nonlinear resonance characteristic vibration, i.e. amplitude-dependent resonance frequency shift, of thermally-damaged concrete specimen was measured via mechanical impact to determine the hysteretic nonlinearity parameter ( $\alpha_h$ ). Fig. 1 shows the schematic diagram of the experiments and the experimental setup. A detailed description of the experimental apparatus and configuration, are as follows:

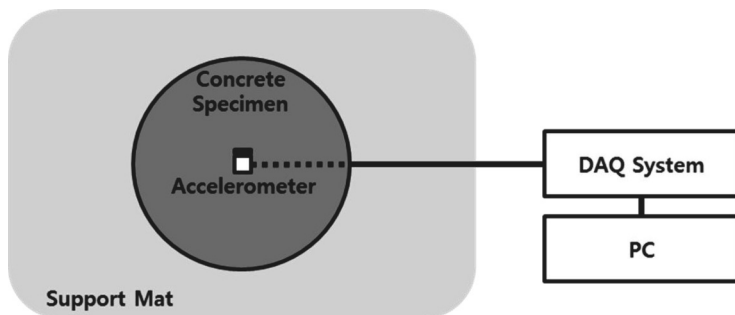


Fig. 1 The schematic diagram of measurement for the nonlinear resonance frequency shift

a steel bead, which is 13.8g in weight, was dropped on the centre of concrete disk to induce different impacts as height; a piezoelectric shear accelerometer was mounted with the petro wax at the opposite side of impact for detecting the vibration of concrete disk; a digitizer for the dynamic signal acquisition with 100kS/s sampling rate converted the analogue vibration signal to digital signal. The signal of the accelerometer triggered the data acquisition system, and the captured signal was stored in the computer. The use of the soft mat was to obtain the free vibration response of the sample, to avoid unwanted effect on the nonlinearity, and to isolate the accelerometer that was attached only to the sample.

The mixture proportion of concrete was 0.50:1.00:2.88:2.88, which is expressed as the weight ratio of water, cement, fine aggregate, and coarse aggregate. The size of concrete specimens was 100mm in diameter and 25mm in thickness, shaped like a thin disk. To prevent hygrothermal spalling, all specimens were stored at 100°C at least 2 days. Then, specimens were exposed to different high temperatures (200°C, 400°C, 600°C, and 800°C) immediately during an hour. For each target temperature, 5 damaged samples were prepared. After cooling, nonlinear resonance characteristic

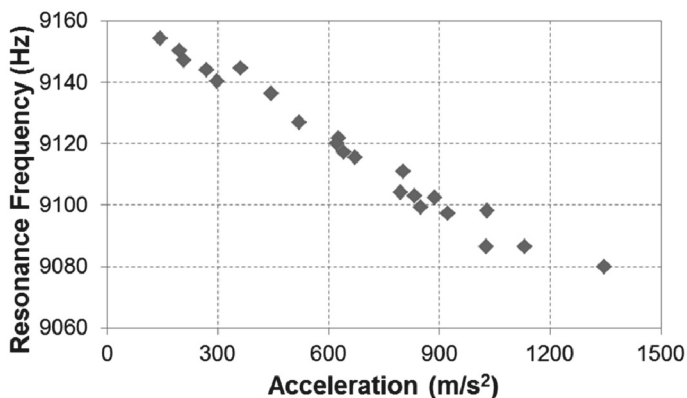


Fig. 2 A representative recorded signal of the time-domain test result (400 °C)

measurement was performed on each specimen. As a representative recorded signal, the time-domain test result of a sample (400°C) is shown in Fig. 2.

#### 4. Test results

To represent thermal damage as quantitative measure, the amplitude-dependent resonance frequency shift of each concrete sample was computed as nonlinearity parameter. Table 1 summarizes the measured nonlinearity parameters, as averaged values of 5 samples that were suffered the same peak temperature. Additionally, the comprehensive results of the nonlinearity parameter are represented in Fig. 3; the averaged values of nonlinearity parameter are marked in along with the error bar which demonstrates the standard deviation. As shown in Fig. 3, the nonlinearity parameter increases rapidly as elevating peak temperature. Remarkably, nonlinearity parameter is significantly increased even though the lower peak temperatures (200°C, 400°C) that induce mainly micro-defects of concrete. Therefore, the proposed method can evaluate accurately the presence or absence of thermal damage; also can evaluate sensitively the degree of thermal damage of concrete.

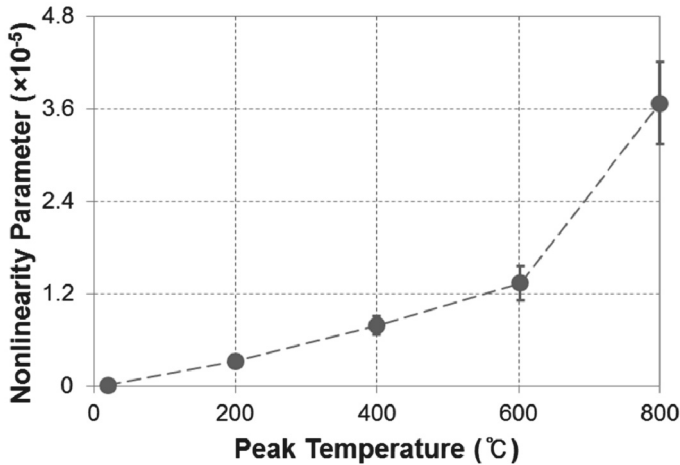


Fig. 3 The measured nonlinearity parameters according to the peak temperature in thermally-damaged concrete

#### 5. Comparison between linear and nonlinear resonance characteristic

In order to compare the sensitivity of each method, the sensitivity parameter was defined as:  $S(T)=1-Y(T)/Y(20)$ , in cases when the experimental result decreased as thermal damage increased (UPV and dynamic modulus), and  $S(T)=1-Y(20)/Y(T)$ . The comprehensive results of the sensitivity parameter are shown in Fig. 4. From the results, the sensitivity parameter of nonlinearity parameter ( $\alpha_n$ ) are much greater than that of linear resonance frequency ( $f_0$ ) for all target temperature levels. Remarkably, the differences between the sensitivity parameters of two measured values are maximized at lower target temperature (200°C or 400°C), which can be considered

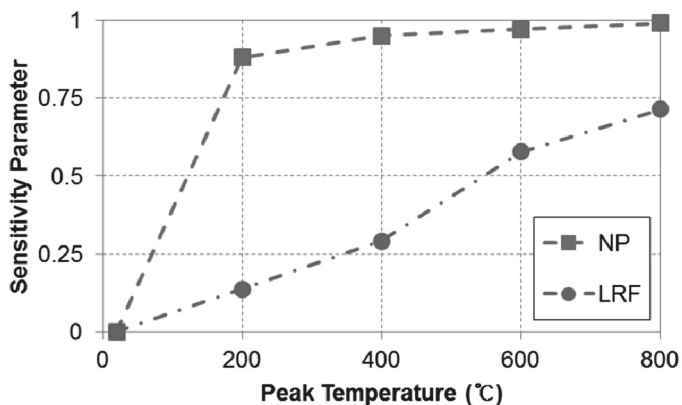


Fig. 4 Comparisons of sensitivity parameters according to nonlinearity parameter (NP) and linear resonance frequency (LRF)

as the formation of thermal defect in concrete. Therefore, the comparative analysis of methods provides that the proposed method can evaluate thermally damaged concrete with sensitivity of test results.

## 6. Conclusion

Nonlinear resonance vibration of concrete disks, a means of NDE method, is appropriate for evaluating thermally-damaged concrete using amplitude-dependent resonance frequency shift, which is in the relation of the hysteretic nonlinearity. The peak temperature mainly effects on the variation of the nonlinearity parameter. Thus, nonlinear resonance vibration provides a reliable measure for determining the state of thermally-damaged concrete, and estimating the exposed temperature. As following the sensitivity analysis, the proposed method represents remarkable sensitivity compared to linear resonance frequency measurement, especially for micro-defects. For the further study, the propose method will be applied to evaluate thermally-damaged concrete structures, and to estimate the material properties of concrete. Furthermore, it can be used for monitoring continuously localized site of u-space social infrastructure.

## Acknowledgment

This work is financially supported by Korea Minister of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTM) as 「U-City Master and Doctor Course Grant Program」 and a grant(13SCIPA01) from Smart Civil Infrastructure Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA).

## References

- [1] M. Colombo and R. Felicetti, "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures," *Fire Safety Journal*, vol. 42, pp. 461-472, 2007.
- [2] M. Y. Chew, "The assessment of fire damaged concrete," *Building and Environment*, vol. 28, pp. 97-102, 1993.
- [3] ACI Committee 228, *ACI Committee 228, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228. 2R-98)*. Farmington Hills, MI, 1998.
- [4] Y. Zheng, R. G. Maev, and I. Y. Solodov, "Review/Synthèse Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review," *Canadian Journal of Physics*, vol. 77, pp. 927-967, 2000.
- [5] K. E. A. Van Den Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet, and P. A. Johnson, "Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)," *Ndt & e international*, vol. 34, pp. 239-248, 2001.
- [6] J. Chen, J. Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, "Theoretical and experimental study of the nonlinear resonance vibration of cementitious materials with an application to damage characterization," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, pp. 2728-2737, 2011.
- [7] K. E. A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. A. Ten Cate, and P. A. Johnson, "Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy," *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 12, pp. 31-42, 2000.



## **PROBLEMATIKA NDE BETONU V OBLASTI JADERNÉ ENERGETIKY**

### **CONCRETE NDE PROBLEMS IN THE FIELD OF NUCLEAR INDUSTRY**

**Jan PATERA\***

\*Centrum Výzkumu Řež s.r.o.  
Contact e-mail: Jan.Patera@cvrez.cz

#### **Abstrakt**

*Zvyšování bezpečnosti struktur a komponent, potřebné pro prodloužení životnosti jaderné elektrárny, je zároveň jedním ze základních cílů výzkumu a vývoje NDT betonu. Dle evropské výzkumné agendy SNETP patří mezi hlavní oblasti výzkumu betonu hodnocení integrity, vlastností materiálu, jeho stárnutí a kvantifikace zatížení.*

*Pro hodnocení stavu betonu se ukázaly být nevhodnější nelineární ultrazvukové metody, uvažující při šíření vln vliv hysterese materiálu. Oproti lineárním akustickým metodám jsou mnohem citlivější na změnu struktury materiálu a zdají se být citlivější než jakákoli jiná metoda, která je v současné době k dispozici. Výzvy a problémy, které stojí před aplikací nelineární spektroskopie v oblasti jaderné energetiky budou diskutovány v tomto příspěvku.*

**Klíčová slova:** NDT betonu, nelineární ultrazvuková spektroskopie, stárnutí betonu, jaderná energetika

#### **Abstract**

*Safety improvement of structures and components, necessary for extending the lifetime of nuclear power plants, is also one of the main R&D objectives of concrete NDT. According to the European research agenda SNETP one of the main research areas is concrete integrity assessment, material performance, aging and quantification of the load.*

*The most suitable for the assessment of concrete proved to be non-linear ultrasonic methods, considering material hysteresis effect during the wave propagation. Compared to the linear acoustic methods these are much more sensitive to material structure changes and seem to be more sensitive than any other method that is currently available. Challenges and problems faced by non-linear spectroscopy applications in the field of nuclear industry will be discussed in this paper.*

**Keywords:** concrete NDT, non-linear ultrasonic spectroscopy, concrete aging, nuclear industry

## 1. Úvod

Hlavním kontextem problematiky nedestruktivního zkoušení (NDT) betonových konstrukcí v oblasti jaderné energetiky je průkaz jejich dlouhodobé životnosti. Ten bude důležitý zvláště při prodlužování životnosti jaderné elektrárny (JE).

Beton pro zajištění bezpečnosti JE sestává z portlandského cementu, drobného kameniva (písek), hrubého kameniva běžného typu (oblázkový štěrk) či těžkého typu (železné broky), optimalizovaného obsahu vody, přísady a ocelové výztuže. Výztuž je tvořena dráty nebo lany uvnitř betonu. Výztužná ocel nejenže nese podstatnou část tahového zatížení, ale též zamezuje šíření trhlin, které při tomto druhu zatížení vznikají.

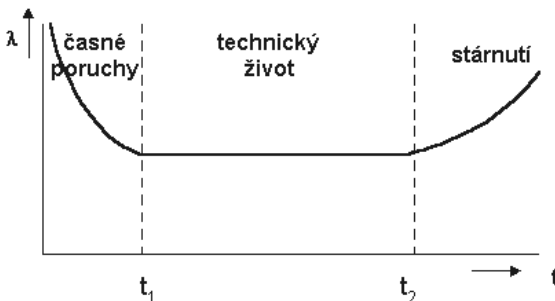
Od běžného betonu se beton pro jaderné účely liší následovně:

- lepší kontrola jakosti
- požadavky na vodotěsnost a plynotěsnost vyžadují použití ocelové oblicovky
- vyšší obsah cementu (tj. optimalizovaný vodní součinitel)

## 2. Provozní zkušenosti

Způsobilost betonových konstrukcí je z bezpečnostního hlediska obecně na velmi vysoké úrovni. Bylo však zjištěno několik případů, které mohly potenciálně ohrozit schopnost kontejnmentu a dalších bezpečnostních konstrukcí plnit funkční a provozní požadavky. Poruchovost jako funkci času dobře popisuje vanová křivka spolehlivosti na obr. 1.

Většina problémů souvisejících s degradací betonových konstrukcí JE se objevila na počátku jejich životnosti. Příčiny souvisely buď s nevhodným výběrem materiálu a konstrukčními závadami anebo s účinky vnějšího prostředí.

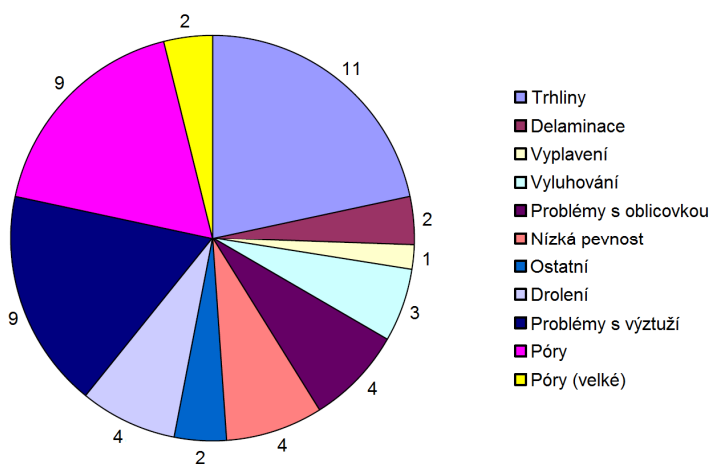


Obr. 1: Vanová křivka spolehlivosti  
Fig. 1: Reliability bathtub curve



Mezi příklady závad uveďme nízkou pevnost v tlaku betonu, póry pod podkladovými deskami předpínací výztuže plynoucí z nesprávného ukládání betonu, trhliny v kotvicích hlavách předpínací výztuže následkem koroze či křehnutí pod napětím, a delaminaci vrchní části kontejmentu způsobenou nízkou kvalitou materiálu kameniva a absencí radiální výztuže či nevyvážením předpínacích sil.

Přestože se neočekává, že do procesu prodlužování životnosti JE mohou výrazněji zasáhnout betonové konstrukce, v minulosti bylo zjištěno několik projevů stárnutí, které jsou uvedeny v grafu na obr. 2. Polovinu všech zjištěných problémů v součtu tvoří trhliny, póry a delaminace. Další čtvrtinu pak tvoří problémy s ocelí – oblicovkou, armovací a předpínací výztuží.[1]



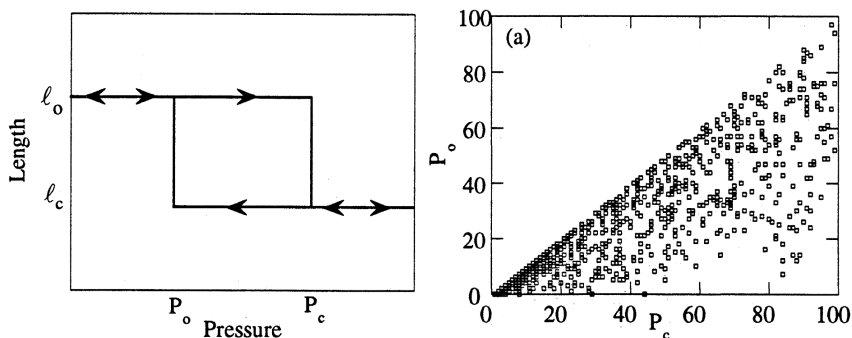
Obr. 2: Charakter zjištěných problémů (popisky podle směru hodinových ručiček) [1]  
 Fig. 2: Nature of reported problems (labels by clockwise direction) [1]

### 3. Nelineární ultrazvuk

Materiály procházející poškozením struktury vykazují rostoucí rysy nelineární elastické odezvy, která pochází od komplexní superpozice trhlin mezoskopické nebo makroskopické velikosti. Předpokládá se, že v chování těchto materiálů má značný vliv hystereze.[2]

Makroskopické chování poškozených materiálů lze popsat pomocí množství mezoskopických jednotek, které se skládají z velkého statistického souboru

mikroskopických jednotek. Hysterezní mezoskopickou elastickou jednotku je možné přirovnat k mikrotrhlině vystavené vnějšímu tlaku, který způsobuje její otevření a zavírání. Na obr. 3 vlevo je mechanické chování mikrotrhliny popsáno hysterezní smyčkou. Pro bezpečné vymezení této smyčky jsou potřeba dvě rovnovážné délky: otevírací  $l_o$  a zavírací  $l_c$ , a odpovídající hodnoty tlaku  $p_o$  resp.  $p_c$ , přičemž platí  $p_c \geq p_o$ . Míra hystereze je však různá (obr. 3 vpravo) a mnoho elastických jednotek hysterezi nevykazuje vůbec (tj.  $p_c = p_o$ ).[3]



Obr. 3: Hysterezní mezoskopická elastická jednotka (vlevo) a rozdělení těchto jednotek podle velikosti hystereze (vpravo).[4]

Fig. 3: Hysteretic mesoscopic elastic unit (left) and hysteresis distribution of these units (right).[4]

#### 4. Degradace betonu

V prostředí JE lze očekávat mnoho degradačních vlivů. Zvláštní pozornost je upřena k působení vysokých teplot a radiace, které vystavují beton nevratným změnám.

##### Tepelné poškození

Při zvýšené teplotě prochází portlandská cementová pasta fyzikálními a chemickými změnami, které přispívají ke vzniku smršťování, tečení a změnám pevnosti. Rozhraní mezi kamenivem a cementovou pastou (tzv. přechodová vrstva) je velmi porézní a zkrystalizované. S nárůstem tepelného poškození tato vrstva postupně degraduje kvůli rozdílné roztažnosti kameniva (expanze) a cementové pasty (smrštění).[1] Mikrotrhliny pak vedou ke zhoršení mechanických vlastností a nárůstu nelineárního chování materiálu.

Zvýšené teploty snižují také vazbu mezi betonem a ocelovou výztuží. Dokonce i při relativně nízkých teplotách (např. 65 °C), mohou mít teplotní cykly škodlivé účinky na mechanické vlastnosti betonu – klesá pevnost v tlaku, tahu, vazebná pevnost

a modul pružnosti. Podle ASME je nejvyšší dovolená provozní teplota na rozhraní oblicovky a betonu 65 °C,[5] v běžném provozu teplota nepřevyšuje 30-35 °C.

Ohřev betonu za podmínek, kdy je zabráněno ztrátě vody, má horší důsledky pro jeho pevnost. Podle jedné z teorií narušují u hydratovaných křemičitanů vápenatých ionty OH<sup>-</sup> existující vazby tak, že se váží na Si<sup>4+</sup> a saturují vazebnou schopnost křemíku.[6] U šachty reaktoru je beton od vnitřního prostředí oddělen plynotěsnou ocelovou výstelkou a proto je znemožněno vysušování betonu. Z tohoto důvodu se při přípravě používá nižší vodní součinitel.

## Radiační poškození

Struktura materiálu může být ovlivněna ozářením rychlými nebo tepelnými neutrony, emitovanými aktivní zónou, či  $\gamma$ -zářením, vznikajícím v důsledku zachycení neutronu součástí, která je s betonem ve styku (zejména ocelí). Změny vlastností betonu závisí především na chování kameniva, které při vystavení záření může změnit svůj objem. Rychlé neutrony jsou zodpovědné především za značný nárůst objemu způsobený atomárními posuny, který byl pozorován u určitých druhů kameniva. Křemičité kamenivo, které má krystaly s kovalentní vazbou, je ovlivněno radiací více než kamenivo vápnité, kde je mezi krystaly iontová vazba.

Pokud je radiace betonem utlumena či pohlcena, téměř všechna absorbovaná radiace se přemění na teplo, které může mít škodlivé účinky na fyzikální, mechanické i stínící vlastnosti betonu. Stanovit, zda je zhoršení vlastností betonu způsobeno radiačním anebo tepelným poškozením, tak může být obtížné. Jaderný ohřev je zanedbatelný pro tok energie dopadajících částic  $< 10^{10}$  MeV·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Dlouhodobé vystavení radiaci může vést k poklesu pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku a modulu pružnosti betonu. Z literatury je známo:[1]

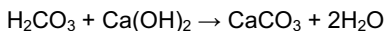
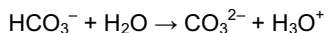
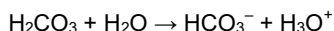
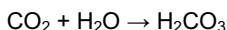
- pro určité druhy betonu může neutronové záření  $> 10^{19}$  neutronů·cm<sup>-2</sup> či dávka  $\gamma$ -záření  $> 10^8$  Gy způsobit snížení pevnosti v tlaku
- pevnost v tahu betonu se významně snižuje při neutronovém toku  $> 10^{19}$  neutronů·cm<sup>-2</sup>; tento pokles je spjat patrně s neutronovou radiací spíše než s poklesem pevnosti v tlaku
- odolnost betonu vůči neutronovému záření zřejmě závisí na typu příslušných neutronů (tj. rychlých či pomalých), jejich účinek však není objasněn
- odolnost betonu vůči neutronovému záření závisí na směšovací poměru, typu cementu a typu kameniva
- vliv  $\gamma$ -záření na mechanické vlastnosti betonu není zcela objasněn (při dávce  $6 \times 10^5$  Gy poklesne pevnost v tlaku, tahu a ohybu o 10 %, resp. 5 % a. 5 %)
- zhoršení vlastností betonu spojené s nárůstem teploty v důsledku ozáření je poměrně nízké
- koeficienty tepelné roztažnosti a vodivosti ozářeného betonu se příliš neliší od betonu vystaveného tepelnému poškození
- při působení neutronového záření klesá s jeho nárůstem modul pružnosti betonu

- radiační tečení betonu není ovlivňováno nízkou úrovní záření; při vysoké úrovni záření však radiační tečení pravděpodobně roste kvůli účinkům záření na pevnost v tahu a tlaku betonu
- pro určité druhy betonu může neutronové záření s fluencí  $> 10^{19}$  neutronů·cm<sup>-2</sup> způsobit výrazný nárůst objemu
- odolnost betonu vůči záření zpravidla vzroste, vzroste-li odolnost kameniva vůči záření
- záření má na stínící vlastnosti betonu malý vliv, až na ztrátu vlhkosti způsobené nárůstem teploty
- radiace v betonu působí radiolýzu vody a vytváří řadu krystalů kalcitu, které snižují velikost pórů i pevnost betonu

Z výše uvedeného nelze s jistotou říci, jakou odezvu bude mít radiační poškození na nelineární chování. Lze předpokládat, že nárůst objemu bude působit nárůst nelinearity materiálu a prorůstání pórů krystalů kalcitu naopak její pokles.

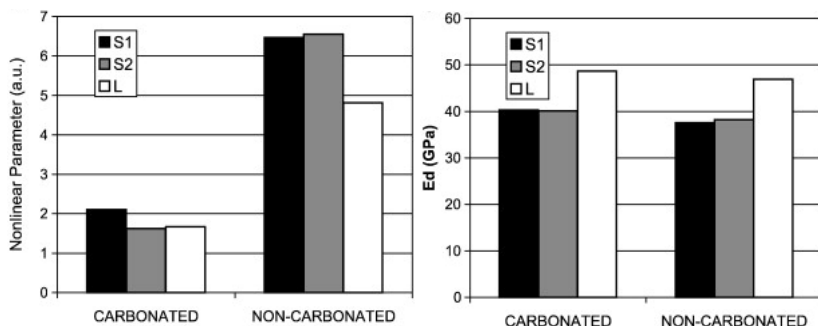
## Karbonatace

Karbonatace je pomalý proces probíhající v betonu, při němž hydroxid vápenatý obsažený v cementu reaguje se vzdušným oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu vápenatého. Chemická reakce má dvě části – nejdříve dochází k rozpouštění oxidu uhličitého ve vodě a následně k reakci vzniklé kyseliny uhličitě s hydroxidem vápenatým.



Jedním z důsledků uvolňování iontů  $\text{H}_3\text{O}^+$  je pokles pH (hodnota 12–13 před karbonací → 9 po karbonaci). Závažné důsledky má tento fakt pro výztuž betonu, neboť vede ke zničení pasivní ochranné vrstvy mezi betonem a ocelovou výztuží. Za přítomnosti vody a kyslíku se pak rozbíhá proces koroze oceli.

Poměrně závažný důsledek má při karbonataci rozdílný molární objem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{CaCO}_3$  – 33,2 resp. 36,9 cm<sup>3</sup>/mol, tj. nárůst o 11 %. Krystalky  $\text{CaCO}_3$  se ukládají v pórech a mikrotrhlinách, což se projeví poklesem porosity vzorku. Tím dojde k nárůstu lineárních parametrů a k poklesu nelineárního chování materiálu.[7]



Obr. 4: Změna nelineárního parametru  $\alpha$  a dynamického modelu pružnosti  $E_d$  před a po karbonataci betonu pro křemičité (S1, S2) a vápencové kamenivo (L).[7]

Fig. 4: Changes of non-linear parameter  $\alpha$  and dynamical Young modulus  $E_d$  before and after carbonation for siliceous (S1, S2) and limestone aggregates (L).[7]

Jak již bylo řečeno, v jaderných aplikacích je beton od vnějšího prostředí oddělen plynotěsnou ocelovou výstelkou, a vliv karbonatace by zde tedy měl být minimální. Avšak u zkušebních vzorků tato ochrana zpravidla chybí, proto je třeba tento mechanismus uvažovat.

## 5. Závěr

V teoretické části bylo uvedeno, že nelineární chování materiálu je způsobeno superpozicí hysterezních mezoskopických elastických jednotek, které lze přirovnat k mikrotrhlině či prázdnému místu v materiálu.

Některé z uvažovaných degradačních mechanismů, zvláště tepelné poškození a zčásti radiační poškození, přispívají k tvorbě nových pórů či mikrotrhlin, které budou nelineární odezvu materiálu zvyšovat. Naopak jiné projevy radiačního poškození a karbonatace vyplňují tato prázdná místa v průběhu degradace krystaly a tím nelineární odezvu materiálu snižují. Je tedy velkou neznámou, jakým způsobem se při zkoušení nelineárním ultrazvukem projeví degradace na betonových zkušebních tělesech.

## Literatura

- [1] NUREG/CR-6927, ORNL/TM-2006/529, *Primer on Durability of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures – A Review of Pertinent Factors*. 2007.
- [2] VAN DEN ABEELE, JOHNSON, SUTIN. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Res Nondest Eval*. 2000, č. 12, s. 17-30.
- [3] BARBIERI, MEO, POLIMENO. Nonlinear wave propagation in damaged hysteretic materials using a frequency domain-based PM space formulation. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, č. 46, s. 165-180.
- [4] MCCALL, GUYER. A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1996, č. 3, s. 89-101.
- [5] *ASME Chapter 14: Code for Concrete Reactor Vessels and Containments*. 2008.
- [6] VYDRA. *Lomové charakteristiky betonu vystaveného působení vysokých teplot*. Praha, 2005. Habilitační práce. ČVUT.
- [7] BOUCHAALA, PAYAN, GARNIER, BALAYSSAC. Carbonation assessment in concrete by nonlinear ultrasound. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, č. 5, s. 557-559.

## Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108, který je realizován v rámci Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF).



## PREDIKCE CHOVÁNÍ BETONOVÝCH SMĚSÍ S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE

## PREDICTION OF BEHAVIOUR OF CONCRETE MIXTURE USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

Lubos PAZDERA<sup>\*</sup>, Libor TOPOLAR<sup>\*</sup>, Vlastimil BILEK<sup>\*\*</sup>, Jaroslav SMUTNÝ<sup>\*</sup>,  
Marta KORENSKA<sup>\*</sup>, Veronika RODRIGUEZOVA<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
<sup>\*\*</sup>ZPSV a.s.

Contact e-mail: Pazdera.L@fce.vutbr.cz

### **Abstrakt**

*Metoda akustické emise je jedním z významných nástrojů oblasti nedestruktivního příp. destruktivního testování. V příspěvku bude prezentována aplikace metody akustické emise při sledování chování betonových směsí rozličného složení. K testování byly použity vzorky 100 mm × 100 mm × 400 mm, aby byl omezen vliv kameniva. Měření praskavého signálu akustické emise bylo prováděno dlouhodobě v řádu týdnů.*

**Klíčová slova:** akustická emise, beton, měření, vlnovod

### **Abstract**

*The Acoustic Emission Method is an important tool for Non-Destructive Testing and/or Destructive Testing. The paper presents the application of Acoustic Emission Method for monitoring the behaviour of concrete mixtures of diverse composition. The test of 100 mm × 100 mm × 400 mm samples was used to restrict the influence of the aggregate. Measurement of burst acoustic emission signal was carried out for a number of weeks. This research has been supported by project of VUT FAST-S-13-2100 No. 23668.*

**Keywords:** acoustic emission, concrete, measuring, waveguide

## Úvod

Výzkum a vývoj metod, které popisují chování technických materiálů po dobu jejich života je jedním z důležitých cílů základního výzkumu. Jelikož metoda akustické emise nezatěžuje strukturu betonových vzorků a umožňuje detekovat děje probíhající ve struktuře, jeví se její využití při tuhnutí, tvrdnutí a zrání betonu jako výhodné. V příspěvku je kladen důraz nejen na aplikaci metody akustické emise, ale zejména na způsob přichycení snímačů akustické emise protřednictvím vlnovodů.

## Experiment

Měření akustické emise jsou prováděna na vzorcích – hranolech o rozměrech 100 mm × 100 mm × 400 mm. Do každého vzorku jsou při nalití směsi do formy vloženy dva vlnovody dle obr. 1. Po jednodenním tuhnutí jsou vzorky odformovány. Připojení snímačů je pak jednoduše provedeno na vlnovody obr. 2.



*Obr. 1 Uchycení snímačů na vlnovodech při tuhnutí betonu*  
*Fig. 1 Mounting of sensors on the waveguide during concrete hardening*



*Obr. 2 Uchycení snímačů na vlnovodech při zrání betonu*  
*Fig. 2 Mounting of sensors on the waveguide during concrete curing*

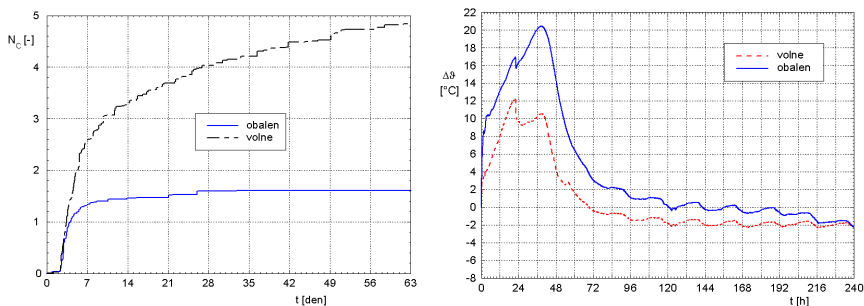


Po skončení experimentu je možné vzorky destruovat a vlnovody vyjmout k dalšímu použití.

Složení 1 m<sup>3</sup> vzorku bylo následující: jemně mletá vysokopecní struska (měrný povrch 420 m<sup>2</sup>/kg) 450 kg, Na-VS 2,0 34 kg, 50% hydroxid draselný 25 kg, voda 166 kg, plastifikátor 5 kg, písek 0/4 870 kg, jemné kamenivo 4/8 390 kg, hrubé kamenivo 8/16 415 kg. Současně byly monitorovány dva vzorky – jeden byl uložen volně, druhý obalen do folie, tj. ošetřován. Vodní součinitel dosahuje hodnoty 0,45.

Časový průběh teploty resp. teplotního rozdílu mezi vzorky a okolím dle obr. 3 vpravo ukazuje jak ochlazení vzorku odformováním po jednom dni (24 h) tak i maximální teploty ve vzorku přibližně ve 36 h. Vlivem obalení vzorku jsou až po 10 dnech teploty u vzorků srovnatelné. Zvlnění křivek od 3 dne odpovídá měnícím se teplotám ve dne a v noci.

Průběhy akustické emise dle obr. 3 vlevo ukazují kladný vliv obalení (ošetřování) vzorku. Významná aktivita akustické emise se projevuje až po ztuhnutí směsi, tedy v okamžiku, kdy se teploty vzorků téměř ustálí s okolní teplotou, tedy od třetího dne. Mezi druhým a čtvrtým dnem aktivita akustické emise výrazně roste. Sedmý den se ošetřovaný vzorek stabilizuje, tedy aktivita akustické emise klesá. U neošetřovaného vzorku tato aktivita akustické emise nadále roste.



Obr. 3 Průběh kumulativní aktivity akustické emise  $N_C$  a teplotního rozdílu  $\Delta\vartheta$  na čase  $t$

Fig. 3 Dependence cumulative acoustic emission activity  $N_C$  and temperature difference  $\Delta\vartheta$  on time  $t$

## Závěr

Metoda akustické emise patří mezi zajímavé metody skupiny nedestruktivního testování. Sledování chování struktury vzorku základního stavebního prvku betonu, ukazuje možnost popisu chování v průběhu života betonové směsi od jejího namíchání až do její destrukce. Využití metody akustické emise od raného stadia se jeví jako velmi výhodné.

Aktivita akustické emise (obr. 3 vlevo) ukazuje významný vliv ošetřování vzorku na vznik trhlin příp. změn struktury vzorku.

## Poděkování

Tento článek vznikl za podpory při řešení projektu specifického výzkumu *VUT FAST-S-13-2100 No. 23668*.

## Literatura

- [1] FICKER, T.; MARTIŠEK, D.; JENNINGS, H. Roughness of fracture surfaces and compressive strength of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2010. 40(6). p. 947 - 955. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [2] FICKER, T. Quasi-static compressive strength of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2011. 2011(41). p. 129 - 132. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [3] MAZAL, P.; PAZDERA, L.; DVOŘÁČEK, J. Application of acoustic emission method in contact damage identification. *International Journal of Materials & Product Technology*. 2011. 41(1). p. 140 - 152. ISSN 0268-1900.
- [4] PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L.; BÍLEK, V.; SMUTNÝ, J.; KUSÁK, I.; LUŇÁK, M. Measuring of Concrete Properties during Hardening. In *ESA 2010*. 1. CZ, Palacky University. 2010. p. 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7.
- [5] PLŠKOVÁ I., CHOBOLA Z., MATYSÍK M.: Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method. *Ceramics-Silikáty* 55 [2] 2011, 176-182, ISSN 0862-5468
- [6] PLŠKOVÁ I., CHOBOLA Z., MATYSÍK M.: Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors. *Transactions on transport sciences* 3 [1] 2010, 23-28, ISSN 1802-971X
- [7] LUNAK M; KUSAK I; PAZDERA L; TOPOLAR L., BILEK V., Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties, *48th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis 2010*, ISBN: 978-80-244-2533-7, Pages: 233-240 Published: 2010
- [8] SCHAUER P.: *Noise spectroscopy of shallow traps in CdTe crystals*. *ElectroScope* 2010 [3] 2010, 55-59, ISSN 1802-4564
- [9] ADÁMEK, J, JURÁNKOVÁ, V, KADLECOVÁ, Z, STEHLÍK, M: There NDT Methods for the Assessment of Concrete Permeability as a Measure of Durability. *International Symposium on NDT Testing of Materials and Structures, Springer in RILEM Book series*, Istanbul, Turkey, p. 55-62, ISBN 978-94-007-0722-1



## **FLEXIBILNÍ MANIPULÁTOR "RICHARD" PRO NDE APLIKACE**

### **FLEXIBLE MANIPULATOR "RICHARD" FOR NDE APPLICATIONS**

**Michal PÖSCHL, Vlastimil HABRCETL**

Centrum Výzkumu Řež s.r.o.  
Contact e-mail: psc@cvrez.cz, hab@cvrez.cz

#### **Abstrakt**

*Při NDE ultrazvukem je někdy potřeba provést měření na špatně přístupných místech s omezeným prostorem, ale stále mechanizovaně. Proto byl v Centru Výzkumu Řež vyvinut manipulátor pod názvem „Richard“.*

*Tento manipulátor je malý, jednoduchý a přizpůsobitelný robot, který je určen k manipulaci s ultrazvukovou sondou. Je určen zejména pro měření technikou phased array.*

*V první části příspěvku je řešen popis manipulátoru (vlastnosti, rozměry), následuje část s možnostmi přizpůsobení manipulátoru, vhodnost použití (napájení, řízení, omezení) a nakonec shrnutí. U manipulátoru bylo dosaženo velmi malých rozměrů, jednoduchost a upravitelnost.*

**Klíčová slova** manipulátor, robot, měření, ultrazvuk, robotika, NDE

#### **Abstract**

*In NDE is sometimes necessary to do the measurement in hardly accessible and limited spaces and it should be still mechanized control. Due this was in Research Centre Rez Ltd. developed a manipulator which is called "Richard".*

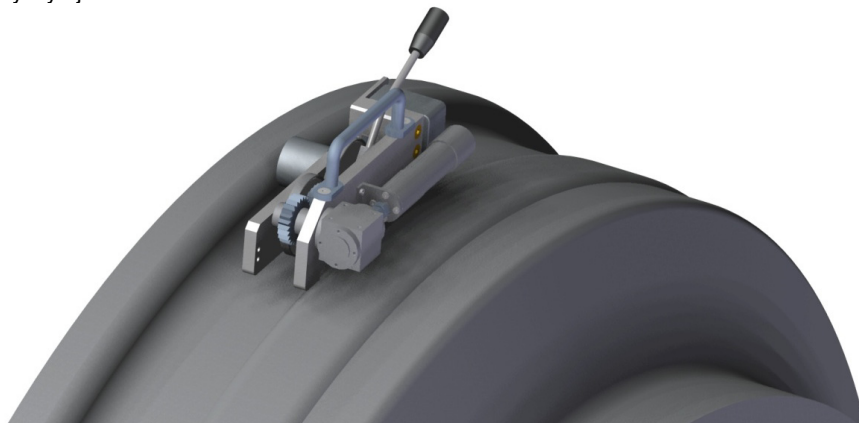
*This manipulator is small, simple and adjustable robot, which is dedicated to manipulate with phased array probe.*

*In the first part of this document is the description of the manipulator (features, dimensions). Then follows the description of adjustability, usability (power supply, controls, restrictions) and the summary. We achieved small dimensions, simplicity and adjustability.*

**Key words** manipulator, robot, measuring, ultrasound, robotics, NDE

## 1. Úvod

Zkoušení svarových spojů v jaderných elektrárnách a nejen tam, sebou přináší mnoho komplikací. Velmi často se stává, že v prostoru okolo zkoušeného místa se vyskytuje mnoho překážek či je prostor jinak omezen. Často se také taková místa vyskytují v nebezpečném prostředí. Místa s komplikovanou dostupností na prozkoušení vyžadují více času, zkušenosti a vyškolenou obsluhu. Navíc musí obsluha čelit záření či jiným nebezpečným vlivům, pokud se v místě testování vyskytují.

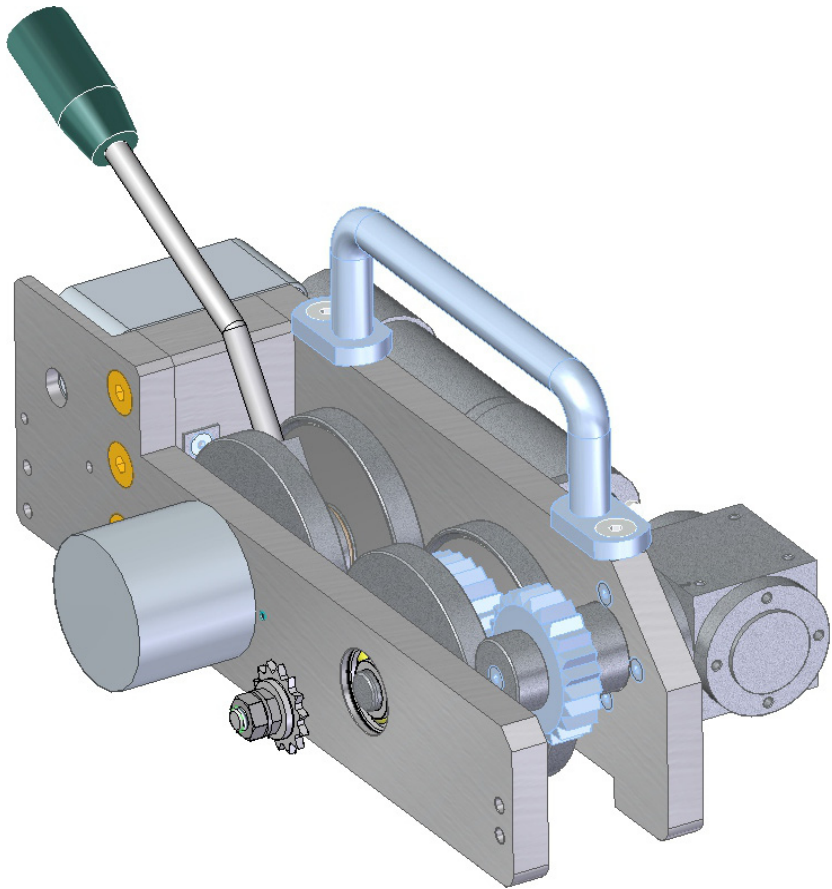


*Obr. 1: Manipulátor na potrubí*  
*Fig. 1: Manipulator on the pipeline*

Manipulátor "Richard" (**Obr. 1**) byl vytvořen s vizí odstranění těchto komplikací nebo alespoň jejich minimalizací. Je tedy určen pro zvláště malé prostory a špatně dostupná místa, protože manipulátor je navržen s malými zástavbovými rozměry. Manipulátor je také vhodný pro usnadnění ručního zkoušení technikou phased array, kdy se sonda většinou pohybuje v konstantní vzdálenosti od osy svaru a je obtížné dodržet tuto vzdálenost po celé délce svaru.

## 2. Představení

Cílem při návrhu manipulátoru bylo dosažení co nejmenších rozměrů, tak aby mohlo být využito automatizovaných procesů i v nejmenších prostorách zkoušené oblasti. Design manipulátoru je navržen původně pro NDE, avšak byl brán zřetel i na možnost uchycení jiných nástrojů. Díky bočnicím, ve kterých jsou navrtány otvory, je možné uchytit jiné nástroje a případně i rameno pro prodloužení dosahu nástroje.

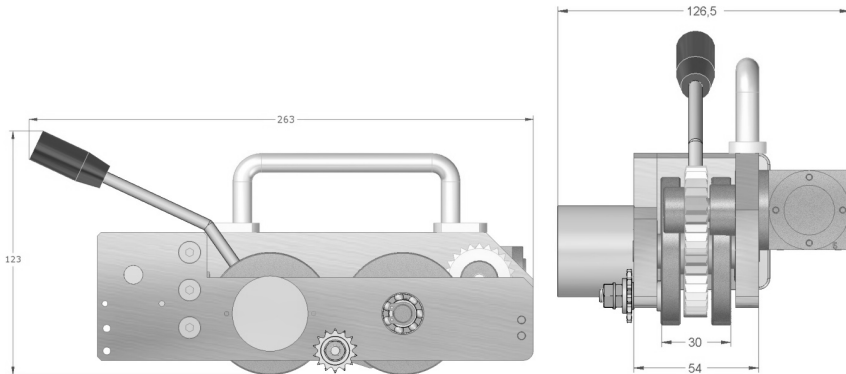


*Obr. 2: Manipulátor Richard*  
*Fig. 2: Manipulator Richard*

### 3. Popis konstrukce manipulátoru

Manipulátor je převážně vyroben z hliníku a jeho hmotnost je cca 3,5 kg. Základní rozměry jsou 263x123x126,5mm (**Obr. 3**). Nejmenšími dosažitelnými rozměry jsou potom 230x76x108,5mm. Tyto rozměry lze ale získat pouze za určitou cenu. Manipulátor má některé části odnímatelné a jsou to: madlo, snímač otáček a odnímací zařízení. Každou z těchto součástí lze odebrat, aniž by to zasáhlo do funkčnosti celého zařízení. Madlo slouží pouze k lepší manipulaci, k odnímání manipulátoru ze zkoušeného místa a v momentě, kdy manipulátor pracuje, je zbytečné. Lze jej tedy během zkoušení odšroubovat a díky pevnému dorazu zůstane odnímací zařízení bezpečně ve své poloze bez nebezpečí zablokování převodu.

Vlivem přilnavosti magnetických kol ke zkoušenému povrchu je odnímací zařízení a madlo konstruováno k pohodlnému odnímání manipulátoru ze zkoušeného povrchu. Odnímací zařízení lze také odšroubovat a získat tak menší rozměry manipulátoru, jak na délku a tak i na výšku. Poslední možností je odebrání snímače otáček, ten už však má výraznější vliv na funkčnost manipulátoru. Pokud k měření není potřeba přesně odečítat kroky či je velká nouze o prostor (například vedle koruny svaru je málo místa) je možné i toto zařízení sejmout a získat tak 14 mm v šířce manipulátoru.



Obr. 3: Standardní rozměry manipulátoru  
Fig. 3: Standard dimensions of the manipulator

Většinou zkoušení se provádí na ocelovém povrchu, proto je manipulátor vybaven magnetickými koly. Účelem magnetických kol je držet manipulátor na zkoušeném povrchu, tak aby nedocházelo k prokluzu či dokonce k pádu zařízení. Magnetická kola musí být a jsou předimenzována, protože bude-li se manipulátor pohybovat například v dolní úvrati potrubí, tak na něj a na nesený nástroj bude působit gravitační zrychlení a tyto síly musí být překonány s rezervou.

Napájení manipulátoru je řešeno tak, aby bylo možné připojit standardní dodávané napájení, vlastní a nebo případně lze manipulátor napájet například z OmniScanu či jiného měřicího přístroje, dataloggeru apod. V takovém případě "odpadá" napájecí kabel, resp. stále existuje, nicméně lze ho provázat s kabelem nástroje a vlastně tak vznikne jeden.

#### 4. Vlastnosti manipulátoru

Manipulátor je poháněn motorem od firmy Maxon (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.) o výkonu 11W, ke kterému je připojená převodovka s poměrem 181:1 a hned na ní kuželová převodovka s převodovým poměrem 1:1. Z druhé strany, tedy za motorem, je připojen snímač, který dává 1000 pulsů za otáčku.

Manipulátor je navrhnutý pre pohyb rýchlosťou  $10\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rýchlosť lze i znížiť v prípade, že je potreba skúšať pomalší rýchlosti. Regulovať rýchlosť manipulátora lze jednoducho priamo potenciometrom na riadičom obvode alebo lze k manipulátoru pripojiť externé zariadenie pre reguláciu rýchlosti. Napríklad v podobe otočného ovladača, ale takéto zariadenie není standardne dodávané k manipulátoru, pretože se při návrhu nepřepokládalo, že se bude rýchlosť meniť v průběhu měření.



Obr. 4: Motor od firmy Maxon  
Fig. 4: Maxon motor

Riadičý obvod má spätnú väzbu ze snímača otáčok a je teda vybaven brzdičím systémom v oboch smeroch otáčenia. Táto vlastnosť účinne zabraňuje rozjízdženiu manipulátora pri jazde "z kopce". Ve smere smeru tohoto pohybu a vlivem vyššej hmotnosti manipulátora dojde ke zmene momentu na osách kol a tým môže dojsť k zrýchleniu. Toto zrýchlenie však ihned zaznamená snímač otáčok a predá túto informáciu spätnou väzbou do riadičieho systému, ktorý ihned vygeneruje menšie akčné zásahy v podobe dodávaného proudu do motoru a zpomalí. Celý tento proces se děje v řádech mikrosekund, tedy v chodu manipulátoru není znatelný.



Obr. 5: Snímač otáčok Omron E6H-C  
Fig.5: Encoder Omron E6H-C

Motor obsahuje tří-kanálový snímač otáčok, ktorý dáva 1000 pulzů za otáčku. V prvej rade slouží jako spätná väzba pre riadičý obvod manipulátora, nímž lze získať priamo z riadičieho obvodu a to buď analogovo či digitálne. Zdroj snímania otáčok je v tomto prípade hriadel motoru. Tento snímač je určen predovšetkým pre riadenie otáčok motoru, avšak po jednoduchom prepočte lze získať i otáčky magnetických kol a samozrejme rýchlosť celého manipulátora. Jako ďalší možnosť se nabízí prídavný snímač otáčok pripojený priamo na hriadel magnetických kol. Prídavný snímač otáčok (**Obr. 5**) dáva 2048 pulzů za otáčku, týmto je zajištená vysoká presnosť. Mnoho nástrojů má vlastní

enkodéry, ale ty vlivem špatného spojenia, nízkej hmotnosti apod. často signalizujú polohu špatne. Snímače otáčok v manipulátore, ať už senzor posadený za motorem či prídavný snímač otáčok majú nespornou výhodu v tom, že jsou pevně uchyceny k manipulátoru a nemůže tak dojsť k vyvráteniu či jinému mechanickému poškodeniu a zároveň majú menšiu pravdepodobnosť "proklouznuti" (napríklad na vazelině, při zkoušení ultrazvukovou sondou) vlivem vyššej hmotnosti manipulátora a magnetických kol.

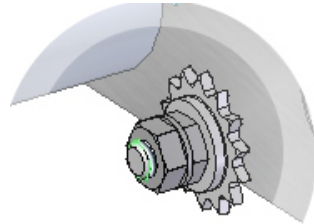
Síla manipulátora je dostatečne dimenzovaná, tak aby k němu mohl být pripojen nástroj, který bude mít znatelný třecí odpor (např. ultrazvuková sonda). Hmotnosť manipulátora je cca 3,5kg a jak už bylo zmíněno, předimenzování motoru je nastaveno tak, že lze hmotnosť manipulátora zvýšit až na 13kg a motor je stále schopný zajištit rýchlosť  $10\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  aniž by došlo k jeho poškodeniu.

## 5. Budoucí plán

Manipulátor má z boku jedné strany připravené ozubené kolo (**Obr. 6**), které bude sloužit k jeho vedení. V reálném světě existují místa, kdy je nutné zkoušet v opravdu velmi nepříznivých podmínkách, například svar na vertikálním potrubí. Vlivem hmotnosti manipulátoru zde hrozí možnost, že bude při zkoušení sledovat spíše trajektorii šroubovice než požadovanou trajektorii kružnice. V takovém případě lze na zkoušené místo připevnit vodící řetěz, do kterého se manipulátor zasadí ozubeným kolem a tímto bude dosaženo lepšího držení manipulátoru na požadované trajektorii.

Tento manipulátor byl navržen hlavně pro zkoušení v těžko přístupných místech, tedy hlavním rysem manipulátoru jsou co možná nejmenší rozměry. Budoucí návrhy pro dalších verzí manipulátoru je v první řadě minimalizovat rozměry.

Návrhem pro příští verzi manipulátoru je zvýšení odolnosti vůči vodě a prachu. Nynější krytí manipulátoru spočívá pouze v zakryté a utěsněné elektronice, manipulátor je schopen pracovat v těžších podmínkách, avšak je třeba udržovat na pracovišti pořádek.



Obr. 6: Ozubené kolo,  
Fig. 6: Cogwheel

## 6. Závěr

Vývoj manipulátoru Richard sebou přináší mnoho zkušeností, ale také mnoho komplikací, které je nutné řešit a konzultovat společně s kolegy v praxi. Často jsou kladeny na vývoj nároky, které jsou téměř nerealizovatelné, ale na druhou stranu vysoké nároky jsou výzvou k dalšímu postupu ve vývoji. Zejména u tohoto druhu manipulátoru, kde jsou jeho minimální rozměry a praktičnost hlavním prodejním artiklem. Je tedy nutné držet se těchto vlastností, spolu s tím je nutné udržovat přesné výpočty nejen pro konstrukci ale i pro elektroniku, tak abychom získali ve výsledku manipulátor, který má minimální rozměry, je praktický, odolný, představitelný, na který lze umístit různé nástroje a zároveň není složitý na obsluhu.

### Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108, který je realizován v rámci Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF).

This work has been supported by the SUSEN Project CZ.1.05/2.1.00/03.0108 realized in the framework of the European Regional Development Fund (ERDF).





## VÝHODY ULTRAZVUKOVÝCH METOD PŘI INTERPRETACI VÝSLEDKŮ

### THE ADVANTAGE OF ULTRASONIC METHODS WHEN INTERPRETING THE RESULTS

Miloslav PROCHÁZKA

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: prochazka@tediko.cz

#### Abstrakt

Měření tlouštěk základního materiálu pomocí ultrazvukových tloušťkoměrů není jedinou možností měření tlouštěk. Ač sama o sobě přesná je však kupodivu metodou nejméně přesnou z pohledu zjištění celkového stavu zařízení. Proto je buď nutné výrazně rozšiřovat počet bodových měření nebo případně provádět liniová měření. Referát však kromě těchto způsobů pojednává i o měření tlouštěk metodami ToFD, Phased Array a technikou IRIS. Kromě toho jsou ukázány různé způsoby interpretace výsledků včetně počítačového zpracování. Jsou diskutovány problémy měření.

**Klíčová slova:** zkoušení ultrazvukem, měření tlouštěk stěny, ToFD, Phased Array, IRIS, interpretace výsledků ultrazvukového měření

#### Abstract

Parent material wall thickness measuring by means of ultrasonic gauges is not only one option how to measure wall thickness. The method itself is accurate but curiously not enough from the point of view of equipment overall status. Therefore it is necessary to increase number of spot measurings or to perform line measuring. In addition to these methods this article also describes other methods like ToFD, Phase Array and IRIS technique. Moreover various kinds of results interpretation are shown including software elaboration. Problems of the inspection are discussed.

**Key words:** ultrasonic testing, wall thickness measuring, ToFD, Phased Array, IRIS, ultrasonic result interpretation

#### 1. Úvod

Nedestruktivní kontroly jsou jedním z prostředků, které nám zprostředkovávají pohled na materiál. Tak jako prostředky medicíny umožňují zkoumat lidské tělo – a to jistě nedestruktivně, protože „destruktivní“ zkoumání není v podstatě možné, alespoň na živých objektech, tak v případě technických zařízení, která jsou funkční, je destruktivní zkoumání též nevhodné.

Problémem NDT je ale v mnoha případech interpretace výsledků, která je založena na jakýchsi smluvních pravidlech daných především evolucí poznatků a zkušeností, později s aplikací výpočtových modelů. Člověk provádějící NDT by měl proto mít alespoň nějakou minimální představivost, aby byl schopen pochopit, co to vlastně vidí – protože základním smyslem, který je v NDT používán, je zrak. Není to ani čich, ani sluch a v podstatě ani hmat, o chuti ani nemluvě.

Některé metody NDT umožňují i lidem s opravdu velmi malou představivostí něco vidět. Kupodivu se to ale netýká kontroly vizuální, kde mnoho lidí je v podstatě „slepých“ a vůbec „nevidí“ to, co by vidět měli. Na druhou stranu metody povrchové jako metoda kapilární či magnetická prášková zobrazují vady většinou excelentně, i když pouze vady povrchové.

U prozařování, neboli „rentgenu“, jsou výsledkem skutečně „obrázky“ i vnitřní struktury materiálu a povrchových změn. Ovšem tento relevantní obraz reality má též svá různá omezení. A to „technický“ rentgen je s odpuštěním hračka proti zkoumání lidského těla.

Ovšem to není vůbec nic proti zkoušení ultrazvukem a zkoušení metodou vířivých proudů – jistě i proto největší počet kvalifikovaných osob má vizuální a povrchové metody, poté následuje prozařování. Z hlediska ultrazvuku je sice držitelů certifikátů hodně, ovšem velká část držitelů je zaměřena na měření tlouštěk. A těch, kteří mají představu, co měří vířivé proudy a jejich případné mutace jako RFT (tedy, co si mají pod tzv. indikací představit) je číslo limitně se blížící nule. Podobně jako u akustické emise se jedná maximálně pár desítek jedinců působících na našem území.

Tento příspěvek navazuje velmi těsně na příspěvek loňský a chce ukázat několik dalších či detailnějších příkladů a to především v rámci prezentace. Zde je samozřejmě možný pouze stručný popis. Zatímco předchozí příspěvek byl zaměřen na kontroly energetických a tlakových zařízení a aplikace moderních metod jako Phased Array a TOFD společně s využitím manipulátorů a týkal se zkoušení turbinových lopatek, stěn potrubí a nádob, svarů, tento příspěvek se zaměří na prezentaci měření tlouštěk stěn pomocí B-Scanů a TOFD, měření tlouštěk stěn teplosměnných trubek vnitřní rotační ultrazvukovou sondou IRIS a měření nádob.

## **2. Kontroly tlouštěk ultrazvukem – B-Scany**

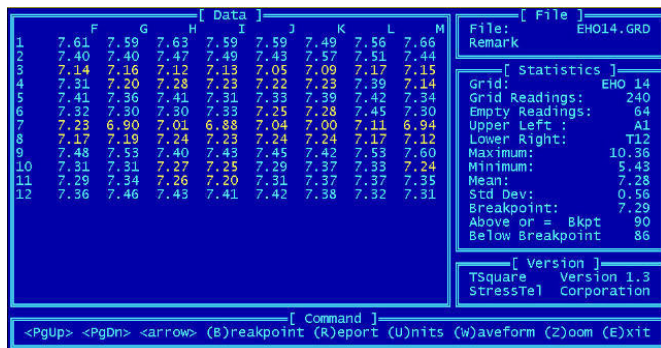
Měření tlouštěk je nejrozšířenější ultrazvuková disciplína. Měří kdokoliv. Certifikované i necertifikované osoby, znalé i neznalé. Chytré i zcela hloupé. Je to prostě podobně jako třeba dnes u fotografování. Ale těžko mne bude přesvědčovat člověk s moderním telefonem s integrovaným fotoaparátem s úžasným počtem megapixelů, že je fotografem a že má úžasně kvalitní fotky pořízené zcela úžasným čipem. Nemá. Pouze využívá toho, že technologie dnes umožňují velmi levně a v podstatě primitivně bez znalosti věci o podstatě a principech fotografování pořizovat relativně líbivé fotky. Nic víc, nic míň. Z pohledu majitele digitálních zrcadlovek s velkým čipem a kvalitními objektivy, které se mimochodem vylepšují stejně rychle jako ty telefony, zůstává stále jen a jen v závěsu a výsledek činnosti je nesrovnatelný. Podobně jako u měření tlouštěk ultrazvukem se objevuje také čím dál více osob ohromujících „znalosti“ z termografie. Vzhledem k poklesu cen zařízení by se dalo říci: „každý sám sobě termovizákem“ nebo „každý sám sobě tloušťkoměřičem“.

Při běžném měření tlouštěk získáváme hodnotu tloušťky měřeného bodu. To nám nijak necharakterizuje stav celého zařízení, u něhož předpokládáme

degradační procesy – erozní a korozní vlivy. Proto se případně provádí měření v sítích. Tyto sítě nám vytváří prvotní „plošný“ obraz. Na následujících obrázcích je ukázáno, jak vypadá takové měření a výsledek v číselné podobě. Pokud přiřadíme celé měřené ploše souřadnicový systém a přijmeme předpoklad, že změřená tloušťka určitého bodu je stejná na ploše až do poloviny vzdálenosti k dalšímu bodu, získáváme první grafické zpracování plochy. Čím bude větší hustota bodů, tím budou zachyceny lépe změny v tloušťce a tím bude obraz přesnější.



Obr. 1 Sítě tvořené jednotlivými měřícími body na ohybech potrubí



Obr. 2 Příklad naměřených výsledků v souřadnicích X-Y tak, jak je generovaly již před více než 10 lety verze SW určené pro první UT tloušťkoměry s LCD obrazovkou a měřením v sítích

Výše uvedená forma zobrazení má jednu nevýhodu. Ač dává zcela konkrétní čísla a lze nastavit meze tloušťky, kdy hodnoty pod určenou mezí mají jednu barvu a nad touto mezí druhou barvu, přeci jen taková tabulka nedává jednoznačný rychlý přehled. Podstatně lepší je právě grafické zobrazení jiného měření na následujícím obrázku, kdy různé odstíny barev charakterizují různé intervaly tlouštěk. Měřená plocha má 600 x 600 mm a je změřeno 7 x 7 bodů (mezi body je tedy vzdálenost 100 mm)

Měření jednotlivých bodů je ale stále jen měřením diskrétních bodů. Čím více měřících bodů bude a čím větší bude jejich hustota, tím přesnější bude výsledek. Budou-li body seřazeny za sebou a vzdálenosti mezi nimi budou dostatečně malé,

uvidíme nepřetržitou čáru. Na druhou stranu, co je limitním počtem bodů, abychom jejich množinu považovali ještě za čáru. Jeden měřicí bod je pouze bodem.

Podstatně lepší vypovídací schopnost má tedy měření liniové-čárové, takzvaný B-Scan. Zde je nutno vysvětlit, že způsoby zobrazení se v ultrazvuku označují písmeny A, B, C a S. Přičemž samotnému měření jednoho bodu odpovídá tzv. A-Scan (ultrazvuková sonda se nepohybuje a je v jedné pozici). B-Scan potom vzniká tak, že se sondou pohybuje – táhne po přímce. Přístroj pravidelně provádí měření s určitou opakovací frekvencí, pro každé jednotlivé měření je odečtena tloušťka ( na obrazovce by tedy bylo možné vidět A-Scan s tzv. koncovým echem). Zde jsou ale dvě možnosti – první možnost využívá pouze času a opakovací frekvence odečtů. V tomto případě záleží na pracovníkovi, jak rychle pohybuje sondou. Ideální by byla taková rychlost, aby získal 100 odečtů na 100 mm dráhy. Ovšem to je velmi nerealistický požadavek. Druhá možnost je použití enkodéru pohybu, kdy je odečet sladěn se skutečnou dráhou. To ale nelze uplatnit téměř u žádného tloušťkoměru a je možností pouze u ultrazvukových přístrojů vyšších kategorií.

G	6,8	6,5	6,4	6,7	6,5	6,8	6,9
F	7,1	6,5	6,8	6,9	6,5	6,5	7,1
E	7,0	7,2	6,9	7,0	6,5	7,0	7,2
D	7,5	7,0	6,5	7,1	7,0	7,0	7,2
C	7,2	7,3	6,9	7,1	6,9	7,4	7,6
B	8,1	7,4	7,5	7,4	7,5	7,6	7,3
A	7,9	7,6	7,7	7,7	7,6	7,8	7,8
	1	2	3	4	5	6	7

Obr. 3 Příklad jiné formy naměřených výsledků v souřadnicích X-Y

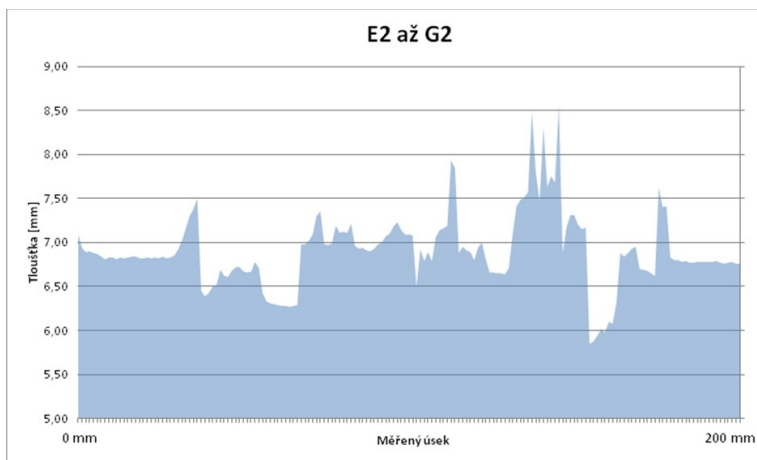
Z výše uvedeného příkladu na obr. 3 vyplývá, že maximální změřená tloušťka je 8,1 mm v bodě B1 a minimální 6,4 mm v bodě G3. To znamená, že můžeme prohlásit, že minimální tloušťka této plochy je 6,4 mm. Je tomu tak ale opravdu ?

Vezmeme například, že změřená tloušťka bodu E2 je 7,2 mm, bodu F2 a G2 je shodná, a to 6,5 mm. Zaznamenáme 200 mm dlouhý B-Scan mezi body E2 a G2. Výsledkem je následující obrázek.

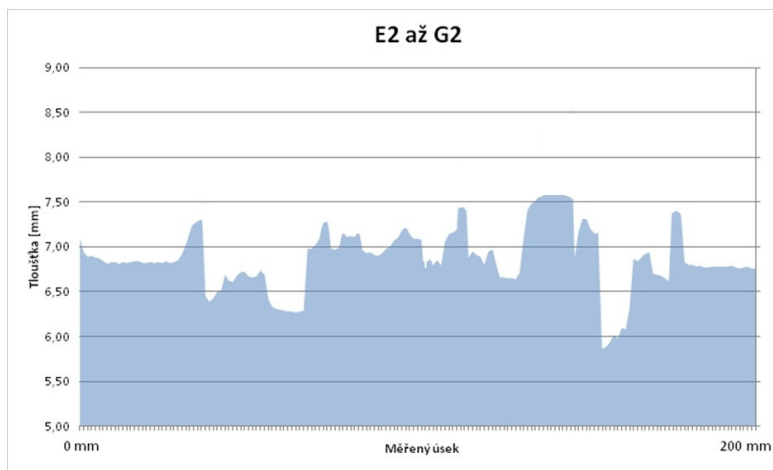
Z porovnání s výsledkem na obr. 3 vyplývá, že počáteční tloušťka je opravdu větší než 7 mm a koncová na úrovni cca 6,6-6,7 mm. Ač se vám může zdát divné, že hodnoty nejsou zcela totožné se zjištěným bodovým měřením, není to žádná záhada ani chyba. Řecký filosof Hérakleitos prohlásil, že „Nevstoupíš dvakrát do téže řeky.“ Stejně tak dvakrát nezměříš totožnou tloušťku na provozovaném zařízení. Jenom samotná chyba měření (přístrojem, který dle výrobců měří na setiny milimetru) je na úrovni 0,1 mm a větší. Nemluvě o vlivu povrchu – vnějšího i vnitřního, posunutí sondy byť jen o jeden milimetr atd. Takže zapomeňte

na neustále omílané nesmysly o přesnosti měření na setiny a dokonce zapomeňte i na tu jednu desetinu. V praxi to tak prostě a jednoduše nefunguje.

Obrázek na obr. 3 je složen z několika set měřících bodů. Při měření sonda samozřejmě „jede“ po reálném povrchu. To vede samozřejmě i k ustřelení hodnot mimo realitu, je to způsobeno např. zadrhnutím sondy, změnou akustické vazby pod. Tyto bodové extrémny je možné samozřejmě odstranit, jak je ukázáno na obr. 5. V každém případě je ale důležité zjištění – minimální tloušťka mezi body E2 a G2 není 6,5 mm ale podstatně menší – 5,9 mm !



Obr.4 B-Scan délky 200 mm

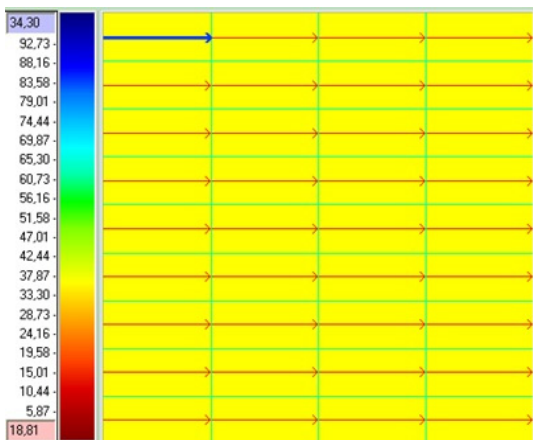


Obr.5 Odstraněné extrémny z B-Scanu na Obr. 4

Z obrázku je vidět, že grafické zpracování a zobrazení B-Scanu dává rychlou vjemovou informaci. Takže pokud nějakou plochu změříme tím způsobem, že místo

bodů budeme měřit v síti B-Scany, získáme desítky linií s tisíci odečtů. Minimální hodnotu tloušťky v B-Scanu není těžké zjistit, protože přístroje ji jsou schopny přímo ukázat, ovšem prohlížet si množství záznamů je poněkud pracné a nudné. Je tedy potřebné dané procesy nějak urychlit – naprogramovat. Například jeden z našich zákazníků používá SW, který propojil se speciálně vyvinutým SW pro práci a importem B-Scanů pro své vlastní potřeby sledování změn tlouštěk zařízení a tím životnosti jednotlivých komponent. Společnost TEDIKO zase používá SW, který umožňuje vytvořit obraz měřené plochy na základě změřené sítě B-Scanů. Tento obraz je samozřejmě velmi hrubý, pokud by byl tvořen jen samostatnými liniemi B-Scanů, které jsou od sebe vzdáleny desítky milimetrů, vyhlazení založené na posouzení průběhu změřených B-Scanů ale umožňuje doložit předpokládaný trend mezi záznamy. Tím je získán celkový obraz dostatečně velké plochy, který je podstatně přesnější než jakékoli diskrétní bodové měření.

Na následujícím dvou obrázcích je ukázáno pole B-Scanů – 4 tahy za sebou označené A, B, C a D v devíti liniích, a část naměřených dat pro jednotlivé B-Scany – např.01A, 01B, 01C, 01D, 02A atd. (údajů v jednom B-Scanu je tolik, že nelze celou řadu zobrazit).



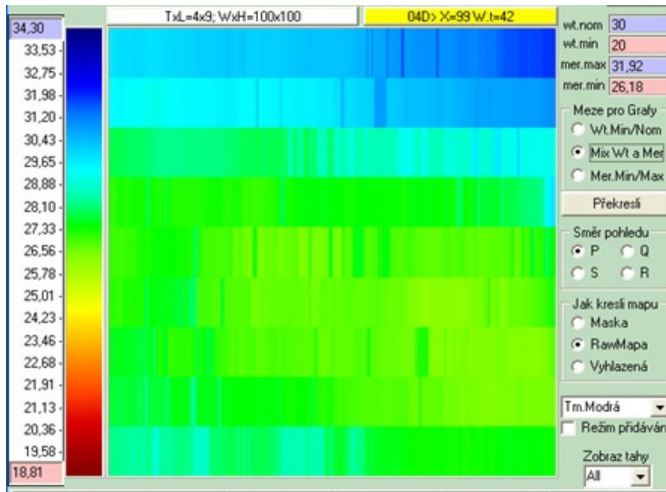
Obr.6 Pole B-Scanů o rozměru 4 x 9

01A=1	11071>	23	76.23	77.23	77.23	78.23	79.23	81.23	85.23	88.23	92.23	91.23	92.23	95.23	95.23	91.23	90.23	89.23	88.23	93.23	94.23	
01B=2	10871>	30	24.30	24.30	23.30	23.30	24.30	27.30	31.30	37.30	35.30	35.30	35.30	35.30	35.30	32.30	21.30	18.30	16.30	16.30	18.30	21.30
01C=3	10571>	30	36.30	35.30	35.30	35.30	35.30	35.30	36.30	36.30	36.30	36.30	36.30	36.30	36.30	36.30	40.30	40.30	40.30	42.30	43.30	46.30
01D=4	10671>	31	06.31	06.31	03.31	03.31	01.31	01.31	01.31	01.31	08.31	10.31	10.31	14.31	14.31	16.31	18.31	22.31	24.31	24.31	25.31	
02A=5	10471>	23	40.23	41.23	40.23	41.23	40.23	39.23	41.23	41.23	45.23	47.23	48.23	49.23	46.23	45.23	45.23	43.23	43.23	40.23	41.23	
02B=6	10271>	23	60.23	59.23	61.23	62.23	64.23	65.23	62.23	67.23	66.23	59.23	59.23	59.23	59.23	60.23	61.23	59.23	55.23	47.23	45.23	
02C=7	10571>	23	86.23	79.23	81.23	84.23	83.23	86.23	86.23	86.23	87.30	46.30	49.30	54.23	59.23	55.23	86.23	82.23	83.23	83.23	83.23	
02D=8	9671>	30	42.30	42.30	43.30	43.30	41.30	41.30	46.30	47.30	49.30	49.30	50.30	52.30	57.30	57.30	59.30	61.30	61.30	61.30	62.30	
03A=9	10471>	27	90.27	90.27	90.27	90.27	91.27	91.27	91.27	91.27	91.27	91.27	91.27	92.27	92.27	93.27	94.27	96.27	98.27	01.28	00.28	
03B=10	9571>	28	13.28	14.28	13.28	14.28	15.28	15.28	12.28	13.28	13.28	02.28	05.28	06.28	06.28	09.28	05.27	96.27	96.27	96.27	96.27	
03C=11	9471>	28	40.28	38.28	39.28	44.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	16.28	
03D=12	10671>	23	05.23	05.23	05.23	05.23	06.23	06.23	05.23	06.23	07.23	04.23	28.23	28.23	28.23	28.23	28.23	28.23	28.23	28.23	28.23	
04A=13	10771>	27	14.27	14.27	13.27	10.27	09.27	11.27	11.27	16.27	18.27	24.27	29.27	34.27	32.27	32.27	20.27	23.27	24.27	24.27	26.27	
04B=14	11471>	27	30.27	30.27	30.27	26.27	26.27	24.27	24.27	24.27	24.27	25.27	25.27	25.27	26.27	26.27	28.27	30.27	30.27	33.27	33.27	
04C=15	10471>	27	46.27	46.27	46.27	44.27	44.27	43.27	45.27	45.27	46.27	46.27	48.27	49.27	42.27	34.27	35.27	35.27	34.27	34.27	36.27	
04D=16	10371>	27	56.27	56.27	58.27	54.27	51.27	36.27	32.27	32.27	32.27	32.27	29.27	21.27	98.27	98.27	08.27	08.27	08.27	08.27	06.27	
05A=17	10771>	27	07.27	07.27	04.27	06.27	06.27	06.27	06.27	06.27	06.27	07.27	01.27	02.27	01.27	06.27	09.27	03.27	05.27	05.27	06.27	
05B=18	11471>	26	90.26	92.26	95.26	88.26	89.26	90.26	91.26	93.26	99.27	07.27	11.27	10.27	04.26	78.26	69.26	66.26	67.26	67.26	69.26	
05C=19	10471>	26	70.26	69.26	60.26	59.26	58.26	59.26	61.26	64.26	66.26	79.27	43.26	80.26	76.26	77.26	71.26	62.26	66.26	68.26		

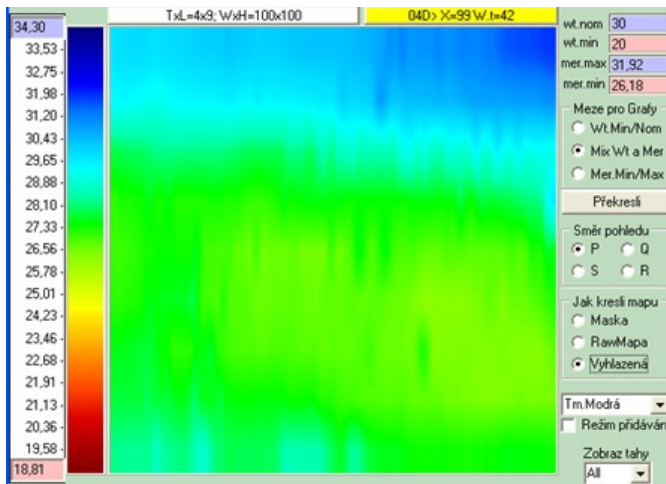
Obr.7 Obsah jednotlivých B-Scanů – odečty tlouštěk

Pokud se nyní zobrazí načtené hodnoty ve své surové formě – přepočítají se ovšem proporcionálně délky jednotlivých B-Scanů (nejedná se samozřejmě o délku

ve smyslu vzdálenosti ale ve smyslu délky řetězce, tedy počtu odečtů tloušťek) na normovanou zadanou vzdálenost (tedy skutečně měřenou dráhu) a bude se předpokládat, že do jedné poloviny vzdálenosti k vedlejšímu rovnoběžnému B-Scanu je tloušťka konstantní, získává se následující obrázek a po matematickém vyhlazení další.



Obr.8 Zobrazení „raw“ záznamů tloušťek



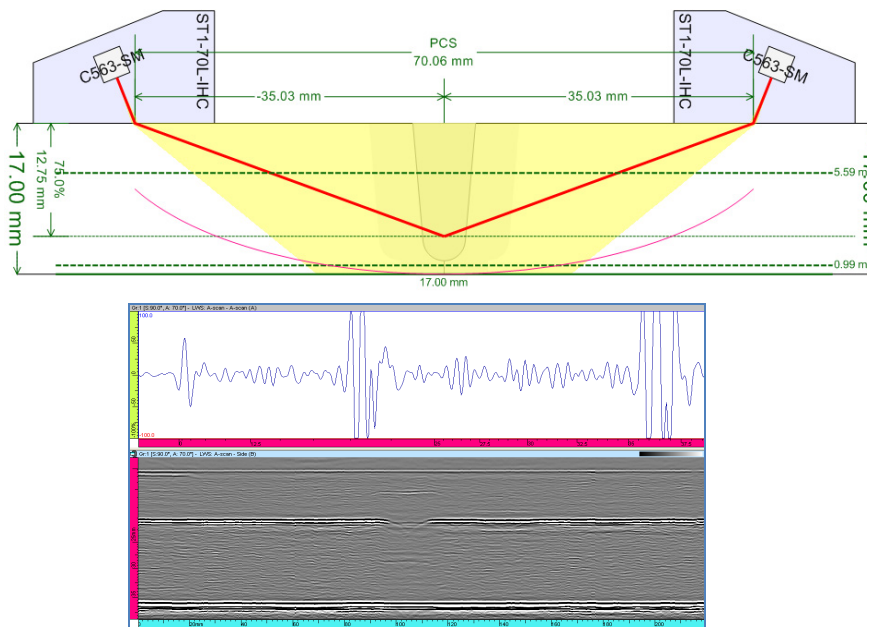
Obr.9 Zobrazení vyhlazených záznamů tloušťek

Na obrázcích je každá tloušťka charakterizována barvou podle barevné stupnice na levé straně. Na pravé straně jsou potom další volitelné údaje. Je na místě ovšem připomenout, že všechny uvedené obrázky jsou pouze výřezy větších

„obrazovek“, které umožňují se záznamy všechny potřebné operace a které nelze z důvodu nedostatku místa prezentovat. Z obrázku je zcela jasně vidět, jak se na kontrolované ploše mění tloušťka.

### 3. Využití metody TOFD k měření tloušťek

Metoda TOFD se používá primárně k měření svarových spojů. Je to metoda poněkud odlišná od běžné kontroly svarových spojů a i měření tloušťky stěn materiálu, která je založená na odrazu ultrazvukového vlnění od vady a návratu části energie zpět do sondy. U metody TOFD se nepoužívá jedna sondy ale vždy sondy dvě – tedy alespoň dvě. Protože podle konfigurace úlohy, např. tloušťky zkoušeného materiálu je nutné použít více sond či kontrolu provádět několikrát. Kontrola je vhodná především na zjišťování vad plošných jako trhlin, nejlépe orientovaných kolmo ke zkoušenému povrchu, avšak výsledkem kontroly i zjištění změn tloušťky stěny – přesněji řečeno změn vnitřního povrchu – erozního či korozního poškození. K měření se používá enkodér polohy.

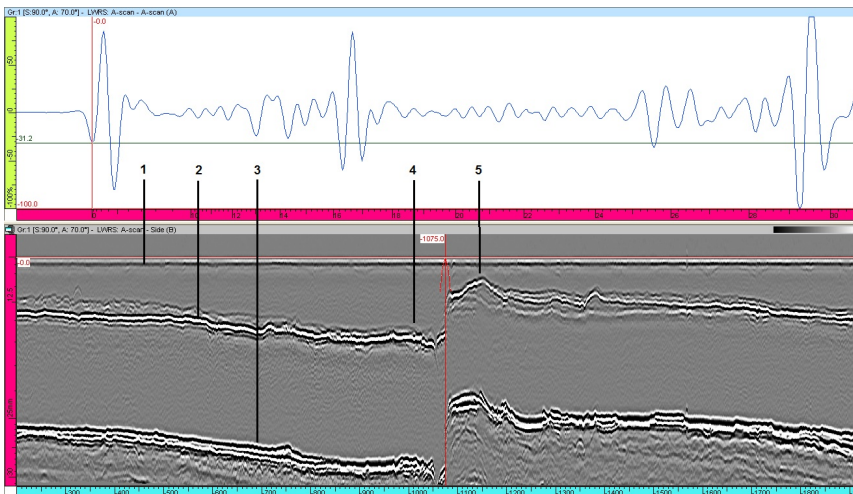


Obr.10 Polohy sond a ukázka záznamu standardu

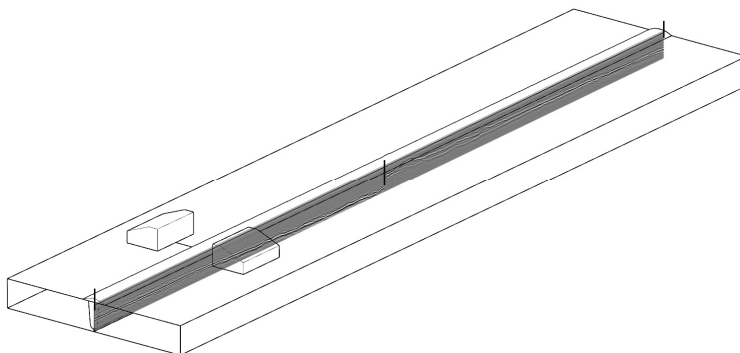
Na dalším obrázku je ukázka vykorodované oblasti v tepelně ovlivněné zóně svarového spoje. Pro vysvětlení – Číslem 1 je označen signál od vnějšího zkušební povrchu (tzv. laterální echo). Číslo 2 představuje signál od vnitřního zkušební povrchu (tzv. backwall echo) – signál je důležitý pro hodnocení hloubky. Číslo 3 je průběh transformovaného signálu od vnitřního zkušební povrchu –



kořene svaru – pro vyhodnocování hloubky vykorodování není důležité. Číslo 4 ukazuje na skokovou změnu tloušťky a číslo 5 je nejmenší zjištěná tloušťka.



Obr.11 Příklad záznamu TOFD (vysvětlení viz text)



Obr.12 Velmi názorné zobrazení svaru s průběhem tloušťky

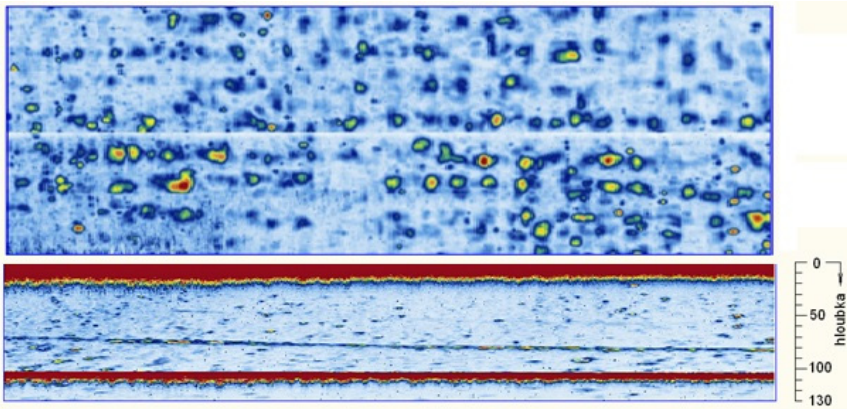
#### 4. Využití metody Phased Array k zobrazení tloušťek

Použití metody Phased Array (PA) pro různé aplikace bylo dostatečně popsáno v příspěvku minulé konference. Jednou z aplikací, která má velmi vysokou vypovídací schopnost, je plošné měření – tedy pořízení tzv. C-skenu. Metoda Phased Array umožňuje získat oproti běžným ultrazvukovým měřením podstatně komplexnější informaci. Měření je doopravdy objemové, tzn. dochází k prozvučení a záznamu objemu materiálu, jehož rozměry jsou dány účinnou délkou sondy (závisí především na počtu elementů), tloušťkou materiálu a dráhou posunu sondy. K měření je zásadně nutné používat enkodéry polohy. Pokud má být měření doopravdy spolehlivé, je nutné také zaručit dobrou manipulaci se sondou

na zkušebním povrchu a bezproblémovou **nepřetržitou** vazbu, v našem případě pomocí vody.

Tato měření, pokud mají mít význam, je nutné provádět zařízeními, která umožňují připojení enkodéru, záznam všech měřených dat a samozřejmě umožňují použít výkonný software pro práci s daty. Zde je nutné si uvědomit přesně to, co bylo napsáno v úvodu – jsou přístroje a přístroje, je software a software. A podle toho je možné získat výsledky takové či makové. K měření je také potřeba používat manipulační či manipulátorovou techniku. Samotné měření může způsobovat problémy, protože záleží na kvalitě přilehlého povrchu a také na měřené tloušťce – v žádném případě se nehodí pro měření malých tlouštěk

To co je zde presentováno nelze v žádném případě získat pomocí jednodušších ultrazvukových přístrojů s možnostmi phased array. Na následujícím obrázku je názorná presentace C-skeny se všemi odrazy z materiálu, pod ním je řez, nebo-li B-sken, kde je vidět tloušťka.



Obr.13 Velmi názorné zobrazení svaru s průběhem tloušťky v B-Skeny

## 5. Měření trubek pomocí vnitřní rotační ultrazvukové sondy

Při měření teplosměnných trubek výměníků se používají podle druhu materiálu a konstrukčního provedení především elektromagnetické metody jako ET a RFT či metody magnetické jako MFL. Další možnou metodou je metoda ultrazvuková – IRIS (Internal Rotary Inspection System). Jedná se o rotační systém, kdy samotná sonda a její nosič nerotuje, rotuje však zrcátko, přes které je ultrazvukový paprsek směřován na stěnu trubky, kterou skenuje. Při zajištění pohybu trubkou a použití enkodéru je možná snímat rozvinutý obraz stěny trubky.

Na obrázcích 14 a 15 je vidět část zařízení používaného společností TEDIKO, s.r.o., v trubce se nachází měřící hlavice se sondou, vně trubky se nachází motorový pohyb s enkodérem pohybu konstrukce TEDIKO. K měření se používá systém MS5800 s patřičným softwarem, stejně jako je používáno ke kontrole výměníků metodami ET/RFT/MFL.

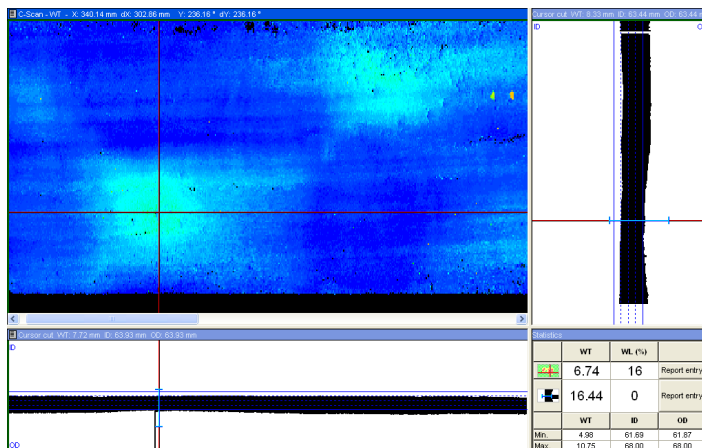


Obr.14 Hlavice umožňující kontrolovaný pohyb systému IRIS



Obr.15 Hlavice systému IRIS centrující systém v trubce

Na následujícím obrázku je vidět záznam pořízený systémem IRIS. Barevné pole je rozvinutý plášť skenované trubky. Vpravo se potom nachází profil/průřez v místě kurzoru. Je zde jasně patrná mírná změna tloušťky stěny.



Obr.16 Záznam stěny trubky pořízený metodou IRIS

## **6. Závěr**

Smyslem příspěvku bylo ukázat výhody ultrazvukového zkoušení z pohledu zobrazení a interpretace výsledků, tentokrát z hlediska zjišťování tloušťky materiálu, tedy disciplíny bohužel v mnoha případech považované za primitivní, kterou přeci každý zvládne bez problémů. Vše, co je v tomto příspěvku uváděno a prezentováno, vychází ze zkušenosti s těmito měřeními prováděnými společností TEDIKO, s.r.o. a jedná se o data pořízení při měření jejími specialisty.



## USING BARKHAUSEN NOISE TO DEVELOP A METHOD OF STEEL S235 HARDNESS MEASUREMENT

**Maciej ROSKOSZ, Krzysztof FRYCZOWSKI**

Silesian University of Technology  
maciej.roskosz@polsl.pl

### **Abstract**

*The aim of the study presented in this paper was to develop diagnostic relationships that could be used in engineering practice between hardness and the quantities that describe the Barkhausen noise quantitatively. Tests were performed on plastically deformed samples made of steel S235. It was found that the quantity that featured the best correlation with the hardness of steel S235 was the Barkhausen noise number of counts ( $N_{BN}$ ) for low values of discrimination voltage. A measurement methodology that could be used in engineering practice was proposed.*

**Key words:** *hardness measurement, Barkhausen noise, NDT inverse problem*

### **1. Aim of study**

Research is being done in many centres [1 – 4] to prove the potential of and identify the limitations on application of the Barkhausen effect in diagnostics. The aim of the study presented in this paper was to analyze the possibility of developing diagnostic relationships that could be used in engineering practice between hardness and the quantities that describe the Barkhausen noise quantitatively. Tests were performed on plastically deformed samples made of steel S235.

### **2. Experimental details**

The testing was performed for plate samples made of the S235 steel (EN – 10025) with initial geometry as shown in Fig. 1. The samples were subjected to tensile loads. The loading process was stopped as soon as a local narrowing – a neck – appeared. Due to cold working, changes in the material hardness occurred. Inhomogeneous plastic strain caused by the specific geometry of the sample and by the presence of the neck results in a particular hardness profile in the sample.

Measurements were made in the sample axis, along a measurement line with the initial length of 200 mm (Fig. 1).

The HV5 hardness was measured using the Krautkramer TIV hardness tester with the TIV 105 measuring head.

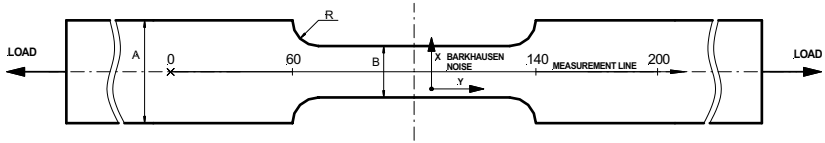


Fig. 1. Experimental sample

Measurements of the Barkhausen noise were carried out with the MEB4-C device, supplied by the company Mag-Lab s.c. from Gdańsk, using a contact probe (magnetizing and measuring coil in one casing). The Barkhausen noise was measured at selected points located on the measurement line. Two measurements were made at each point, for two magnetization directions:

- direction X – perpendicular to the load axis,
- direction Y – coaxial with the load.

### 3. Testing results and analysis

Selected representative results of hardness measurements are presented in Fig. 2.

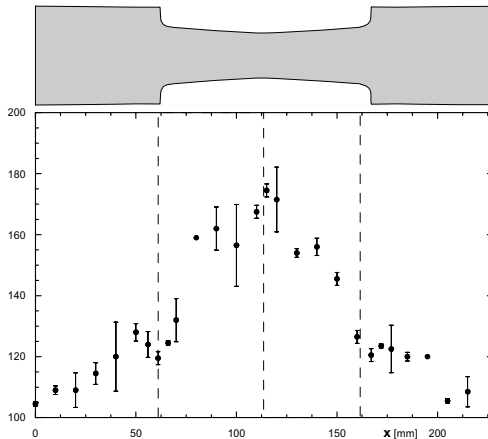


Fig. 2. Example distribution of hardness HV5 for a plastically deformed sample (top part of the figure presents the deformed sample real geometry)

In order to develop the correlation with hardness, basic values describing the Barkhausen noise quantitatively, such as the value of rms voltage  $U_{\text{RMS,BN}}$ , energy  $E_{\text{BN}}$  and the number of counts  $N_{\text{BN}}$ , were analyzed.

Abrupt changes in the domain structure at overmagnetization cause local disturbances in magnetic induction. These disturbances are recorded in the measuring coil as the Barkhausen noise. The number of counts  $N_{\text{BN}}$  is the sum of all

pulse changes in magnetic induction recorded in the measuring coil as pulses with a certain voltage level.

The Barkhausen noise energy, which is also referred to as the Barkhausen noise intensity, is defined as the time integral of squared pulse voltage  $U_i$ , and it is a parameter describing the pulse distribution and voltage in time  $T$  of an overmagnetization cycle by means of a single value [5].

$$E_{BN} = \int_T U_t^2 dt \quad (1)$$

It was found that the quantity featuring the best correlation with the hardness of steel S235 was the Barkhausen noise number of counts ( $N_{BN}$ ). Example  $N_{BN}$  distributions for the distribution of hardness shown in Fig. 2 are presented in Fig. 3. Fig. 4a and Fig. 4b show the relations between hardness HV5 and the number of counts in direction X for two different values of threshold voltage (Fig. 4a –  $U_d=0.7V$ , Fig. 4b –  $U_d=7V$ ).

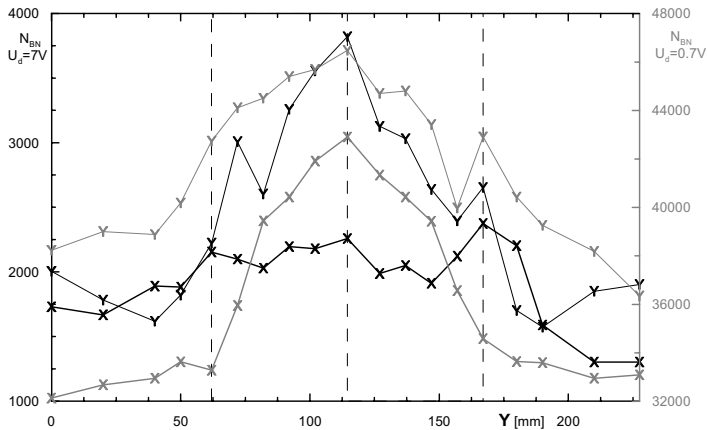


Fig. 3. Distribution of the Barkhausen noise number of counts  $N_{BN}$  for different values of threshold voltage  $U_d$

This is confirmed by the values of correlation coefficients  $R^2$  of the linear dependences between hardness HV5 and the number of counts, which are substantially higher for low values of threshold voltage.

In engineering practice, diagnostic relations have to be made independent of the direction of stress, which is usually unknown. It is proposed that the module of the number of counts should be introduced in the following form:

$$N = \sqrt{N_x^2 + N_y^2} \quad (2)$$

where  $N_x$  and  $N_y$  are the values of the number of counts for two perpendicular directions of magnetization. In order to determine these values in a real object, measurements have to be made at a given measuring point, changing the magnetization direction in the range of at least  $0^\circ$  to  $180^\circ$ . The direction for which the biggest number of counts is obtained should be assumed as direction X and the direction perpendicular to it – as Y. The dependence between hardness HV5 and the number of counts for threshold voltage  $U_d=0.7V$  for the S235 steel is presented in Fig. 5.

These dependences may be used in inverse problems in non-destructive testing [6] to determine mechanical properties based on the measurement of magnetic properties. Using standard methods, it is impossible to carry out periodic testing of hardness at the same place. However, magnetic methods, such as the Barkhausen noise measurement and application of the diagnostic relations developed previously, make it possible to do so.

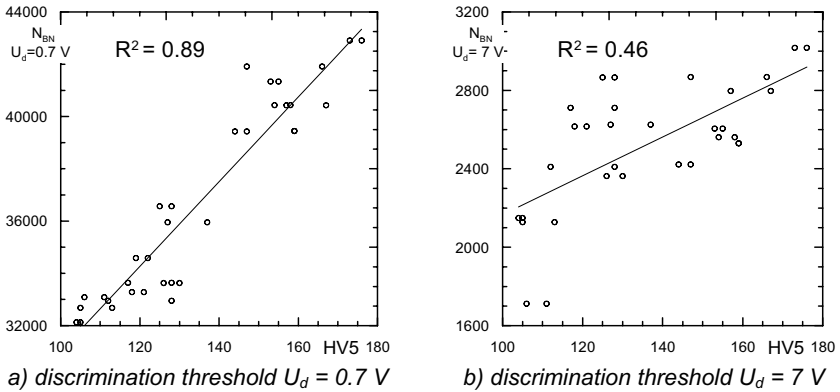


Figure 4. Dependence between hardness HV5 and the Barkhausen noise number of counts  $N_{BN}$  in direction X for different values of threshold voltage – steel S235

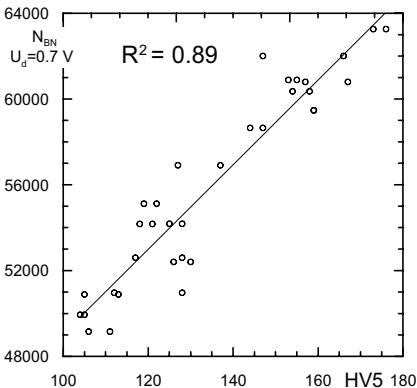


Figure 5. Dependence between hardness HV5 and the module of the number of counts of the Barkhausen noise  $N_{BN}$



#### 4. Conclusions

The results of measurements of hardness HV5 and of the Barkhausen noise in plastically deformed samples made of steel S235 and the comparison of distributions of the analyzed quantities indicate that it is possible to develop a reliable method of hardness evaluation based on the Barkhausen noise number of counts  $N_{BN}$ . Especially good correlation was obtained for low values of discrimination voltage  $U_d$ . A measurement methodology that could be used in engineering practice was proposed.

#### Acknowledgements

The results presented in this paper were obtained from research work co-financed by the Polish National Centre for Research and Development within the framework of Contract SP/E/1/ 67484/10 – Strategic Research Programme – Advanced technologies for obtaining energy: Development of a technology for highly efficient zero-emission coal-fired power units integrated with CO<sub>2</sub> capture.

#### References

- [1] G. Dobmann, I. Altpeter, R. Becker, R. Kern, U. Laub and W-A Theiner, "Barkhausen Noise measurements and related measurements in ferromagnetic materials", in "Sensing for material characterization, processing and manufacturing", edited by G. Birnbaum and B. A. Auld, Vol. 1, The American Society for Nondestructive Testing (ASNT), pp. 233- 251, 1998.
- [2] Roskosz M., Witoś M., Fryczowski K., Studies on magnetic and mechanical properties in plastically deformed ferromagnetic steels, The 18th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation ENDE 2013, p. 118-120
- [3] M Blaow, J Evans, B Shaw, "Effect of hardness and composition gradients on Barkhausen emission in the case of hardened steel", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2006;153:159–303.
- [4] Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M, Tomáš I. The influence of plastic deformation on the magnetoelastic properties of the CSN12021 grade steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321 (2009) 2331–2335
- [5] S. White, T. Krause, L. Clapham, Quantitative analysis of surface Barkhausen noise measurements, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 27, ed. by D. O. Thompson and D. E. Chiment, 2008 American Institute of Physics
- [6] Altpeter I., Becker R., Dobmann G., Kern R., Theiner W., Yashan W. Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation Inverse Problems 18 (2002) 1907–1921 PII: S0266-5611(02)37002-3





## **IMPACT-ECHO METHOD EASY TOOL FOR MONITORING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE CORROSION**

**Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Daniela ŠTEFKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA**

Department of Physics, Faculty of Civil Engineering,  
Brno University of Technology, Žitkova 17, 602 00 Brno, Czech Republic  
Contact e-mail: samarkova.k@fce.vutbr.cz

### **Abstract**

*The paper deals with the study of dominant frequencies of an Impact-Echo method response signal obtained from a reinforced concrete beam with a steel rod diameter of 6 mm. Tension pulse was produced in the centre of the concrete beam and detected in opposite position of the concrete beam. Dominant frequencies of the response signal will be the main criterions for the reinforced concrete rebar corrosion progress. The article presents the results of measurements obtained after 18 months controlled degradation in aqueous NaCl solution. The results were compared with measurements of electrical resistance of reinforcing steel by using the Thomson double bridge.*

**Key words:** *Impact-Echo method, dominant frequencies, corrosion of reinforcing steel, electrical resistance, Thomson double bridge.*

### **1. Introduction**

The rebar condition influences profoundly the properties of horizontal structures. Note that the occurrence of corrosion in the bulk cannot be observed from the outside in many cases. This is why studies of non-destructive methods allowing the researchers to detect the degree of corrosion for the built-in rebars are being paid much attention currently.

An acoustic method, known as Impact-Echo method [1], providing for the internal structure damage evolution and degree detection, appears to be a convenient method to monitor the building structure condition the defect detection, identification and location are constituents of the diagnosis of the object technical condition [2, 3]. The non-destructive testing methods make it possible to timely identify the occurrence and development of defects in materials and thus ward off the failure or even the breakdown of structural units consisting of mechanically or thermally stressed, or corrosion affected parts [4, 5]. The frequency inspection (impact-echo) method belongs to the family of non-destructive testing methods and can be applied in many branches, among others also in civil engineering [6, 7]. To assess degree of corrosion a new measurement method has been designed which is based on using the acoustic [7 – 9].

The results of measurements obtained the state of corrosion by using the Impact-Echo methods were compared with results obtained by measuring the electrical resistance using the Thomson double bridge.

## 2. Experimental

We studied a concrete beam which was reinforced with one standard reinforcing bar going central through the beams. The length of bar was 400 mm and the diameter 6 mm. For beam was used concrete mixture in composition 400 kg cement CEM II/B – S 32.5 and 1400 kg sand Želešice with fraction of aggregate 2 mm – 4 mm and 225 l water. Concrete has been modified on a vibration table. After casting, the concrete was kept in the forms at room temperature for 24 hours before being demoulded and placed in water for 28 days. Then dry up with samples at room temperature for next 28 days.

A short-time mechanical impulse (a hammer blow) is applied to the specimen under test to be detected by means of piezoelectric sensors placed on the specimen surface. The impulse is reflected by the surface but also by micro-cracks and defects being present in the specimen under investigation. Thus originating resonance frequency is determined by means of frequency analysis. Dominant frequencies can be determined from the response by means of Fourier transform.

The 360x50x50mm concrete beam with and 6 mm diameter steel rebar have been studied. To generate the exciting impulse, a steel hammer hit the specimen surface. An MIDI piezoelectric sensor was used to pick up the response, the respective impulses being fed into the input of a oscilloscope TiePie engineering Handyscope HS3 two-channel with resolution 16 bits.

Having been recorded by the oscilloscope, the response impulses were analyzed by means of an SW package called TiePie Multi Channel software. The piezoelectric sensor being placed at centre of concrete beam in the direction of the transverse axis and the hammer have hit the on the opposite side in the opposite direction. For resistance measurement method was used Thomson double bridge.

The Thomson double bridge measurement accuracy depends on the accuracy of the resistors used, the bridge sensitivity and various interferences. The measurement accuracy will be virtually affected by the accuracy of the bridge arm resistors only provided the bridge sensitivity is sufficient and the interferences are suppressed by suitable measurement methodology.

The present research is aimed at studying the response signal predominant frequencies in a reinforced concrete beam with a steel rod diameter of 6 mm, which were subsequently corroded.

To launch the corrosion accelerated degradation in compliance with RILEM AAC 7.2. standard was used. In all cases, the specimens were immersed into a 5 % water solution of NaCl for 16 hours, to be subsequently placed into a drier, whose internal air temperature amounted to 40 °C, for 8 hours.

## 3. Results and discussion

Fig. 1 shows the spectral density versus frequency plot for the sample No. 53 before degradation. The sensor is placed at centre of concrete beam and the hit is made at the opposite side of concrete beam in centre in the opposite direction. A spectral component of frequency of 6530 Hz is dominating the plot.

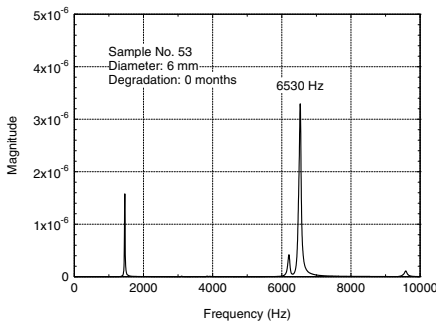
Fig. 2 illustrated the time-domain responses for measurements made before degradation of sample No. 53. We studied the value of damping coefficient  $\lambda$  of exponential dependence changes amplitudes  $A = A_0 e^{-\lambda T}$ . When we calculating the damping coefficient we use changes of envelopes made from squares of the

maximum deviations of the reference signal. The value of the damping coefficient for sample No. 53 was  $\lambda_1 = 18.7 \text{ s}^{-1}$ .

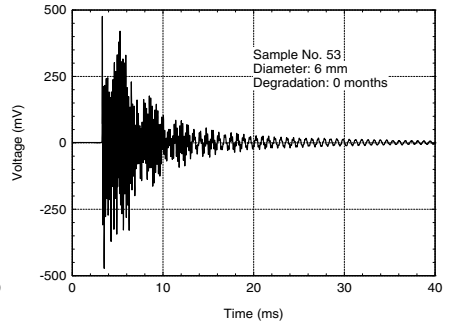
At the Fig. 3 we can see frequency spectrum for the sample No. 53 after 18 months controlled degradation in aqueous NaCl solution. Dominant frequency shifted to the value of 6735 Hz.

After 18 months of controlled degradation in aqueous solution of NaCl, we observed changes in the signal response (Fig. 4). The damping coefficient increased from its initial value, to the  $\lambda_2 = 21.3 \text{ s}^{-1}$ .

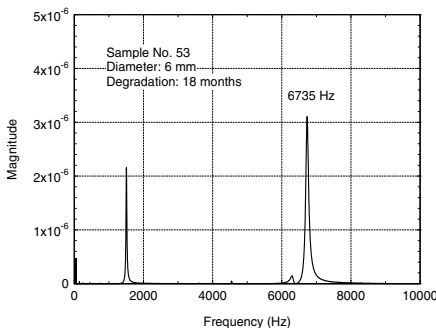
In Fig. 5 we can observe the modification of the dominant frequency during 18 months of controlled degradation in aqueous solution of NaCl. The frequency is change from 6530 Hz to 6735 Hz, that by 3.1 %. The graph shows the rapid increase the dominant frequency in the first six months of degradation. Other changes of the dominant frequency are more gradual. In the same time damping coefficient is changed from  $\lambda_1 = 18.7 \text{ s}^{-1}$  to the  $\lambda_2 = 21.3 \text{ s}^{-1}$ , by 13.9 %. (Fig. 6). Significant rise in the value of this coefficient also takes place in the first six months of degradation.



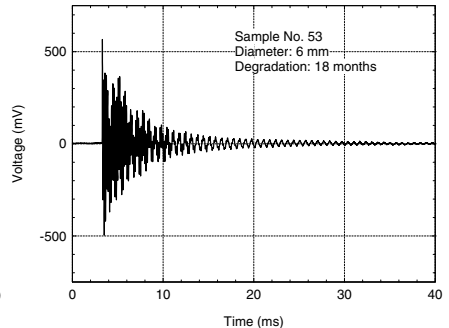
*Fig. 1 Frequency spectrum for the sample No. 53 before degradation.*



*Fig. 2 Sensor output versus time plot for the sample No. 53 before degradation.*



*Fig. 3 Frequency spectrum for the sample No. 53 after 18 months of degradation.*



*Fig. 4 Sensor output versus time plot for the sample No. 53 after 18 months of degradation.*

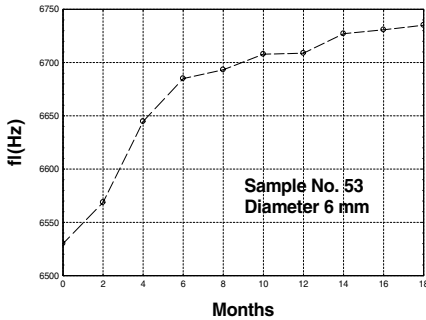


Fig. 5 Frequency spectrum for the sample No.53 after 18 months of degradation.

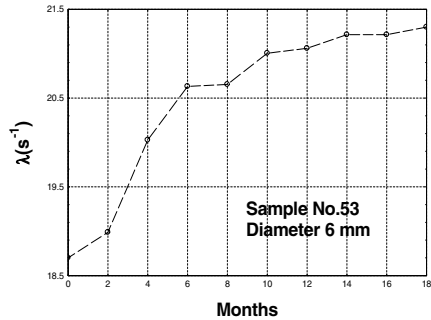


Fig. 6 Sensor output versus time plot for the sample No.53 after 18 months of degradation.

Fig. 7 shows the results of monitoring changes in resistance of reinforcing steel No. 53 with a diameter of 6 mm within 18 months of controlled degradation. The initial value of electrical resistance changed during the controlled degradation from value  $R_1 = 1.66 \text{ m}\Omega$  to value of  $R_2 = 1.82 \text{ m}\Omega$ . The average value of electrical resistance of all 20 samples prior to degradation was  $R_{a1} = 1.64 \text{ m}\Omega$  and after degradation  $R_{a2} = 1.79 \text{ m}\Omega$ . After 18 months there was a change of electrical resistance of  $\Delta R_a = 0.15 \text{ m}\Omega$ . This represents a change of 9 %.

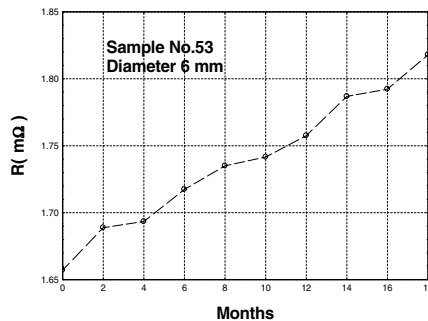


Fig. 7 Change of resistance of steel reinforcement No.53 with a diameter of 6 mm within 18 months of controlled degradation.

#### 4. Conclusion

The paper deals with the study of dominant frequencies of an Impact-Echo method response signal obtained from a reinforced concrete beam with a steel rod diameter of 6 mm. Tension pulse was produced in the centre of the concrete beam and detected in opposite position of the concrete beam. Dominant frequencies of the

response signal will be the main criterion for the reinforced concrete rebars corrosion progress. The article presents the results of measurements obtained after 18 months controlled degradation in aqueous NaCl solution. The results were compared with measurements of electrical resistance of reinforcing steel by using the Thomson double bridge.

During the degradation shift the dominant frequency. For example, the sample No. 53 change the frequency from  $f_1 = 6530$  Hz to  $f_2 = 6735$  Hz, by 3.1%. The damping coefficient change from  $\lambda_1 = 18.7$  s<sup>-1</sup> to the  $\lambda_2 = 21.3$  s<sup>-1</sup>, by 13.9 %.

The results obtained by studying the state of corrosion by acoustic method Impact-Echo was compared with results obtained by measuring the electrical resistance of steel reinforcement bars. Measurements were carried out using a double Thomson bridge. The average value of the resistance of whole group of 20 samples changed from  $R_{a1} = 1.64$  m $\Omega$  to  $R_{a2} = 1.79$  m $\Omega$ . During 18 months of degradation occurred increased electrical resistance of reinforcement by 9 %.

It is obvious that the measurement of electrical resistance of reinforcement is a sensitive method for assessing the state of corrosion of reinforcing steel in reinforced concrete structures and so it can be used to compare the results of corrosion monitoring using acoustic methods. We observed a strong correlation between these two changes.

Based on the above results, the frequency inspection method can be recommended as an efficient tool to evaluate the steel rebar corrosion condition.

The non-destructive testing methods make it possible to timely identify the occurrence and development of defects in materials and thus ward off the failure or even the breakdown of structural units consisting of mechanically or thermally stressed, or corrosion affected parts.

### Acknowledgements

This research is supported by Czech Science Foundation – project SV RC project: FAST – J – 13-1879.

### References

- [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] Plskova I., Chobola Z., Matysik M., Martinek J. *EWGAE 2008 - Proceedings of the 28th European Conference on Acoustic Emission Testing*. Cracow: Kanji Ono, European Working Group on Acoustic Emission and Cracow University of Technology, pp. 322 – 327, (2008).
- [3] Plskova I., Matysik M., Chobola Z. *Proceedings the 10<sup>th</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing*. Ljubljana: Grum J, Slovenian Society for NDT, pp. 333 – 340, (2009).
- [4] Lunak M., Kusak I. *Defektoskopie 2009 - NDE for Safety*. Praha: Mazal P., BETIS, pp. 269 – 274, (2009).
- [5] Pazdera L., Smutny J., Topolar L., Korenska M., Bilek V. *NDT Welding Bulletin (special issue)*, pp. 18,( 2010).
- [6] Korenska, M., Chobola, Z., Sokolar, R., Mikulkova, P., Martinek, J. *Ceramics-Silikáty 50 (3)*, pp. 185, (2006).

- [7] Plšková I., Chobola Z., Matysík M. *Ceramics-Silikáty* 55 (2), pp. 176-182, (2011).
- [8] Epasto, G., Proverbio, E., Venturi, V. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method. *Materials and Structures. Volume 43, Numbers 1-2 (2010)*. 2010. pp. 235-245. DOI: 10.1617/s11527-009-9484-0.
- [9] Jašniok, M. Examining and Modelling the Influence of Lengths of Rebars in Concrete to Shapes of Impedance Spectra. In *ESPSC 2011 European Symposium on Polymers in Sustainable Construction*. Warsaw Poland, pp 1-6, (2011).





## AKUSTICKÁ A METALLOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA GRAFITU LITIN ACOUSTIC AND METALLOGRAPHIC CHARACTERISTICS OF CAST IRON GRAPHITE

Břetislav SKRBEK\*, David BÍLEK \*\*

\*TU v Liberci, \*\*ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav

Contact e-mail: [bretislav.skrbek@tul.cz](mailto:bretislav.skrbek@tul.cz)

### Abstrakt

*V Grafitické litiny – dosud nejrozšířenější lité konstrukční materiál. Rozdělení litin podle tvaru grafitu dle ISO 945. Metallografický znakový popis tvaru a velikosti grafitu nevystihuje numerický vztah k užitém vlastnostem dané litiny. Z literatury znám již 30 let vztah rychlosti zvuku k podílu kuličkového a červíkového grafitu ke kontrole odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. Chybí vazba na vliv lupinkového grafitu, ledeburitického cementitu, velikost útvarů grafitu. V rámci studentských prací TU Lbc vznikly matematické modely pro vztah akustických vlastností s parametry a podílem lupinkového grafitu, volného cementitu, velikostí kuličkového grafitu. Význam pro praxi.*

**Klíčová slova:** *Grafitické litiny, metallografie, rychlost zvuku, kontrola výroby.*

### Abstract

*Graphite cast irons are still most widespread cast construction material. The classification of cast irons after shape of graphite after ISO 945. The metallography character description of shape and size of graphite doesn't depict numerical relation to useful properties of given cast iron. There is already thirty years known relation between sound velocity and share of spheroidal and vermicular graphite for cast iron with spheroidal graphite castings checking. The binding onto flake graphite, ledeburitic cementite, size of graphite formations effect is missing. The mathematical models for relation among acoustic properties and parameters of flake graphite and free cementite share and spheroidal graphite size. Practical importance.*

**Key words:** *Graphite cast irons, metallography, sound velocity, production control.*

### 1. Úvod

Většina důležitých litinových odlitků je vázána v expedici a přejímce mezemi struktury litiny. Norma ISO EN 945 (obr. 1) tvoří vzorník základních tvarů grafitu litin, podle kterých se i nazývají jednotlivé druhy litin. Tvar grafitu určuje pevnost a houževnatost litiny. Například vyloučení lupinkového grafitu GI místo kuličkového GVI u odlitku způsobí snížení pevnosti na čtvrtinu původní hodnoty. Určitý typ litiny obvykle vyžaduje v technických podmínkách odlitku vyloučení 80% jmenovitého tvaru grafitu. Příprava metallografického výbrusu pro kontrolu tvaru grafitu je destruktivní a zdlouhavá zkouška. Běžně se ohodnocuje částkou 600Kč. Již prakticky 40 let se [1] využívá vztahu tvaru grafitu k rychlosti zvuku (5) při výrobě litiny s kuličkovým grafitem GVI. Nepřípustný podíl cca 20% červíkového grafitu GIII v odlitku z litiny

s kuličkovým grafitem (tvárné litiny) se projeví poklesem rychlosti zvuku o cca 60m/s (asi 10% z absolutní hodnoty). Samotná zkouška tvaru grafitu provedená ultrazvukovým tloušťkoměrem je sice asi 20x levnější a rychlejší, přesto není ve slévárnách ani zpracovatelských firmách dostatečně rozšířena. Úloha není tak jednoduchá jak se zdá. Je tu řada činitelů fyzikálně působících a další zhoršující reprodukovatelnost zkoušky. O nich se literatura příliš nezmiňuje. V rámci studentských a disertačních prací byly tyto činitele na straně objektu měření (tloušťka, topografie a rovnoběžnost povrchů, pnutí, tepelné zpracování, chemické složení, velikost grafitů, struktura matrice...) a vlivy geometrie kvantifikovány. Příspěvek předkládá výsledky zkoumání vztahu podélné rychlosti zvuku k velikosti lupinkového a kuličkového grafitu, k podílu ledeburitu ve struktuře a k stupni eutektičnosti (obsahu C, Si, P). Popis dílčích odlišků, vzorků a numerických výsledků vlivem omezeného rozsahu příspěvku není uveden.

## 2. Základní princip

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s rostoucím útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Za nespojitost lze považovat výztuže, vrstvy, inkluze se značně odlišným vlnovým odporem

$$Z = c \times \rho \quad [\text{MPa/s}] \quad (1)$$

vůči matrici [3] Čím větší je rozdíl akustických odporů  $Z_m$  a  $Z_g$ , tím větší je podíl  $R$  odraženého tlaku akustické vlny z rozhraní zpět. Pro ocelovou matrici platí

$$Z_m = 5,92 \times 7,8 = 46,2 \quad [\text{MPa/s}].$$

Pro uhlík ve formě grafitu přibližně platí

$$Z_g = 2 \times 2 = 4 \quad [\text{MPa/s}].$$

$$R = (Z_g - Z_m) / (Z_g + Z_m) \quad [1] \quad (2)$$

Jedno rozhraní matrice – grafit tak odrazí  $R = 80,5\%$  tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny kompozitem je po několika odrazech od útvarů výztuže vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny matricí pak závisí na labyrintu cesty matricí. Čím více útvary matricí oslabují (čím jsou štihlejší), tím větší je hodnota akustické dráhy  $L_u$  ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny)  $L$ . Rychlost zvuku  $c_L$  tak klesá.

$$c_L = c_{L0} \times L / L_u = 5920 \times L / L_u \quad [\text{m/s}] \quad (3).$$

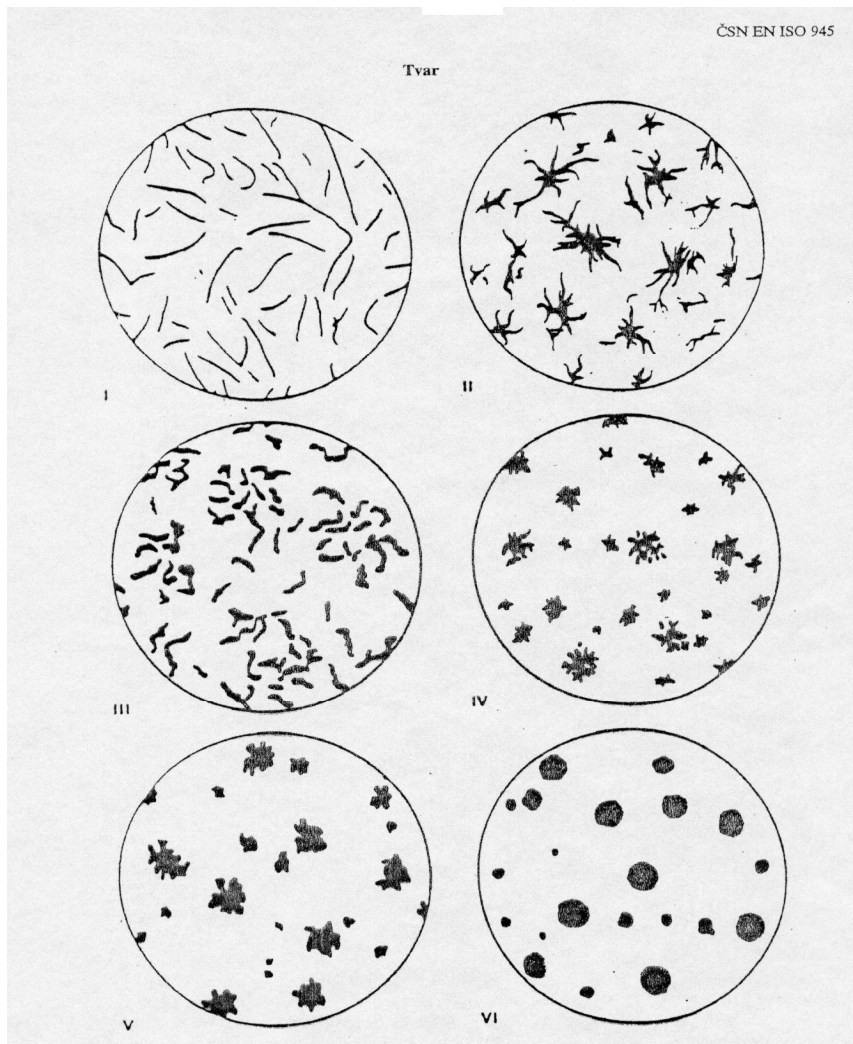
$c_{L0}$ ...rychlost zvuku ocelové matrice litiny.

Charakter rozhraní se podepisuje na fázi odražené vlny. Rozhraní s menší vlnovou impedancí odráží vlnu v opačné fázi jak rozhraní s vyšší impedancí. Tento efekt se hojně využívá u vláknových nebo vrstvených soustav materiálů. Nejvyšší stupeň strukturální diagnostiky tvoří spektrální analýza akustické odezvy (echa, šumy).

Kontrola tvaru grafitu přímo na posledním odlitku, který byl z pánve odlit, přináší jistotu celé dávce pokud množství kuličkového grafitu  $GVI > 85\%$ . Pokud tato podmínka není splněna, nutno zkontrolovat podíl  $GVI$  u všech odlitků dávky.

Obsah GVI 6. velikosti dle ČSN v ojnicích z LKG v litém stavu byl například určován podle [2]

$$\text{GVI} = 1132 \times L/L_u - 1000 \quad [\%] \quad K=0.9 \quad (4)$$



Obr. 1 ISO 945 – grafit litin  
Fig. 1. ISO 945 – graphite of cast irons

### 3. Výsledky výzkumu

Standardní vzorec pro stupeň eutektičnosti SE, který vyjadřuje polohu litiny v diagramu Fe-C, kvantifikuje množství grafitu ve struktuře odlitku.

$$SE = C / (4,28 - 0,33 \times (Si+P)) \quad [1] \quad (5)$$

Pro 5. velikost grafitu dle ISO 945 měřením na souborech průmyslových odlitků s velikostí SE od 0,95 do 1,15 v rámci práce [4] byly postaveny výrazy

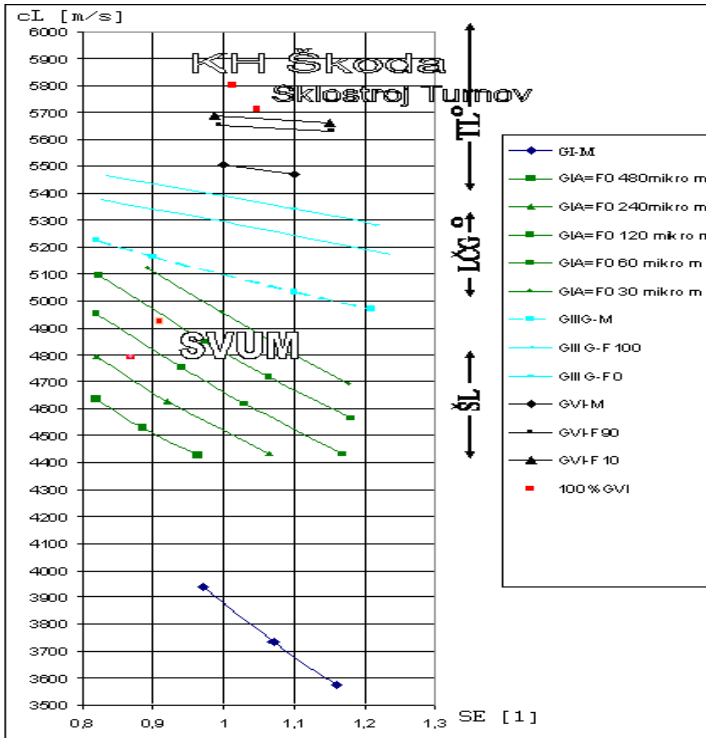
$$V_{L_{GVI}} = 5832 - 150 \times SE \quad [m/s] \quad (6)$$

$$V_{L_{GIII}} = 5766 - 467 \times SE \quad [m/s] \quad (7)$$

Pro lupínkový grafit o rozložení A a B velikosti d (μm) dle ISO 945 platí

$$\text{Log} (L/L_{UGI}) = -0,0109 - 0,0452 \times \text{log} d - 0,304 \times \text{log} SE \quad [1] \quad (8)$$

Z výrazů (6), (7) a rovnic (8) pro jednotlivé délky d lupínkového grafitu bylo možno sestavit komplexní graf vlivu SE a tvaru grafitu na rychlost zvuku litin z obr.2.



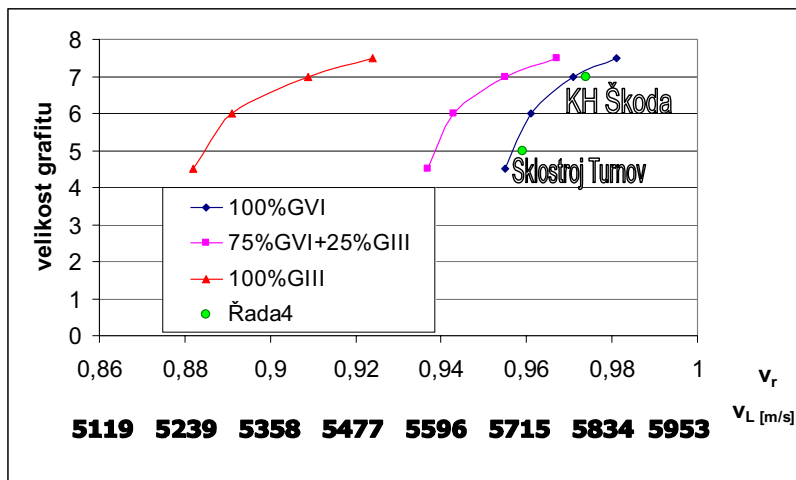
Obr. 2. Vliv chemického složení a tvaru grafitu na rychlost zvuku litin.

Fig. 2. Influence chemical constitution and form graphite on speed of sound cast iron

Zpracováním výsledků měření relativní rychlosti zvuku  $V_r = L/L_u$  na škále odlitých vzorků s jemným a hrubým kompaktním grafitem byly vypracovány [3] matematické modely (9, 10) a graf 3 vlivu velikosti kompaktního grafitu na rychlost zvuku při zhruba konstantním SE = 1.

Tabulka 1 velikostí grafitu dle ISO 945

ČSN znak	1	2	3	4	5	6	7	8
μm	1000	480	240	120	60	30	15	8



Obr. 3. Vliv velikosti grafitu GVI na rychlost zvuku

Fig. 3. Dependence between the size of graphite GVI and velocity of sound

$$d_{GVI} = -4845,8 \times (L/L_u)^2 + 9492,2 \times L/L_u - 4641 \quad [1] \quad (9)$$

$$d_{GIII} = -1820,7 + 3355,3 \times L/L_u - 1538,4 \quad [1] \quad (10)$$

Předvedené výrazy platí pro litinu krystalizující eutekticky ve stabilní soustavě železo-grafit, dále pro eutektoidní metastabilní krystalizaci litiny s lupínkovým grafitem a převážně feritické kompaktní litiny.

Pakliže vlivem příliš rychlého chladnutí, či vyhasínání očkovacího účinku v tekuté litině se v odlitcích vyskytuje nežádoucí tvrdý a křehký ledeburit (metastabilní eutektikum) zvýší se rychlost zvuku dané litiny nad hodnotu platnou pro 100% grafitu žádaného tvaru a velikosti (ledeburit se vylučuje na úkor grafitu).

Pokusy byla stanovena rychlost zvuku ledeburitu jako konstantní hodnota 5910m/s bez ohledu na prvkové složení a výchozí litinu. Podíl karbidů „zákalky“ ve stěně odlitku lze poměrně přesně měřit rychlostí zvuku. Pro každou litinu a složení ale bude jiný použitelný interval hodnot rychlostí zvuku.

Pro litinu s lupínkovým grafitem o velikosti 5 a SE 0,93 je tento interval (viz obr. 2)  $v_L$  4910 – 5910 m/s. Změříme-li ve stěně odlitku z této litiny  $v_L$  5010m/s, s největší

pravděpodobností bude obsahovat 10% ledeburitu. V konkrétním případě byl pro odlitky z LLG stanoven a pro kontrolu % ledeburitu (CEM) použit výraz

$$\%CEM = 462,5 \times L/Lu - 368 \quad [\%] \quad (11)$$

Pro stěnu odlitky z litiny s kuličkovým grafitem o velikosti 6 při SE 1 bude (obr. 3) použitelný interval podstatně menší  $v_L$  5710 – 5910 m/s. 10% ledeburitu tedy bude obsahovat stěna odlitky s hodnotou  $v_L$  5730 m/s.

#### 4. Závěr

Z provedených experimentů plynou zásadní dříve nepublikované poznatky:

Hodnota rychlosti zvuku grafitických liti litin závisí na chemickém složení litiny tím více, čím méně kompaktní grafit struktura litiny obsahuje.

Stejný podíl ledeburitu ve struktuře litiny se projeví u litiny s lupínkovým grafitem zhruba 5x větší změnou  $v_L$  jak u litiny s kuličkovým grafitem. Kontrola výskytu ledeburitu u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem ultrazvukem je proto zatížena podstatně větší chybou (překryta ostatními vlivy).

Článek byl částečně podpořen projektem OP VaVpl 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] Pirsch, J. Gefugeuntersuchungen an Gusswerkstoffen mit Hilfe Ultraschall. . Giessereitechnik XVII., 8/1971, s. 267 – 274.
- [2] Skrbek, B. Nedestruktivní materiálová diagnostika litin. Kandidátská disertační práce, 1989, VŠST Liberec.
- [3] Bejčková Monika. Vliv velikosti útvarů grafitu na rychlost zvuku. Diplomová práce KMT 199, 2006, TU v Liberci.
- [4] Bílek, D. Výzkum tloušťkoměru DIO 570 v ultrazvukové strukturoskopii litin. Bakalářská práce KMTB 113, 2006 TU v Liberci.



## MAGNETICKÉ MIKRODRÔTY AKO NÁHRADA ODPOROVÝCH TENZOMETROV MAGNETIC MICROWIRES AS A STRAIN GAUGE SUBSTITUTION

Miroslav ŠMELKO\*, Dušan PRASLIČKA\*, Norbert FLACHBART\*,  
Josef BLAŽEK\*

\* Technická univerzita v Košiciach, Letecká Fakulta, Katedra leteckej technickej prípravy

Contact e-mail: miroslav.smelko@tuke.sk

### Abstrakt

Odporové tenzometre predstavujú základný metrologický prvok používaný pre meranie mechanických pnutí. Dosahujú vysokú presnosť pri relatívne nízkej cenne snímača. Mechanická deformácia meraného prvku je reprezentovaná zmenou ohmického odporu snímacieho meándra tenzometra. Detekciu zmeny odporu najčastejšie snímajú presné odporové mostíky. Oproti veľkému množstvu výhod majú odporové tenzometre dve zásadné nevýhody a to relatívne veľké mechanické rozmery a nutnosť galvanického spojenia s meracou sústavou. Tieto nevýhody obmedzujú odporové tenzometre pre použitie najčastejšie na povrchu meraných súčiastok.

Magnetické mikrodrôty sú kompozitné materiály zložené z kovového jadra a skleneného plášťa. Chemické zloženie jadra, rozmery jadra a plášťa a prípadné ďalšie spracovanie určujú výsledné vlastnosti mikrodrôtu. Mikrodrôty s veľkou kladnou magnetostrikciou sa vyznačujú dobrou reakciou na mechanické pnutie. Je možné vyrábať ich v rozpätí celkového priemeru od jednotiek mikrometrov do stoviek mikrometrov pri zachovaní požadovaných magnetických vlastností. Zmena mechanického namáhania mikrodrôtu sa prejaví na zmene jeho magnetických vlastností, predovšetkým v zmene koercivity. Meranie prebieha indukčnou metódou, kedy je meraný mikrodrôt periodicky premagnetovaný vonkajším magnetickým poľom budiacej cievky. Odozva mikrodrôtu je snímaná snímacou cievkou s následným prevodom na meranie času. Celý proces merania prebieha bezkontaktno pomocou sústavy cievok uloženéj v blízkosti meraného mikrodrôtu.

Pre potreby merania pnutia v súčasnosti používame mikrodrôty na báze železa s kladnou magnetostrikciou, celkovým priemerom 40  $\mu\text{m}$  a dĺžkou 2 cm. Takýto mikrodrôt sa mechanickými parametrami približuje k vláknam sklenených tkaním používaných pre výrobu kompozitných materiálov. Jeho vloženie medzi vrstvy kompozitu nespôsobí narušenie štruktúry materiálu a nevytvorí pevný uzol ani žiadnu lokálnu nehomogenitu. Zabudovaný mikrodrôt je možné bezkontaktno snímať z povrchu materiálu čo umožní sledovanie procesov prebiehajúcich vnútri sledovaného materiálu. V súčasnej dobe je postavený prvý prototyp zariadenia a prebiehajúce laboratórne skúšky potvrdili možnosť snímania pnutia do hĺbky približne 3 mm pod povrchom materiálu.

**Kľúčová slova:** odporové tenzometre, meranie pnutia, magnetické mikrodrôty

## **Abstract**

*Strain gauges are basic tensile stress metrological elements. High accuracy and low price are reached together. Mechanical deformation of measured component is represented by change of resistance of strain gauge. For active resistance change detection are used resistance bridges, mostly. Galvanic connection and relatively big dimensions are two disadvantages compared to many advantages of force gauges. These disadvantages reduce possible applications of force gauges mostly for surface use.*

*Magnetic microwires are composite materials which consist of metallic core and glass coating. Core chemical composition, dimensions of core and coating and possible post processing determine the final magnetic properties of such microwire. Good reaction to tensile stress is characteristic for magnetic microwires with high positive magnetostriction. Overall diameter of microwire can be prepared between ones and hundreds micrometers with magnetic properties preserved. Changes of magnetic parameters of microwire, mostly coercivity, are caused by change of tensile stress applied on microwire. Periodic reversal magnetization field of excitation coil is used for measuring by induction method. Microwire response is sensed by sensing coil with subsequent conversion to time interval measurement. Whole measurement is contactless with coil system placed close to measured microwire.*

*Iron based microwires with positive magnetostriction, overall diameter 40  $\mu\text{m}$  and 2cm length are used for present measurement purposes. Such microwire is similar to the glass fibers used for composite materials matrix. Embedding the microwire between the layers of matrix does not cause structural damage, solid node or local heterogeneity. Processes ongoing inside composite material can be observed by such microwire embedded and sensed from material surface by contactless induction method. First prototype of such device had been build and current laboratory tests confirmed tensile stress measuring possibilities up to 3 mm under the material surface.*

**Key words:** strain gauges, tensile stress sensing, magnetic microwires

## **1. Úvod**

Kompozitné materiály majú v súčasnej dobe zastúpenie v širokej rade aplikácií. V konštrukciách moderných dopravných lietadiel dosahuje podiel kompozitných materiálov až 50%, u menších športových lietadiel sa však bežne stretávame s celo kompozitnými konštrukciami. Najpoužívanejšími tkaninami sú sklenené tkaniny, no čoraz častejšie sú nahradzované pevnejšími uhlíkovými tkaninami. Keďže u kompozitných materiálov dochádza k skokovému pretrhnutiu pri prekročení kritického zaťaženia, je nutné tieto materiály diagnostikovať a včas detegovať možné poškodenie materiálu v snahe predísť zboreniu konštrukcie.

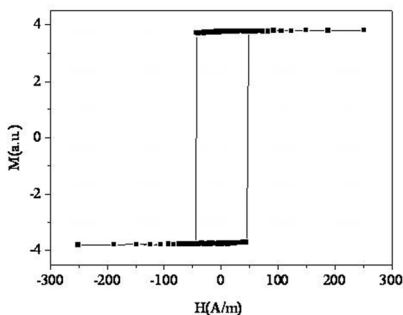
Na tieto účely bolo vyvinutých množstvo diagnostických metód. Najbežnejšie používanou metódou stanovenia pnutia materiálu je meranie pnutia použitím odporových tenzometrov. Ich použitie poskytuje množstvo výhod, avšak vo väčšine prípadov je ich aplikácia obmedzená len na povrch meraného komponentu. Zavedenie tenzometrického snímača do vnútra materiálu je spojené so značnými problémami, ak vôbec možné.

Použitie magnetických mikrodrôtov v pozícii snímačov mechanického pnutia ponúka alternatívu k tenzometrickým snímačom, pričom ich aplikácia do vnútra materiálu nepredstavuje takmer žiadny problém. Metóda prezentovaná v tomto článku je zameraná na použitie magnetických mikrodrôtov v sklenených a uhlíkových kompozitných materiáloch. Snímač vložený medzi vrstvy kompozitu počas výroby kompozitnej súčiastky slúži počas jej celej životnosti.



## 2. Princíp činnosti

Magnetické mikrodrôty sú amorfne materiály zložené z kovového jadra a skleneného obalu. Ich magnetické vlastnosti sú definované chemickým zložením kovového jadra, mechanickými rozmermi jadra a obalu, výrobným postupom, či posteriorným teplotným spracovaním. V závislosti na konkrétnom nastavení magnetických parametrov mikrodrôtov sa líši ich aplikačné nasadenie. Vo všeobecnosti magnetické mikrodrôty reagujú na vonkajšie magnetické pole, mechanické pnutie a teplotu. Pre potreby merania mechanického pnutia sa ako najvhodnejšie momentálne ukazujú magnetické mikrodrôty s výraznou kladnou magnetostrikciou. Ich magnetizačná charakteristika je pravouhlá a zmena ich magnetického stavu prebieha skokovo, prostredníctvom jedného Bakrhausenovho skoku. Takéto mikrodrôty sa tiež nazývajú bistabilné a ich typická magnetizačná charakteristika je znázornená na nasledujúcom grafe.

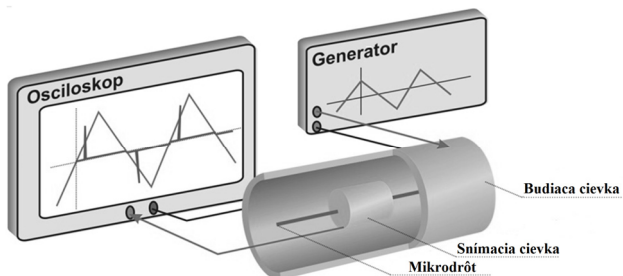


Obr. 1 Magnetizačná charakteristika bistabilného mikrodrôtu [1]

Fig. 1 Bistable microwire magnetization characteristic [1]

K zmene magnetizácie jadra dochádza pri hodnote intenzity vonkajšieho magnetického poľa nazývaného spínacie pole. U ortogonálnych magnetických materiálov sa tejto hodnote vraví koercivita. Pri dosiahnutí tejto hodnoty dôjde k odtrhnutiu magnetickej domény, ktorá prebehne celým objemom mikrodrôtu a zmení jeho magnetickú polarizáciu. Ak na mikrodrôt pôsobí mechanické pnutie, hodnota spínacieho poľa sa zmení.

Keďže k zmene magnetizácie jadra mikrodrôtu dochádza skokovo, je možné túto zmenu dobre detegovať pomocou jednoduchšej indukčnej metódy. Magnetický mikrodrôt je periodicky vybudzovaný budiacim poľom trojuholníkového priebehu, čím dochádza k jeho pravidelnému premagnetovaniu zo stavu saturácie jednej polarizácie do stavu saturácie opačnej polarizácie. Umiestnením snímačovej cievky v blízkosti mikrodrôtu je možné snímať indukované napätové špičky spôsobené preletom doménovej steny. Takto je možné vytvoriť bezkontaktný snímač mechanického pnutia umiestnený v meranom materiáli, ktorý nepotrebuje vnútorný zdroj napájania, ani galvanické pripojenie k meracej aparatúre.



Obr. 2 Metodika merania spinacieho poľa mikrodrôtu [2]

Fig. 2 Microwire switching field measuring principle [2]

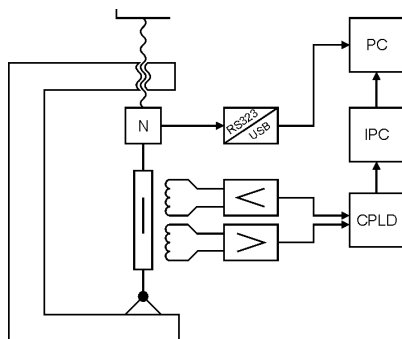
Pokiaľ poznáme amplitúdu budiaceho poľa, dobu trvania periódy budiaceho signálu a sme schopný merať časové intervaly od hrany budiaceho impulzu po príchod špičky signalizujúcej premagnetovanie mikrodrôtu, sme schopný pomerne jednoducho stanoviť spinacie pole meraného mikrodrôtu na základe nasledovného vzťahu

$$H_{SW} = \frac{2H_m}{T}(t_+ + t_-) - H_m \quad [2]$$

kde  $H_{SW}$  je spinacie pole mikrodrôtu,  $H_M$  je amplitúda budiaceho poľa,  $T$  je doba periódy budiaceho poľa,  $t_+$  a  $t_-$  sú časy príchodu indukovaných impulzov zo snímacej cievky.

### 3. Výsledky meraní

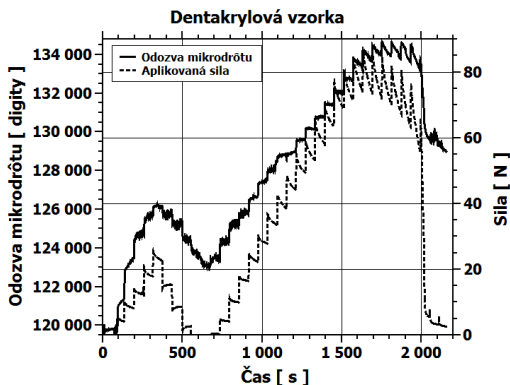
Pre potreby overenia funkčnosti navrhutej indukčnej metódy bolo vytvorené meracie pracovisko, pozostávajúce z počítačov a meracej elektroniky, stendu Lutron simulujúceho mechanické pnutie a sady niekoľkých vzoriek kompozitných materiálov s vloženými mikrodrôtmí.



Obr. 3 Bloková schéma meracieho pracoviska

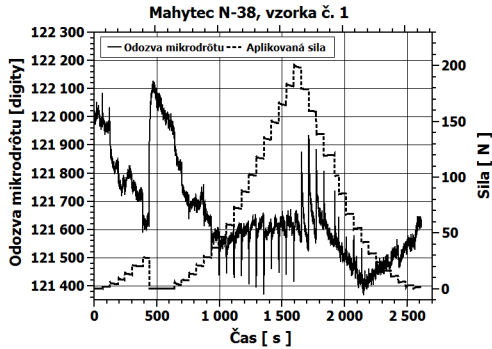
Fig. 3 Block diagram of measurement workstation

Pred samotnou výrobou vzoriek kompozitných materiálov prebehlo niekoľko meraní rôznych druhov mikrodrôtov za účelom výberu vhodného mikrodrôtu. Smerodajným parametrom bola úroveň vnútorného šumu jednotlivých mikrodrôtov. Na základe vykonanej analýzy bol zvolený ako vhodný mikrodrôt s označením N 38, ktorého chemické zloženie je  $Fe_{38,5}Ni_{39}Si_{7,5}B_{15}$  a celkový priemer  $40\ \mu m$ . Tento mikrodrôt bol následne použitý u všetkých doposiaľ vytvorených vzoriek. Prvou vzorkou bola vzorka z materiálu Dentacryl, bez vloženia vystužujúcej tkaniny, následkom čoho došlo počas prvého merania k jej roztrhnutiu. Meranie je zobrazené na nasledujúcom grafe.



Obr. 4 Meranie na vzorke vyrobenej z Dentacrylu [3]  
 Fig. 4 Measurement of the sample made from Dentacryl [3]

Čierna krivka prezentuje záznam z kontrolného tenzometra a červená krivka záznam odozvy mikrodrôtu vloženého v meranej vzorke. Na priebehu zaťažujúcej sily je možné vidieť značné uvoľnenie po každom zvýšení zaťaženia vzorky. Tento pokles je viditeľný aj na odozve mikrodrôtu. Uvoľňovanie zaťaženia bolo spôsobené tečením materiálu vzorky, čo viedlo až k roztrhnutiu vzorky približne v tretej minúte merania. Toto meranie potvrdilo funkčnosť navrhutej metódy a taktiež použitej meracej elektroniky. Následne bolo vytvorených niekoľko vzoriek z rôznych materiálov, vrátane technickej gummy, epoxidovej živice, sklolaminátového a uhlíkového kompozitu. Pri týchto vzorkách boli pozorované problémy so zaistením dobrej adhézie mikrodrôtu a nosného materiálu. Príkladom zlej adhézie môže byť meranie prezentované na nasledujúcom grafe.

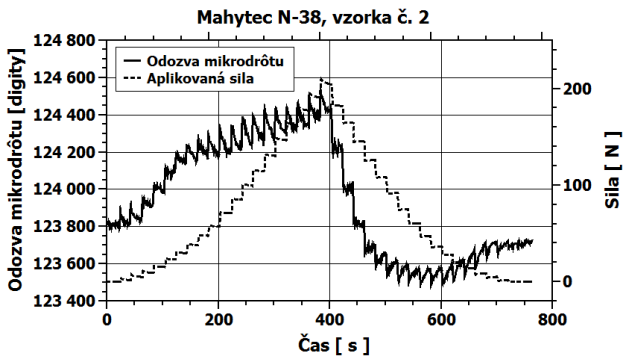


Obr. 5 Meranie na laminátovej vzorke č. 1

Fig. 5 Measurement of the glass fiber sample no. 1

Pre meranie bola použitá vzorka skladajúca sa z 20 vrstiev sklenených vlákien, pričom mikrodrôt bol umiestnený medzi 5 a 6 vrstvou. Meranie na tejto vzorke ukázalo reakciu na skokovú zmenu zaťaženia vzorky, avšak okamžite po ukončení zmeny zaťaženia došlo k relaxácii odozvy mikrodrôtu takmer na počiatočnú hodnotu. Správanie odozvy mikrodrôtu jasne poukazuje na nedostatočnú adhéziu medzi mikrodrôtom a nosným materiálom. Po niekoľkých meracích cykloch došlo k popraskaniu vzorky a poškodeniu vlákien vrchnej vrstvy. Na základe kontroly vzorky bol vyvodený záver, že vzorka neobsahovala dostatočný objem pojiva, čo spôsobilo jej rozpad.

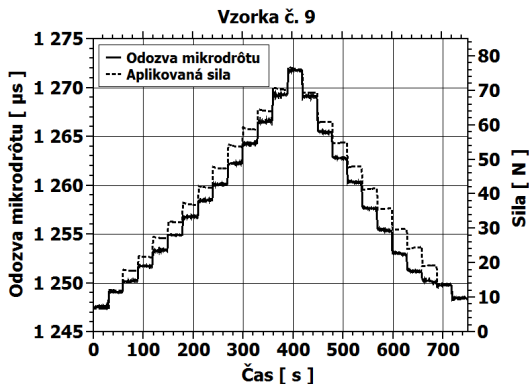
Ďalším príkladom nesprávnej vzorky môže byť meranie zobrazené na nasledujúcom grafe. Pre meranie bola použitá vzorka zložená z 20 vrstiev sklenených vlákien s mikrodrôtom vloženým medzi 5 a 6 vrstvou. V tomto prípade vzorka obsahovala dostatok pojiva, avšak pojivo nebolo správne namiešané a nedošlo k jeho úplnému vytvrdeniu. Následkom čoho bola dobrá adhézia mikrodrôtu vnútri vzorky, avšak na vzorke sa prejavovalo značné tečenie vplyvom aplikovaného zaťaženia.



Obr. 6 Meranie na laminátovej vzorke č. 2 [2]

Fig. 6 Measurement of the glass fiber sample no. 2 [2]

Celkovo bolo doposiaľ vytvorených 10 sklo laminátových vzoriek, pričom najlepšie dosiahnuté výsledky boli dosiahnuté na vzorke číslo 9 a sú znázornené na nasledujúcom grafe.



Obr. 7 Meranie na vzorke č. 9 [4]

Fig. 7 Measurement of the sample no. 2 [4]

Je možné vidieť, že meraná vzorka obsahovala dostatok pojiva, čo sa prejavilo v dobrej adhézii vloženého mikrodrôtu. Vzorka taktiež vykazuje náznaky tečenia materiálu, avšak nie sú také výrazné ako u iných vzoriek.

#### 4. Záver

V našom doterajšom skúmaní sme podrobili meraniu celkovo desať rôznych laminátových vzoriek a niekoľko vzoriek vytvorených z Dentacrylu, technickej gumy a uhlíkového kompozitu. Spoločným problémom sa u všetkých vzoriek stala adhézia vloženého mikrodrôtu a nosného materiálu. Táto skutočnosť poukazuje na nutnosť ďalšieho výskumu v tejto oblasti. Šumové vlastnosti samotných mikrodrôtov taktiež spôsobujú problémy a zhoršujú dynamiku samotného merania.

Dosiahnuté výsledky prvotných meraní však preukázali funkčnosť použitej metódy a možnosť vytvorenia bezkontaktného snímača pnutia s využitím magnetických mikrodrôtov. Na základe získaných údajov je možné predpokladať stav materiálu vnútri skúmanej vzorky. Použitie bezkontaktných snímačov vložených priamo v materiály konštrukcie by mohlo poskytnúť nové možnosti diagnostiky kompozitných konštrukcií v rámci krátkodobého, či dlhodobého sledovania stavu konštrukcie. Pri použití v laboratórnych podmienkach môžu tieto snímače napomôcť pri sledovaní vlastností kompozitných materiálov a ich správania sa v rámci jednotlivých vrstiev materiálu. Taktiež je možné použiť tieto snímače ako kontrolný prvok počas výroby kompozitných materiálov, najmä ako snímače vytvrdenia kompozitu.

## PodĎakovanie

Táto práca vznikla za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja v projekte APVV-0266-10 a grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v rámci grantu VEGA 1/0286/13.

## Použitá literatúra

- [1] Noise of bistable magnetic microwire sensors / Dušan Praslička ... [et al.] - 2012. In: IC-MAST-2012 : 2nd International Conference on Materials and Applications for Sensor and Transducers : Abstracts Book : 24. - 28.5 May 2012, Budapest Hungary. P. 139.
- [2] PRASLIČKA, D., BLAŽEK, J., ŠMELKO, M., HUDÁK, J., ČVERHA, A., MIKITA, I., VARGA, R., ZHUKOV, A., Possibilities of Measuring Stress and Health Monitoring in Materials Using Contact-Less Sensor Based on Magnetic Microwires / Dušan Praslička ... [et al.] - 2012. In: IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 49, no. 1 (2012), p. 1-4. - ISSN 0018-9464
- [3] Bezkontaktné snímanie pnutia / Miroslav Šmelko, Dušan Praslička, Miroslav Laššák - 2012. - 1 elektronický optický disk (CD-ROM).In: 2. vedecká konferencia doktorandov LF : zborník príspevkov z konferencie : 9. - 10.5.2012, Košice. - Košice : LF TU, 2012 S. 1-8. - ISBN 978-80-553-0914-9
- [4] Miniature strain gauge sensors for embedding in composite materials / Miroslav Smelko, Dusan Praslicka, Josef Blazek - 2013.In: ICMT 2013 : international Conference on Military Technologies : May 22 - 23, 2013, Brno, Czech Republic. - Brno : University of Defence, 2013 P. 1521-1525. - ISBN 978-80-7231-917-6



## **NON – DESTRUCTIVE TESTING OF HIGH – TEMPERATURE – DEGRADED CEMENT – BASED COMPOSITE BY ACOUSTIC METHODS**

**Daniela ŠTEFKOVÁ\*, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA**

\*Department of Physics, Faculty of Civil Engineering,  
Brno University of Technology, Žižkova 17, 602 00 Brno, Czech Republic  
Contact e-mail: stefkova.d@fce.vutbr.cz

### **Abstract**

*The present paper deals with the applicability of Impact-echo acoustic method to testing of cement-based composites prepared from a mix of cement mortar and quartz sand, which were intentionally degraded by high-temperature treatment (in the temperatures range from 200°C to 1200°C). Changes in the bulk density and the flexural tensile strength were monitored during the degradation for comparison.*

**Key words:** *High-temperature degradation, Impact-Echo method, cement-based composite material, flexural tensile strength, bulk density.*

### **1 Introduction**

The present paper examines the potential applicability of the Impact-echo method for analysing the specimens made from a mix of cement mortar and quartz sand, which were intentionally degraded by high-temperature treatment (the temperatures ranging 200°C to 1200°C).

The principle of the Impact-echo method is based on analysing an elastic-impulse-induced mechanical wave (Kořenská 2006, Krause 1997, Liang 2001). A short-time mechanical impulse, which is induced by a steel spherical body tapping the test specimen surface, gives rise to a low-frequency pressure wave. Thus generated wave propagates throughout the specimen structure being rebounded by defects located in the specimen bulk or in the surface. The time difference between the emitted wave and the rebounded one is captured by a sensor, which shows the signal waveform. This signal describes transient local vibrations, which are caused by the mechanical wave multiple reflection inside the structure. The dominant frequencies of these vibrations give an account of the condition of the structure, at which the waves are rebounded (Luňák, 2009, Luňák, 2010, Martinek, 2006, Mazal, 2011). As a rule, the signal is digitized by means of a data processing system to be transferred into a computer memory. The signal is further processed to give rise, for example, to a frequency spectrum. Peaks in this spectrum represent resonance frequencies in the curve and can be used for assessing the condition of the structure under investigation

## 2 The specimens

The test specimens of dimensions 40 x 40 x 160 mm were made from a cement mortar whose water-cement ratio was  $w/c = 0.46$ . The mortar preparation mixture contained CEM I 42,5R cement from Českomoravský cement, a.s., of Mokrý, and mortar preparation mixture test quartz sand from Filtrační písky, s.r.o., in a ratio of 1 to 3. In compliance with ČSN 721200 standard, 3 gradings of sand, namely, 0-1, 1-3, and 3-4 mm were used in all cases, to be blended in weight ratio 1:1:1.

Having been made from the cement mortar, all specimens were aged at a temperature of 22°C and a relative humidity of 55% for 24 hours. Subsequently, the specimens were placed in a water bath for 27 subsequent days. Thereafter, the specimens were dried at a temperature of 60°C for two days. Subsequently, the specimens under investigation were heated in a furnace to temperatures of 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C and 1200°C at a rate of 5°C/min and with a dwell of 60 minutes at the maximum temperature to find out the effect of high temperature on them. This having been done, the specimens cooled down spontaneously to the laboratory environment temperature.

## 3 Experiment

To generate the signal, a hammer of a mass of 12 g, originally suspended from a hanger, was released to fall down on the specimen from a height of 4 cm. The response was picked up by an S3 type piezoelectric sensor whose output voltage was fed into Yokogawa 1540-CL four-channel, digital, eight-bit oscilloscope [8-10]. Being processed and displayed by the oscilloscope, the signal was evaluated by means of AE-proc package. Subsequently, a special smoothing algorithm was used to determine 5 dominant frequencies for each of the output signals. Each measurement run consisted of 10 separate measurements, from which an average was calculated (Plskova, 2009, Plskova, 2010, Plskova, 2011).

## 4 Measurement results

Fig. 1 shows a record of the frequency spectrum measurement taken for a reference specimen (this specimen has not been subjected to any elevated-temperature load test). The sensor was placed at the centre of the specimen shorter side. The hammer tapped the specimen at the opposite side in the longitudinal centre line direction. The measurement run was labelled U0-S0. The measurement was repeated 10 times. The result average is shown in Fig. 1. Two dominant frequencies can be observed, namely,  $f_1 = 6080$  Hz and  $f_2 = 13860$  Hz. Taking into account the length of the armature, we get the wave propagation velocity to equal  $4340 \text{ ms}^{-1}$ .

Fig 2 shows a record of the signal time behaviour as picked up by the reference specimen sensor prior to the thermal degradation start. The response signal duration is  $t_{20} = 26$  ms. The value of the damping coefficient,  $\lambda$ , in the exponential function  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$  was determined from the curve shape. When calculating the damping coefficient, variations in the envelopes obtained from maximum deviation squares of the reference signal were used. The damping coefficient is  $\lambda_0 = 540 \text{ s}^{-1}$  for the reference specimen.



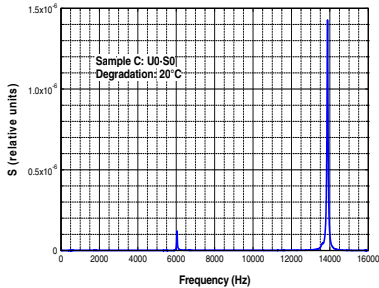


Fig. 1 Frequency spectrum for the sensor placed at the end of the joist and the hammer blow at the opposite end in the longitudinal centre line direction. The specimen was not stressed by elevated temperature. Reference specimen. Temperature, 20°C.

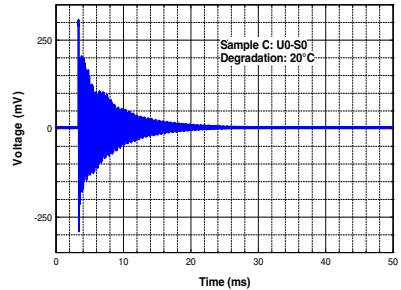


Fig. 2 Recorded signal time response for the specimen, which has not been stressed by elevated temperature. Temperature, 20°C.

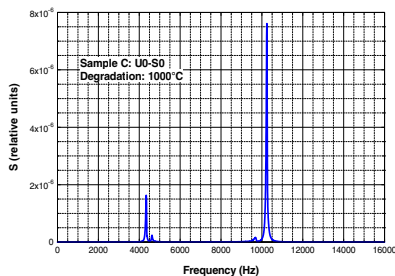


Fig. 3 Frequency spectrum for the sensor placed at the end of the joist and the hammer blow at the opposite end in the longitudinal centre line direction. The specimen was stressed by an elevated temperature of 1000°C.

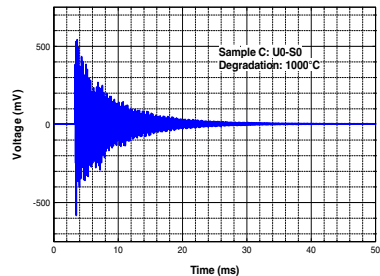


Fig. 4 Recorded signal time response for the specimen, which has been stressed by an elevated temperature of 1000°C.

Fig. 3 shows a frequency spectrum record for the specimen which underwent thermal stressing at a temperature of 1000°C. It is seen that the predominant frequencies shifted down towards the lower frequency region, namely, to  $f_1=4480$  Hz and  $f_2=9890$  Hz. It means that  $f_1$  went down by 26%, whereas  $f_2$ , by 29%. After the 1000 °C - induced thermal stress, the damping coefficient equalled  $\lambda_{1000}=557 \text{ s}^{-1} \text{ t}$  (Fig. 4) and the signal duration was  $t_{1000}=24 \text{ ms}$ .

Fig. 5 shows a frequency spectrum record for the specimen which underwent a thermal stress by a temperature of 1200°C. It is seen that the predominant frequencies shifted upwards towards the higher frequency region, namely, to

$f_1=6110$  Hz and  $f_2= 13920$  Hz. It is evident that a structural change, accompanied with the creation of new crystal phases, takes place in the specimen at temperatures of about  $1200^{\circ}\text{C}$ . After the  $1200^{\circ}\text{C}$  - induced thermal stress, the damping coefficient equalled  $\lambda_{1200}=554$   $\text{s}^{-1}$  (Fig. 4) and the signal duration was  $t_{1200}=23$  ms.

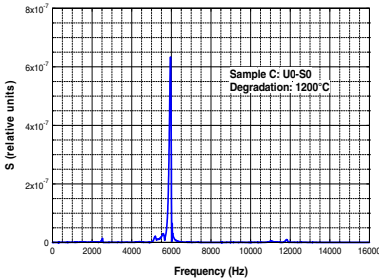


Fig. 5 Frequency spectrum for the sensor placed at the end of the joist and the hammer blow at the opposite end in the longitudinal centre line direction. The specimen was stressed by an elevated temperature of  $1200^{\circ}\text{C}$ .

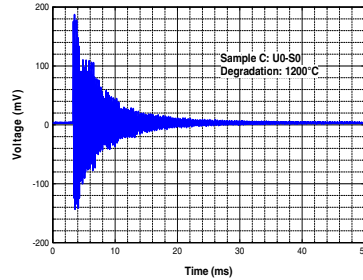


Fig. 6 Recorded signal time response for the specimen, which has been stressed by an elevated temperature of  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Fig. 7 illustrates the change in predominant frequencies  $f_1, f_2$ , it is seen from Fig.1, 3, 5, versus the specimen stressing temperatures. Both predominant frequencies are shifting towards to the lower frequency range in the course of the degradation, namely, for  $f_1$  from 6080 Hz to 4480 Hz when the temperature changes from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $1000^{\circ}\text{C}$ . At the same temperature difference is changing the predominant frequency  $f_2$  of the value of 13860 Hz to 9890 Hz. The decrease is rather slow at temperatures up to  $600^{\circ}\text{C}$ , to speed up above this temperature. This is due to the phase transformation of quartz at  $573^{\circ}\text{C}$ . The predominant frequencies are growing up at temperatures above  $1000^{\circ}\text{C}$ . This is due to the specimen structural changes, because new crystalline phases are arising.

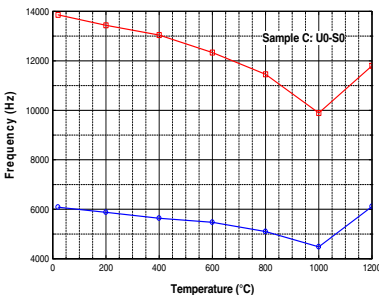


Fig. 7 Specimen degradation induced predominant frequency shift caused by elevated temperature.

The red curve shows the trend of frequency  $f_2$ , the blue curve shows the trend of frequency  $f_1$ .

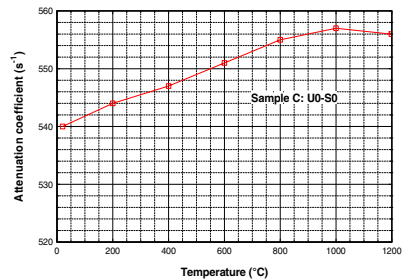


Fig. 8 Specimen degradation induced damping coefficient change caused by elevated temperature.

Fig. 8 shows the damping coefficient  $\lambda$  versus the stressing temperature plot. Its value increases from  $\lambda_{20} = 540 \text{ s}^{-1}$  at  $20^\circ\text{C}$  up to  $\lambda_{1000} = 5557 \text{ s}^{-1}$  at  $1000^\circ\text{C}$ . At temperatures over  $1000^\circ\text{C}$ , it drops to  $\lambda_{1200} = 554 \text{ s}^{-1}$  at  $1200^\circ\text{C}$ .

Figs. 9 and 10 show similar plots as Figs. 7 and 8, but the sensor is placed in the middle of the specimen face, perpendicularly to it (in S1 position). The results are similar to those of the preceding measurements. It follows that there a predominant wave mode propagating through the specimen, namely, the progressive wave mode.

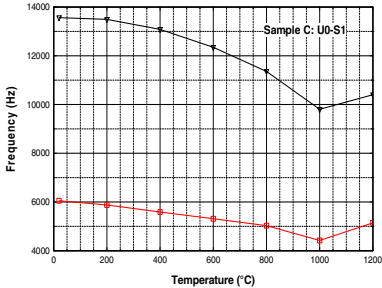


Fig. 9 Specimen degradation induced predominant frequency shift caused by elevated temperature. The hammer hit the specimen in the longitudinal centre line direction, perpendicularly to the signal propagation direction. The upper curve shows the trend of frequency  $f_2$ , the bottom curve shows the trend of frequency  $f_1$ .

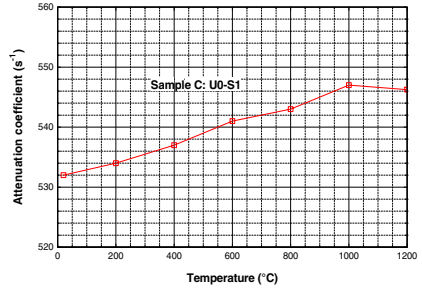


Fig. 10 Specimen degradation induced damping coefficient change caused by elevated temperature. The hammer hit the specimen in the longitudinal centre line direction, the sensor was placed in the middle of the specimen face, perpendicularly to the signal propagation direction.

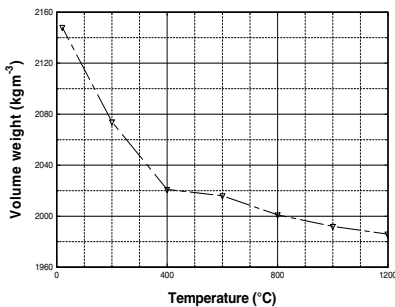


Fig. 11 Baking-induced bulk density change

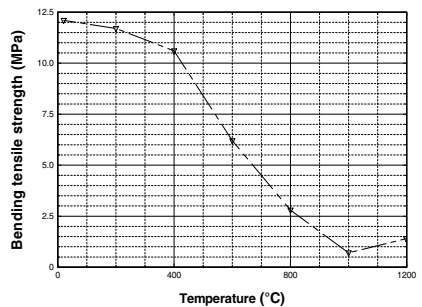


Fig. 12 Baking-induced flexural bending strength change.

It follows from Fig. 11 that the bulk densities of the specimens under investigation are decreasing in the course of baking. During the baking process, the specimens are dehydrated and some filler components are decomposed. Water steam and/or carbon dioxide are released at the same time. The largest drop in bulk density takes place at the beginning of the heating-up process. No appreciable changes in the bulk density took place at higher temperatures.

Fig. 12 illustrates the change in the flexural bending strength. First, a slight decrease from 12.1 MPa to 10.6 MPa is observed at 400°C. Subsequently, a more pronounced drop is observed, which is connected with the dehydration and CSH gel decomposition and also a phase transformation of  $\beta$ -quartz to  $\alpha$ -quartz at 573°C. The CSH gel decomposition gives rise to a pressure deformation of the binder and, consequently, to an increase in porosity. Maximum strength is attained at a temperature of 1000°C. The flexural bending strength increases slightly at temperatures above 1000°C, which is due to formation of new crystalline phases.

## 5 Conclusion

The paper deals with analyzing the feasibility of composite material testing by means of Impact-echo acoustic method. The specimens were made of cement composites, which in turn were prepared from a mixture of cement mortar and quartz sand. The specimens were intentionally degraded by application of elevated temperatures of 200°C to 1200°C. A shift of the predominant frequencies and a change in the damping coefficient were observed to occur during the degradation process.

Thus obtained results were compared with the changes in the bulk density and flexural bending strength of these specimens. Using a confocal microscope, we were able to track the progress of the structure changes in the course of elevated temperature induced degradation.

A strong correlation, which was disclosed between thus obtained results shows that the frequency inspection carried out by means of the Impact-echo method makes a convenient tool to assess the quality and life of these composite materials when exposed to elevated temperature.

## Acknowledgements

This research is supported by Czech Science Foundation – project SV RC project: FAST - S -11-6.

## References

- [1] Korenska M., Chobola Z., Sokolar R., Mikulkova P. and Martinek J., 2006. Frequency inspection as an assessment tool for the frost resistance of fired roof tiles, *Ceramics-Silikaty*, 50(3), 185–192.
- [2] Krause M., Barmann M., Frielinghaus R. and et al., 1997. Comparison of pulse-echo methods for testing concrete, *NDT & E International*, 30(4), 195–204.
- [3] Liang M.T. and Su P.J., 2001. Detection of Corrosion Damage of Rebar in Concrete Using Impact-Echo Method, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1427–1436.
- [4] Lunak M. and Kusak I., 2009. Electric and Temperature Properties of Concrete Setting Measurement Set, *Proc. of the Defektoskopie 2009 - NDE for Safety*. Praha, BETIS, 269–274.
- [5] Lunak M., Kusak I., Pazdera L., Topolar L. and Bilek V., 2010. Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties, Proc. of the 48th International Scientific Conference Experimental Stress Analysis 2010, Olomouc, Palacky University, 233–240.
- [6] 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, 121–124.
- [7] Mazal P., Pazdera L. and Dvořáček J., 2011. Application of acoustic emission method in contact damage identification, *International Journal of Materials and Product Technology*, 41(1), 140–152.
- [8] Pazdera L., Topolář L., Bilek V., Smutný J., Kusak I. and Luňák M., 2010. Measuring of Concrete Properties during Hardening, *Proc. of the 48th International Scientific Conference Experimental Stress Analysis 2010*, Olomouc, Palacky University, 311 - 318.
- [9] Pazdera L., Smutny J., Topolar L., Korenska M. and Bilek V., 2010. Non Destructive Testing during Concrete Hardening, *NDT Welding Bulletin (special issue)*, 18–21.
- [10] Pliskova I., Chobola Z., Matysik M. and Martinek J., 2008. Detection of the Response Parameter Change Prior To and After Realization of the Frost-thawing Test on Ceramic Tiles, *Proc. of the 28th European Conference on Acoustic Emission Testing*, Cracow, EWGAE and Cracow University of Technology, 322–327.
- [11] Pliskova I., Matysik M. and Chobola Z., 2009. Evaluation of ceramic tiles frost resistance using Impact Echo Method, *Proc. of the 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing*, Ljubljana, Slovenian Society for NDT, 333–340.

- [12] Plskova I., Matysik M. and Chobola Z., 2010. Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors, Transactions on transport sciences, 3(1), 23-28.
- [13] Plskova I., Chobola Z. and Matysik M., 2011. Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method, Ceramics-Silikáty 55(2), 176-182.



## SLEDOVÁNÍ VLIVU ZHORŠENÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK PŮSOBÍCÍCH NA APIS MELLIFERA ZAZNAMENÁVANOU AKUSTICKOU EMISÍ

### OBSERVING THE IMPACT OF THE DETERIORATED CLIMATIC CONDITIONS ON APIS MELLIFERA BY THE MONITORED ACOUSTIC EMISSION

Jaromír TLAČBABA, Michal ČERNÝ, Petr DOSTÁL

Ustav techniky a automobilové dopravy; Ústav zoologie, rybářství, hydrobiologie a včelařství  
Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika  
e-mail: jaromir.tlacbaba@mendelu.cz

#### **Abstrakt**

*Předmětem výzkumu je vývoj a aplikace akustické emise v živočišné říši. Metodika je zaměřena na Apis Mellifera (včelu medonosnou), která představuje pro společnost významnou důležitost. Včela medonosná se podílí na produkci rostlinné a živočišné výroby. Monitorování vybraného vzorku, kterým byla zmenšená verze klasického úlu, který zastupuje reprezentativní vzorek včelstev umístěných na stanovišti. Při experimentu byly pozorovány intenzivnější klimatické podmínky, které se vychylovaly od normálního stavu. Jedná se krupobití a povětrnostní podmínky, kterým byla vystavena včelstva. Metoda akustické emise snímá rozrušení včelstva v bezprostřední blízkosti. Snimače jsou umístěny v prostoru kolonie, které snímají intenzitu rozrušení, až po uklidnění celého včelstva. Jedinci předávají impulsy, které se šíří prostředím a tyto vzruchy zaznamenává akustické emise. Stanovená metodika umožňuje kontrolovat stav včelstva při změně klimatických podmínek a následnou reakci celého včelstva na nastalou situaci. Predikace působení rušivého elementu v blízkosti umístěného úlku. Klimatické podmínky mají vliv na dynamiku včelstva při následném rozvoji. Metodou akustické emise jsou zaznamenávány dopady těchto vlivů na kolonii.*

**Klíčová slova:** akustická emise, včelstvo, monitorování, klimatické podmínky

#### **Abstract**

*The subject of research is the development and application of acoustic emission in the animal kingdom. The method focuses on Apis mellifera (honeybees), which represents a significant importance for the society. A honey bee is involved in the production of crop and livestock production. Monitoring of the sample, which was scaled down version of the classic beehive, representing a representative sample of hives located on site. Experiment was observed intense climatic conditions that different from normal. It is hail and weather conditions, which was exposed colonies. The method of acoustic emission scans upset colonies in the immediate vicinity. The sensors are located in the colony, which sense the intensity of excitement, to appeasement the entire colony. Individuals transmit impulses that spread environment, and these impulses recorded acoustic emissions. The established methodology to check the status hives when weather conditions change and the subsequent reaction of the colonies on the situation. Prediction of effect of disturbing element located near the hive. Climatic conditions influence the dynamics of the colonies during subsequent development. The method of acoustic emissions is recorded impact of these effects on the colony.*

**Key words:** acoustic emission, colony, monitoring, climatic conditions

## 1. Úvod

Využití nedestruktivní zkušební metody - akustické emise (AE) slouží nejen na testování neživého materiálu, kde tato velmi citlivá verifikace slouží např. při zjišťování deformací, iniciaci mikrotrhlin nebo lokalizaci defektu či korozního napadení ve fázi před vznikem děje samotného. V současné době bylo rozšířeno i o aplikaci v biologické oblasti (např. termity, kůrovci, larvy tesařka krovového apod.). Byla použita pro pochopení činnosti, samotné podstaty, vnějších i vnitřních projevů vybraných biologických druhů. To byl podnět i pro počátek uplatnění AE u biologického druhu rod včela (*Apis mellifera*), který představuje samostatnou skupinu. Cílem experimentu bylo stanovení míry stresu a reakce na zhoršení přírodních podmínek, které probíhaly na stanovišti s uloženými včelstvy. Ucelený a komplexní náhled na včelstva, které se vyrovnávají na ojedinelé přírodní podmínky, kterými jsou vystaveny a následné zhodnocení a zmapování průběhu reakcí kolonie.

Metoda AE detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s cílem „odposlechu“ akustické aktivity, která je emitována procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoj porušení, svírání a rozevírání trhlin, únik média přes průchozí trhlinu) apod.. Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení defektů právě a pouze v jejich průběhu a lze ji označit jako pasivní. (Kopecký, 2008)

Metoda akustické emise (AE) patří k technikám nedestruktivního zkoušení. Na rozdíl od jiných nedestruktivních technik je pasivní kontrolní metodou, která může prověřovat celou objemovou strukturu konstrukce. Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objekt, odhalení vnitřních změn před událostí samotnou a úsporu času v porovnání s postupným testováním jinými metodami. Metoda akustické emise detekuje pouze aktivní poruchy. K emisi akustických impulzů dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie vlivem výskytu vnitřního nebo vnějšího napětí (Kreidl a Šmíd, 2006) (Pazdera a kol, 2004)

Včelí úl či různé odnože včelích příbytků jsou uměle vytvořené člověkem, pro chov jednoho včelstva. Ideální konstrukce obydlí úlu je velmi obtížná. Je nutné hledat kompromis mezi snadnou obsluhou při chovatelských zásazích včelaře a životními potřebami včel, které vyplňují prostor úlu. Komplikovanost takového zadání dokumentuje rozmanité množství typů úlů, které se v české a světové včelařské komunitě nachází.

Celý plemenáč se skládá z částí, jako jsou:

- *Víko* – vyžaduje dostatečnou tepelnou izolaci
- *Nízký nástavek* – o rozměrech 37x15, který je zaveden na stanovišti experimentu. Do celého prostoru nástavku je možné maximálně vložit 5 rámků.
- *Úlové dno* – má nízký podmet, tzn., že výška *úlového dna* resp. volný prostor mezi dnem a spodními okraji rámků činí 3 cm i méně.
- na čelní spodní hraně dna je znatelný přesah plochy vně hranice půdorysu úlu. Plocha nese označení *leták*. Uspodňuje včelám „start“ i „přistání“. Přes celou šířku letáku resp. čelní stěny dna je štěrbina. Nazývá se *česno*; pro včely „hlavní vchod“ do úlu.
- podle polohy rámků vzhledem k česnu rozlišujeme uložení podélné *na studenou stavbu* a příčné *na teplou stavbu*. V experimentu se rámkové konstrukce nacházely na studenou stavbu.



## 2. Materiál a metody

Pro pilotní měření, byla vybrána zmenšená verze klasického úlu, který se využívá ve včelařství (označení Q05/13). Úl obsahuje pět snímků s rozměry 37 cm x 15. Dvě identické senzory (určený Slot01 a Slot02, vyrábí DAKEL společnosti) byly umístěny v úlu: Slot01 a Slot02. Toto schéma pojmenování odpovídá jednotlivých kanálů (slotů) na analyzátoru DAKEL XEDO.



*Obr. 1 Řada malých úlů použitých v experimentu. Foto autorů.  
Fig. 1 Row of small hives used in the experiment. Photo by authors.*

Snímač Slot01 byl umístěn na plechu o rozměrech 30 x 100 mm. Čidlo bylo spojeno s 35dB předzesilovačem. Na kontaktní plochu byla nanesena akustická pro lepší akustické vazby. Samotný snímač byl upevněn pomocí fixační gummy a celá deska byla zavěšena do úlu mezi rámy. Pro vhodnější přenos signálu mezi kolonií a snímačem, byl odstraněn jeden rámeček. Toto propojení médium se skládá převážně z včelího vosku, který byl vybrán z hygienických důvodů. (TLAČBABA A KOL., 2013)



*Obr. 2 Snímače Slot01-02 umístěné na desce uvnitř úlu. Foto autorů.  
Fig. 2 Slot01-02 sensors on the sheet metal plate in the hive interior. Photo by authors.*

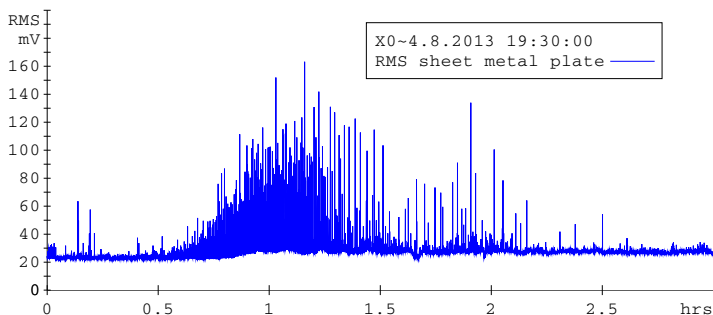
Signály z obou čidel jsou následně zpracovávány v systému DAKEL XEDO AE analyzátoru. Ethernet připojený k notebooku s DAKEL softwarem, byl použit pro kontinuální sledování a ukládání dat AE. Údaje z monitorování AE byly vyhodnoceny pomocí DAKEL DaeShow software, který bude poskytovat vizuální reprezentaci dat.



*Obr. 3 Dakel XEDO AE analyzátor používán v experimentu. Foto autorů*  
*Fig. 3 Dakel XEDO AE analyzer used in the experiment. Photo by authors.*

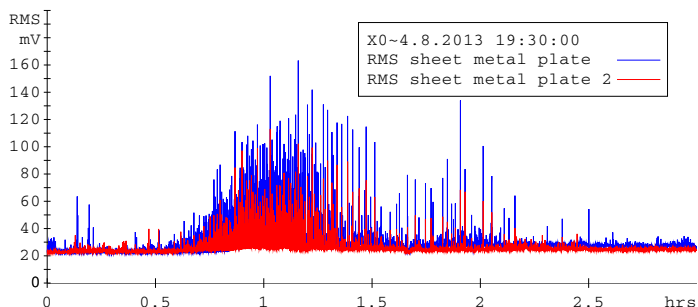
### 3. Výsledky

Experiment při zhoršených povětrnostních podmínkách probíhal v 4.8.2013 19:30:00 - 4.8.2013 22:30:00, kdy v této lokalitě docházelo k zesílení náporu větru. Celé stanoviště bylo zasaženo silným větrem, který se zaznamenal pomocí metody akustické emise. Metoda znázorňuje, jaké stresové situaci se nacházelo včelstvo při poryvu větru.



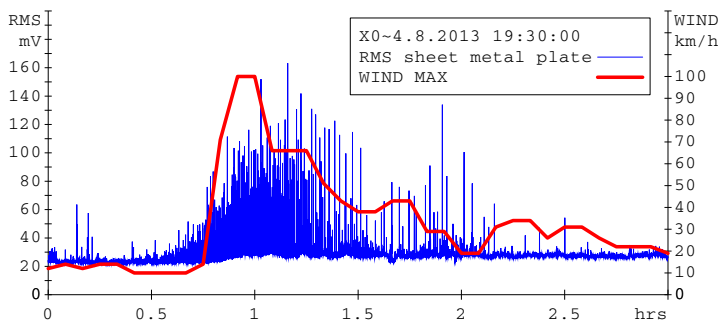
*Obr. 4 RMS kanál na ocelovém plechu*  
*Fig. 4 RMS channel sheet metal plate.*

Aktivita včelstva je zaznamenána pomocí RMS signálu, který zaznamenal vzruchy, které vyvolala letní bouře v kolonii včel. Sensor byl umístěn na plechovém plátu, který byl vložen k plodovému rámku. Poloha snímače byla mezi plodovými rámkami v přední části plodového seskupení v prostoru plemenáče. Tedy blíže k česnovému otvoru, který slouží pro vstup jednotlivých včel do prostředí úlku. Tento snímač byl nejvíce zasažen při poryvy větru v měřeném zorku.



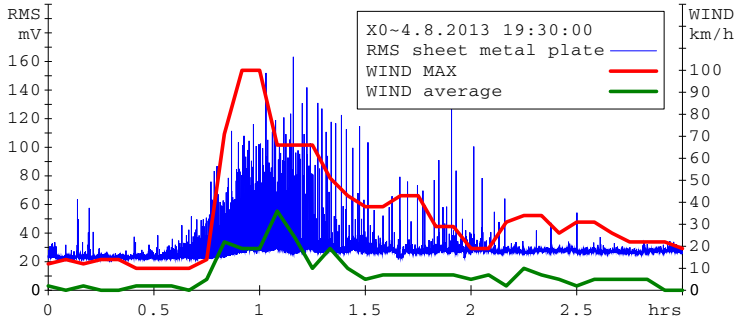
*Obr. 5 RMS obou kanálů*  
*Fig. 5 RMS for both channels.*

Záznam obou snímačů, které byly umístěny v plemenáči na vystaveném stanovišti. Modrá barva je snímač, který byl vložen blíže k česnovému otvoru a červená barva je snímač, který byl v zadní části plemenáče. Je zřejmé, že postižení při větru má vyšší aktivitu snímač modré barvy, který byl blíže epicentru bouře. Samozřejmě včely, které byly blíže k česnovému otvoru, tak byly více zasažené a musely více odolávat této stresové situaci, které byly vystaveny v době bouře. Klidnější část červené barvy RMS je následkem rozrušené celé kolonie, která odolávala přírodním podmínkám.



*Obr. 6 RMS a maximální vítr*  
*Fig. 6 RMS and wind max*

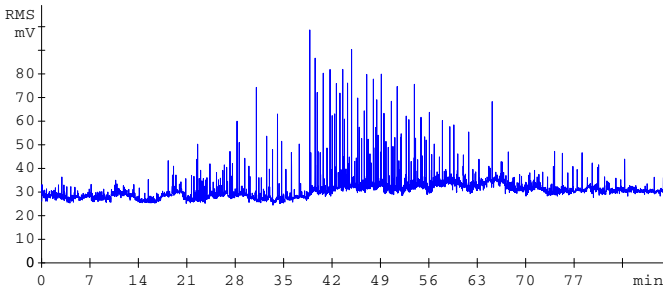
Nastalá situace, která zasáhla stanoviště, při větrné bouři. Znázorňuje RMS signál, který byl pořízen v plodovém tělese a následný záznam maximálního větru, který byl pořízen v den měření. Já názorné že, při zvýšení maximálního nárazu větru, tak dochází k druhotnému jevu a to je zvýšená RMS. Aktivita větru, která byla změřena v období experimentu, prokazuje syngii mezi nárazy větru do plemenáče a následným rozrušení celé kolonie.



*Obr. 7 RMS a průměrný vítr  
Fig. 7 RMS and wind average*

Znázornění RMS signálu s maximálním a průměrnými nárazy větru. Kdy ze záznamu je patrné, že i při matematickém vyjádření průměrných podmínek daného měřeného období je znatelná prokazatelnost s nárazy větru na stanovišti a rozrušení kolonie. Zprůměrovaná data v nárazech větru jsou obdobná jak při maximální větru v daném časovém období. Je patrná zvýšená aktivita RMS, které způsobilo rozrušená kolonie.

Zápis RMS při bouřce, která byla zaznamenána v Brně. Záznam zaregistrován v plemenáči, na ocelovém plátu, který byl umístěn v plodovém tělese. Záznam poukazuje aktivitu, která byla při krupobití v plemenáči. Samotné včelstvo na přírodní živel jednalo rozrušením, které zapsala akustická emise.



*Obr. 8 RMS při zasažení kroupami  
Fig. 8 RMS after contact with hail*

Znázorněná zvýšená aktivita RMS v době 10.6.2013 15:00:00 - 10.6.2013 16:00:00 při padání krup v oblasti stanoviště. Kroupy se vyskytují ve spojitosti s bouřkovými oblaky, kdy srážky před pádem na zem se pohybují nahoru a dolů uvnitř oblaku. Ledové částice z horní části se spojují a dostávají se do nižšího oblaku a dochází k přechlazení vodní kapky. Při pádu těchto ledových krup do exponovaného vzorku měřeného plemenáče, dochází ke zvýšení aktivity na ocelovém plátu, který je uvnitř plemenáče. Při těchto ojedinělých přírodních podmínkách dochází ke zvýšení míry stresu nad nastalou situaci, kterou včelstvo řeší silným rozrušením a hledání příčin, které způsobily neklid, který zasahuje do prostoru kolonie.

#### 4. Výsledky

Akustickými signály bylo zjištěno, že se používají pro komunikaci mezi včelami v řadě kontextů chování. Feromony slouží jako zdroj informací v mnoha případech (Free, 1987). Jeden z rozdílů mezi zvukem a vůní je rychlost: zákony difúze obecně omezit feromonovou komunikaci v jakékoliv fázi, tj. emise, přenos a vnímání, v časových rozlišených. Akustické signály mohou být vyráběny za velmi krátkou dobu, které se šíří rychle a můžou být vnímány a analyzovány s předstihem. Tato funkce umožňuje časové kódování informací v zvukových signálech, zatímco o chemických látkách je výhradně kódovány spektrálně o směs chemických sloučenin. Při využití akustické emise, která zaznamenávala aktuální rozrušení včelstva, které bylo způsobeno přírodními podmínkami v lokalitě experimentu. Záznam stavové situace v prostředí úlu, kdy porывy větru či nárazy vzduchové hmoty do úlu, způsobily celkové rozrušení, které se šířilo celým prostředím kolonie. Akustická emise znázornila míru stresu, které vyvolalo okolní prostředí na stanovišti. AE je indikátorem aktuálního rozrušení včelstva, které je způsobeno vlivy v těsné blízkosti kolonie. Záznamy dat, které jsou pořízeny z aparatury akustické emise, slouží pro predikaci biologických pochodů, které se uskutečňují v prostředí úlu.

#### 5. Souhrn

Živočišný druh je neschopný poskytnout subjektivní zprávu o tom, jak se cítí nebo jaký je jeho emocionální stav v dané situaci. Negativní elementy, které souvisí s procesem zpracování informací, které se získávají z reakcí, které jsou vyvolány přírodními klimatickými podmínkami. Včely, které byly zkoumány pomocí akustické emise, tak byly vystaveny nepříznivými podmínkám, které způsobovaly negativní stres, který se šířil celou kolonií. RMS zaznamenávala velikost negativního stresu, který se kumuloval v prostředí včelstva. Okolnosti, při kterých včelstvo reagovalo na kritické podmínky, které vyvolaly zvýšenou aktivitu, jsou simulací na útok predátora či odstranění rušivého elementu v prostředí stanoviště.

Poděkování:

Práce vznikla za podpory projektu č. TP 5/2013 "Aplikace nedestruktivních metod technické diagnostiky v oblasti zemědělské techniky" financovaného Interní Grantovou Agenturou Mendelovy univerzity v Brně; Fakulty Agronomické.

Práce probíhala za podpory Ústavu zoologie, rybářství, hydrobiologie a včelařství.

## 6. Literatura

- KOPEC, B. A kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. (Nauka o materiálu IV). 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika – 4. Díl*. BEN – technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P.: *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Vysoké učení technické v Brně, 2004, ISBN 80-214-2802-3.
- TLAČBABA, J., *Acta Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně*. Brno: Ediční středisko MZLU v Brně, 2013, s. 215-220. ISBN 1211-8516.
- BATESON, M., DESIRE, S., GARTSIDE, E., S., a WRIGHT, A., G., *Agitated Honeybees Exhibit Pessimistic Cognitive Biases*. Albany, NY: State University of New York Press, c2009. ISBN 10.1016/j.cub.2011.05.017.
- DAWKINS, Marian Stamp. *From an animal's point of view: Motivation, fitness, and animal welfare* [online]. USA: Cambridge University Press, [19 May 2011] [cit. 2013-09-23]. Behavioral and Brain Sciences, 13. DOI: 10.1017/S0140525X00077104. Dostupné z: <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=7223256>
- SHERWIN, C M. Can invertebrates suffer? Or, how robust is argument by analogy? [online]. Hertfordshire, 2001 [cit. 2013-09-23]. ISBN 0962-7286. Dostupné z: <http://www.ufaw.org.uk/animal.php>
- MENDL, M., O. H. P. BURMAN a E. S. PAUL. *An integrative and functional framework for the study of animal emotion and mood* [online]. Lincoln, UK: The Royal Society, 7.10 2010 [cit. 2013-09-23]. 277. DOI: 10.1098/rspb.2010.0303. Dostupné z: <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/277/1696/2895.short>
- ROLLS, Edmund T. *Emotion explained*. New York: Oxford University Press, c2005, xvii, 606 p. ISBN 978-019-8570-035.
- PLUTCHIK, Robert. *Emotion, a psychoevolutionary synthesis*. New York: Harper, c1980, xix, 440 p. ISBN 00-604-5235-8.
- PANKSEPP, Jaak. *Affective neuroscience: the foundations of human and animal emotions*. New York: Oxford University Press, 1998, xii, 466 p. ISBN 01-950-9673-8.
- FRIJDA, Nico H. *The laws of emotion*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, 2007, xiv, 352 p. ISBN 08-058-2598-3.
- MENDL, Michael, Oliver H.P. BURMAN, Richard M.A. PARKER a Elizabeth S. PAUL. *Cognitive bias as an indicator of animal emotion and welfare: Emerging evidence and underlying mechanisms* [online]. Langford, UK, 2009 [cit. 2013-09-23]. DOI: 10.1016/j.applanim.2009.02.023. Dostupné z: <http://www.journals.elsevierhealth.com/periodicals/applan/article/PIIS0168159112001712/abstract>

PAUL, Elizabeth S., Innes CUTHILL, Go KUROSO, Vicki NORTON, Joe WOODGATE a Michael MENDEL. Mood and the speed of decisions about anticipated resources and hazards. *Evolution and Human Behavior* [online]. 2011, vol. 32, issue 1, s. 21-28 [cit. 2013-09-24].

DOI: 10.1016/j.evolhumbehav.2010.07.005. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1090513810000760>

BRYDGES, Nichola M., Matthew LEACH, Katie NICOL, Rebecca WRIGHT a Melissa BATESON. Environmental enrichment induces optimistic cognitive bias in rats. *Animal Behaviour* [online]. 2011, vol. 81, issue 1, s. 169-175 [cit. 2013-09-24].

DOI: 10.1016/j.anbehav.2010.09.030. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003347210003994>

HARDING, E.J., E.S. PAUL a M. MENDEL. The anatomy of dependence. *Animal behaviour: Cognitive bias and affective state* [online]. Překlad John Bester. 2004, roč. 427, č. 6972 [cit. 2013-09-24]. DOI: doi:10.1038/427312a. Dostupné z:

<http://www.nature.com/nature/journal/v427/n6972/abs/427312a.html>

BATESON, M. a S.M. MATHESON. Animal welfare: Performance on a categorisation task suggests that removal of environmental enrichment induces 'pessimism' in captive European starlings (*Sturnus vulgaris*) [online]. Newcastle, UK, 2007 [cit. 2013-09-24]. ISBN 0962-7286.

Dostupné z: [http://www.staff.ncl.ac.uk/melissa.bateson/Bateson\\_Matheson\\_2007.pdf](http://www.staff.ncl.ac.uk/melissa.bateson/Bateson_Matheson_2007.pdf)

BRILOT, Ben O., Lucy ASHER a Melissa BATESON. Stereotyping starlings are more 'pessimistic'. *Animal Cognition* [online]. 2010, vol. 13, issue 5, s. 721-731 [cit. 2013-09-24].

DOI: 10.1007/s10071-010-0323-z. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10071-010-0323-z>

SALMETO, Amy L., Kristen A. HYMEL, Erika C. CARPENTER, Ben O. BRILOT, Melissa BATESON a Kenneth J. SUFKA. Cognitive bias in the chick anxiety-depression model. *Brain Research* [online]. 2011, vol. 1373, č. 1, s. 124-130 [cit. 2013-09-24].

DOI: 10.1016/j.brainres.2010.12.007. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006899310026193>

## **ADDRESS**

Ing. Jaromír Tlačbaba, doc. Ing. Michal Černý, CSc., Ing. et Ing. Petr Dostál Ph.D., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: jaromir.tlacbaba@mendelu.cz, michal.cerny@mendelu.cz, petr.dostal@mendelu.cz





# PREDIKCE INICIACE LOMU JEMNOZRNNÝCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ S PŘÍMĚSEMI POMOCÍ MĚŘENÍ AKUSTICKÉ EMISE

## PREDICTION OF STABLE CRACK INITIATION IN FINE-GRAIN CEMENT-BASED COMPOSITES WITH ADDITIVES BY ACOUSTIC EMISSION MEASURING

Libor TOPOLÁŘ\*, Vlastimil BÍLEK\*\*, Hana ŠIMONOVÁ\*\*\*,  
Barbara KUCHARCZYKOVÁ\*\*\*\*, Ivana HAVLÍKOVÁ\*\*\*, Luboš PAZDERA\*,  
Zbyněk KERŠNER\*\*\*

Vysoké učení technické v Brně, \*FAST, Ústav fyziky, \*\*FCH, Ústav chemie materiálů,

\*\*\*FAST, Ústav stavební mechaniky, \*\*\*\*FAST, Ústav stavebního zkušebnictví

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

### Abstrakt

Náhrada části cementu alternativním pojivem patří k aktuálním tématům materiálového inženýrství. Za účelem zkoumání vlivu náhrady 20 % hmotnosti portlandského cementu u jemnozrnného kompozitu vybranou příměsí na hodnoty řady parametrů byla z těchto kvazikřehkých materiálů vyrobena sada zkušebních těles. Příměsí představovaly vysokoteplotní popílek, metakaolin a jejich kombinace.

Zkušební tělesa byla namáhána tříbodovým ohybem, přičemž se během tohoto zatěžování prováděla měření akustické emise a byly zaznamenávány závislosti zatížení vs. otevření ústí trhliny (F-CMOD diagramy), které dále posloužily k vyhodnocení experimentů s využitím lomového modelu „dvoji-K“.

Výstupy lomového modelu „dvoji-K“ a měření akustické emise byly v tomto příspěvku využity při predikci iniciace lomu zkoumaných jemnozrnných cementových kompozitů s příměsemi. Speciálně byla vyšetřována oblast F-CMOD diagramů se zatížením na počátku stabilního šíření trhliny, kterému odpovídal vznik prvotních relevantních událostí zachycených měřením akustické emise.

**Klíčová slova:** jemnozrnný cementový kompozit, vysokoteplotní popílek, metakaolin, lomový test, akustická emise

### Abstract

Partial replacement of cement by alternative additives is a current topic in material engineering. In order to examine the effect of replacement of 20 % weight of portland cement in fine-grain composite using selected additive on values of the parameters, a set of specimens from these quasi-brittle materials was produced. Fly ash, metakaolin and combination of the two served as additives.

Three-point bending tests of these specimens were conducted and acoustic emission was measured during this testing. Load versus crack mouth opening displacement (F-CMOD) diagrams we also recorded, and these were used to evaluate the tests using the “double-K” fracture model.

In this paper, the outputs of the “double-K” fracture model and acoustic emission measuring were used for stable crack initiation prediction in fine-grain cement-based composites with additives. In particular, the part of F-CMOD diagrams with load level in the beginning of stable crack propagation which correspond to the beginning of pilot relevant events measured using acoustic emission, was assessed.

**Key words:** fine-grain cement-based composite, fly ash, metakaolin, fracture test, acoustic emission

## 1. Úvod

Částečná náhrada portlandského cementu vhodnými minerálními příměsemi patří k aktuálním tématům materiálového inženýrství. Důvody ekonomického a ekologického rázu doplňují snahy ovlivnit mechanické vlastnosti a trvanlivost takto modifikovaných kompozitů, u které lze předpokládat podstatnou souvislost s množstvím mikrotrhlin vzniklých například v důsledku alkalicko-křemičité reakce. Často studované příměsi představují vysokoteplotní popílek a metakaolin, který podle [1] může nalézt své uplatnění jako alternativa ke křemičitým úletům. Efektivita účinků uvedených příměsí na vlastnosti kompozitů na bázi portlandského cementu souvisí jak s čistě fyzikálními vlastnostmi příměsí, mezi které patří například velikost částic, tak s vlastnostmi fyzikálně chemickými, zejména pak s jejich pucolánovou aktivitou [2, 3]. V předkládaném příspěvku je pozornost zaměřena především na kvantifikaci iniciace stabilního šíření lomu zkušebními tělesy z jemnozrnných cementových kompozitů s výše zmíněnými příměsemi, přičemž se vedle vyhodnocení lomových testů využilo měření akustické emise.

## 2. Použité materiály

Výchozím pojivem kompozitů byl portlandský cement CEM I 42,5 R (sc) z cementárny Mokrá. 20 % hmotnosti cementu bylo nahrazováno dvěma minerálními příměsemi: vysokoteplotním popílkem (VP) Pruněrov splňujícím ČSN EN 450-1 a metakaolinem (MK) IMETA; použita byla také jejich kombinace (VPMK). Obsah příměsí ve směsích a jejich označení udává Tab. 1, přičemž R označuje referenční cementový kompozit.

označení směsi	R	VP20	MK20	VPMK20
CEM 42,5 R (sc)	100	80	80	80
popílek Pruněrov I	–	20	–	10
metakaolin IMETA	–	–	20	10

*Tab. 1 Procentuální vyjádření obsahu cementu a příměsí ve směsích*

*Tab. 1 Percentage content of cement and additives in mixtures*

Dále byly při přípravě uvedených směsí použity dva typy písků, a to písek přírodní těžební na jihovýchodní Moravě a odpadní písek po výrobě vodního skla ve společnosti Vodní sklo a.s. Odpadní písek byl v některých případech v rámci širšího studia jeho případného uplatnění ve stavebnictví záměrně přidáván k písku přírodnímu. Vzhledem k tomu, že odpadní písek obsahuje vodní sklo (7,5 % Na<sub>2</sub>O), docházelo tím k nárůstu obsahu alkálií v daných záměsích. Odpadním pískem bylo nahrazováno 20 % hmotnosti písku přírodního. Rozsah náhrady cementu příměsemi byl u směsí s odpadním pískem stejný jako u směsí uvedených v Tab. 1, pro rozlišení je označení směsi obsahující odpadní písek doplněno čárkou nahoře (R', VP20', MK20', VPMK20').

Lomovým experimentům popsaným v následující kapitole předcházelo testování vzorků na alkalicko-křemičitou reakci podle ASTM C 1260, resp. ASTM C 1567. Vzorky byly 24 hodin po namíchání uloženy ve vodě o teplotě 80 °C, po uplynutí dalších 24 hodin pak po dobu 14 dní v 1 M roztoku NaOH. Po těchto 14 dnech bylo jejich relativní prodloužení následující: R ... 0,192 %; VP20 ... 0,118 %; S20 ... 0,063 %; VPS20 ... 0,098 %, R' ... 0,251 %; VP20' ... 0,229 %; S20' ... 0,152 % a VPS20' ... 0,186 %.

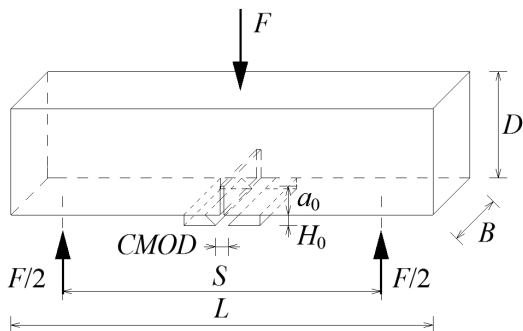
### 3. Lomové experimenty

Kvantifikace lomově-mechanických parametrů (lomová houževnatost, lomová energie, tahová pevnost atd.) se provádí pomocí testů zkušebních těles s koncentrátorem napětí (typicky třibodový ohyb nebo štípací test). Následně jsou získané výsledky těchto experimentů v podobě diagramů zatížení vs. otevření ústí trhliny ( $F$ - $CMOD$  diagramy) vyhodnoceny přímými nebo nepřímými metodami s využitím jednoho z mnoha lomových modelů.

V rámci experimentů vyhodnocovaných v tomto příspěvku byly prováděny zkoušky v třibodovém ohybu, a to na tělesech ve tvaru trámce s centrálním zářezem. Nominální rozměry těles byly 25 mm  $\times$  25 mm  $\times$  190 mm, rozpětí činilo 150 mm. Počáteční zářezy byly před samotným testováním vytvořeny pilou s diamantovým kotoučem. Hloubka tohoto zářezu byla přibližně 9 mm. Experimenty byly prováděny na mechanickém lise Heckert FPZ 10/1 při rozsahu 400 N v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně.

Geometrii zkušebního tělesa namáhaného třibodovým ohybem ukazuje schéma na Obr. 1, kde  $D$  značí výšku,  $B$  šířku a  $L$  délku tělesa,  $S$  pak rozpětí podpor;  $a_0$  je hloubka počátečního zářezu,  $CMOD$  pak označuje otevření ústí trhliny (zářezu) při zatížení  $F$ ,  $H_0$  je tloušťka břitů držáku svorky extenzometru (pro všechna tělesa  $H_0 = 2,7$  mm).

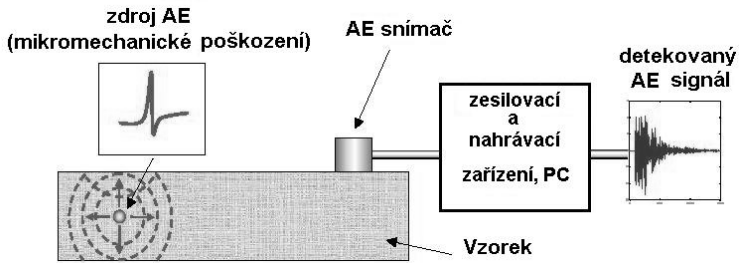
Během lomových zkoušek byly zaznamenávány  $F$ - $CMOD$  diagramy, z nichž byla dále odečtena vstupní data pro níže specifikovaný model „dvojitá- $K$ “, který byl v tomto příspěvku využit k určení hodnot lomově-mechanických parametrů zkoušených kompozitů.



Obr. 1 Schéma zkoušky třibodovým ohybem trámce se zářezem  
Fig. 1 Scheme of the three-point bending test of notched beam

### 4. Měření akustickou emisí

Metoda akustické emise (AE) patří k technikám nedestruktivního zkoušení, i když v tomto příspěvku je použita současně s destruktivním zkoušením. Na rozdíl od jiných technik představuje metoda AE pasivní kontrolní metodou, která může prověřovat celou objemovou strukturu konstrukce, konstrukčního prvku či – jako v tomto případě – zkušebního tělesa. Výhodou AE oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času v porovnání s postupným testováním jinými metodami. Metoda AE však detekuje pouze aktivní poruchy. K AE dochází ve zdroji této emise při uvolnění energie vlivem stimulace vnitřním nebo vnějším napětím viz Obr. 2 [4, 5].



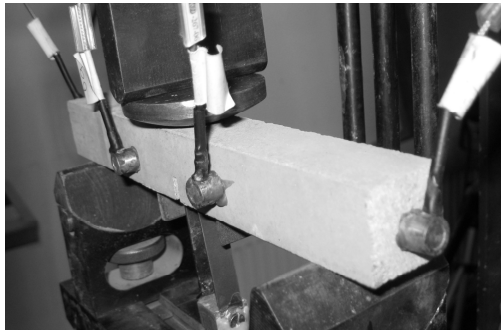
Obr. 2 Vznik a šíření vlny při události akustické emise [4]

Fig. 2 Initiation and propagation of waves in acoustic emission events [4]

Metoda AE detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s cílem „odposlechu“ akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoj porušení, svírání a rozevírání trhlin) apod. Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení a defektů právě a pouze v jejich průběhu [6].

Událost AE je emitována nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impuls šířící se materiálem jako elastická podélná nebo příčná vlna. Jakmile vlna dopadne na povrch materiálu, částečně se odrazí a částečně dochází k její transformaci na jeden nebo více módů. U deskových struktur se vlna šíří převážně Rayleighovou, tj. povrchovou vlnou. Kromě povrchové vlny dochází také k transformaci např. na Lambovy, tj. deskové vlny. Každá z těchto vln se šíří různou rychlostí. Kmitání detekované na snímači akustické emise je převedeno na elektrický signál a označuje se jako signál akustické emise [4]. Ke každé emisní události lze přiřadit čísla (parametry), která ji popisují. Základním způsobem popisu je počet emisních událostí v závislosti na čase [5, 7]: Tzv. počet překmitů (counts) určuje počet překmitů signálu AE, které překročí nastavenou prahovou hodnotu v daném časovém intervalu. Tento parametr je jednoduchým měřítkem určení velikosti signálu, od silnějších událostí se získá větší počet událostí AE.

Měření AE bylo provedeno na zařízení DAKEL XEDO se čtyřmi kanály. Vybranou realizaci lomové zkoušky ukazuje Obr. 3.



Obr. 3 Zkouška tříbodovým ohybem trávce se zářezem s umístěním snímačů akustické emise

Fig. 3 Test of three-point bending notched beam with the location of acoustic emission sensors

## 5. Lomový model „dvojí- $K$ “

V tomto příspěvku použitý lomový model „dvojí- $K$ “ v principu vychází z konceptu působení kohezivních sil na lících efektivní trhliny kombinovaného s kritériem rozvoje trhliny založeným na faktoru intenzity napětí (podrobnosti o modelu lze nalézt v řadě publikací – od pilotních článků [8, 9, 10, 11] až např. po shrnující knihu [12]). Předností modelu je popis různých úrovní šíření trhliny: tj. iniciační, která odpovídá počátku stabilního šíření trhliny (při dosažení úrovně faktoru intenzity napětí rovné  $K_{Ic}^{ini}$ ) a kritickou, která koresponduje s počátkem nestabilního šíření trhliny (při dosažení lomové houževnatosti  $K_{Ic}^{um}$ ).

Jak už bylo výše zmíněno, naměřené  $F$ - $CMOD$  diagramy byly dále použity ke stanovení lomových parametrů pomocí modelu „dvojí- $K$ “. V tomto případě byla jako první numericky stanovena hodnota lomové houževnatosti  $K_{Ic}^{um}$ , následně pak kohezivní složka lomové houževnatosti  $K_{Ic}^c$ . A nakonec při znalosti obou zmiňovaných hodnot byla z následujícího vztahu dopočítána tzv. iniciační složka lomové houževnatosti  $K_{Ic}^{ini}$ :

$$K_{Ic}^{ini} = K_{Ic}^{um} - K_{Ic}^c. \quad (1)$$

Podrobnosti týkající se výpočtu jak hodnoty lomové houževnatosti, tak i kohezivní složky lomové houževnatosti, případně dalších níže uváděných veličin lze nalézt v [13] a/nebo [14].

## 6. Výsledky

Získané relativní hodnoty vybraných materiálových parametrů jsou uvedeny v Tab. 2 (kompozity obsahující přírodní písek, nebo odpadní písek): 100% hodnota určitého materiálového parametru odpovídá hodnotě tohoto parametru pro kompozit z referenční směsi, tedy bez příměsí, s označením R, respektive R'. Vyhodnocované parametry jsou následující: tlaková pevnost  $f_c$  (informativní hodnota zjišťovaná na tělesech po lomových zkouškách), modul pružnosti  $E$ , lomová houževnatost  $K_{Ic}^{um}$ , iniciační složka lomové houževnatosti  $K_{Ic}^{ini}$ , kritické otevření trhliny  $CTOD_c$  ve vrcholu zářezu, zatížení  $P_{ini}$  (odpovídá úrovni zatížení na počátku stabilního šíření trhliny z iniciačního zářezu) a poměr  $K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{um}$ , tj. poměr hodnot iniciační složky lomové houževnatosti k celkové lomové houževnatosti.

	R	VP20	MK20	VPMK20	R'	VP20'	MK20'	VPMK20'
$f_c$	100,0	101,4	93,8	97,1	100,0	164,6	–	141,5
$E$	100,0	170,6	198,6	141,1	100,0	167,5	–	173,2
$K_{Ic}^{um}$	100,0	102,8	122,8	112,6	100,0	166,7	–	148,5
$K_{Ic}^{ini}$	100,0	100,0	176,5	191,5	100,0	236,2	–	180,5
$CTOD_c$	100,0	60,0	53,9	38,8	100,0	90,7	–	86,7
$P_{ini}$	100,0	97,8	182,2	195,7	100,0	241,8	–	184,8
$K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{um}$	100,0	97,2	143,3	171,2	100,0	140,9	–	120,6

Tab. 2 Relativní hodnoty vybraných materiálových parametrů v %

Tab. 2 Selected material parameters – relative values in %

Tab. 3 shrnuje vzájemné procentuální porovnání výsledných hodnot vybraných parametrů kompozitů obsahujících přírodní, případně i odpadní písek: 100% hodnota určitého materiálového parametru odpovídá hodnotě tohoto parametru pro kompozit obsahující pouze přírodní písek.

	R'	VP20'	VPMK20'
$f_c$	29,5	47,9	43,0
$E$	37,9	37,2	46,5
$K_{Ic}^{un}$	39,6	64,3	52,3
$K_{Ic}^{ini}$	30,8	72,7	29,0
$CTOD_c$	114,1	172,4	255,1
$P_{ini}$	30,6	75,6	28,9
$K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un}$	77,8	112,8	54,8

Tab. 3 Relativní hodnoty vybraných materiálových parametrů v % (hodnoty pro kompozity obsahující přírodní písek odpovídají hodnotě 100 %).

Tab. 3 Selected material parameters – relative values in % (values for composites with natural sand correspond to 100 %).

Pro vyhodnocení signálů AE byla pozornost zaměřena k počtu překmitů událostí AE přes předem nastavenou prahovou úroveň. Signály jsou vždy zachyceny snímačem, který byl nejbližší viditelné trhliny. Vybrané závislosti zatížení a počtu překmitů AE na otevření ústí zářezu ze zkoušek těles z jednotlivých směsí uvádí Obr. 4.

## 7. Závěr

Z výše uvedených výsledků lze stanovit, že měření akustické emise podkládá u všech zkoumaných kompozitů numericky získanou úroveň zatížení při iniciaci stabilního šíření trhliny z iniciačního zářezu zkušebních těles. Vedle počtu překmitů byla kvantifikována celá řada lomově-mechanických parametrů. Dílčí závěry vyplynuly z hodnocení odezvy kompozitů s náhradou 20 % hmotnosti cementu vysokoteplotním popílkem (VP20), metakaolinu (MK20) a jejich kombinace (VPMK20) s plnivem přírodním pískem a jeho částečnou náhradou 20 % hmotnosti pískem odpadním.

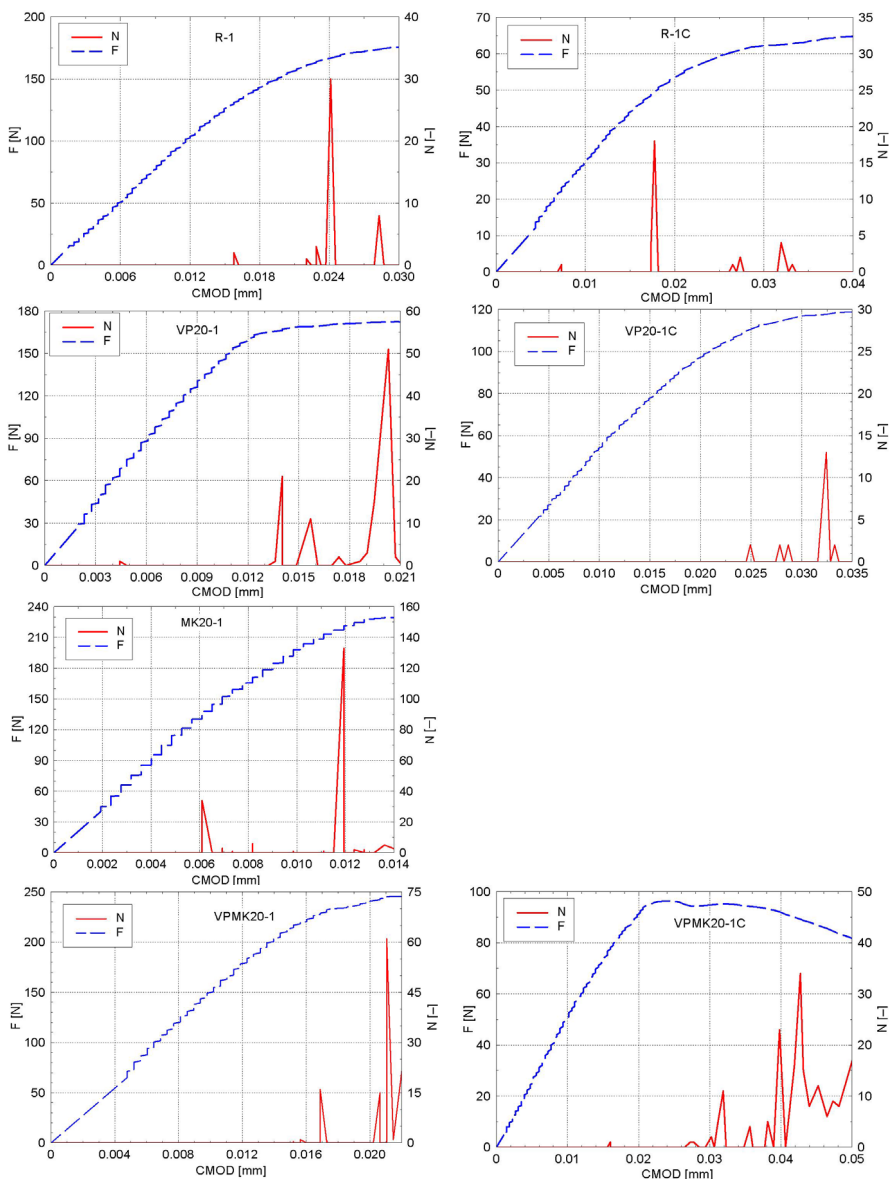
### Kompozity s přírodním pískem:

Hodnoty tlakové pevnosti se oproti hodnotám z referenčních těles prakticky nelišily u VP20; pokles zhruba 6 a 3 % byl zaznamenán u MK20 a VPMK20. Podstatně jinak tomu bylo v případě hodnot statického modulu pružnosti, kdy byl naměřen nárůst o zhruba 70, 100 a 40 % u kompozitů VP20, MK20 a VPMK20. U hodnot lomové houževnatosti šlo o nárůst 3, 23 a 13 % u kompozitů VP20, MK20 a VPMK20. Ještě podstatněji byla u kompozitů s příměsí MK20 a VPMK20 ovlivněna úroveň iniciace stabilního šíření trhliny – o přibližně 80 a více než 90 % narostla hodnota iniciační složky kritické hodnoty faktoru intenzity napětí a tomu odpovídajícího zatížení.

### Kompozity s obsahem odpadního písku:

Podstatně narostly hodnoty tlakové pevnosti v tlaku – o přibližně 65 a 40 % u VP20' a VPMK20'. Obdobně výrazně se zvýšily hodnoty statického modulu pružnosti – o 68 a 73 % u VP20' a VPMK20'. Také nárůst lomové houževnatosti byl značný – zhruba 70 a 50 % u VP20' a VPMK20'. Úroveň iniciace stabilního šíření trhliny se zvýšila o přibližně 140 a více než 80 % u VP20' a VPMK20'.

Použití odpadního písku způsobilo podstatně snížení hodnot většiny sledovaných parametrů. Užítí příměsí hodnoty většiny sledovaných parametrů oproti referenčním hodnotám (R, R') zvyšovalo, což pravděpodobně souvisí s výrazným snižováním míry alkalického rozpínání.



Obr. 4 Zatížení  $F$  a počet překmitů akustické emise  $N$  vs.  $CMOD$  u jednotlivých kompozitů  
 Fig. 4 Load  $F$  and number acoustic emission overshoot  $N$  vs.  $CMOD$  diagrams for each composite

## 8. Poděkování

Tento výzkum je financován z projektu VUT FAST-S-13-2100 No. 23668 a projektu Centra materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně CZ.1.05/2.1.00/01.0012.

## 9. Literatura

- [1] VEJMELKOVÁ, Eva, Milena PAVLÍKOVÁ, Martin KEPPERT, Zbyněk KERŠNER, Pavla ROVNANÍKOVÁ, Michal ONDRÁČEK, Martin SEDLMAJER a Robert ČERNÝ. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials*. 2010, č. 24, s. 1404-1411.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Přeložil Vlastimil BÍLEK. 1. vydání. Praha: IC ČKAIT, 2009. 344 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] MALHOTRA, V. M. a P. K. MEHTA. *High-Performance High Volume Fly Ash Concrete*. Ottawa, Canada: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., 2012. čtvrté vydání. ISBN 978-0-9916737-0-4.
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika – 4. díl. BEN – technická literatura*, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [5] PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P. *Využití akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2004*, ISBN 80-214-2802-3.
- [6] KOPEC, B a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. CERM, Brno 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [7] POLLOCK, R. A. *Practical guide to acoustic emission testing*, Physical Acoustic Corporation – Princeton, New Jersey, 1988.
- [8] REINHARDT, H.W. a S. XU. Crack extension resistance based on the cohesive force in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 1999, Vol. 64, N. 5, pp. 563-587. ISSN 0013-7944.
- [9] XU, S. a H.W. REINHARDT. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation. *International Journal of Fracture*. 1999, Vol. 98, N. 2, pp. 111-149. ISSN 1573-2673.
- [10] XU, S. a H.W. REINHARDT. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams. *International Journal of Fracture*. 1999, Vol. 98, N. 2, pp. 151-177. ISSN 1573-2673.
- [11] XU, S. a H.W. REINHARDT. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens. *International Journal of Fracture*. 1999, Vol. 98, N. 2, pp. 179-193. ISSN 1573-2673.
- [12] KUMAR, S. a S. BARAI. *Concrete Fracture Models and Applications*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-16763-8. 262 s.
- [13] XU, S., H.W. REINHARDT, Z. WU a Y. ZHAO. Comparison between the double-K fracture model and the two parameter fracture model. *Otto-Graf-Journal*. 2003, Vol. 14, pp. 131-157. ISSN 0938-409X.
- [14] ZHANG, X. a S. XU. A comparative study on five approaches to evaluate double-K fracture toughness parameters of concrete and size effect analysis. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011, Vol. 78, N. 10, pp. 2115-2138. ISSN 0013-7944.





## **MONITOROVÁNÍ CEMENTOVÝCH PAST BĚHEM JEJÍ ŽIVOTNOSTI POMOCÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE A IMPACT ECHO METODY S POUŽITÍM VLNOVODŮ**

### **MONITORING CEMENT PASTE LIFETIME BY MEANS OF IMPACT-ECHO AND ACOUSTIC EMISSION METHODS WITH THE APPLICATION OF WAVEGUIDES**

**Libor TOPOLÁŘ, Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Daniela ŠTEFKOVÁ,  
Luboš PAZDERA**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav fyziky  
Contact e-mail: topolar.l@fce.vutbr.cz

#### **Abstrakt**

*Pro experiment byly použity, zatím pro stavebnictví netradiční akustické metody, zejména metoda akustické emise a metoda impact echo. Cementová pasta je základním kompozitním materiálem ve stavebnictví. My víme, že člověk je jako dítě, když se narodí má v sobě vložené vlastnosti dané složením materiálu, z kterých se skládá. Správnou výchovou (ošetřováním) můžeme tyto pozitivní vlastnosti posílit nebo naopak utlumit. To znamená, že je důležité sledovat vlastnosti cementové pasty ihned po namíchání. Vzhledem k tomu, že vzorky jsou vlhké a měkké není jednoduché umístit snímače akustické emise na povrch, což lze řešit pomocí vlnovodů. Snímače akustické emise se připevnilly na ocelový válcový vlnovod, který je vložen do čerstvé směsi. Tuhnutí a tvrdnutí cementové pasty je kritické pro následné vlastnosti i samotné betonové konstrukce. Z tohoto hlediska je patrné, že aplikace nedestruktivních metod v rané fázi tuhnutí cementové pasty, je užitečné.*

**Klíčová slova:** *Metoda akustické emise, Metoda impact echo, Vlnovod, Cementová pasta*

#### **Abstract**

*Non-destructive acoustic analysis methods, Impact-echo method as a traditional and the Acoustic Emission method as nontraditional method for civil engineering, were used for experiment. Cement paste is a composite construction material which is used in civil engineering very often. We know that concrete is as a man – when concrete is made it is as a baby, then it ages and its properties change in accordance to its baby life. That means it is better to monitor and change its properties when it is young as soon as possible. However, using these methods immediately after making the mixture for monitoring developments during setting and hardening is difficult. The main aims of the article are to show the application of Acoustic Emission method, and Impact-echo method with waveguides. The sensors were affixed to the steel cylinders (waveguides) which were installed in the cement paste. Cement paste hardening and setting processes are the most critical phases during construction work influencing the properties of cement mortar structure. For this reason applying non-destructive testing in the early age of cement mortar lifetime can be useful.*

**Key words:** *Acoustic emission method, Impact-echo method, Waveguides, Cement paste*

## 1. Úvod

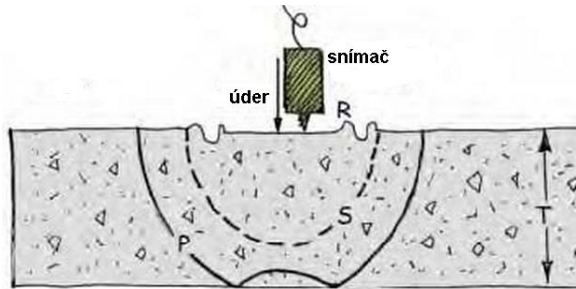
Pro sledování změn napětí resp. vzniku trhlin je použita metoda akustické emise. Tato metoda umožňuje sledování aktivních (dynamických) dějů uvnitř struktury [1]. Vlivem kumulace lokálních napětí uvnitř materiálu vznikají ohniska napětí (tyto napětí mohou být mechanické, chemické nebo tepelné) a tedy potenciální zdroje akustické emise. Pokud se v určitém místě dosáhne resp. přesáhne napětí kritických hodnot, uvolní se naakumulovaná energie a projeví se jako akustická událost. Předpokládá se, že bývá provázána vznikem mikrotrhliny. Vzniklé napětí se šíří materiálem. Místo vzniku se nazývá zdroj akustické emise [2, 3]. Pro jednoduchost předpokládáme homogenní izotropní prostředí. Ze zdroje se pak šíří kulová vlna, jejíž energie se vzdáleností od zdroje klesá. Po dosažení povrchu může být tato energie zaznamenána pomocí snímače akustické emise. V případě homogenních izotropních materiálů a vhodného umístění snímačů lze lokalizovat polohu mikrotrhliny [4].

Tuhnutí a tvrdnutí betonu lze považovat za nejkritičtější období v průběhu životnosti betonové konstrukce. V zájmu předcházení problémům se životností betonové konstrukce je nezbytné mít k dispozici spolehlivé informace o ranných stádiích betonu [5]. Existuje mnoho způsobů pro určení vlastností betonu. Jejich aplikace v ranných stádiích je velmi složitá, nebo dokonce nemožné [6]. A v takových situacích je vhodné použít akustický vlnovod viz Obr.1. Jedná se o mechanické zařízení sloužící k zjednodušení a zpřesnění měření při přenosu akustických vln ve vzorku z pasty, malty nebo betonu. Vlnovod umožňuje jednoduché umístění snímačů příp. generování mechanických impulzů. Tedy prováděné experimenty mají podobnou statistickou chybu, která se neliší od přímého umístění na vzorku. Používá se např. pro měření chování betonových směsí v čase – v uvedeném případě i měření aktivity akustické emise.



*Obr.1 Umístění snímače na vlnovodu*  
*Fig. 1 Location of sensor on the waveguide*

Metoda impact-echo (viz Obr.2) se řadí mezi metody nedestruktivního testování, založené na šíření nárazem vyvolaných mechanických vln. Tyto vlny se šíří strukturou a odrážejí se od vnitřních poruch a od vnějšího povrchu. Metodu lze teoreticky použít k určování polohy a rozměrů poruch např. trhlin, štěpení vrstev, dutin, kavitačních dutin a nespojitostí ve strukturách, jako jsou desky, vrstvené desky, sloupy, trámy nebo duté válce [7].

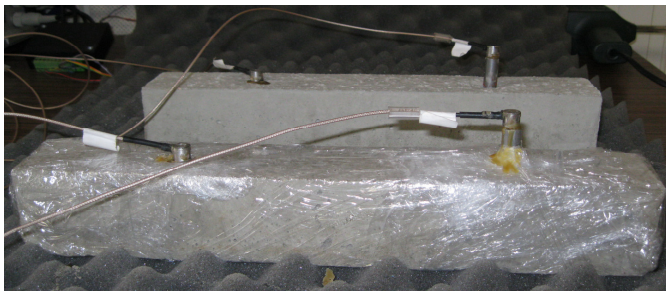


Obr. 2 Schématické znázornění metody impact-echo  
Fig. 2 Impact-echo method

Krátkodobý mechanický impuls, způsobený poklepem tělesa na povrch, vyvolá tlakovou vlnu. 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 zachycuje časový průběh signálu, obvykle zrychlení. Tento signál popisuje přechodné lokální vibrace, způsobené násobným odrazem mechanické vlny uvnitř struktury. Dominantní frekvence těchto vibrací referují u vybraných aplikací o hloubce poruchy uvnitř struktury, od které se vlny odrážejí. Signál je digitalizován analogovým/digitálním datovým systémem a přenášen do paměti počítače. Pomocí matematických operací se signál upravuje. Výsledkem pak může být grafické spektrum amplitudy a frekvence. Vrcholy v tomto spektru představují rezonační frekvence v průběhu křivky a používají se pro výpočet tloušťky nebo hloubky poruch [8].

## 2. Experiment

Měření pomocí metody akustická emise bylo provedeno na zařízení DAKEL XEDO s použitím vhodných snímačů a vlnovodů. Snímače akustické emise byly připevněny na vlnovod (Obr. 3), který byl zapuštěn do čerstvé směsi. Pro vyhodnocení vzniku mikrotrhlin jsme se zaměřili na aktivitu akustické emise, resp. nejčastěji používaný parametr počet překmitů přes nastavenou úroveň.



Obr. 3 Umístění snímačů akustické emise na povrchu vzorku a na vlnovodech  
Fig. 3 Photography of Acoustic Emission measurement



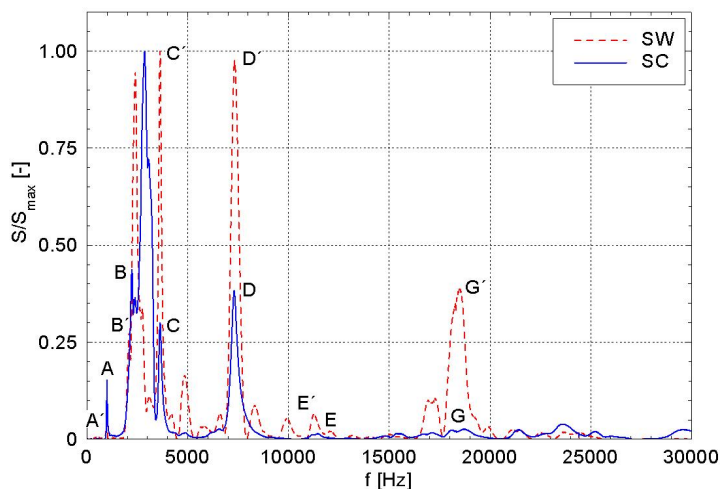
Obr.4 Aplikace metody impact-echo (vlevo – úder, vpravo – snímač)

Fig. 4 Photograph of Impact-echo measurement (left – impact, right – sensor)

Krátkodobý mechanický impuls (úder kladivem) byl aplikován na vlnovod, který byl zalit do zkoušeného vzorku a byl detekován pomocí piezoelektrického snímače, který byl připevněn na vlnovodu viz Obr.4. Snímačem zachycené impulsy byly přivedeny do vstupu dvou kanálového osciloskopu TiePie Handy HS3 s rozlišením 16 bitů.

### 3. Výsledky

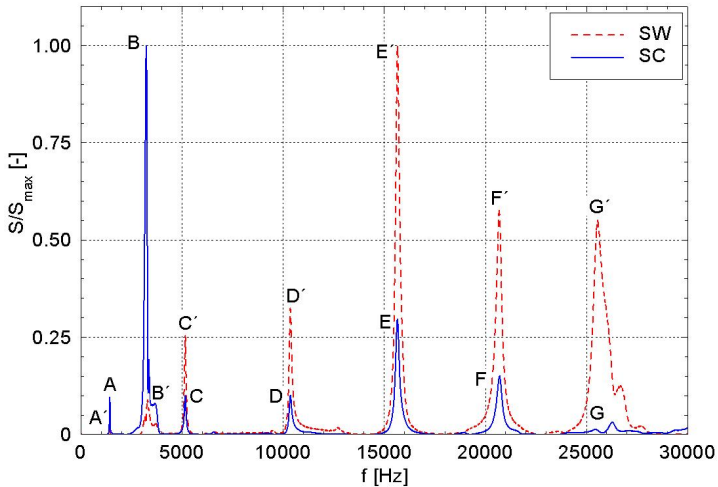
Měření začalo po odformování vzorků tedy po 24 hodinách od namíchání. Grafy (Obr. 5 a Obr. 6) ukazují frekvenční spektrum. Každý graf je z jiného okamžiku od namíchání. frekvenční spektrum bylo detekováno, jak na povrchu vzorku (plná čára s označením SC), tak na vlnovodu (přerušovaná čára s označením SW). Z frekvenčních spekter na Obr.5 a Obr.6 je patrné, že pozice frekvencí z snímače n povrchu vzorku (označeny písmeny A až G) odpovídají pozicím frekvencí ze snímače na vlnovodu (písmena A' až G'). V průběhu zrání vzorků se tyto významné frekvence posunují k vyšším hodnotám.



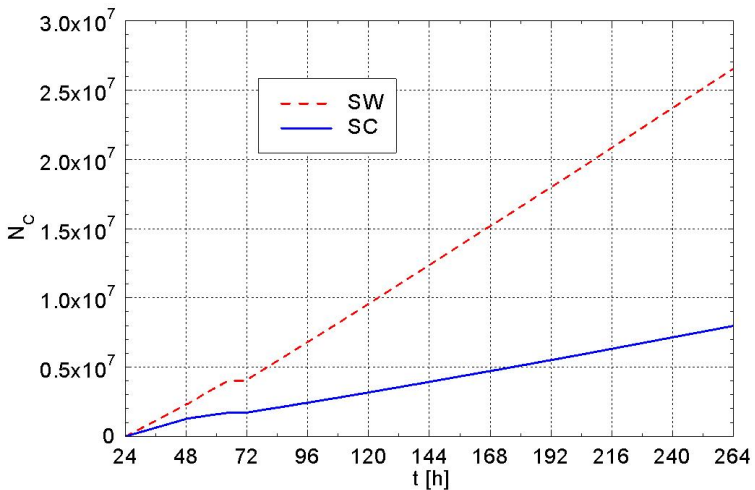
Obr. 5 Impact-echo – frekvenční spektrum po 24 hodinách od namíchání

Fig. 5 Impact-echo – frequency spectrum after 24 hours from the mixing

Graf na Obr. 7 ukazuje závislost kumulativního počtu překmitů  $N_C$  na čase  $t$ . Snímač akustické emise umístěn na vlnovodu (označení SW – přerušovaná čára) vykazuje více událostí akustické emise než snímač umístěný na povrchu vzorku (označení SC – plná čára). Toto svědčí o zvýšené citlivosti snímače umístěného na vlnovodu.



Obr. 6 Impact-echo – frekvenční spektrum po 240 hodinách od namíchání  
 Fig. 6 Impact-echo – frequency spectrum after 240 hours from the mixing



Obr. 7 Akustická emise – závislost kumulativního počtu překmitů  $N_C$  na čase  $t$   
 Fig. 7 Acoustic emission – dependence of cumulative counts  $N_C$  on time  $t$

#### 4. Závěr

Použití vlnvodů se jeví jako velmi výhodné pro sledování tuhnutí čerstvé betonové směsi. Vlnvod umožňuje umístění senzoru v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí betonu a zároveň zlepšuje citlivost snímače, díky čemuž jsou přijaté vlny lépe detekovatelné. Další použití, vlnvodů bude předmětem následujících experimentů.

#### 5. Poděkování

Tento výzkum byl podporován z projektu FAST – J – 13-1879.

#### 6. Literatura

- [1] Mazal P., "Acoustic emission method using in evaluation of fatigue properties of materials," in Proceeding of European Conference on Advances in Mechanical Behaviour, Plasticity and Damage (EUROMAT 2000), Miannay D., Costa P., Francois D., Pineau A., eds., Tours, France, November, 2000, pp. 1137-1142. ISBN 0-08-042815-0.
- [2] Mazal P., Pazdera L. and Kolar L., "Advanced Acoustic Emission Signal Treatment In The Area Of Mechanical Cyclic Loading," in Proceedings of 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing (Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering), Grum J., ed., Portoroz, Slovenia, September, 2005, pp. 283-292. ISBN 961-90610-5-5.
- [3] Pazdera L., Smutny J., Janostik D., Korenska M. and Prouzova P., "Study of metal timber join by acoustic emission method," in Proceedings of 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing (Application Of Contemporary Non-Destructive Testing In Engineering), Grum J., ed., Portoroz, Slovenia, September, 2005, pp. 299-307. ISBN 961-90610-5-5.
- [4] Uchida M., Ohtsu M. and Okamoto T., "Advanced NDT of Reinforced Concrete Members by Ultrasonic and Acoustic Emission," in Proceedings of 26th Seiken Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, Tokyo, Japan, April, 2000, pp. 161-170. ISBN 0-08-043717-6.
- [5] Popovics, S. (1971). "Physical aspects of the setting of Portland cement concrete," *Journal of Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 150-162
- [6] Struble, L.J., Zhang, H., Sun, G.-K., and Lei., W.-G. (2000). "Oscillatory shear behavior of Portland cement paste during early hydration," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 2, No. 9, pp. 141-149
- [7] Sansalone M. J., William S.B., "The Impact-Echo Method," *NDT.net*, 1998, vol. 3, No. 2
- [8] Pomeroy, C. Properties of fresh concrete. *Materials and Structures*, 1991, Vol. 24, No. 2, pp. 159. ISSN: 1359-5997



## MOŽNOSTI NEDESTRUKTIVNÍ PROHLÍDKY LETECKÉ TECHNIKY POMOCÍ AKTIVNÍ TERMOGRAFIKÉ METODY UŽÍVAJÍCÍ KONTAKTNÍHO ELEKTRICKÉHO OHŘEVU POSSIBILITIES OF AIRCRAFT NON-DESTRUCTIVE INSPECTION USING ACTIVE THERMOGRAPHIC METHOD BASED ON CONTACT ELECTRIC RESISTANCE HEATING

Václav TRÍSKA, Tomáš CHLEBEČEK

Katedra letecké a raketové techniky, Univerzita obrany

Contact e-mail: vaclav.triska@unob.cz

### Abstrakt

*Aktivní termografie dnes patří mezi etablované metody nedestruktivního zkoušení. Tato metoda využívá pro detekci defektů vizualizaci teplotního pole povrchu zkoušeného objektu podrobeného ohřevu pomocí externího zdroje tepla. V případě použití plošného ohřevu v kombinaci se záznamem pomocí moderních infračervených kamer s maticovými FPA detektory se tato metoda jeví jako výhodná také pro kontrolu velkorozměrových potahových panelů letadel, ať již jsou vyrobeny z kompozitních materiálů, či slitin lehkých kovů. Vedle vlastností kamery je nejdůležitějším faktorem, ovlivňujícím citlivost a spolehlivost metody, zvolený způsob ohřevu. Jednou ze slibných možností plošného ohřevu, vyznačující se požadovanou vysokou homogenitou a dostatečnou intenzitou, je užití elektrického odporového topného elementu ve formě fólie, který kontaktně ohřívá kontrolovaný potah letounu a umožňuje provedení jak průchodové techniky, tak techniky odrazové. Praktické zkoušky metody byly provedeny v oblasti detekce vad nacházejících se v relativně tlustostěnném vzorku z kompozitu uhlík/epoxid a také v oblasti detekce simulovaných korozních úbytků u plechu z hliníkové slitiny. V obou případech se metoda ukázala jako velmi slibná.*

**Klíčová slova:** nedestruktivní prohlídka, infračervená termografie, odporový topný element, potah letadla.

### Abstract

*Active infrared thermography can be regarded as a well-established non-destructive method today. This method uses visualization of surface temperature field of test object, which has been subjected to heating by an external heat source, for detecting defects. If surface heating in combination with present-day thermal imagers using matrix FPA detectors is used, this method appears to be useful even for the inspection of large-area aircraft skin panels, whether they are made of composite materials or light metal alloys. The proper method of heating is, besides the properties of the infrared imager, the most important factor influencing the method sensitivity and reliability. There is one promising method of high homogeneity and intensity surface heating that can be used - the use of electric resistance heating element in the form of thin film, which can heat the skin surface and enable the use of both transmission and reflection technique. Practical tests of the method were carried out in the field of detection of subsurface defects located in the relatively thick-walled carbon/epoxy composite sample and detection of simulated corrosion loss of light metal alloy plate. In both cases, the method proved to be very promising.*

**Key words:** non-destructive inspection, infrared thermography, resistive heating element, aircraft composite skin

## 1. Úvod

Oblast výroby a provozu letecké techniky je typická vysokými požadavky na kvalitu, spolehlivost a bezpečnost. Splnění těchto požadavků vyžaduje mimo jiné také široké nasazení metod nedestruktivního zkoušení. Vedle etablovaných metod, za jaké lze považovat metodu ultrazvukovou, prozařovací či metodu vířivých proudů, lze dle autorů použít pro kontrolu určitých částí letadel také infračervenou termografii. Její nasazení se jeví jako smysluplné v oblasti lokalizace vad a poškození tlustostěnných kompozitových potahů soudobých bojových letadel či v oblasti detekce koroze dílců vyrobených ze slitin lehkých kovů.

Infračervená termografie je obecně založena na určování a analýze tepelných polí povrchu zkoumaného objektu na základě elektromagnetického záření o vlnových délkách od 0,76  $\mu\text{m}$  do 1000  $\mu\text{m}$  vysílaného tímto objektem a přijímaného detektorem. Metoda je založena na detekci anomálií v tepelném poli povrchu objektu, které mohou ukazovat na vady a poškození konstrukce jinak nezjistitelné.

Infračervená termografie se dělí dle principu na techniky pasivní a aktivní. Z pohledu výše uvedených oblastí prohlídky letecké techniky se jako zajímavější jeví techniky **aktivní termografie**. Ty se vyznačují užitím vnějšího tepelného pulzu nutného k zobrazení tepelného kontrastu zkoumaného materiálu. Defekty, například odlepení, delaminace, roztržená vlákna či oslabení objektu korozním úbytkem, ovlivňují tepelné vlastnosti materiálu. Při správné aplikaci externího zdroje tepla lze tyto defekty lokalizovat pomocí obrazu povrchu potahu v infračerveném pásmu.

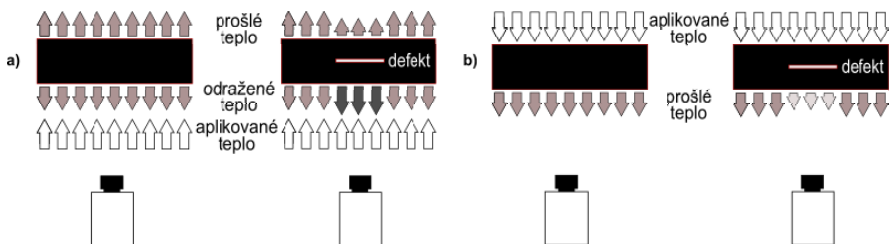
Odhlédneme-li od vlastností užité infračervené kamery, pak citlivost a spolehlivost aktivní termografie je nejvíce ovlivněna aplikovaným způsobem externího ohřevu. Ohřev by měl být plošného charakteru, dostatečně intenzivní a měl by vykazovat vysokou homogenitu. Jako zajímavý se jeví ohřev pomocí kontaktního elektrického odporového elementu ve formě tenké fólie.

## 2. Aktivní infračervená termografie užívající kontaktního elektrického odporového ohřevu

Jak již bylo řečeno, aktivní termografie užívá vnější tepelné excitace vhodným zdrojem tepla a sledování měnícího se teplotního pole povrchu. Jednou z užívaných technik je technika **pulzní termografie**, založená na relativně rychlém ohřevu vzorku a poté sledování poklesu teploty formou záznamu křivek chladnutí povrchu zkoušeného prvku. Pokud dojde k abnormálnímu chování této křivky, lze očekávat anomálii – například podpovrchový defekt, který zpomalil pronikání čela tepelné vlny pod povrch. Povrch nad tímto defektem má jinou teplotu než povrch intaktního okolí.

Konkrétní provedení techniky se může lišit jak užitým způsobem ohřevu, tak způsobem záznamu. Pro velkoplošné potahové dílce letadel je vhodný plošný ohřev v kombinaci se záznamem pomocí maticových FPA detektorů. Samotné pozorování lze pak rozdělit na **techniku odrazovou** (reflexní) a **techniku průchodovou** (transmisní), jejichž princip je naznačen na obrázku 1.





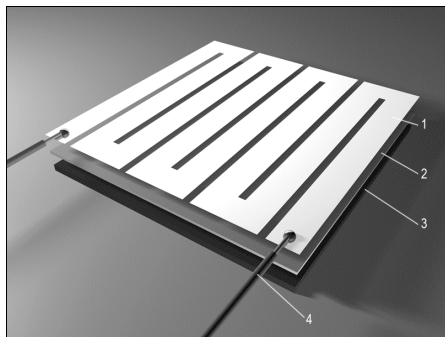
Obr. 1 Princip pulzní termografie

a) technika odrazová, b) technika průchodová

Fig. 1 Pulse thermography principle

a) reflection technique, b) transmission technique

Klíčovým prvkem celého nedestruktivního termografického zkoušení je použitý způsob plošného ohřevu. Jednou z možností je kontaktní ohřev pomocí elektrického odporového elementu, který je přiložen na zkoušený prvek. Je jasné, že tohoto přístupu lze užít, jen pokud by se jednalo o techniku průchodovou, v případě techniky odrazové by totiž muselo dojít k rychlému odejmutí tělesa před zahájením sledování změn teplotního pole, což se jeví neproveditelné, ale nepraktické. Existuje ovšem možnost, jak se problému se zastíněním povrchu vyhnout. Je jím použití topného tělesa ve formě fólie, která má velmi malou tloušťku a navíc je velmi dobře tepelně vodivá, proto se změny v teplotním poli povrchu zkoušeného objektu „prokopírují“ bez většího útlumu na její povrch.



Obr. 2 Kontaktní topný odporový element

1 – vinutí, 2 – vrstva lepidla, 3 – zkoušený objekt, 4 – elektrický vodič

Fig. 2 Contact resistance heating element

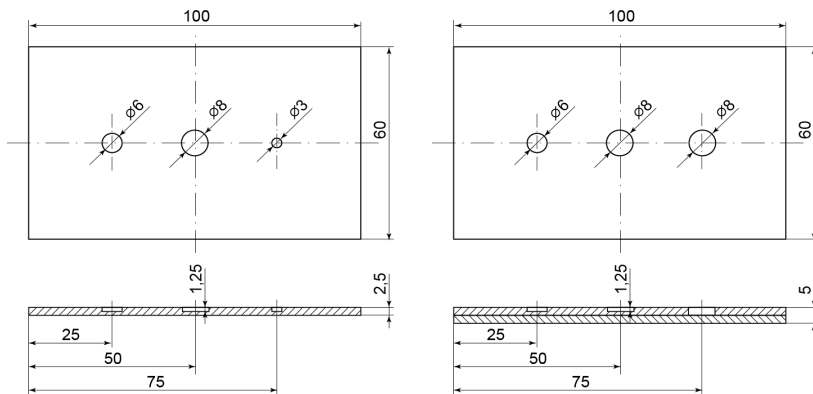
1 - winding, 2 - adhesive, 3 - tested object, 4 - line wire

Topný element je zhotoven z elektricky vodivé fólie (hliník) a má formu plošného vinutí, které je vhodným způsobem do fólie vyřezáno, jak je naznačeno na obrázku 2. Vznikne tak odporový prvek, jímž protékající proud produkuje Jouleovo teplo, které pak vedením proniká i do zkoušeného objektu. Také je samozřejmě nutné zabezpečit dokonalé spojení odporové fólie s povrchem objektu. Jako nejvhodnější se jeví použití tenké vrstvy lepidla aplikované na kontaktní plochu odporové fólie.

Pro praktické zkoušky citlivosti metody bylo navrženo měřicí zařízení schopné řídit celý proces zkoušky a měřit základní elektrické veličiny ohřevu. Základem zařízení byla infračervená kamera Micro-Epsilon TIM 160 pracující ve spektrální oblasti 7,5-13  $\mu\text{m}$  s rozlišením 160x120 obrazových bodů. Teplotní rozlišení kamery je 0,08 K. Kameru doplňoval hardware firmy National Instruments s programovým vybavením LabView. Vedle synchronizace záznamu kamery bylo zařízení schopné díky stejnosměrnému zdroji poskytnout přesně řízené elektrické pulzy o napětí 0-30 V s proudem do 60 A.

### 3. Lokalizace defektů v kompozitovém potahu

Relativně tlustostěnné kompozitové potahy soudobých bojových letadel je nutné podrobit nedestruktivní prohlídce již v rámci jejich výroby, navíc jsou nepříjemně citlivé na poškození dopadem cizího tělesa o nízké energii. Poškození je jen obtížně detekovatelné vizuální prohlídkou, proto je zapotřebí nasazení rutinní nedestruktivní prohlídky celého povrchu letounu.

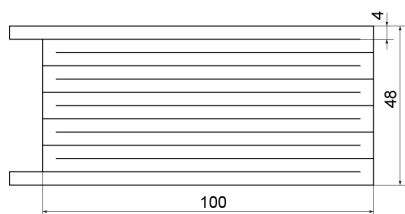


Obr. 3 Kompozitové vzorky s umělými defekty

Fig. 3 Composite samples with artificial defects

Schopnost metody detekovat podpovrchové defekty u kompozitových potahů byla vyzkoušena na vzorcích o rozměrech 100 x 60 mm obsahujících umělé vady. První vzorek byl vyroben z 18 vrstev prepregu uhlík/epoxid, jeho výsledná tloušťka byla 2,5 mm. Defekty byly simulovány pomocí tří válcových slepých otvorů o průměru 3, 6 a 8 mm umístěných na zadní straně vzorku. Druhý vzorek o tloušťce 5 mm byl vyroben slepením dvou částí a vybaven simulovanými vadami. Jedna z vad měla průměr 6 mm, dvě vady pak průměr 8 mm. Vady s větším průměrem měly rozdílnou hloubku. Podobu obou vzorků lze vidět na obrázku 3. Slepé otvory byly vyplněny pěnovou hmotou.

Odporový element byl vyroben ze samolepící hliníkové fólie o tloušťce 0,08 mm. Tvar vinutí je možné vidět na obrázku 4. Element byl vybaven vrstvou z PVC s vysokou emisivitou, aby byly při užití odrazové metody eliminovány problémy s vysokou odrazivostí povrchu hliníkové fólie. Napájecí kabely byly k vinutí elementu připájeny. Celkový vzhled vzorku je patrný z obrázku 4.



Obr. 4 Tvar a rozměry vinutí a celkový vzhled vzorku  
Fig. 4 Heating element shape and overall sample design

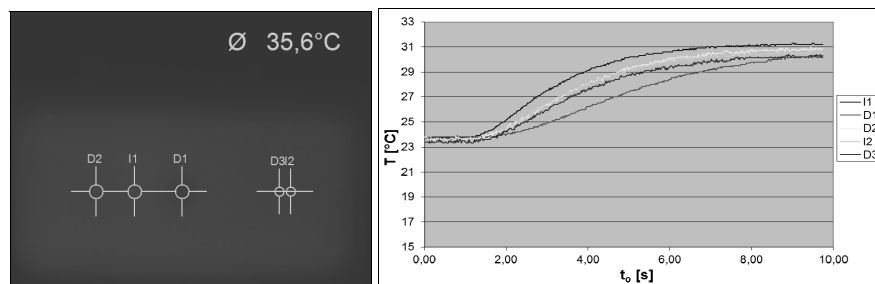
Vzorky byly drženy v zorném poli infračervené kamery pomocí jednoduché optické lavice a proces změn teplotního pole povrchu byl zaznamenáván do radiometrického videosouboru. Parametry ohřevu byly zvoleny tak, aby bylo dosaženo změny teploty povrchu o 60 °C. Obecně lze říci, že bylo zkoušeno napětí v rozmezí 4 – 15 V, což odpovídalo časům ohřevu od 19,75 do 0,43 s. Celkové množství Jouleova tepla investovaného do soustavy se pohybovalo od 130 J v případě velmi krátkých pulzů až do 500 J v případě pulzů relativně velmi dlouhých.

Záznam byl analyzován pomocí programového vybavení TIM Connect. Bylo zvoleno vyhodnocení pomocí sledování teplotního kontrastu mezi místem nad defektem a místem nepoškozeným a pomocí vizuálního posouzení viditelnosti kontrastu.

V případě **techniky průchodové** byl topný element umístěn na zadní straně vzorků. Teplota nad oblastmi s poškozením byla v průběhu průchodu tepelné vlny nižší než teplota oblastí bez vad. Absolutní teplotní kontrast  $C_a$  lze určit dle vztahu [1]

$$C_a(t) = T_I(t) - T_D(t),$$

kde  $T_I$  je hodnota povrchové teploty nad neporušenou oblastí a  $T_D$  je povrchová teplota nad defektem. V zorném poli software TIM Connect byly definovány oblasti nad defekty i oblasti intaktní tak, jak je vidět na příkladu na obrázku 5 vlevo. V těchto oblastech byl sledován průběh vývoje teplot (viz obrázek 5 vpravo).

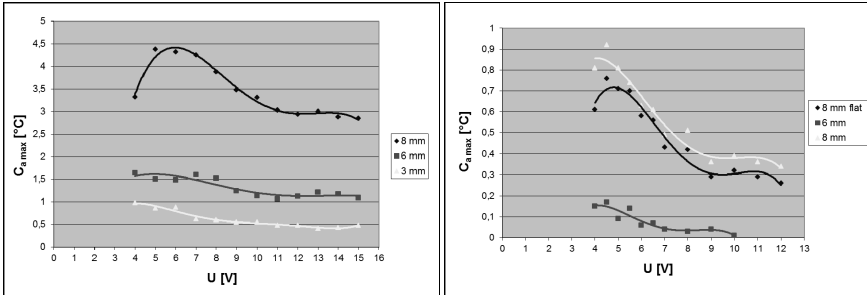


Obr. 5 Příklad časového průběhu vývoje teplot v měřících oblastech  
Fig. 5 Example of temperature evolution curves

Na základě těchto křivek vývoje teplot byl pro jednotlivé defekty určen časový průběh absolutního kontrastu, určeno jeho maximum a to vyneseno jako závislost na užitém napájecím napětí (viz obrázek 6). Z těchto grafů bylo pak možné určit optimální velikost napájecího napětí.

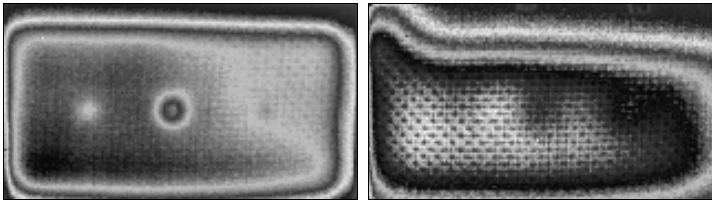
Z termografických záznamů zkoušek při optimálním napětí byly v okamžiku nejvyšších teplotních kontrastů pořízeny statické termogramy, na nichž bylo možné

při užití vhodných barevných škál zhodnotit viditelnost jednotlivých defektů (obrázek 7). Lze konstatovat, že všechny defekty byly viditelné.



Obr. 6 Závislost maximálního teplotního kontrastu na napětí (vlevo - vzorek tl. 2,5 mm, vpravo – vzorek tl. 5 mm)

Fig. 6 Maximal absolute thermal contrast as a function of voltage (left - 2.5 mm thick sample, right - 5 mm thick sample)



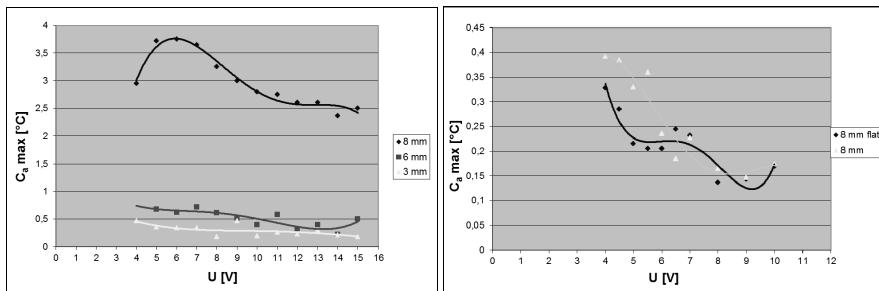
Obr. 7 Nejlepší viditelnost defektů při optimálním ohřevu (vlevo - vzorek tl. 2,5 mm, vpravo – vzorek tl. 5 mm)

Fig. 7 The best flaw visibility in case of optimal heating (left - 2.5 mm thick sample, right - 5 mm thick sample)

V případě **odrazové techniky** byl topný element umístěn na přední straně vzorku. Povrchová teplota nad oblastmi poškození byla v průběhu postupu tepelné vlny vyšší než teplota nad oblastmi bez poškození. Absolutní teplotní kontrast byl pak počítán dle mírně odlišného vztahu:

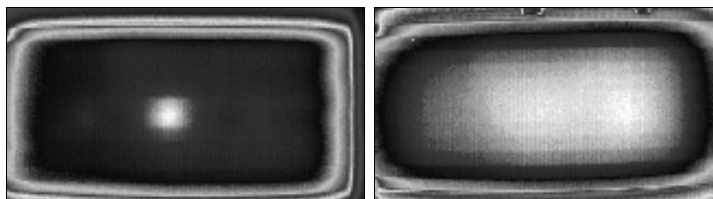
$$C_a(t) = T_D(t) - T_i(t).$$

Měřicí oblasti byly definovány podobně jako v případě techniky předchozí, také celý další vyhodnocovací proces byl podobný. Jako výsledek lze uvést až průběhy maximálního teplotního kontrastu (obrázek 8) a viditelnost defektů u obou vzorků při optimálním ohřevu v čase maxima absolutního kontrastu (obrázek 9). Je patrné, že u vzorku tloušťky 2,5 mm jsou detekovatelné defekty o průměru 6 a 8 mm, defekt o nejmenším průměru nelze již odlišit od šumu. U vzorku s větší tloušťkou jsou detekovatelné oba defekty o průměru 8 mm, přičemž viditelnost je již značně ovlivněna hranovým efektem.



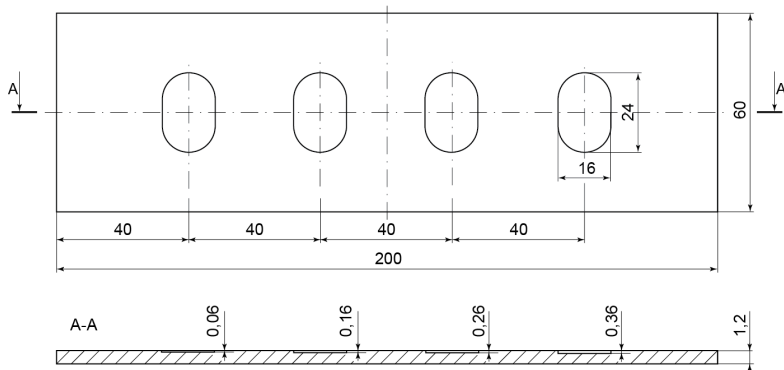
Obr. 8 Závislost maximálního teplotního kontrastu na napětí (vlevo - vzorek tl. 2,5 mm, vpravo - vzorek tl. 5 mm)

Fig. 8 Maximal absolute thermal contrast as a function of voltage (left - 2.5 mm thick sample, right - 5 mm thick sample)



Obr. 9 Nejlepší viditelnost defektů při optimálním ohřevu (vlevo - vzorek tl. 2,5 mm, vpravo - vzorek tl. 5 mm)

Fig. 9 The best flaw visibility in case of optimal heating (left - 2.5 mm thick sample, right - 5 mm thick sample)



Obr. 10 Vzorek z hliníkové slitiny se simulovanou korozí ztrátou tloušťky

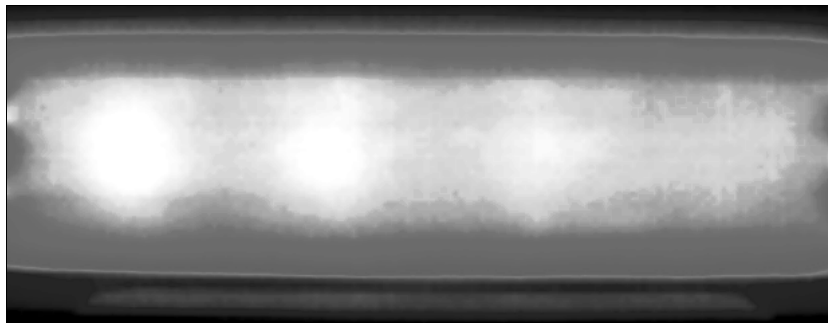
Fig. 10 The aluminum alloy sample with simulated corrosion thickness loss

#### 4. Lokalizace korozních úbytků

Další oblastí, ve které byla vyzkoušena použitelnost metody, byla oblast koroze potahů z hliníkových slitin. Byl použit vzorek z plechu z hliníkové slitiny Al-Cu4-Mg1

o tloušťce 1,2 mm s frézovanou simulací korozních úbytků o různé hloubce (viz obrázek 10).

Při zkouškách byla aplikována technika odrazová za užití topného elementu o velikosti 194 x 48 mm se šířkou vinutí 8 mm. Provedení vzorku bylo totožné se vzorky kompozitovými, stejně jako provedení zkoušek. Byla zkoušena napájecí napětí v rozsahu 10 – 15 V po dobu odpovídající ohřevu povrchu vzorku o 40 °C (3,28 – 0,67 s). Viditelnost korozních úbytků při optimálním napětí ohřevu (14 V) lze posoudit na obrázku 11. Lze říci, že lze detekovat i nejnižší úbytek 0,06 mm, což, vyjádřeno v procentech, činí úbytek 5 % původní tloušťky materiálu.



*Obr. 11 Viditelnost korozních úbytků (napětí 14 V)  
Fig. 11 The corrosion loss visibility (voltage 14 V)*

#### **4. Závěr**

Lze říci, že výše uvedená termografická metoda prokázala schopnost detekovat jak relativně malé defekty u kompozitových potahů, tak i korozní úbytky u potahů zhotovených ze slitin hliníku. Metoda vykazuje v mnoha ohledech vysoký potenciál, má samozřejmě i své stinné stránky.

Odporový topný element ve formě fólie je schopný poskytnout velmi rychlý a dostatečně homogenní ohřev, který je možné velmi přesně řídit. Velikost elementu je omezena pouze požadovaným příkonem. Základní nevýhodou metody je nutnost instalace odporového elementu na povrch zkoušeného objektu.

V případě kompozitových vzorků se technika průchodová ukázala být citlivější než technika odrazová. Zlepšení citlivosti odrazové techniky lze dosáhnout zlepšením v oblasti materiálů a výroby odporového elementu.

#### **Literatura**

- [1] MALDAGUE, Xavier. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Canada : John Wiley & Sons, Inc., 2001. 673 s. ISBN 0-471-18190-0.



## SPT RESULTS EVALUATION

Miroslav Varnér\*, Václav Koula\*\*, Hana Krausová\*\*\*

\*ČKD Blansko Engineering, \*\*DAKEL ZD Rpety, \*\*\*Brno University of Technology  
Contact e-mail: varnerm@seznam.cz

### **Abstract**

*Small punch test (SPT) is known as a powerful NDT tool for material properties determination of existing structures. The paper presents a description and results of SPT computer simulations performed with the steels in a wide range of yield strength and tensile strength. The true tension diagrams of these steels are created by the Hollomon's formula. Conventional mechanical properties of the steels are verified from the results of computer simulation of tensile tests, too. True mechanical properties are used for SPT simulation of steels. Relationships of loads and puncher displacements are shown in the paper. Subsequently parameters SPT, i.e. the maximum load, puncher displacement at maximum load, plastic tangent at the initial stage of SPT and "yield load" are carried out. Intersection of plastic tangent and axis of load determines "yield load". Causal relations between the characteristics of static strength steels and SPT parameters are shown as graphic results. Quite notable is the influence of hardening exponent in causal relations and correlation of yield strength with "yield load". Two generally independent methods of estimating of yield strength and tensile strength from SPT results are presented. These methods are based either on causal relationships or derived regression models.*

**Key words:** simulation, small punch test, evaluation, mechanical properties of steel, finite element method

### **1. Introduction**

Small punch test (SPT) has been widely used for effective verification of mechanical properties related to steel elements in existing structures [1], [2] and [3]. SPT testing specimens are small in size. Thus, any imperfections of structure geometry developed during material sample extraction do not represent any significant factor with respect to overall structure strength. As a result, SPT ranks among NDT methods. Multiple procedures have been published that deal with innovative steel mechanical properties determination. This new approach includes computer-aided SPT simulation with controlled optimization of real stress/strain diagram [4] and [5]. Obviously, such methods are challenging with respect to technical equipment, software, and personnel as well. In common engineering praxis, the steel properties are estimated using simple empirical equations derived from available test results [6], [7], [8] and [9].

Commercial software programs based on finite element method allow for solution of complex tasks related to stress/strain computations. In such studies, elastic-plastic behavior of solid parts can be examined with focus on extensive deformation/friction scenarios. Results obtained

from tensile test simulations and SPT simulations [10] and [11] indicate that such computer-aided simulation results may provide useful information about causal relationships between steel properties and SPT results.

Preparation phase included generation of true tensile diagrams [12] of model steels with pre-entered values of yield strength  $R_{p0.2}$  and ultimate strength  $R_m$ . Then, simulation results were obtained for tensile tests and SPT with the same model steels. Information about relationships between material properties and SPT results were collected. The goal is to show that using this valuable data, yield strength and ultimate strength could be estimated directly from SPT results.

## 2. Model Steels

Model steel properties used in the simulation are described by Young modulus  $E = 210\,000$  MPa, Poisson ratio  $\nu = 0.3$ , and true tensile test diagrams. The diagrams were created using Hollomon's formula  $\sigma = k \cdot \epsilon_p^n$ , where  $\sigma$  is true stress,  $\epsilon_p$  is plastic strain,  $k$  is strength coefficient, and  $n$  is strain hardening exponent. Mechanical properties of model steels were calculated using computer simulation of tensile tests [11]. Elongation  $A$  and reduction of area  $Z$  correspond to point, where the HMH stress reached maximal specified value of true stress in 90% of the area within the cross-section of narrowed test specimen (see Table 1).

Table 1: Mechanical properties of model steels

$k$ [MPa]	$n$ [-]	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]	$Z$ [%]
931	0.05	682	761	19	74
1212	0.09	682	885	20	67
1530	0.13	682	1027	24	69
849	0.05	622	694	16	72
1105	0.09	622	806	20	68
1395	0.13	622	937	24	66
775	0.05	568	633	16	71
1010	0.09	568	737	21	68
1274	0.13	568	856	24	69
484	0.05	355	396	15	57
631	0.09	355	461	21	68
796	0.13	355	536	25	69

## 3. SPT Simulation

Geometric model of SPT includes punching device (PD) and test specimen. The specimen is a disc-shaped solid (diameter 8 mm, height 0.5 mm) [11]. Model of the PD with the specimen was created using rotational symmetry with respect to vertical axis of the PD. Friction coefficient  $f = 0.07$  was applied onto the PD/specimen contact. Specimen was "fixed" in the PD by means of C and D forces from union nut. Geometric model of the PD is shown in Figure 1. Material properties of individual PD parts, for example steels, lower die (INCONEL625), and puncher (corundum) have corresponding values of Young modulus and Poisson ratio. Model of the lower die (INCONEL625) includes additional parameters of isotropic hardening. In the first step of the SPT, the test specimen disc is fixed in the PD using the C and D forces. In the second step, the specimen is gradually loaded due to displacement of the puncher up to value of 2.1 mm.



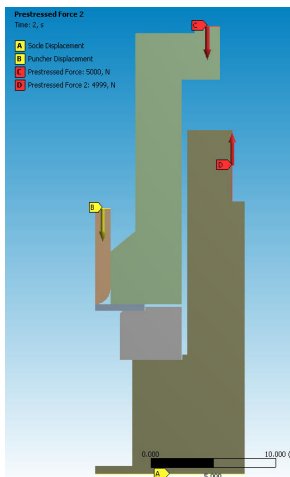


Fig. 1: Geometric model of SPT fixture

#### 4. Relations between Material Properties and SPT Simulation Results

Figure 2 shows loading diagrams of simulated SPT model steels marked with yield strength and hardening exponent. This represents relationship of loading force  $L$  and puncher displacement  $d$ .

Figure 3 shows maximum load  $L_{max}$  related to displacement  $d_{Lmax}$  for model steels with yield strength  $R_{p0.2}$  and hardening exponent  $n$ . Maximum load  $L_{max}$  and displacement  $d_{Lmax}$  increases with yield strength and hardening exponent of the steel.

Figure 4 shows dependences of model steel ultimate strength values and maximum load  $L_{max}$  for hardening exponent values of  $n = 0.05, 0.09$  and  $0.13$ . With constant values of hardening exponent, the dependences are linear and pass through the coordinate system origin. Ultimate strength increases with growing maximum load values. When the maximum load is constant, the ultimate strength shows increase along with decrease of the hardening exponent.

Figure 5 shows dependency of yield strength and maximum load  $L_{max}$  for model steels. With constant values of hardening exponent, the dependences are linear and pass through the coordinate system origin. Yield strength increases with growing maximum load values. When the maximum load is constant, the yield strength shows increase along with decrease of the hardening exponent.

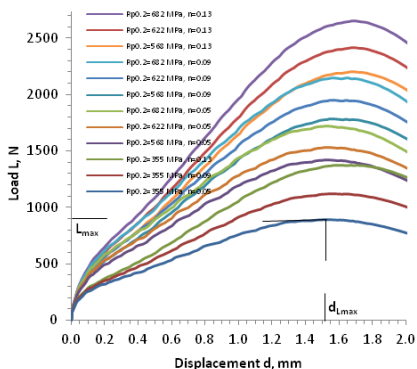


Fig. 2: Load-displacement curve for model steels

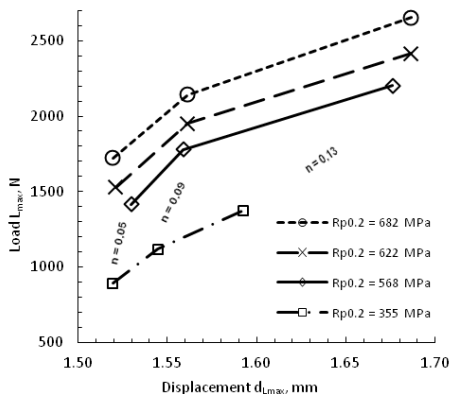


Fig. 3: Effect of yield point and hardening on SPT results

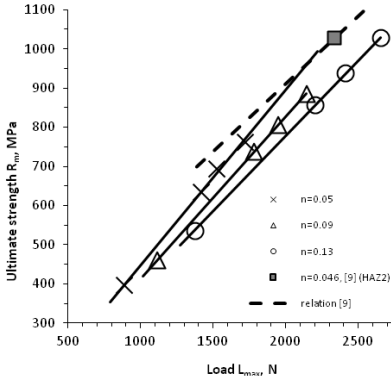


Fig. 4: Dependency of ultimate strength and maximum load

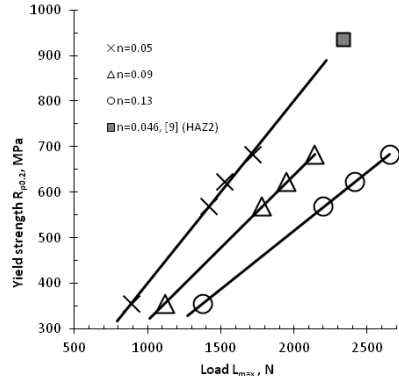


Fig. 5: Dependency of yield strength and maximum load

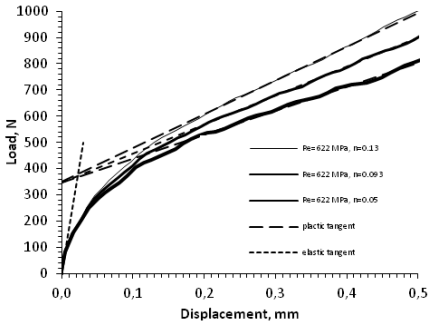


Fig. 6: Procedure of "yield load  $L_{Re}$ " assessment

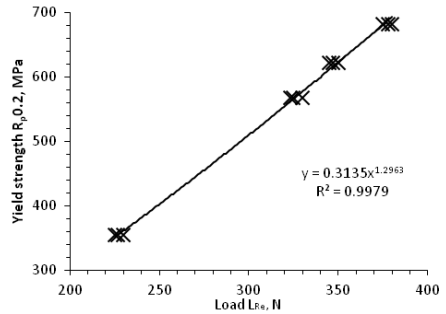


Fig. 7: Yield strength – "yield load  $L_{Re}$ " relation

Incline of plastic tangents constructed in loading diagram at the start of the SPT, i.e. shortly after reaching of the yield strength in test specimen shows strong increasing trend with growing hardening exponent  $n$  (see Figures 2 and 6). Plastic tangents constructed for given yield strength intersect for examined values of hardening exponent at the axis of load. They determine value of the property „yield load“  $L_{Re}$ , see Figure 6.

Figure 7 shows dependency of yield strengths of model steels and values of „yield load“  $L_{Re}$ .

The dependency can be approximated using a linear or power law relation. When the power law approximation is used, the determination coefficient  $R^2$  reaches value of 0.9979.

### 5. Estimation of Yield Strength and Ultimate Strength from SPT Results

Analysis of relationships between mechanical properties of steels and computer-simulated SPT results makes it possible to establish improved methods for estimation of yield strength and ultimate strength using graphic-calculation methodic and multidimensional linear regression (MLR).

### A. Graphic-calculation Methodic

Plastic tangent is constructed in the loading-displacement diagram provided by the SPT. The tangent's intersection with the axis of load of the diagram marks the loading value  $L_{Re}$  (see Figure 6). The yield strength is either read out from the diagram showing the dependence of yield strength and „yield load“  $L_{Re}$  or can be calculated using regression function (see Figure 7). The hardening exponent  $n$  can be estimated using dependency of yield strength and measured maximum load  $L_{max}$  (see Figure 5). Then, ultimate strength value is either calculated using a equation  $R_m = R_{p0.2} \cdot (500 \cdot n)^n / (n+1)$  derived from Hollomon's formula or it can be read out from the diagram showing the dependence of ultimate strength and maximum load  $L_{max}$ , (see Figure 4).

### B. Multidimensional Linear Regression (MLR)

SPT simulation results (maximum load  $L_{max}$  and displacement at maximum load  $d_{L_{max}}$ , or their squared values and mutual products) are considered to be independent variables (so called regressors). Yield strength and ultimate strength values are randomly dependent variables. Linear regression model in matrix notation was applied to SPT simulation results. The model is described by  $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$  equation, where  $\mathbf{X}$  is a matrix of regressors,  $\boldsymbol{\beta}$  is a regression coefficient vector, and  $\boldsymbol{\varepsilon}$  is a random error vector [13]. It is presumed that components for the random error vector have normal distribution of probability with zero mean value. Also, they have the same variation  $\sigma^2$  and they are uncorrelated. Estimation of the regression coefficient vector  $\mathbf{b}$  was performed using the least square method. This method relies on minimization of residual sum of squares for the exact value deviations  $y_i$  with respect to theoretical values of  $Y_i$ . Thus, regression coefficient vector represents solution of normal linear equations  $\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Y}$  provided that symmetric matrix  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  is regular. Regression coefficient vectors are estimated with yield strength and ultimate strength. The vectors can be described using the following functions: linear function, quadratic function without mixed member or quadratic function of SPT results.

**Table 2:** Regression relations of yield strength/ultimate strength and SPT parameters.

Function	Regression Relations	$R^2$
Linear	$R_{p0.2} = 2753.2 - 1794.1 \cdot d_{L_{max}} + 0.36121 \cdot L_{max}$	0.9260
	$R_m = 1126.9 - 732.80 \cdot d_{L_{max}} + 0.42931 \cdot L_{max}$	0.9941
Quadratic without	$R_{p0.2} = 40448 - 49364 \cdot d_{L_{max}} + 14911 \cdot d_{L_{max}}^2 + 0.62184 \cdot L_{max} - 0.00008 \cdot L_{max}^2$	0.9935
	$R_m = 16616 - 20312 \cdot d_{L_{max}} + 6143.3 \cdot d_{L_{max}}^2 - 0.04411 \cdot L_{max} - 0.00004 \cdot L_{max}^2$	0.9992
Quadratic	$R_{p0.2} = 33649 - 39736 \cdot d_{L_{max}} + 11493 \cdot d_{L_{max}}^2 + 0.67330 \cdot d_{L_{max}} \cdot L_{max} - 0.29960 \cdot L_{max} - 0.00012 \cdot L_{max}^2$	0.9942
	$R_m = 12212 - 14077 \cdot d_{L_{max}} + 3929.8 \cdot d_{L_{max}}^2 + 0.43606 \cdot d_{L_{max}} \cdot L_{max} - 0.04411 \cdot L_{max} - 0.00001 \cdot L_{max}^2$	0.9993

Table 2 contains estimated equation of yield strength  $R_{p0.2}$ , ultimate strength  $R_m$ , and corresponding values of determination coefficients  $R^2$ . The determination coefficients  $R^2$  related to ultimate strength are higher than those related to yield strength. It is worth noting that determination coefficients reach the highest values for the quadratic relation.

## 6. Discussion

Determination of steel yield strength using ordinate of elastic and plastic tangent intersection as described in commonly used methodic [9] does not take into account the dependency of plastic tangent incline and hardening exponent. Another methodic uses elastic tangent re-positioned at specified displacement value [7]. However, this approach results in even higher error of yield strength estimation.

Plastic tangents are determined in a specific area of the SPT diagram, where the plastic strain is quite small and fitting of Holloman's formula to true tensile diagram is satisfactory. SPT simulation provided dependencies of loading  $L$  on displacement  $d$  (Figure 6) and of yield strength on the  $L_{Re}$  value (Figure 7). These dependencies are realistic and correspond to result of actual SPT procedures.

Relations between yield strength, ultimate strength, maximum load  $L_{max}$ , and displacement  $d_{Lmax}$  acquired using SPT simulation can be affected by the construction method used to get true tensile diagrams, especially for greater strain conditions. However, this presumption was not supported by the SPT results carried out with steel specimens in the heat-affected zone of the weld joint [9], see Figure 4 and Figure 5. Simulation results correspond to SPT experiment for steel with hardening exponent of approximately 0.05.

It worth noting, that based on our results, linear equation  $R_m = a \cdot d_{Lmax} + b \cdot L_{max}$  (where  $a$  and  $b$  are constants) used by Rodrigez [9] may be considered valid only for steels with higher strength values. It is ergo possible to presume, that this linear relationship is established for higher-strength steels without taking into account the hardening. It is logical expect that curve of dependency of yield strength and „yield load“  $L_{Re}$  goes through the origin of coordinates. These considerations were confirmed by our results of the SPT simulation (see Figure 4).

Estimation of yield strength from SPT using graphic-calculation methodic works with different data than estimation using MLR. As a result, the both approaches may be considered independent. Evaluation of yield strength and ultimate strength using relation established by MLR is straightforward with no personnel influence factor. On the other hand, values of determination coefficient predict greater estimation errors, especially for yield strength estimation.

Validity range for relations among yield strength, ultimate strength, and SPT results should be verified by experiment (tensile testing, SPT) followed by a SPT simulation. Applied normalization of loading  $L_{max}$ ,  $L_{Re}$ , and displacement  $d_{Lmax}$  with specified specimen height  $v$  [13] does not affect either conclusions referring to relations between material properties of steels and SPT results or proposed evaluation methodic. With SPT evaluation, normed loads  $L_{max}/v^2$ ,  $L_{Re}/v^2$  and normed displacement  $d_{Lmax}/v$  are used in the procedure.

## 7. Conclusions

SPT simulation results for model steels featuring specific values of yield strength (from 355 MPa to 682 MPa) and ultimate strength (from 396 MPa to 1027 MPa) made it possible to establish empirical relationships between mechanical properties of the steels and SPT results. Significant findings include influence of hardening exponent onto dependency of yield strength/ultimate strength and maximum load of the SPT. The hardening exponent proved to affect the incline of the plastic tangent constructed in the load/displacement diagram as well. Strong correlation of yield strength and the „Yield load“ value established

in the intersection of plastic tangent and load axis is considered an important feature, too. This knowledge was crucial for the development of an improved SPT result evaluation methodic. Two generally independent methods for estimation of yield strength and ultimate strength from SPT results are presented.

## 8. References

1. KUPČA, L. – BŘEZINA, M. – PETZOVÁ, J. – BALÁK, M.: Evaluation of the reactor pressure vessel material properties degradation due to the irradiation by SPT method, 1<sup>st</sup> International Conference SSTT, Ostrava, 2010
2. KUPČA, L. – BŘEZINA, M.: Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkových zariadení pri hodnotení vlastností materiálov, Chem. Listy 105, s 167-170 (2011)
3. ŠŤASTNÝ, R. – PAVLÍK, V.: Application of SPT in CEZ, 1st International Conference SSTT, Ostrava, 2010
4. EGAN, P., et al.: Small punch test: An approach to solve the inverse problem by deformation shape and finite element optimization, Comput. Mater. Sci. 40 (2007) pp33-39
5. IVÁN, L. – DYMÁČEK, P.: Optimalizace materiálových parametrů při simulaci protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích, ANSYS konference 2010, Frymburk, Czech Republic, 2010
6. Abdul Salam Ali Zidan-LI, W. – BROOKFIELD, D. J.: The FE analysis and application of the small punch test, Int. Conf. on STISWB, Mahasarakham University, Thailand, 2009
7. AUTILLO, M., A. et al.: Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (Small Punch Test) EN LA Caracterización mecánica de aceros, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. 1 (2006), 77-83
8. KLEVTSOV I. et al.: Using of small punch test for determination of tensile properties for power plant steels, 6th Int. DAAAM Baltic Conf. INDUSTRIAL ENGINEERING, Tallinn, 2008
9. RODRÍGUEZ, C. et al.: Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test, Welding Journal, Vol. 88 (2009) 188-192
10. HŮLKA, J. – KUBÍK, P. – PETRUŠKA, J.: Sensitivity analysis of small punch test, 18th Int. Conf. ENGINEERING MECHANICS 2012, Svratka, Czech Republic, 2012
11. VARNER, M. – KOULA, V. – VOLÁK, J.: Influence of instrumentation imperfections on SPT results, 43<sup>rd</sup> International Conference NDE for Safety 2013, Olomouc, 2013
12. DOWLING, N. E.: Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993
13. KROPÁČ, O.: Náhodné jevy v mechanických soustavách, Praha, SNTL, 1987
14. CAMPITELLI, E. N.: Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zircalloys and steels with non-standard tests and finite element calculations, These No 3304, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2005

## **Acknowledgments**

The present work has been supported by European Regional Development Fund in the framework of the research project NETME Centre, reg. no. CZ. 1.05/2.1.00/01.0002, under the Operational Programme Research and Development for Innovation.

## **Contact**

### **Miroslav VARNER**

ČKD Blansko Engineering a.s..  
Čapkova 2357/5  
64 801 Blansko

### **Václav KOULA**

DAKEL ZD Rpety  
Ohrobecká 408/3  
142 00 Praha 4

### **Hana KRAUSOVÁ**

Energetický ústav, FSI, VUT v Brně  
Technická 2896/2  
61 669 Brno



## **VLIV IMPERFEKČÍ INSTRUMENTACE NA VÝSLEDKY SPT INFLUENCE OF INSTRUMENTATION IMPERFECTIONS ON SPT RESULTS**

**Miroslav VARNER<sup>\*</sup>, Václav KOULA<sup>\*\*</sup>, Josef VOLÁK<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>ČKD Blansko Engineering, <sup>\*\*</sup>DAKEL ZD Rpety, <sup>\*\*\*</sup>Výzkumný a zkušební ústav Plzeň  
Contact e-mail: varnerm@seznam.cz

### **Abstrakt**

*Uvádí se popis a výsledky počítačové simulace protlačovací zkoušky - small punch test (SPT) oceli P92. Maximální vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentálně. Přemístění děrovače při maximální vypočítané síle je o 2 % menší, než je hodnota zjištěná experimentálně. Vliv tření mezi zatěžovacím přípravkem a vzorkem, vliv úchylek rozměrů a geometrie přípravku a vliv utahovací síly jsou analyzovány s použitím výsledků simulace SPT. Analýza ukazuje, že výsledky SPT jsou významně ovlivněny třením a úchylkami rozměrů i úchylkami geometrie přípravku.*

**Klíčová slova:** *small punch test, imperfekce, simulace, metoda konečných prvků*

### **Abstract**

*The paper deals a description and results of computer simulation of small punch test (SPT) performed with structural steel P92. Maximum force computed during the SPT simulation is about 5% greater than the value obtained experimentally. Puncher displacement at maximum computed force is by 2 % less than the puncher displacement value obtained experimentally. The influence of several factor like friction between the punching device and the test sample, geometry of a punching device and value of tightening force are analyzed using SPT simulation. The analyses show that SPT results are significantly affected by friction and deviations of punching device dimensions/geometry.*

**Key words:** *small punch test, imperfection, simulation, finite element method*

## **1. Úvod**

Metoda konečných prvků je rutinně používána k řešení inženýrských úloh dimenzování konstrukcí a strojů a k simulaci technologických procesů. Komerční programy umožňují řešit statické lineární i nelineární úlohy. Pokud je požadováno elastické řešení úlohy stanovení napětí a deformací postačuje v případě izotropního materiálu znalost modulu pružnosti  $E$  a Poissonova čísla  $\nu$ . V posledních letech se vyskytují požadavky na výpočty napětí a deformací s uvážením elasto-plastického chování materiálu [1], [2]. Věrná simulace chování dílců s uvážením izotropní plasticity předpokládá znalost skutečného tahového diagramu, tj. modelové závislosti skutečného napětí na skutečné plastické deformaci. Dobře přiléhavý model chování plastického materiálu lze sestavit ze smluvního tahového diagramu [3], [4], [5], [6] a [7].

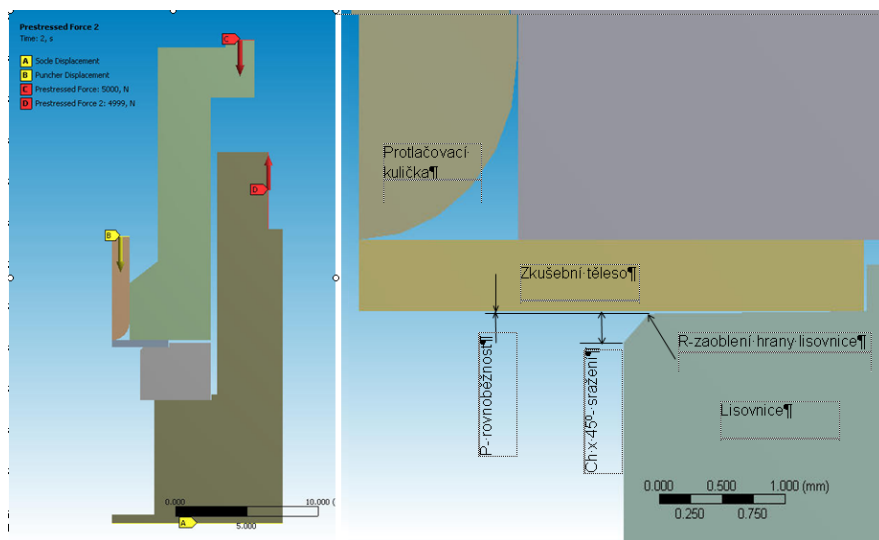
Protlačovací zkouška - small punch test (SPT) - je často používána pro odhad mechanických vlastností ocelí stávajících konstrukcí [8], [9] a [10]. Zkušební tělesa SPT jsou malá. Po odběru vzorků, určených k vypracování zkušebních těles SPT, jsou vzhledem k jejich malým rozměrům imperfekce geometrie konstrukce tak malé, že nesnižují pevnost konstrukcí. To je důvod zařazení SPT do nedestruktivních zkoušek. Vliv průměru protlačované kuličky, tloušťky zkušebního tělesa, součinitele tření, meze kluzu a exponentu zpevnění zkoušeného materiálu je analyzován pomocí počítačové simulace SPT,

příčemž je uvažována ideální geometrické uspořádání SPT a součásti přípravku jsou modelovány jako tuhá tělesa [11] a [12].

V příspěvku se zabýváme simulací SPT oceli P92 [13] a porovnáním vlivu vybraných parametrů SPT a imperfekcí přípravku na její výsledky. Výpočty respektují požadavky na modelování velkých deformací zkušební tělesa, plastické vlastností ocelí (izotropní plasticity) a tření v kontaktech mezi díly vlastního zatěžovacího přípravku a zkušební tělesa.

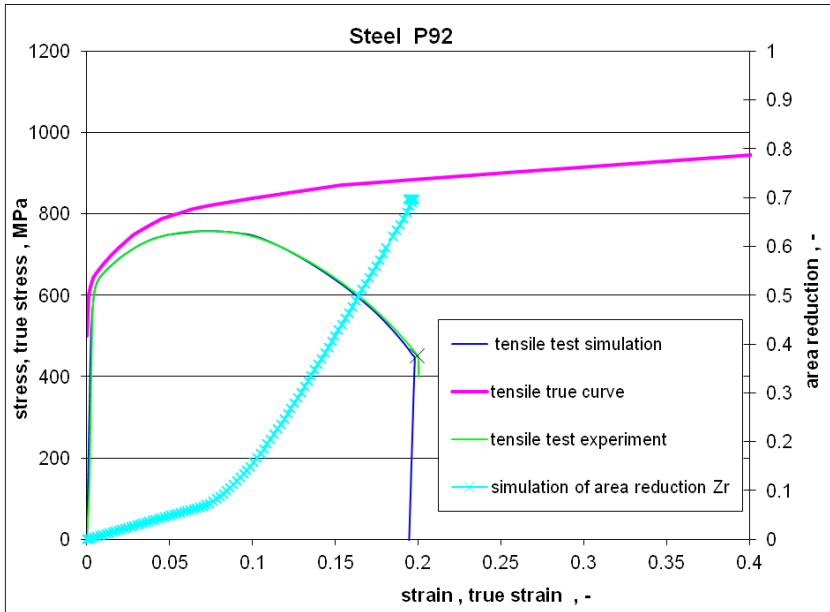
## 2. Simulace small punch test

Geometrický model zahrnuje zatěžovací přípravek používaný ve Výzkumném a zkušebním ústavu Plzeň, a zkušební tělesa – disk o průměru 8 mm a výšce 0.5 mm [14]. Model přípravku se zkušebním tělesem je vytvořen s využitím symetrie vzhledem k svislé ose přípravku. Tření v kontaktu mezi díly přípravku a diskem je uvažováno hodnotami součinitele tření  $f$  v mezích 0.07 až 0.2. Upnutí zkušební tělesa v přípravku zajišťují síly C a D od převlečné matice. Geometrický model ve výkresové konfiguraci zatěžovacího přípravku je zobrazen na obr. 1. Materiály dílů přípravku (oceli, INCONEL625 a korund) se uvažují příslušnými hodnotami modulů pružnosti a Poissonovými čísly. Model materiálu lisovnice (INCONEL625) navíc zahrnuje izotropního zpevnění. Ve výkresové konfiguraci se uvažuje s hodnotou součinitele tření  $f = 0.07$  [15]. Studium vlivu geometrických imperfekcí lisovnice zahrnuje sražení hrany lisovnice  $Ch = 0.3$  mm (výkresové sražení hrany  $Ch = 0.2$  mm) zaoblení hrany lisovnice poloměrem  $R = 0.02$  mm a imperfekci rovnoběžnosti plochy zahloubení pro zkušební těleso o velikosti  $P = 0.02$  mm, viz obr. 1.



Obr. 1 Model a zkoumané imperfekce,  
Fig. 1 geometry model and examined imperfections





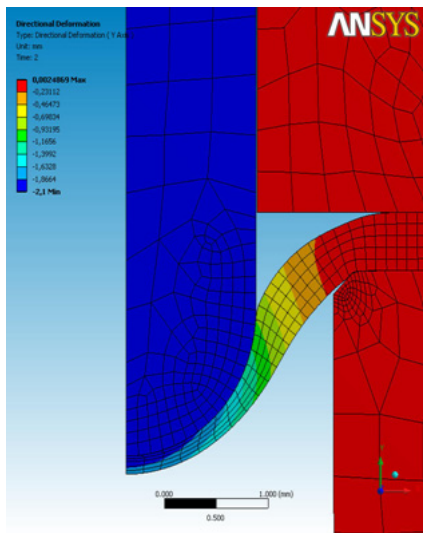
Obr. 2 Tahové diagramy oceli P92,  
 Fig. 2 Tensile diagrams of steel P92

Vlastnosti oceli P92 použité při simulaci jsou určeny modulem pružnosti  $E = 210000$  MPa, Poissonovým číslem  $\nu = 0.3$  a závislostí skutečného napětí na skutečné poměrné plastické deformaci odvozenou ze skutečného tahového diagramu. Skutečný tahový diagram je v oblasti poměrných deformací nad smluvní mezí pevnosti korigován s cílem dosažení shody smluvního tahového diagramu oceli stanoveného experimentálně a simulací, viz obr. 2.

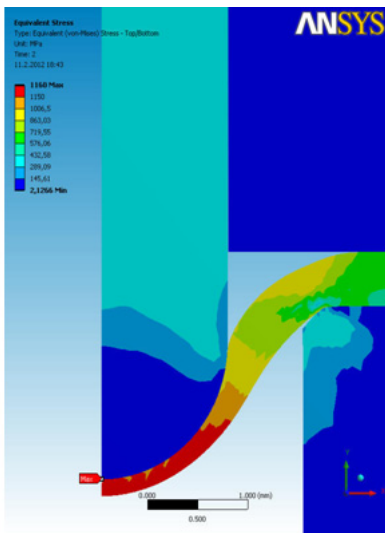
V prvním kroku simulace SPT se zkušební disk upne do zkušebního přípravku těleso silami C a D. V druhém kroku je disk stále upnut silami C a D a postupně se zatěžuje přemístěním děrovače, až je dosaženo jeho předepsané hodnoty.

### 3. Výsledky simulace SPT a jejich vyhodnocení

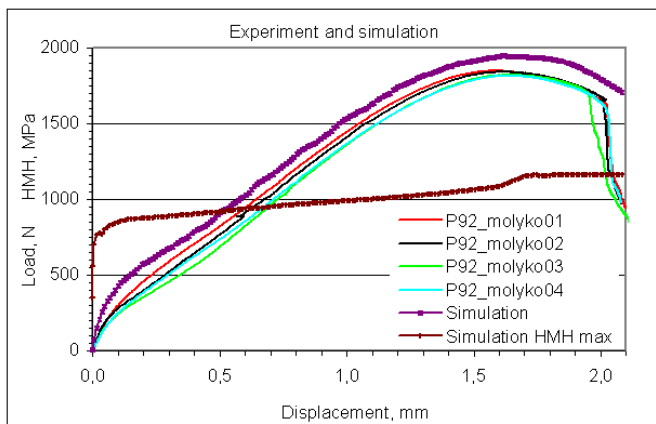
Celková deformace a napětí HMM po ukončení zkoušky při standardní konfiguraci SPT je vykreslena na obr. 3 a obr. 4. Vypočítané závislosti síly a max. napětí HMM ve zkušebním disku na přemístění děrovače je spolu s výsledky experimentů [16] (zkuš. disky P92\_molyko01 – 04) vykreslena na obr. 5. Max. vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentem. Přemístění děrovače při max. vypočítané síle je o 2 % menší, než je experimentálně zjištěná hodnota.



Obr. 3 Deformace na konci SPT  
Fig. 3 Deformation on the SPT end



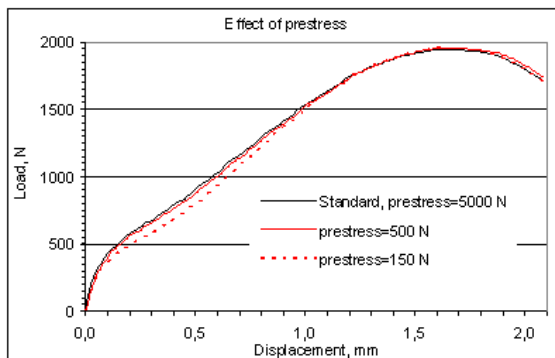
Obr. 4 Napětí HMH na konci SPT  
Fig. 4 Stress HMH on the SPT end



Obr.5 Síla versus posuv – experiment a simulace,  
Fig. 5 Force versus displacement – experiment and simulation

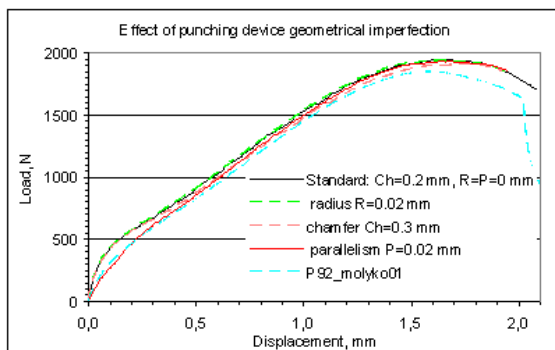
Je zřejmé, že již na začátku SPT je významný rozdíl závislosti síly na přemístění získanými experimentálně a simulací. Podle průběhu napětí HMH ve zkušební disk, viz obr. 4, vzniká tato odchylka v oblasti závislosti, kde ocel je v elastickém stavu nebo stavu s málo rozvinutou plastickou deformací. Při zvětšování rozsahu a velikosti plastických deformací se odchylka zmenšuje. Tento poznatek je v rozporu s očekáváním, že shoda

výsledků experimentů s výsledky simulace je v počátku SPT velká a s rozvojem plastické deformace se zmenšuje. Proto jsou zkoumány vytipované parametry ovlivňující výsledky SPT: velikost upínací síly, imperfekce zatěžovacího přípravku a tření mezi díly zkušebního přípravku a zkušebním tělesem. Vliv velikosti upínací síly od 150 N do 5000 N je ukázán na obr. 6. Malá hodnota upínací síly způsobuje zmenšení zatěžovací síly od zahájení SPT do přemístění přibližně 1.3 mm a naopak malé zvýšení zatěžovací síly od přemístění 1.5 mm.



Obr. 6 Vliv předpětí, Fig. 6 Prestress effect

zvětšení sražení hrany lisovnice na  $Ch = 0.3$  mm a imperfekce rovnoběžnosti plochy lisovnice  $P = 0.02$  mm, která je v kontaktu s plochou zkušebního tělesa způsobí významné změny závislosti síla na přemístění. Zvětšení sražení hrany na 0.3 mm se projevuje zmenšením zatěžovací síly od přemístění 0.25 mm prakticky do konce testu.

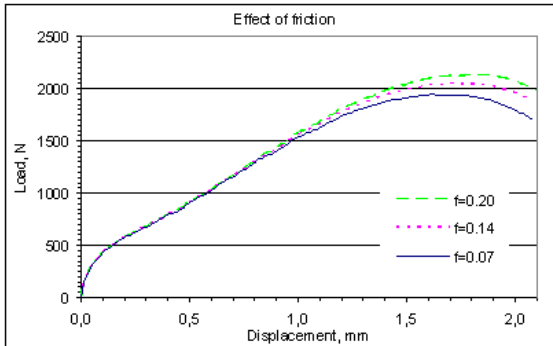


Obr. 7 Vliv imperfekcí přípravku, Fig. 7 Imperfection device effect

Od předpětí 500 N je vliv velikosti předpětí zanedbatelný. Je zřejmá potřeba zvýšit reprodukovatelnost výsledků SPT standardizací postupů upínání disku. Vliv imperfekcí geometrie lisovnice na výsledky SPT je spolu s výsledkem experimentu znázorněn na obr. 7. Zaoblení hrany lisovnice  $R = 0.02$  je odhadnuto z trvalé deformace hrany po odlehčení zkušebního tělesa. Takto velké zaoblení hrany lisovnice má marginální vliv na výsledek SPT. Naproti tomu

Nerovnoběžnost způsobuje výrazné zmenšení zatěžovací síly zejména v počátku zatěžování, se zvětšováním přemístění děrovače se odchylka zmenšuje. Odchylky simulace SPT od experimentu mohou být způsobeny imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch testovacího zařízení. Vzhledem k různým směrníci závislosti síla – přemístění při experimentech SPT, viz obr. 4, lze očekávat i významný vliv imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch zkušebních disků na výsledky SPT.

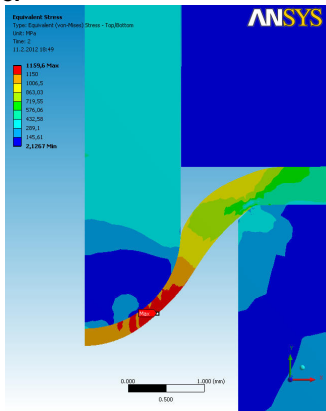
Vliv tření mezi zatěžovacím přípravkem a zkušebními diskem je znázorněn na obr. 8. Zvětšování hodnoty součinitele tření zvětšuje významně zatěžovací sílu od přemístění cca 0.75 mm. Velikost tření ovlivňuje lokalizaci porušení disku. Největší hodnota napětí HMH při součiniteli tření  $f = 0.07$ , resp. 0.2 je ve středu zkušebnímu tělesu - disku, kde lze očekávat jeho protržení, viz obr. 4, resp. na poloměru cca 0.6 mm, kde je rovněž patrné lokální zmenšení tloušťky disku, viz obr. 9. Výsledky simulace imperfekcí zatěžovacího přípravku SPT ukazují na možné příčiny vzniku odchylek výsledků simulace a experimentu.



Obr. 8 Vliv tření,  
Fig. 8 Friction effect

ke studiu závislosti výsledků SPT na vlastnostech materiálu a vývoji přesnějších metodik vyhodnocování výsledků SMP.

#### 4. Závěr



Obr. 9 Napětí HMH na konci SPT- $f=0,2$   
Fig. 9 Stress HMH on the SPT end- $f=0,2$

Odchylky geometrie zatěžovacího přípravku, disků zkušebních těles a odchylky pracovních postupů nepříjemně ovlivňují výsledky SPT. Uvážíme-li, že hlavní účel SPT spočívá v získání podkladů pro predikci dalšího chování stávajících konstrukcí z hlediska jejich integrity, je nutné použít všech dostupných prostředků k zajištění správnosti a reprodukovatelnosti výsledků SPT. Účinným prostředkem se jeví simulace SPT počítačem, kterou lze použít

Skutečný tahový diagram a závislost skutečného napětí na plastické deformace lze stanovit z dat získaných z tahové zkoušky s kruhovým průřezem. Nejmenší možný rozsah dat umožňující stanovit skutečný tahový diagram oceli zahrnuje napětí a deformace na smluvní mezi kluzu, na mezi pevnosti a při lomu. Výsledky simulace tahové zkoušky a „small punch test“ dobře přiléhají k výsledkům reálných zkoušek. Při větších požadavcích na správnost odhadu parametrů skutečného tahového diagramu se doporučuje smluvní tahový diagram modifikovat s využitím simulace tahových zkoušek. Sledované imperfekce zatěžovacího přípravku způsobují posunutí zatěžovacího diagramu SPT

směrem k menším hodnotám síly. Největší vliv na snížení zatěžovací křivky v počátečním stádiu SPT má odchylka od rovnoběžnosti lisovnice. Obdobné výsledky lze očekávat v případě zkušebních vzorků, pokud jejich plochy vykazují nerovnoběžnost v řádu setin mm. Srovnání výsledků experimentů a simulace SPT ukazuje na vliv možných geometrických odchylek přípravku od výkresové dokumentace a vliv náhodných odchylek utahovací síly a geometrie zkušebních vzorků. Účinným prostředkem identifikace systematických a náhodných chyb výsledků se jeví simulace SPT počítačem, kterou lze rovněž použít ke studiu kauzálních vztahů výsledků SPT a vlastností materiálu.

## 5. Použité podklady

1. LAM, P., S. – MORGAN, M., J.: Tritium reservoir structural performance prediction, WSRC-Tr-2005-00251, Savannah River National Laboratory, WSRC, Aiken, SC, 2005
2. BOŘKOVEC, J.: Výpočtové modely tvárného porušování kovů v simulaci technologických procesů, Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2842/2006/G1, ÚMTMB, VUT Brno, 2006
3. ČSN EN ISO 6892 Kovové materiály-Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
4. KLESNIL, M. – LUKÁŠ, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Praha 1975, ACADEMIA
5. Tensile testing, edited by Davis, J., R., ASM International, 2004
6. Handbook of workability and process design, edited by Dieter G., E., Kuhn H., A. and Semiatin S., L., ASM International, 2003
7. DOWLING, N. E.: Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
8. KUPČA, L. – BŘEZINA, M. – PETZOVÁ, J. – BALÁK, M.: Evaluation of the reactor pressure vessel material properties degradation due to the irradiation by SPT method, 1st International Conference SSTT, Otrava, August 31-September 2, 2010
9. KUPČA, L. – BŘEZINA, M.: Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkových zariadení pri hodnotení vlastností materiálov, Chem. Listy 105, s167-s170 (2011)
10. ŠŤASTNÝ, R. – PAVLÍK, V.: Application of SPT in CEZ, 1st International Conference SSTT, Otrava, August 31-September 2, 2010
11. PATHAK at al.: Influence of key parameters on SPT result, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 16, December 2009, pp. 385-389
12. HŮLKA, J. – KUBÍK, P – PETRUŠKA, J.: Sensitivity Analysis of small punch test, 18th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2012, Svratka, May 14-17, 2012,
13. ČMAKAL, J. – HORVÁTH, L. – CHMELA, T. – SKLENIČKA, V.: The influence of initial deformation on structure and mechanical properties of P92 steel, METAL 2010, Rožnov pod Radhoštěm, 2010
14. KANTA, V.: Přípravek na zkoušky protlačováním (Small punch test), Výkresová dokumentace, Škoda Výzkum s.r.o., 2005

15. [www.redhill-balls.cz](http://www.redhill-balls.cz)
16. KOULA, V. – SLUNÉČKO, T. – VOLÁK, J.: Nепublikované výsledky měření:
17. Protocol -07.06.2011, VZÚ Plzeň, 2012

Poštovní adresy:

**Miroslav VARNER**

ČKD Blansko Engineering a.s..  
Čapkova 2357/5  
64 801 Blansko

**Václav KOULA**

DAKEL ZD Rpety  
Ohrobecká 408/3  
142 00 Praha 4

**Josef VOLÁK**

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.  
Tylova 1581/46  
301 00 Plzeň

**PAPERS AFTER DEADLINE,  
ABSTRACTS AND PAPERS OUT  
OF INSTRUCTIONS FOR AUTHORS**





## APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION FOR THIN LAYER MECHANICAL TOUGHNESS EVALUATION VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE K VYHODNOCOVÁNÍ MECHANICKÉ ODOLNOSTI TENKÝCH VRSTEV

Petr Boháč<sup>1\*</sup>, Jan Tomáščík<sup>2</sup>, Václav Koula<sup>3</sup>, Martin Dráb<sup>4</sup>, Lubomír Jastrabík<sup>4</sup>

<sup>1)</sup> Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

<sup>2)</sup> SLO UPOL a FZÚ AV ČR, tř. 17. listopadu 50a, 779 00 Olomouc

<sup>3)</sup> ZD Rpety - Dakel, Ohrobecká 408/3, 142 00 Praha 4

<sup>4)</sup> Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze, Trojanova 13, 120 00 Praha 2

<sup>\*)</sup> [bohac@fzu.cz](mailto:bohac@fzu.cz)

### Abstrakt

*Tenké vrstvy se deponují jako funkční povlak na součástky. V provozu tyto povlaky mají vylepšovat nebo pozměňovat povrchové vlastnosti materiálu součástky, případně sloužit jako protektivní tribologické vrstvy s dostatečnou nosností, odolností proti opotřebením, případně s dobrými kluznými vlastnostmi. Omezujícím faktorem jejich aplikace je jejich adheze k podložce. Scratch test (vrypová zkouška) je laboratorní metoda k vyšetřování jejich adheze a mechanické odolnosti. Tato metoda do určité míry simuluje mechanismus abrazivního opotřebením. Výsledky testu se vyhodnocují především mikroskopickým zkoumáním deformací a mikrotrhlin v rýze na povrchu materiálu.*

*Ne vratné deformace (plastické nebo křehký lom), které vznikají během scratch testu generují akustickou emisi (AE). Simultánním snímáním a záznamem vzrůstající hloubky penetrace se vzrůstající zátěžnou silou na nanotesteru NT600 (Micro Materials, Ltd.) a tím generované AE (zaznamenané pomocí analyzátoru IPL-DAKEL) se pro každý test obdrží soubory dat, v nichž je uložen celý průběh experimentu a příslušná AE. Pomocí vhodného software se pak může libovolněkrát (tzn. nezávisle na době, místě a prostředí experimentu) zpracovávat soubor AE za účelem izolovat jednotlivé akustické události, resp. hity, odpovídající vzniku trhlinky ve zkoumaném vzorku. Těmto hitům lze pak ze simultánního záznamu z NT600 přiřadit velikost okamžité zátěžné síly, která pak slouží jako míra ocenění mechanické odolnosti při scratch testu. Ačkoliv po provedení experimentu, jedná se o jakousi „in situ“ metodu zkoumání odezvy materiálu při prováděném testu.*

*Metoda je použitelná především pro křehké vrstvy. Může odhalit porušení koheze (vnitřní struktury materiálu) – na povrchu i uvnitř nebo adheze k podložce. Je vhodná i pro výzkum transparentních tenkých vrstev, tj. i v případech kdy mikroskopické sledování rýhy selhává. Ověřovací experimenty a jejich vyhodnocení jsou prezentovány.*

**Klíčová slova:** akustická emise, adheze, mechanická odolnost, scratch test

### Abstract

*The thin films are used as a functional coating of components. These coatings should improve or modify the surface properties of the component materials in operation, or they serve as protective tribological films with sufficient load bearing capacity, wear hardness and with good sliding properties, alternatively. The limiting factor of their application is the adhesion to substrate. The laboratory method to investigation of their adhesion and mechanical toughness is the scratch test. This method emulates a mechanism of the abrasive wear in a way. Evaluation of the test results is mainly performed by microscopic investigation of deformations and micro cracks in the scratch track.*

The thin films are used as a functional coating of components. These coatings should improve or modify the surface properties of the component materials in operation, or they serve as protective tribological films with sufficient load bearing capacity, wear hardness and with good sliding properties, alternatively. The limiting factor of their application is the adhesion to substrate. The laboratory method to investigation of their adhesion and mechanical toughness is the scratch test. This method emulates a mechanism of the abrasive wear in a way. Evaluation of the test results is mainly performed by microscopic investigation of deformations and micro cracks in the scratch track.

Irreversible deformations (either plastic or brittle fracture), which arise during scratch test generate an acoustic emission (AE). By simultaneous scanning and recording of the increasing depth of penetration with increasing load of the stylus in the nanotester NT600 (Micro Materials, Ltd.) and by this way generated AE (recorded by IPL-DAKEL analyzer) one can obtain data files, which contain a course of the whole experiment including AE. Using an appropriate software one can any times (i.e. independently on time, place and environment of the experiment) process data of AE and from particular events calculate hits corresponding with inception of a micro cracks in the investigated sample. They can be then matched with magnitude of the loading at the same time. The method is like „in situ“ method of the scratch test.

The method can be mainly used by investigation of brittle films. It can reveal rupture of cohesion either on the surface or inside of material, or rupture of adhesion. The method is also possible for investigation of the transparent films when the microscopic scanning is failing. They are presented results of testing experiments.

**Key words:** acoustic emission, adhesion, mechanical toughness, scratch test

## 1. Úvod

Vrstvy se deponují jako funkční povlak na základní materiál (substrát) z různých důvodů, zejména z důvodu ochrany jeho povrchu (protektivní vrstvy) nebo z důvodu zlepšení jeho mechanických (únosnost), resp. tribologických vlastností (kluzné vlastnosti, ořezuvzdornost). Při depozici a následné aplikaci vrstev a povlaků je jednou z nejdůležitějších vlastností jejich přilnavost (adheze) k substrátu. Podle použité metody depozice se materiál vrstvy mnohdy nachází v metastabilním stavu v určitém rozsahu provozních podmínek. Situaci komplikuje též to, že se „nutí“ ke koexistenci materiály mnohdy velmi odlišných fyzikálních vlastností, např. různé teplotní roztažnosti. Proto z hlediska mechanické odolnosti je důležitý výzkum adheze v systému substrát – vrstva.

Elementární adheze, definovaná jako silová vazba mezi atomy vrstvy a substrátu, se měří metodami založenými na nukleaci lamerálních defektů, tj. na trhání těchto vazeb. Makroskopická adheze se pak může chápat jako součet těchto atomárních sil. V praxi je adheze měřena pomocí síly aplikované na systém substrát – vrstva. Velikost adheze se stanoví různými metodami, z nichž významné jsou v následující Tab. 1:

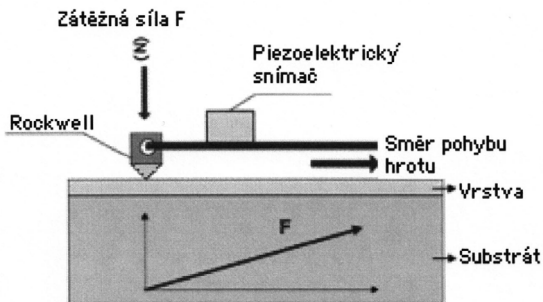
Tab. 1 Experimentální metody pro určení adheze  
Tab. 1 Experimental methods for determination of adhesion

Mechanické		Nemechanické	
<i>Kvalitativní</i>	<i>Kvantitativní</i>		
odrhávání lepicí pásky	přímá odtrhovací metoda	rtg. difrakce	termální metody
abrazní test	odlupování účinkem záření laseru		nukleární test
ohybový a tahový test	indentační test		kapacitní test
	testování na ultracentrifuze		
	scratch test		

Specifika a přednosti nebo nevýhody uvedených metod jsou diskutovány v článku [1].

## 2. Scratch test

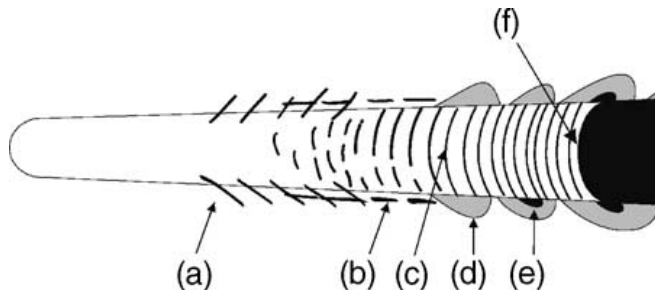
Metoda spočívá v plynulém zatěžování diamantového hrotu (rydla), který se pohybuje ve směru rovnoběžném s povrchem vrstvy. Hrot při tom vytváří ve vrstvě stále hlubší stopu. Standardně se používá kuželový hrot Rockwell „C“ s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a poloměrem zaoblení špičky  $200\ \mu\text{m}$ . Schematicky je scratch test znázorněn na obr. č. 1. Je kombinací indentace (vnikání hrotu ve směru zvyšující se zátěžné síly) a rovnoměrného pohybu podél povrchu vzorku.



Obr. 1 Schema scratch testu  
Fig. 1 Schema of the scratch test

Napětí v okolí vnikajícího hrotu po dosažení kritické hodnoty generuje trvalou (plastickou) deformaci ve vrstvě. Ta je pozorována v měkkých vrstvěch. V tvrdých vrstvěch se objevují trhliny (křehké poškození) šířící se od povrchu, které mohou vést k narušení soudržnosti uvnitř vrstvy (porušení koheze), mohou pronikat až k rozhraní se substrátem a v závěrečné fázi může dojít až k úplnému odloupení povlaku od substrátu (porušení adheze), případně i destrukci celého vzorku. Reálné poškození vzorku je kombinací tvárného a křehkého mechanismu poškození podle aktuálních mechanických vlastností vrstvy, rozhraní se substrátem i samotného substrátu.

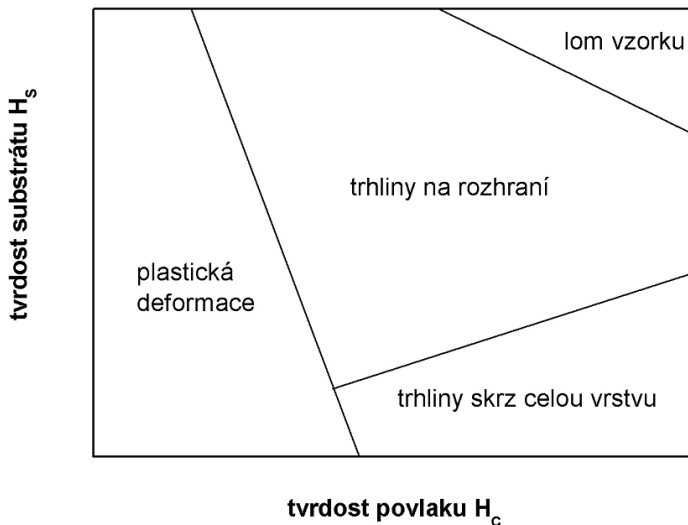
Ve vrstvě schopné určité plastické deformace lze v rýze za plynule zatěžovaným hrotem pomocí mikroskopu nalézt různé druhy nevratného poškození, jak je schematicky naznačeno v obr. č. 2: od plastické deformace povrchu (a), šikmých trhlínky (b), paralelní a příčné obloukové trhliny (c) až k odštěpávání vrstvy (d), jejímu odloupávání (e) až k úplnému obnažení substrátu v celé šířce rýhy (f).



Obr. 2 Schematická porušení povrchu vrstvy po scratch testu  
Fig. 2 Schematic damages of the film after scratch test

Výsledky scratch testu pro systém substrát – vrstva jsou ovlivněny mnoha parametry, které je nutno při interpretaci vzít v úvahu. Kombinace jejich vlastností a kvality jejich vazby na společném rozhraní jsou mezi prvními. Během testu jsou generována napětí tahová i tlaková, což způsobuje složitější mechanismy a tvary poškození než jsou znázorněna v obr. 2. Druhy poškození pro různé kombinace substrátu a vrstvy a kombinace tahových nebo tlakových napětí byly modelově analyzovány a souhrnně diskutovány v publikacích [2, 3]. Teoretický závěr, že materiály s tendencí k tvárným poruchám snesou vyšší kritická zatížení obecně souhlasí s pozorováními. Reálná poškození vrstev po scratch testu jsou složitější než publikované modelové typy a vyskytují se v různých kombinacích. Záleží na tom, zda poškození vznikají převážně křehkým nebo tvárným mechanismem. V případě křehkého je poškození mnohem větší než poškození tvárné. Ne všechna poškození závisí na adhezi vrstvy k substrátu. Adheze je porušena hlavně odštěpováním a vrásněním pro tvárné substráty, mixem obou a elastickým zotavováním pro mnohem křehčí substráty. Obecně lze však konstatovat, že pokud se vyskytne odštěpování na rozhraní, trhliny mají tendenci šířit se směrem k povrchu vrstvy, což vede k velkoplošnému poškození vrstvy.

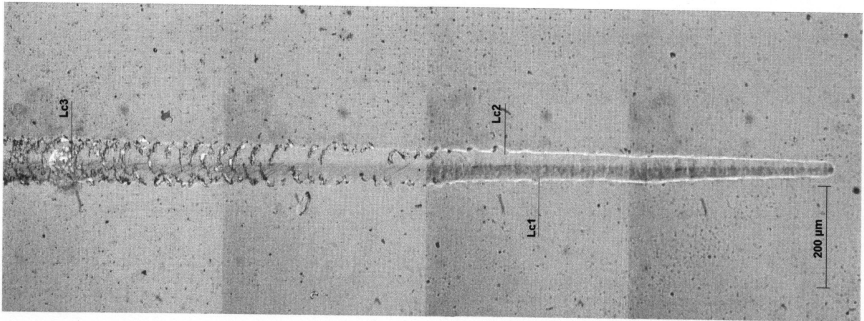
Rozsah a charakter poškození je závislý na mnoha faktorech. Kromě charakteristik experimentálního zařízení to jsou geometrické vlastnosti systému substrát-vrstva jako tloušťka vrstvy, drsnost jejího povrchu a radius zatěžovaného hrotu; experimentální parametry jako paralelní relativní rychlost hrotu a vzorku, rychlost normálového zatěžování hrotu a maximální zátěžná síla. Dále to jsou vlastnosti systému substrát-vrstva jako teplotní součinitel, mikrostruktura a vnitřní pnutí, moduly pružnosti a tvrdosti obou složek, koeficient tření mezi hrotem a povrchem vrstvy a vliv prostředí. Dominující poškození při scratch testu v závislosti na tvrdosti substrátu a vrstvy znázorňuje obr. č. 3.



Obr. 3 Dominantní poškození v závislosti na tvrdosti substrátu a povlaku [4]  
 Fig. 3 Dominant damage depending on the hardness of the substrate and coating [4]

Pro kvantifikaci výsledků scratch testů byla navržena tři kritická zatížení hrotu  $L_{c1}$ ,  $L_{c2}$  a  $L_{c3}$  [5] pro vrstvy typu DLC (diamond like coating), jimž na morfologii rýhy odpovídají počátky tří oblastí různých typů poškození vrstvy: kritická normálová síla  $L_{c1}$  odpovídá počátku oblasti do tvaru „V“ tvarovaných trhlinek na bocích rýhy – viz (a);  $L_{c2}$  odpovídá počátku oblasti do tvaru „V“ tvarovaných trhlinek, které jsou provázeny odlupováním třetí vrstvy od podložky na bocích rýhy – viz (e);  $L_{c3}$  odpovídá počátku oblasti s velkým odlupováním vrstvy (velké šupiny) od podložky – viz (f) na obr. č. 2. Tudíž za porušení adheze je možné považovat  $L_{c3}$ , možná i  $L_{c2}$ . Někteří dřívější autoři [např. 6,7] definují jen  $L_C$ , resp.  $L_A$  jako kritická zatížení při objevení první trhlinky, resp. při porušení adheze.

Z panoramatického snímku je zřejmé, že přesnost stanovení polohy  $L_{c1}$  až  $L_{c3}$  je značně subjektivní - obr. č. 4 (rýha ve vrstvě a-C:Si na ocelovém substrátu. Maximální normálová síla 80 N [8]). Při nižších maximálních zatížení (řádu mN) a též menších poloměrech křivosti hrotů je pak nutné ke studiu rýhy používat velkých zvětšení, nejlépe snímků SEM (scanning electron microscope). Ještě obtížnější kvantifikace je pro rýhy, v nichž nejsou jednotlivé oblasti poškození zřetelně vyvinuty nebo pokud se jedná o transparentní vrstvu a nedostatečný kontrast snímků. Navíc ne vždy počáteční trhlinky pronikají na povrch, zejména pokud se jedná o kohezní poškození.



*Obr. 4 Příklad vyhodnocení rýhy ve vrstvě a-C:Si na ocelovém substrátu [8]  
Fig. 4 Example of evaluation in the track on surface of a-C:Si film on steel [8]*

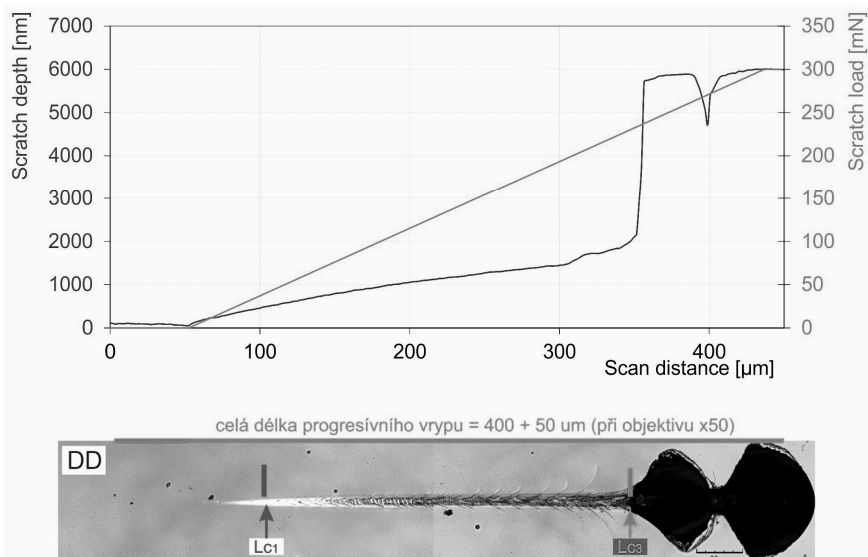
Další užívanou vyhodnocovací metodou je měření třecí síly, případně DSI techniky (depth sensing indentation), které simultánně k průběhu scratch testu zaznamenávají skokovou změnu koeficientu tření, respektive skokovou změnu hloubky penetrace hrotu [9, 10]. Tyto metody však jsou méně citlivé na vznik počátečních trhlinek (meze  $L_{c1}$  a  $L_{c2}$ ) nebo též ke koheznímu poškození.

### 3. Akustická emise

Mechanické jevy v namáhaných konstrukcích a materiálech jsou obvykle provázeny chvěním, které je možné detekovat a snímat v ultrazvukové oblasti frekvencí 20 kHz až 1 MHz jako akustickou emisi (AE). Podle definice je událost AE fyzikální jev, který způsobuje vznik akustické emise (např. posun dislokace, dynamický vznik mikrotrhliny, klepnutí částice). Jedná se o jednorázový dynamický proces, při kterém dojde k rychlému uvolnění určitého množství energie. Při indentaci nebo scratch testu vznikají neelastické deformace, přičemž kritický je okamžik vzniku mikrotrhliny, kdy dojde k náhlému uvolnění určitého množství naakumulované deformační energie. Při zpracování signálu praskavé AE se vyhodnocují jednotlivé události samostatně [11]. Sledování pouhých akustických spekter

je ale k tomu nedostačující. Je nutné tato spektra zaznamenat, zpracovat a vyhodnotit. Pro zpracování spekter byly použity různé metody. Např. rychlá Fourierova transformace nebo vlnová transformace. K vyhodnocení se pak používají grafy akustické energie a kumulativní akustické energie v závislosti na relativní pozici v délce rýhy. Jednotlivé emisní události jsou pak mnohem zřetelnější, přehlednější a vhodnější k interpretaci [12 až 14].

Nanoindentační zařízení NT600 umožňuje provádět programově řízené scratch testy. Po adaptaci k analyzátoru DAKEL-IPL a s využitím software fy DAKEL byly realizovány záznamy a vyhodnocení AE generované při ověřovacích scratch testech tenkých vrstev, viz. např. obr. 5. Zařízení zajišťuje relativní pohyb vzorku vůči hrotu v longitudálním směru a provádí též přesný DSI (depth sensing indentation) záznam velikosti zátěžné normálové síly na hrot a hloubku jeho penetrace během scratch testu. Doba trvání testu je od nulového do maximálního zatížení hrotu. Během scratch testu dochází v blízkosti hrotu k tvárným a křehkým deformacím zkoumaného materiálu.



Acoustic emission

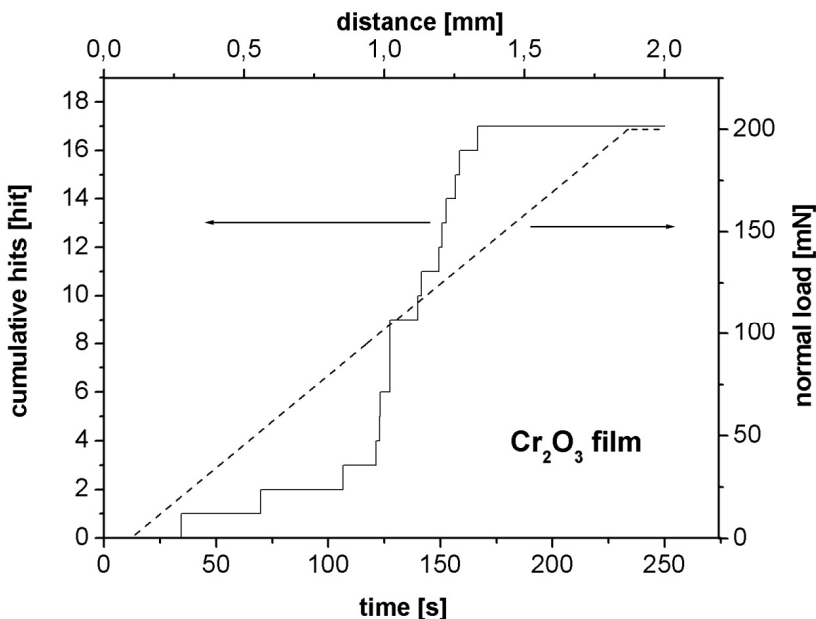
Channel 4 (40dB)

*Obr. 5 Záznam průběhu scratch testu na NT600, mikroskopický snímek stopy a synchronní záznam AE (shora)*

*Fig. 5 Record of the scratch test from NT600, the track from microscope and synchronous record of AE*

Emisní událost na záznamu AE odpovídá prvnímu porušení adheze vrstvy  $\text{TiO}_2$  na skle -  $\text{Lc}_3$  na obr. č. 5. Záznam AE pořízený synchronně k poloze hrotu v podélném směru umožňuje nalézt i odpovídající zátěžnou sílu na hrot, resp. mezní zatížení  $\text{Lc}_1$ , při němž se v zatěžované vrstvě začínají generovat první trhlinky. Přitom analýza AE se provádí už zcela mimo experiment a je ji možné libovolněkrát opakovat při jiných hodnotách vstupních parametrů.

AE zaznamenaná při testu vrstvy  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  na skle, zpracovaná do grafu kumulativních hitů umožnila nalézt první hit odpovídající vzniku první trhlinky;  $Lc_1 \sim 4 \text{ mN}$  – obr. č. 6.



Obr. 6 Vyhodnocení AE pomocí kumulativních hitů  
 Fig. 6 Evaluation of AE by means of cumulative hits

Při běžném měření akustické emise máme několik snímačů s fixní, předem známou polohou a poloha vzniku emisní události se určuje triangulací z časových posunů záznamu události na jednotlivých snímačích. Emisní měření při scratch testech je založeno na úplně jiném přístupu. Zde se používá pouze jeden snímač. Emise je generována třením špičky hrotu a současnou deformací testovaného vzorku v okolí hrotu. Poloha události vůči dráze vrypu se určuje z času od počátku vrypu. Je tedy velmi kritické, aby měření začínalo vždy přesně na počátku každého vrypu a to s takovou přesností, s jakou pak bude možné určit i polohu každé události.

Pro spolupráci testovací aparatury NT600 a akusticko-emisní měřící aparatury DAKEL IPL bylo tedy potřeba speciálně upravit software DAST fy DAKEL pro měření akustické emise tak, aby bylo možné měření akustické emise spustit automaticky se začátkem a ukončit taktéž automaticky na konci každého scratch testu, aby s danou přesností bylo možné určit polohu případných taktéž zaznamenaných emisních událostí (generovaných nevratnými poškozeními vzorku), resp. změn signálu či spektra a jejich lokalizaci podél dráhy hrotu při testu. Spouštění a zastavování měření je tak prováděno na základě přídatného vstupního signálu z testovací aparatury NT600, signalizujícího přitlačení hrotu k vzorku a díky tomu je pak možno automaticky cyklovat a opakovat jeden scratch test za druhým bez nutnosti zásahu operátora a každý test je vždy správně automaticky zaznamenan.

Aparatura DAKEL IPL zaznamená kontinuální emisní signál podél celého vrypu synchronně k veličinám získaným z NT600, tj. okamžitou přítláčnou silou a odpovídající hloubkou průniku. Signál AE pak lze zpracovat buď analýzou emisních událostí, případně analýzou celého kontinuálně naměřeného emisního signálu v přímé či frekvenční oblasti (spektra). Díky automatizaci a přesnosti celého měření lze pak výsledky jednotlivých měření vzájemně porovnávat.

#### **4. Závěr**

Vyhodnocování záznamu AE libovolněkrát nezávisle na vzorku, místě a době měření umožňuje co nejpečlivěji nalézt první emisní událost (hit), což vede k co nejpřesnějšímu stanovení kritického zatížení charakterizující únosnost systému substrát – tenká vrstva při scratch testu. Metoda je perspektivní pro testy materiálů, u nichž se namáháním generuje křehký lom (trhlinky). Je aplikovatelná pro netransparentní i transparentní vrstvy.

#### **5. Literatura**

- [1] Rickerby D. S., Surf. Coat. Technol., 36 (1988) 541.
- [2] Thouless M. D., Thin Solid Films, 181 (1989) 397.
- [3] Bull S. J., Surf. Coat. Technol., 50 (1991) 25.
- [4] Bull S. J., Berasetegui E. G., Tribol. Int. 39 (2006) 99.
- [5] Jacobs R., Meneve J., Dyson G., et al., Surf. Coat. Technol., 174-175 (2003) 1008.
- [6] Perry A. J., Thin Solid Films, 107 (1983) 167.
- [7] Steinmann P.A., Tardy Y., Hintermann H. E, Thin Solid Films, 154 (1987) 333.
- [8] Sosnová M., Gomelská J., Bláhová O., Skálová J., Boháč P., Zborník Vrstvy a Povlaky, Rožnov pod Radhoštěm, 7. – 8. oktobra 2004, 73.
- [9] Micro Materials Nano Test User Manual (2003).
- [10] Wu F.-B., Duh J.-G., Surf. Coat. Technol., 162 (2002) 106.
- [11] Charvát V., Konstrukce přípravku pro ověřování snimačů akustické emise, Diplom. práce, FSI VUT Brno (2011)
- [12] Piotrkowski R., Gallego A., Castro E., et al., NDT&E Int., 38 (2005) 260.
- [13] Galego A., Gil J. F., Vico J. M., et al., Scripta Mater., 52 (2005) 1069.
- [14] Galego A., Gil J. F., Castro E., Piotrkowski R., Surf. Coat. Technol., 201 (2007) 4743.

#### **Poděkování**

Tato práce byla realizována s finanční podporou TAČR, projektu č. TA03010743





## **KONTROLY METODOU IRIS PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI INSPECTION BY MEANS OF IRIS TECHNIQUE PRACTICE EXPERIENCE**

**Miloslav PROCHÁZKA, Martin PROCHÁZKA, Roman BENEŠ**  
TEDIKO, s.r.o.  
Contact e-mail: prochazka@tediko.cz

### **Abstrakt**

*Při měření teplosměnných trubek výměníků se používají podle druhu materiálu a konstrukčního provedení především elektromagnetické metody jako ET a RFT či metody magnetické jako MFL. Tyto metody ale nemusí být vždy použitelné jak z důvodu použitého materiálu a konfigurace tak v případě trubek o větším průměru a tloušťce stěny. Zde je k dispozici metoda IRIS – Internal Rotary Inspection System. V článku je ukázáno praktické použití včetně úpravy zařízení, konstrukce a výroby tažného zařízení. Diskutovány jsou problémy spojené s měřením, např. vlivem bublin ve vodě apod.*

**Klíčová slova:** *inspekce trubek výměníků, zkoušení ultrazvukem, IRIS, internal rotary inspection system, tahač*

### **Abstract**

*Electromagnetic methods like ET and RFT or magnetic method MFL are used in case of heat exchanger tubes inspection depending on material and design of heat exchanger. But these methods are not relevant in all cases – the reason is used material and configuration or bigger diameter and wall thickness tubes. IRIS method (Internal Rotary Inspection System) is possible to use in this case. Practical use of IRIS is described, device redesigning, construction and manufacturing of the push/puller included. Inspection problems are discussed, bubbles influence etc.*

**Key words:** *heat exchanger tubes´ inspection, ultrasonic testing, IRIS, internal rotary inspection system, push/puller*

### **1. Úvod**

Diagnostika stavu trubek tepelných výměníků není pouhé měření metodou vířivých proudů tak, jako tomu bylo v minulosti. Rozmanitost materiálů, rozměrů a provedení jak trubek samotných, tak celých trubkových svazků, které tvoří spolu s nádobou výměník, je obrovská. Metoda vířivých proudů pokrývá jen část, i když podstatnou. Další části pokrývají metody RFT a MFL. Do trubek je také možné nahlížet endoskopy či kamerovými systémy. Avšak, co dále? Metoda ET je sice ze všech uvedených metod nej přesnější a nejflexibilnější, ale nelze v podstatě použít na magnetických materiálech, metoda RFT používaná pro magnetické materiály

je sice velmi přesná, avšak je určená pro především pro vady korozního a erozního původu. Metoda MFL je sice jedinou možnou v případě trubek vybavených žebry pro zvýšení teplosměnné plochy, avšak nese si s sebou všechny nedostatky magnetických metod – vysokou citlivost ke všemu, tzn. i k projevům, které nejsou vadami a neumožňuje přesné hodnocení hloubky vad v reálných podmínkách – co funguje perfektně na standardech, to v reálu často způsobuje chmury na čelech vyhodnocovačů.

Novější metodou je metoda akustická, ta však má také své problémy. Všechny výše uvedené metody hodnotí vady ve stěně trubky a ET s RFT bez problémů i vady z protilehlého povrchu. Všechny však potřebují vyčištěné trubky. Akustická metoda není schopna odhadnout vady, které nekomunikují s vnitřním povrchem a navíc je též výrazně závislá na čistotě vnitřního povrchu trubek a je schopna zjistit ucpání či zanesení trubek. Na čistých trubkách funguje bez problémů, ale například v chemickém, petrochemickém a rafinérském průmyslu nelze operovat s výsledkem, jak je která trubka zanesená – to, že jsou trubky zanesené provozovatelé ví a takovouto informaci nepotřebují, potřebují vědět, jak dlouho ještě mohou svazek provozovat. To znamená, potřebují získat údaj o životnosti.

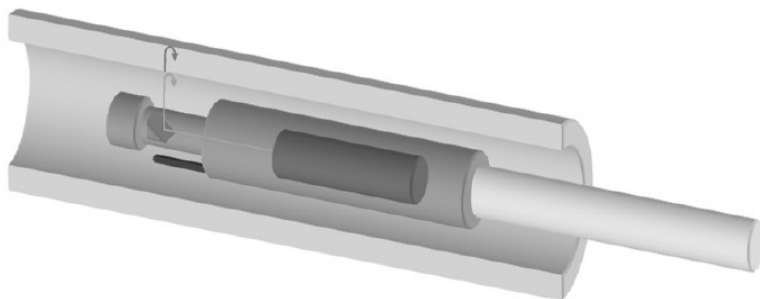
Poslední – zatím – metodou je metoda ultrazvuková – IRIS (Internal Rotary Inspection System).

## 2. IRIS – popis metody

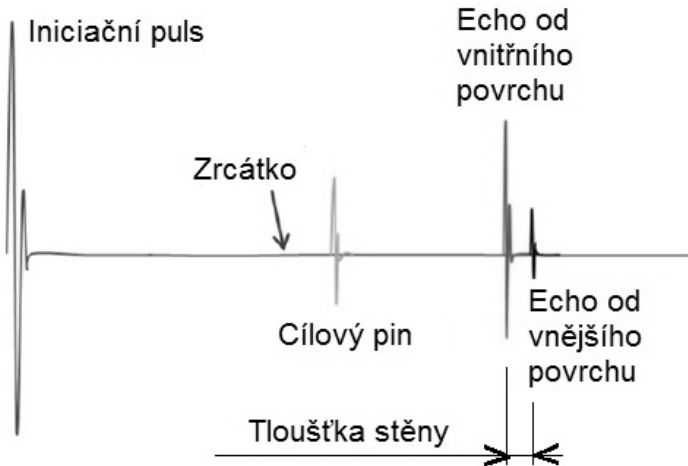
IRIS je posuvný rotační ultrazvukový systém, kdy samotná sonda a její nosič sice nerotuje, rotuje však zrcátko, přes které je ultrazvukový paprsek směřován na stěnu trubky, kterou skenuje v rozsahu 100%.

Značku IRIS nelze považovat za název zařízení nějakého výrobce, protože těchto systémů existuje více, přístup k řešení je však velmi podobný. Naše společnost používá víceúčelová zařízení umožňující provádění kontrol několika metodami, v tomto případě ET/RFT/MFL/IRIS/UT. Výhodou je jedno zařízení a jeden software pro nastavování, kontrolu, záznam i hodnocení.

Metoda potřebuje bezpodmínečně použití enkodéru, protože se provádí 100% skenování trubky a je tedy nutné každému kontrolovanému bodu přiřadit jak souřadnici obvodovou tak souřadnici podélnou, tedy podél délky trubky. Při zajištění pohybu trubkou a právě použití enkodéru je možné snímat rozvinutý obraz stěny trubky, bez něho ztrácí kontrola smysl. Na následujícím obrázku je základní princip hlavice IRIS.



Ultrazukový svazek je vysílán z měniče ve směru osy kontrolované trubky a na zrcátku se láme pod úhlem  $45^{\circ}$  a dopadá kolmo na vnitřní stěnu trubky. Část energie se odráží zpět od vnitřní stěny, část prochází stěnou a odráží se zpět od vnější stěny trubky. Tím, že zrcátko rotuje kolem své osy, je zajištěno proskenování  $360^{\circ}$  obvodu. Jednotlivé otáčky se od sebe odlišují pomocí pevného pinu tvaru kovové tyčky zabudované v hlavici. Pin při každé otočce zrcátka protne jedenkrát dráhu ultrazvuku, tím je zajištěno odlišení jednotlivých obvodových skenů od sebe. Níže je ukázán průběh ech při skenování.



Při každé otáčce zrcátka se zaznamenává na 150 výše uvedených průběhů signálu, tzn. ukládá se informace o poloze echa jak od vnitřního tak od vnějšího povrchu. Zároveň se registruje i echo od pevného pinu. Tím je k dispozici informace o ukončení jedné otáčky. Počet otáček je měnitelný a je velmi vysoký, kolem 2500 otáček za minutu (40 až 50 otáček za vteřinu).

Při posouvání hlavice IRIS trubkou jsou tedy získávány informace o poloze vnějšího a vnitřního povrchu trubky a zároveň jsou přiděleny příslušné otáčky. Posunujeme-li hlavici IRIS trubkou a máme informaci o poloze hlavice, máme k dispozici údaje, ze kterých lze rekonstruovat průběh změn tloušťky stěny trubky po její délce a jejím obvodu.

Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že při kontrole je nezbytné používat enkodér pohybu, pokud chceme získat relevantní a přehledné výsledky. Dále je zřejmé, že rychlost posuvu musí být taková, aby byla celá trubka prozkoušená a že z hlediska principů zkoušení bude rychlost posuvu hlavice IRIS vůči ostatním metodám malá, na úrovni max. 20-30 mm/s, což je o jeden až dva řády méně než u ostatních metod jako jsou ET, MFL a RFT.

### 3. Realizace metody IRIS

Název IRIS je obecně používán pro ultrazukové inspekční systémy s vnitřním rotujícím ultrazukovým svazkem. Tyto systémy jsou vyráběny a používány mnoha společnostmi a přes stejný princip se liší detailním provedením a softwarovým zpracováním. Dále uvedené způsoby realizace a příklady jsou založeny na našich zkušenostech se zařízením vyráběným společností Olympus. Zkušenosti jsou ale většinou obecně přenositelné i pro ostatní zařízení.

Systém IRIS používáme v rámci komplexní diagnostiky teplosměnných trubek tepelných výměníků a to především pro ověřování nálezů jinými metodami. Celý komplex potom představuje měření metodami ET, ET-MB, RFT nebo MFL podle elektromagnetických vlastností materiálu, IRIS pro speciální měření a ověřování, VTP v rámci korozního posouzení stavu, podobně endoskopická inspekce metodou VTn a ověření tloušťky stěny UTT.

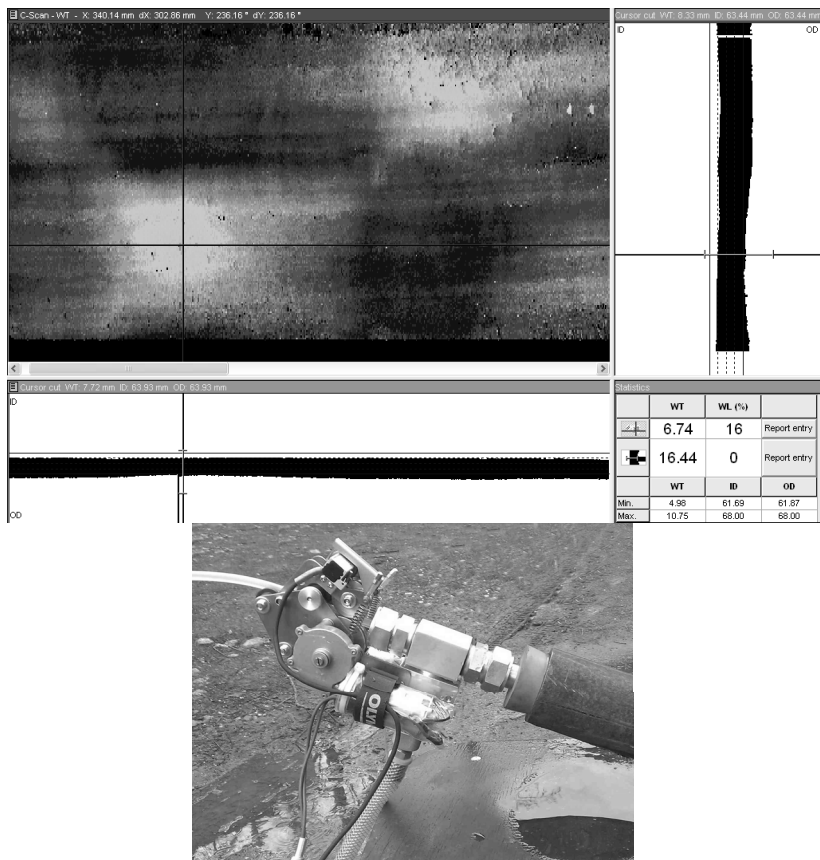
Modul IRIS je součástí univerzálního zařízení MS5800 obsahujícího zároveň i metody ET, RFT a MFL. Tím může jedna měřicí skupina kontrolovat různé teplosměnné trubky jedním základním zařízením a softwarem.



Při měření IRIS lze použít většinou frekvence od 10 MHz do 20 MHz. Rozsah vnitřních průměrů kontrolovaných trubek se u většiny zařízení pohybuje mezi cca 12 do 76 mm. Používaná rychlost pohybu hlavice je ale dost často menší, než je obecně udáváno a to z důvodů uvedených dále.

Na následujícím obrázku je hlavice IRIS systému vybavená rozpěrkami pro vystředění v trubce.

Vzhledem k pomalému pohybu hlavice není vhodné hlavicí pohybovat ručně (s výjimkou např. dohledávání vady či případného laborování) a proto je velmi vhodné zařízení vybavit tahačem, samozřejmě propojeným s enkodérem pohybu. Možných řešení je samozřejmě více, zde je uvedeno naše konstrukční řešení. Na obrázku je systém umožňující naplnění trubky vodou, pohon zrcátka a pohyb hlavice zároveň se zaznamenáváním její polohy. Přístroje a SW jsou samozřejmě provázány.



Příklad výsledku měření je uveden na následujícím obrázku. Na obrázku je vidět rozvinutý plášť jedné trubky, čím tmavší modrá barva, tím větší je tloušťka. Světlejší odstín znamená tloušťku menší – zeslabenou, nikoliv však výrazně. Souřadnicový kříž definuje polohu B-Scanu na pravé straně obrázku, který představuje tloušťku po obvodu trubky v daném místě (ve směru pohybu ultrazvukového svazku) a profil stěny trubky po délce trubky někdy též označovaný jako D-Scan pod rozvinutým pláštěm.

#### 4. Poznatky z použití metody IRIS při reálném měření

Metoda IRIS je metoda zajímavá především tím, že není závislá na materiálu trubek, zatímco metody ET, RFT a MFL nejsou z tohoto pohledu univerzální. Dále dává také skutečný obraz vady. Ne vše je ale to pravé ořechové, protože metoda má zároveň svá podstatná omezení a nečnosti.

Kladem metody IRIS je:

- zmapování až 100 % objemu materiálu trubky
- ocenění reálné změny tloušťky stěny a to nejen po délce ale i po obvodu
- relativně vysoká přesnost, větší než u ostatních metod, protože vychází s principů ultrazvukového zkoušení
- velmi dobré ocenění vad typu korozních a erozních úbytků a to z obou povrchů
- možnost kontrolovat v oblasti přepážek a za určitých podmínek i v oblasti trubkovnice
- při použití enkodéru a zajištění neprokluzování nosné trubice, lze místa skenovat i několikrát při pohybu sem a tam a software doplňuje případně vynechané body či je zpřesňuje

Záporem metody je:

- metoda je vysoce náchylná na stav vnitřního povrchu, úsady, nečistoty, pleny atd. vysoce omezují a až znemožňují kontrolu
- trubky musí být velmi čisté, nestačí úroveň čištění jako pro ET/MFL/RFT, čistota musí být nejlépe „kovová“ – tedy podobně jako při jiném zkoušení ultrazvukem
- zjišťované vady nejsou v žádném případě trhliny, ty nelze zjistit, metoda tedy slouží na vady charakteru plošného
- rychlost kontroly je velmi nízká, podstatně nižší než u metody ET a nižší než u metod MFL a RFT
- je třeba zajistit dostatek vody, která slouží jako vazební médium (jedná se vlastně o imerzi) tak jako pohonné médium pro zrcátko

Při samotné realizaci jsme se zaměřili na zkoumání poměrů v trubce při měření. Použití metody totiž není založeno na principu kup, instaluj a měř.

Ono vlastně žádné měření takto nefunguje, to jen zcela nesmyslné reklamy a propagační tažení výrobců a prodejců vytváří dojem, že vše je jasné, jednoduché – prostě „dolce vita“. Z toho pak plynou zcela neuvěřitelné nesmysly, tím spíše, že jen málokdo, kdo vyrábí a prodává, ví vůbec něco o reálném „životě“ a podmínkách měření. U IRIS je tomu jinak, protože o problematice měření je známo.

Stejně však jsme byli konfrontováni se skutečností ne příliš lichotivou. Metoda skýtá totiž ještě jedno úskalí a tou je médium. Není voda jako voda. Veškerá voda pře měřením prochází přes výkonný filtr, protože všechny nečistoty musí být odfiltrovány. Dále voda sama o sobě obsahuje rozpuštěné plyny. Nejméně plynů obsahuje voda např. ustátá či kondenzát. Ten však v 99 % na místě měření neexistuje. Proto je nutné používat různé prostředky, které omezují vylučování plynů a vznik bublin (každý, kdo provádí UT zkoušky snad jistě ví něco o rozhraní mezi prostředím a vlivem rozhraní na šíření ultrazvuku). Proto není například dobré přivádět studenější vodu do teplejšího prostředí.

Ač se zdá výše uvedený problém teoreticky jasný, prakticky je velmi těžko řešitelný a vyžaduje praktické zkušenosti jak s přípravou vody, tak s nastavením zařízení k měření.

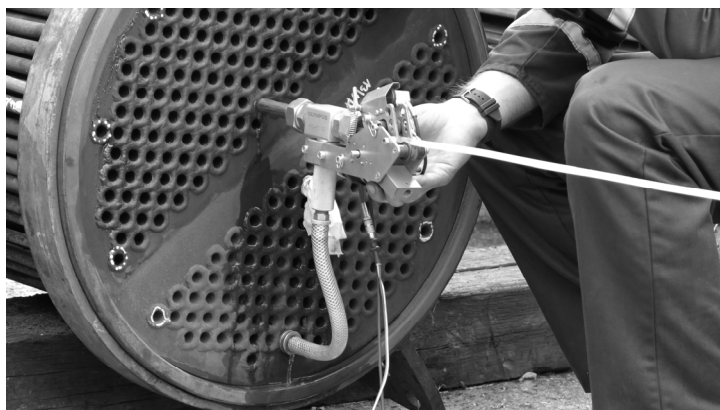
Bublinky mají tu nepříjemnou vlastnost, že se velmi dobře přichytávají na všechny povrchy, ty drsnější obzvlášť. Proč je tomu tak, to zde nebude vysvětlováno, ale ti, kteří absolvovali úspěšně získání certifikátu pro PT, by se mohli rozpomenout ....

Je dobré také podotknout, že vody je potřeba občas opravdu hodně. Například u trubky o vnitřním průměru kolem 60 mm a délce 10 m je to opravdu množství nemalé, protože pro kontrolu musí být trubka plně zavodněna a navíc je ještě nutná voda k pohonu zrcátka – koneckonců, můžete si to spočítat sami.

Na následujícím obrázku je vidět simulace měření v odpovídající trubce, včetně provizorního způsobu mechanického řešení odstranění bublinek. Zkoumáním poměrů v trubce při kontrole se nám podařilo vyřešit některé problémy, přesto však nelze prohlásit, že metoda IRIS je snadná. Při každé jednotlivé inspekci je potřeba v závislosti na rozměru trubek, vodě, která je k dispozici, kvalitě čištění, stavu vnitřního povrchu atd. vždy znovu nastavit měřicí zařízení právě pro daný konkrétní případ.

Na dalším obrázku je potom ukázka jednoho z provedených měření v reálných podmínkách. Prováděná měření byla realizována z důvodu ověření hloubky rozsahu vad nalezených při zkoušení metodou RFT v případě trubek zhotovených z uhlíkových ocelí.





## 5. Závěr

Metoda IRIS nám prokázala svoje opodstatnění, její zavedení a plné zvládnutí však představuje náročnou cestu aplikačního zkoušení. Příspěvek měl za úkol seznámit pouze se základními aspekty z důvodu omezeného prostoru a detailnější pojednání bude provedeno v rámci přednášky, kde je větší prostor pro obrazové, a především filmové, předvedení. Vše, co je v tomto příspěvku uváděno a prezentováno, vychází ze zkušenosti s těmito měřeními prováděnými společností TEDIKO, s.r.o. a jedná se o data pořízení při měření jejími specialisty s výjimkou obrázku principů a tvaru hlavice IRIS





## STUDIUM VYSOKOCYKLOVÉHO CHOVÁNÍ Cr-Ni-Mo-V OCELI S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE STUDY OF HIGH-CYCLE BEHAVIOUR OF Cr-Ni-Mo-V STEEL USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

František VLAŠIC \*, Václav KOULA \*\*, Pavel MAZAL \*, Denisa BÁRTKOVÁ \*

\* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

\*\* Zemědělské družstvo Rpety, středisko DAKEL

Contact e-mail: vlastic@fme.vutbr.cz

### Abstrakt

Práce se zabývá výzkumem únavového chování Cr-Ni-Mo-V oceli, používané u tlakových nádob reaktoru typu VVER-1000 pod označením GOST 15Ch2NMFA. Pro hodnocení cyklických zkoušek byly dodány tři různé tavby oceli pod označením „H“, „P“ a „S“ ve formě CT těles. Únavové zatěžování bylo realizováno při asymetrii cyklu  $R = -1$  a  $R = 0$  ve vysokocyklové oblasti. Během zkoušek byl zaznamenáván průběh rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL Cracktronic a signál akustické emise. Cílem bylo pomocí této defektoskopické metody vyhodnotit mikrostrukturní změny v průběhu celé životnosti materiálu při méně používaném a publikovaném ohybovém zatěžování a navrhnout nový přístup a metodiku hodnocení jednotlivých stádií únavového procesu.

**Klíčová slova:** únavové zatěžování, akustická emise, trhлина, stádia únavového procesu

### Abstract

This investigation deals with the fatigue behaviour of Cr-Ni-Mo-V type steel that is used to manufacture of the VVER-1000 reactor pressure vessel, known as GOST 15Kh2NMFA. Three different steel melting under the designation “H”, “P” and “S” were supplied in the form of compact tension specimens to the cyclic tests evaluation. The fatigue loading was carried out at asymmetry ratio (stress ratio)  $R = -1$  and  $R = 0$  in the high-cycle regime. The time behaviour of a resonance frequency of the loading RUMUL Cracktronic machine and acoustic emission signals were recorded. The aim was to evaluate the microstructural changes during the whole fatigue life by the seldom used and published bending loading using this non-destructive method. In addition, the new approach and methodology to the stages of fatigue process evaluation was proposed.

**Key words:** fatigue loading, acoustic emission, crack, stages of fatigue process

### 1. Úvod

Statistické údaje ukazují, že až 40 % havárií různých druhů energetických zařízení je spojeno s tvorbou pittingu, únavové trhliny a dalšími poruchami korozního charakteru [1]. V této souvislosti je proto velmi důležité studovat korozní a únavové chování těchto komponent, zejména jedná-li se o zařízení pracující v jaderných elektrárnách. Tato práce se zabývá výzkumem únavového chování materiálu, který

se od roku 1975 používá k výrobě hlavní části jaderného zařízení - tlakové nádoby reaktoru (TNR), typu VVER-1000. Jedná se o feritickou žárovzdomou nízkolegovanou ocel 15Ch(K)2NMFA, která musí splňovat nejpřísnější požadavky na zajištění jaderné bezpečnosti, spolehlivosti a ekonomičnosti provozu. Mezi základní pevnostní požadavky patří vysoká odolnost vůči vzniku křehkého a únavového lomu, odolnost vůči růstu poruch a trhlin a vysoká metalurgická čistota materiálu [2]. Autoři odborných článků, zabývající se výzkumem tohoto materiálu, se zaměřují zejména na oblasti spojené s projevy stárnutí - prostředím podporovaného praskání a radiací podporovaného korozního praskání [3], růstem trhlin základního materiálu v kombinaci se svarovým kovem při únavovém (korozním) namáhání [4] a neméně důležité jsou také výzkumy vlivu neutronového záření na celkový stav TNR. Bylo zjištěno, že při vysokých teplotách a tlacích je studovaná ocel náchylná ke koroznímu praskání pod napětím a další výsledky ukazují, že dynamické deformační stárnutí při nižších rychlostech (deformace) snižuje tažnost studovaného materiálu. Aktuálním tématem se však stává v souvislosti s plánovaným prodlužováním doby provozu jaderných elektráren problematika zkřehnutí ocelí [5].

Jak již bylo zmíněno výše, provozuschopnost TNR je určena mechanickými vlastnostmi použité oceli, která by také měla splňovat přísné požadavky na odolnost proti šíření trhlin jak základního materiálu tak také jeho svarových spojů. Vlivem snižování teplot z provozní úrovně (254 - 304 °C) na teploty přechodových režimů, např. při přerušení nebo spouštění reaktoru během odstávek (20 - 100 °C), dochází v celém systému k urychlování korozních procesů. Za těchto podmínek dochází k hydrogenaci kovu a zesílení neutronového záření. Při uvažovaném 30 až 40 letém provozu jaderného reaktoru se působením fluence neutronů zvyšují jeho pevnostní charakteristiky při současném zhoršení charakteristik deformačních, což má za následek nárůst pravděpodobnosti vzniku křehkého lomu. V práci [4] bylo zjištěno, že růst únavových trhlin významně ovlivňuje za daných podmínek zvýšená pevnost díky tepelnému zpracování, snižování frekvence zatěžování a zvyšování asymetrie cyklu. Dále bylo zjištěno, že koncentrát kyseliny borité s pH 8 při 80 °C snižuje únavovou odolnost a urychluje růst trhlin, zejména v oblasti prahové hodnoty.

Kontrola kvality TNR se provádí při výrobě, montáži a instalaci reaktoru v souladu s platnými normami. Zkoušky jsou prováděny využitím nedestruktivních metod, mezi které patří např. zkoušky ultrazvukové, rentgenové, magnetické či penetrační [6]. Při tlakových zkouškách se např. na českých, slovenských a maďarských jaderných elektrárnách úspěšně používá pro detekci úniků metoda akustické emise (AE), založená na detekci a konverzi vysokofrekvenčních elastických vln (v řádech 100 kHz) na elektrický signál. Už např. HUTTON [7] zjistil, že po odfiltrování šumu z proudícího média může být tato metoda úspěšně aplikována pro detekci a růst trhlin také za provozu. Další úspěšné aplikace ze současné doby jsou např. v [8, 9]. Již řadu let se metoda AE úspěšně uplatňuje také v základním a aplikovaném výzkumu, týkající se porušování materiálů při únavovém a korozně-únavovém namáhání [10]. Autoři se především snaží nalézt korelaci mezi základními parametry AE a strukturálně-korozními změnami materiálu v důsledku cyklické plastické deformace.

Hlavním cílem našeho výzkumu bylo využitím metody AE identifikovat strukturální změny v materiálu při různé amplitudě a asymetrii cyklu a obohatit současný výzkum tohoto materiálu o studium vysokocyklového chování při ohybovém zatěžování.

## 2. Materiál a zkušební zařízení

Zkušebním materiálem pro únavové zkoušky byla Cr-Ni-Mo-V žáruvzdorná ocel s označením GOST 15Ch2NMFA, která byla získána z rozřezaných zkušebních těles CT50 z kovaných prstenců pro tlakovou nádobu VVER-1000. Dodaný materiál byl tepelně zpracován na jakost dvoustupňovým kalením a popuštěním. Pro hodnocení cyklických zkoušek při pokojové teplotě byly dodány tři různé tavby oceli pod označením „H“, „P“ a „S“. Chemické složení (% hm.) bylo následující: 0,15 C, 2 Cr, 1,25 Ni, 0,6 Mo a 0,1 V. Zastoupení P a S bylo max. 0,02. Mechanické charakteristiky při zkoušce tahem byly následující:  $R_m = 608$  MPa,  $R_{p0,2} = 490$  MPa,  $A_5 = 15$  % a  $Z = 55$  %.

Z materiálu byla vyrobena zkušební tělesa se čtvercovým průřezem (12x12 mm), na kterých byl ve střední části vysoustružen mělký vrub o průměru 10 mm pro iniciaci trhliny. Vysokocyklové únavové zkoušky byly realizovány na univerzálním elektrozreznáčním pulzátoru RUMUL Cracktronic 8204/160, který zatěžoval zkušební tělesa v ohybovém režimu na základě jejich rezonanční frekvence. Ta je vlastně funkcí tuhosti tělesa. Samotné zkoušky probíhaly až do lomu při asymetrii cyklu  $R = -1$  a  $R = 0$  v rozsahu od  $5 \times 10^4$  do  $4 \times 10^7$  cyklů, při kterých byla monitorována a ukládána rezonanční frekvence a signál AE.

Pro měření a detekci elastických (napětových) vln byla použita aparatura od firmy ZD Rpety – DAKEL. Jednalo se konkrétně o dvoukanalový systém XEDO s přídatnou (I/O) kartou pro měření pomocné veličiny (průběh síly) a pasivní piezokeramické snímače AE typu MIDI (obr. 1). K měření a vyhodnocování signálu byl použit firmou dodaný software DaeMon a DaeShow.



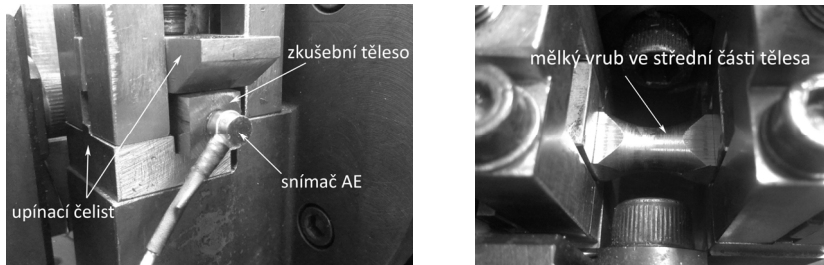
Obr. 1 Diagnostický systém AE: DAKEL-XEDO

Fig. 1 Diagnostic system AE: DAKEL-XEDO

## 3. Metodika měření signálu AE

Na čela každého zkušebního tělesa byly po upnutí do čelistí zatěžovacího zařízení RUMUL přilepeny dva snímače AE. Jeden byl upevněn na statické straně vzorku a druhý na kmitající (ohýbací), viz obr. 2. I přes relativně vysoké rezonanční frekvence vzorku, které se pohybovaly kolem 100 Hz, nedocházelo k odlepování a poškození snímače. Délka zkoušky se pohybovala dle nastavené amplitudy napětí v rozmezí od jednotek minut až po dny. Před každým měřením byla kontrolována citlivost a kvalita upevnění snímačů pomocí Hsu-Nielsonova zdroje (Pen Testu), která byla také zároveň spojena s ověřením správné lokalizace zdrojů událostí AE. Tímto postupem byla získána

informace o (průměrné) rychlosti šíření vln, která činila 4 mm/ $\mu$ s. Poté následovalo nastavení parametrů AE, které bylo u všech zkoušek stejné, viz tab. 1.



Obr. 2 Umístění snímače AE na zkušebním tělese (vlevo) a detail vrubu (vpravo)  
 Fig. 2 Location of the AE sensor at the specimen (left) and its notch (right)

Tab. 1 Nastavení základních parametrů signálu AE

Table 1 Basic parameters of the AE signal

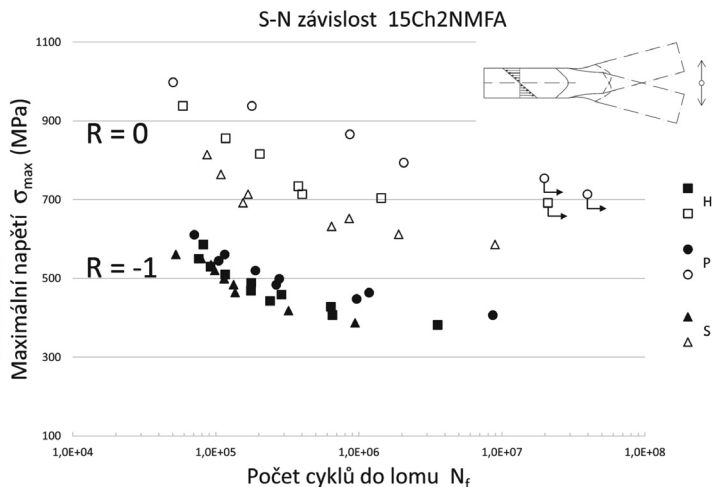
Parametr	Hodnota
rozsah měření	2400 mV
zesílení	20 dB
count prahy (16 hladin)	rozmezí 5 až 80 % rozsahu (120 až 1920 mV)
HW interval měření	1000 ms
práh startu / konce detekce události	16 % rozsahu (384 mV)
mrtvá doba	300 $\mu$ s
vzorkování	2 MHz
nastavení triggeru	začátkem události

## 4. Výsledky

### 4.1 Únavové chování ve vysokocyklové oblasti

Cyklické zkoušky zkoumané oceli byly realizovány při dvou různých asymetriích cyklu:  $R = -1$  a  $R = 0$  ( $P = 1$  a  $P = 2$  dle Klesnila a Lukáše) ve střídavém ohybu. Při tomto druhu zatěžování dochází střídavě na každé straně zkušebního tělesa k tahovému a tlakovému namáhání. V případě  $R = 0$  zůstává tahové (tlakové) pouze na jedné a těže straně. Ke společnému znázornění únavového chování za těchto podmínek se vychází z Walkerova popisu vlivu asymetrie cyklu, kde na osu y vynášíme horní (max.) amplitudu napětí a na osu x počet cyklů do lomu, viz obr. 3. Jak je z grafu zřejmé, s rostoucí hodnotou asymetrie cyklu dochází ke zvyšování únavové odolnosti ve vysokocyklové oblasti (tj. dostatečně daleko od meze pevnosti), což je v souladu s všeobecně známými poznatky z oblasti únavového zatěžování. Dále byl zjištěn, zejména v případě asymetrie cyklu  $R = 0$ , výrazný rozdíl v únavové životnosti sledovaných taveb oceli. Nejodolnější ocelí vůči cyklické plastické deformaci se stala ocel s označením tavby „P“ a nejméně odolnou tavby „S“. Diference činila po celou dobu životnosti cca 160 MPa. Tento výsledek zřejm

potvrzuje známý fakt, že cyklicky namáhané materiály se stejným označením ale od různých výrobců nemusejí vykazovat obdobné výsledky. Svou roli také mohlo sehrát přirozené stárnutí.



Obr. 3 Výsledky únavových zkoušek 15Ch2NMFA oceli pro střídavý a mĳivý cyklus při ohybovém zatěživání

Fig. 3 S-N results of 15Ch2NMFA steel in alternating and pulsating cycle under bending loading

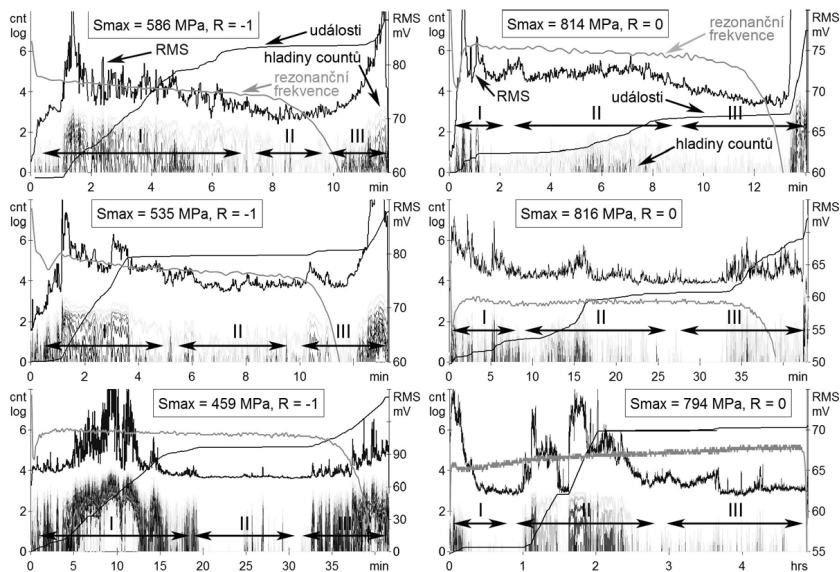
#### 4.2 Odezva plastické deformace na signál AE

Výsledky únavových zkoušek ukázaly, že při obou asymetriích cyklu vykazovaly sledované (tavby) oceli odlišné odezvy na cyklickou plastickou deformaci. Cílem měření signálu AE bylo kromě srovnání charakteru signálu v obou režimech zatěživání zanalyzovat stádia únavového procesu a nalézt příčinu tohoto heterogenního chování především z hlediska mechanismu vzniku poškození.

V případě střídavého symetrického cyklu ( $R = -1$ ) byly nalezeny na všech napětových úrovních zřetelné tři oblasti, které s největší pravděpodobností odpovídají třem základním stádiím únavového procesu (obr. 4). Již z předchozích měření bylo zjištěno, že po počátečním nárůstu AE nastává tzv. klidné stádium (II), ve kterém dochází k iniciaci trhlin a jejich vzájemnému propojování. Toto období bylo společně s posledním (III) na všech úrovních nejkratší. U mĳivého cyklu ( $R = 0$ ) se tyto typické oblasti vyskytovaly také, avšak se zcela odlišným průběhem a délkou trvání. Dalo by se říci, že v inverzním tvaru. Stádia II a III patřila mezi nejdelší a první tvořilo jen asi pětinu celkové životnosti. Z těchto výsledků přirozeně vyplývá, že v případě mĳivého cyklu proces iniciace a šíření trhliny vizuálně probíhal delší dobu, než v případě cyklu symetrického.

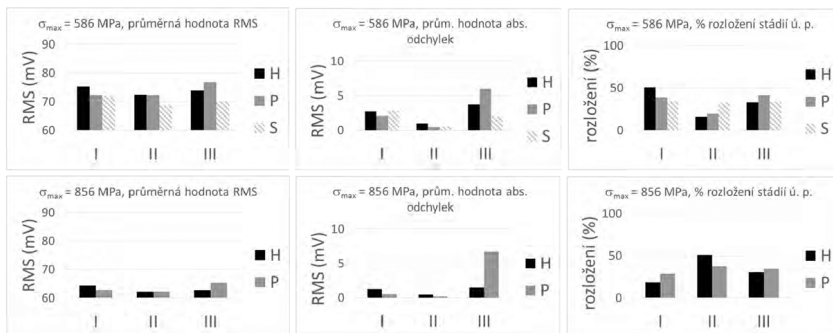
Vzhledem k tomu, že všechny zkoušky probíhaly při stejném nastavení parametřů AE, bylo možné srovnat emitovanou energii (ve formě RMS) na všech napětových úrovních a tavbách. V grafech na obr. 5 je v první ( $R = -1$ ) a druhé ( $R = 0$ ) řadě porovnávána průměrná hodnota energie (RMS), absolutní odchylka a % rozložení tří sledovaných stádií únavového procesu. Závěry z tohoto hodnocení se téměř shodují

se závěry z hodnocení vizuálního (obr. 4), s tím, že ve stádiu iniciace bylo při  $R = -1$  emitováno energie nakonec ze všech tří stádií nejméně a z časového hlediska zaujímal nejmenší podíl. Při  $R = 0$  bylo toto stádium nejdelší. Jak se také dalo předpokládat, největší (absolutní) odchylky od průměrné hodnoty RMS byly zjištěny v posledním stádiu (III) – šíření hlavní (magistrální) trhliny těsně přes lomem tělesa.



Obr. 4 Časové průběhy základních parametrů signálu AE vč. rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL (vlevo  $R = -1$ , vpravo  $R = 0$ )

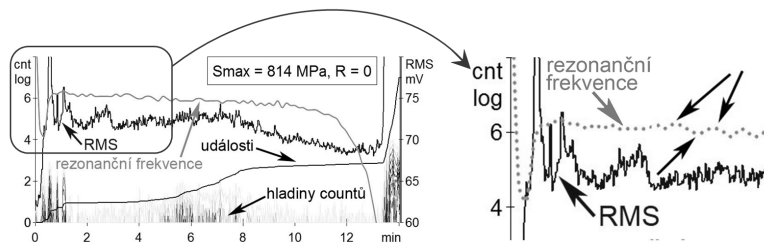
Fig. 4 Time behaviour of basic parameters of the AE signal, including a resonant frequency of RUMUL loading machine (on the left:  $R = -1$ , on the right:  $R = 0$ )



Obr. 5 Energetické změny (RMS) ve třech sledovaných stádiích únavového procesu (I – změny mechanických vlastností, II – iniciace trhliny, III – šíření trhliny)

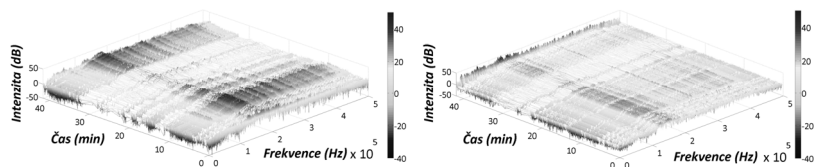
Fig. 5 RMS energy changes in three stages of the fatigue process (I – changes of mechanical properties, II – crack initiation, III – crack propagation)

Záznam rezonanční frekvence (tuhosti) zkušebního tělesa citlivě reaguje na mikrostrukturální procesy během celé doby zatěžování. To můžeme vidět v detailu na obr. 6. Přednostně je však tento průběh využíván jako indikátor začátku šíření hlavní trhliny.



Obr. 6 Ukázka citlivosti rezonanční frekvence (tuhosti) tělesa při únavové zkoušce  
Fig. 6 Illustration of resonant frequency sensitivity of the specimen during fatigue test

Detekované hity AE, převedené do frekvenční oblasti pomocí FFT, jsou zobrazeny v 3D grafu na obr. 7. Jedná se vlastně o vývoj frekvenčního spektra v čase zkoušky. Největší část „výkonu“ spektrální hustoty byla přenášena na 140 až 180 kHz. Zejména v průběhu stádia I a III se také objevovaly složky i na vyšších frekvencích (230, 290 a 320 kHz) a těsně před lomem dominovaly složky na nižších frekvencích (60 a 85 kHz). Nicméně žádná výrazná závislost mezi oběma zátěžnými cykly zjištěna nebyla.



Obr. 7 Frekvenční obraz hitů AE v průběhu celé únavové zkoušky (vlevo  $R = -1$ , vpravo  $R = 0$ )  
Fig. 7 Frequency spectrum of AE hits during whole fatigue test (on the left:  $R = -1$ , on the right:  $R = 0$ )

## 5. Závěr

Hlavní motivací této práce bylo vyšetřit únavové chování žárovzdomně nízkolegované oceli 15Ch2NMFA ve vysokocyklové oblasti při asymetrii cyklu  $R = -1$  a  $R = 0$  a navrhnout vhodnou metodiku hodnocení únavových procesů s využitím metody AE. Únavové chování zkoumané oceli ve třech tabkách objasňuje obr. 3. Zejména u  $R = 0$  byly zjištěny výrazné rozdíly v únavové životnosti sledovaných taveb oceli. To může být způsobeno výrobou nebo odlišným přirozeným stárnutím. Nicméně jak plyne ze samotných požadavků na tento materiál, byla prokázána velmi dobrá odolnost vůči šíření trhliny jak z průběhů rezonanční frekvence tělesa tak také z fraktografických analýz. U obou sledovaných asymetrií cyklu bylo metodou AE zjištěno rozdílné chování jak v délce trvání jednotlivých stádií tak také ve velikosti

emitované energie (RMS), viz obr. 4 a 5. Pro budoucí výzkum hodnocení únavových procesů využitím metody AE je velmi perspektivní a zajímavá oblast preiniciačních stádií, která z hlediska celkové životnosti tělesa emituje velké množství energie a ve které se odehrávají podstatné změny v mikrostruktuře materiálu. Pro detailnější a přesnější objasnění prezentovaných výsledků bude zapotřebí na zkušebním tělese vytvořit malou plochu ke sledování počátku šíření trhliny a vyšetřit z metalografických a fraktografických analýz mechanismy vzniku poškození.

### Poděkování

Práce byla vytvořena za podpory projektu TIP MPO ČR FR-TI4/602 „Diagnostický komplex pro detekci úniků tlakových médií a materiálových vad tlakových komponent jaderných a tepelných elektráren” a NETME Centra.

### Literatura

- [1] TIMOFEEV, B. T., CHERNAENKO, T. A. 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. p346.
- [2] ŘÍHA, T. *Studium radiačního poškození nádoby reaktoru VVER-440 jaderné elektrárny Dukovany*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 109 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Hugo Šen.
- [3] NOVOTNY, R., SAJDL, P., VOSTA, J., MACAK, J. The initiation and propagation of stress corrosion cracks in high temperature and high pressure conditions. In *International Conference on Hydrogen Effects on Material Behaviour and Corrosion Deformation Interactions*. Minerals, Metals & Materials SOC, USA, 2003, pp. 791-798. ISBN 0-87339-501-8.
- [4] POKHMURS'KYI, V. I, BILYI, L. M. and KHOMA, M. S. Corrosion-mechanical Properties of Materials for Reactor Vessels. *Materials Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 499-508, 2001. ISSN 1573-885X.
- [5] VÁLEK, Š., HAUŠILD, P., KYTKA, M. Mechanisms of Fracture in Neutron-irradiated 15Ch2MFA Steel. *Strength of Materials*. Springer US, Vol. 40, No. 1, 2008, pp. 102-105. ISSN 1573-9325.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Pressure Vessels*, IAEA-TECDOC-1556, Vienna, 2007 (update), 205 p. ISBN 978-92-0-104907-0.
- [7] HUTTON, P. H., et al. *Acoustic Emission Monitoring of Hot Functional Testing, Watts Bar Unit 1 Nuclear Reactor*. Division of Engineering Technology, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1984.
- [8] LACKNER, G., TSCHELIESNIG, P. Detection of Corrosion Damage on Pressure Equipment with Acoustic Emission. *Advanced Materials Research*. Vols. 13-14, (2006), pp 127-132. ISSN: 1662-8985.
- [9] RAUSCHER, F. Acoustic Emission during Fatigue Testing of Pressure Vessels. *Advanced Materials Research*. Vols. 13-14, (2006), pp 147-152. ISSN: 1662-8985.
- [10] MIZUTANI, Y., OHTA, M., TODOROKI, A. Effect of Plastic Strain on Low-Cycle Fatigue Life and Fatigue Damage Detection by Acoustic Emission Method. In *30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission*. University of Granada, 2012. ISBN 13:978-84-615-9941-7.





## **VYUŽITELNOST METODY AKUSTICKÉ EMISE V LOŽISKOVÉM PRŮMYSLU APPLICABILITY OF ACOUSTIC EMISSION METHOD IN BEARING INDUSTRY**

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

### **Abstrakt**

*Metoda akustické emise se za poslední tři dekády rozvinula do plnohodnotné metody využívané pro detekci aktivních defektů tlakových nádob, sledování stavu konstrukcí, materiálový výzkum a zkoušky, nebo sledování stavů strojů. Během zkoušek trvanlivosti ložisek se vyhodnocuje doba do vzniku kontaktního poškození, pittingu. Standardně se pro hodnocení míry poškození využívá monitorování vibrací. Nicméně bylo prokázáno, že metoda akustické emise umožňuje včasnější detekci poškození, zejména u pomaloběžných ložisek. Tento článek prezentuje současné možnosti využití metody akustické emise pro detekci poškození valivých ložisek. Shrnuje publikované výsledky mnoha autorů a nastiňuje možnosti dalšího vývoje.*

**Klíčová slova:** akustická emise, ložisko, kontaktní únava, pitting, trvanlivost

### **Abstract**

*The acoustic emission method has been developed in the last three decades into fully-fledged method for detection of the active defects in pressure vessels, structural health monitoring, material research and testing, or condition monitoring of the machines. During the bearing life tests is evaluated the time to creation of rolling contact damage (pitting). The standard method for evaluation of damage level is used vibration monitoring. However, it has been shown that the acoustic emission method allows the earlier detection of damage, in particular for slow-speed bearings. This article presents the current possibility of application of acoustic emission method for damage detection of rolling bearings. It summarizes many published results and outlines the possibilities for further development.*

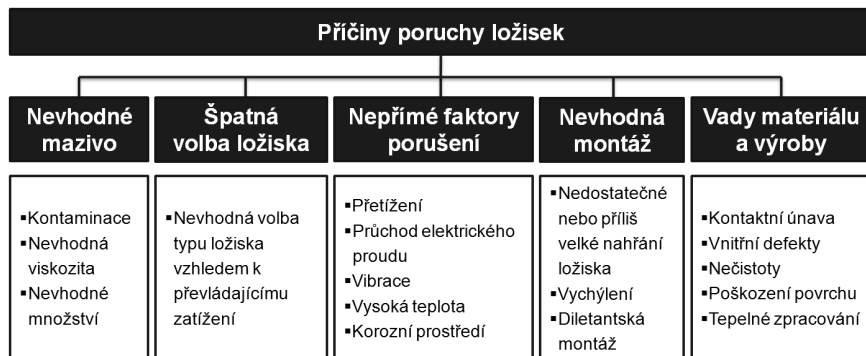
**Keywords:** acoustic emission, bearing, rolling contact fatigue, pitting, bearing life

### **1. Úvod**

Metoda akustické emise (AE) je v současné době využívána v mnoha oblastech nedestruktivního zkoušení a monitorování stavu strojů. V kombinaci společně s ostatními metodami jsme schopni získat užitečné informace o procesech probíhajících pod povrchem součástí a s předstihem identifikovat a predikovat porušení součástí. V těžkém průmyslu (důlní technika, hutnictví apod.) a s výrazným rozvojem větrné energetiky, kde při poškození ložiska či převodovky dochází

až k miliónovým ekonomickým ztrátám, dochází k implementaci monitorovacích systémů využívajících metodu akustické emise.

V ložiskovém průmyslu může najít metoda AE uplatnění jak v diagnostice ložiskových uzlů instalovaných na strojích u zákazníka, tak při zkouškách trvanlivosti ložisek či odolnosti materiálů proti kontaktní únavě. Nejčastější příčiny selhání ložisek jsou nastíněny na obr. 1. Akustickou emisí jsme schopni detekovat defekt v časnějším stádiu než monitorováním vibrací, zejména pak u pomaloběžných ložisek pracujících při otáčkách cca 100 min<sup>-1</sup>, kdy nedochází k emitaci dostatečné energie pro překročení rozlišovacího prahu vibrodagnostiky [1, 2].



Obr. 1 Nejčastější příčiny selhání ložisek  
Fig. 1 The most common causes of bearing failure

Jak je vidět z obr. 1, k poruše ložiska mohou vést různé příčiny. Nicméně pokud je správně provedena montáž, použito vhodné množství a typ maziva, ložisko je chráněno proti vnějším vlivům (nečistoty, voda apod.) a provozní podmínky odpovídají typu a správnému zatěžování ložiska, jedinou příčinou, která může způsobit defekt ložiska je kontaktní únava. Trvanlivost ložiska je doba, než je detekován nepřijatelný defekt na povrchu valivé dráhy (TIMKEN uvádí 6 mm<sup>2</sup>). Konečné stádium defektu jsme schopni detekovat i pomocí vibrací, i když v případě pomaloběžných ložisek je i toto problematické, jak bylo zmíněno výše. Počáteční fáze kontaktní únavy jsou detekovatelné pouze akustickou emisí, která umožňuje zachytit i samotný proces porušování, ne jen jeho důsledky (spalling).

Publikované práce v této oblasti se zaměřují zejména na:

- sledování stavu velkorozměrových ložisek (malé otáčky);
- detekce defektů radiálních ložisek (kuličková, válečková jednořadá ložiska);
- detekce defektů axiálních ložisek (kuličková jednosměrná ložiska);
- zkoušky ložiskových materiálů (různé konfigurace zkušebních stanic).

## 2. Metoda akustické emise v diagnostice ložisek

Do současné doby byly publikovány výsledky popisující monitorování stavu různých typů ložisek s využitím metody akustické emise. Tyto experimenty se zaměřovaly na detekci uměle vytvořených defektů na vnitřním nebo vnějším kroužku radiálních nebo axiálních ložisek. Případně na detekci a identifikaci přirozeně vzniklého defektu na ložisku během zkoušek do porušení [4].

Kontaktní úrava se může projevit pittingem na vnitřním a vnějším kroužku, nebo na valivých elementech. Detekce defektu vzniklého na vnitřním kroužku ložiska pomocí AE se ukázala jako problematická vzhledem k velkému útlumu vysokofrekvenčního signálu. Při analýze parametrů AE bylo zjištěno, že největší nárůst při vzniku poškození vykazovala maximální amplituda signálu. Při zkouškách s předem definovanými defekty na vnějších kroužcích bylo prokázáno, že existuje korelace mezi délkou transientního signálu a velikostí defektu. Během hladovění ložiska dochází ke vzniku rychlých tlakových pulzů, experimenty bylo prokázáno, že změna energie signálu AE koreluje s vypočtenou tloušťkou mazacího filmu a výrazný stav hladovění může být identifikován značnými pulzy v četnosti překmitů přes detekční práh [5–10].

Kontaminace maziva pevnými částicemi se projevila v signálu akustické emise růstem jednotlivých hladin časové četnosti překmitů přes detekční práh a to nelineárně vzhledem ke koncentraci částic. Částice menší velikosti generovaly vyšší pulzy časové četnosti překmitů přes detekční práh než částice větší velikosti. Zároveň parametry AE reagovaly nelineárně na různé velikosti defektů vzhledem k různému zatížení a otáčkám [11].

## 3. Přístupy ve zpracování signálu AE v monitorování ložisek

Způsob zpracování surového signálu z monitorování stavu ložisek je závislý na konkrétní aplikaci. Všeobecně lze říci, že nejlépe indikují rozvíjející se defekt energetické parametry signálu AE, jako je absolutní energie, RMS a v některých případech i hladiny časové četnosti přes detekční práh. Pro identifikaci poškození se využívají zejména parametry popisující stochastický charakter signálu.

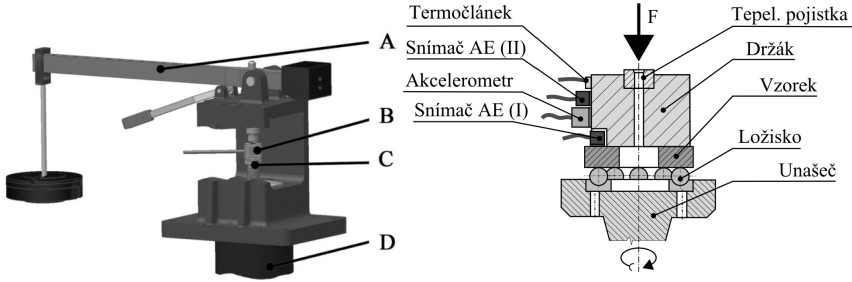
### Nejčastější analyzované parametry:

- efektivní hodnota signálu (RMS);
- energie signálu;
- činitel výkyvu;
- informační entropie;
- koeficient špičatosti.

Pro zpracování surového signálu lze využít zejména při nižším odstupu signálu od šumu diskrétní a spojitá vlnková transformace s různými mateřskými vlnkami (meyer, morlet, daubechies). V detekci výkmitů praskavého signálu je využitelná Hilbertova transformace pro získání obálky signálu. V poslední době se jako nadějný nástroj jeví spektrální koeficient špičatosti, ale zatím jeho aplikace nebyla ověřena pro obecné podmínky. Nejrozšířenější metodou zpracování nadále zůstává statistické zpracování tradičních parametrů AE a korelace s dalšími veličinami jako je teplota apod.[1, 6-10]

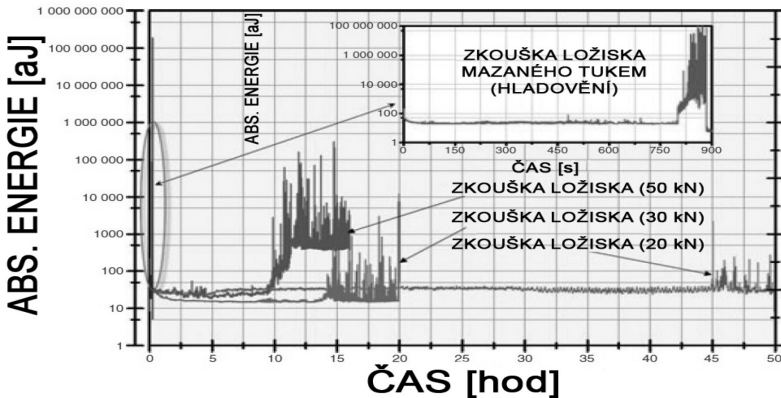
#### 4. Zkoušky odolnosti materiálů proti kontaktní únavě

Pro zkoušky materiálů na odolnost proti kontaktní únavě se využívá celá řada zkušebních stanic s různou konstrukcí. Nejvhodnější pro tyto zkoušky s využitím metody AE je jak z hlediska podobnosti mechanismu vzniku únavového poškození jako v reálném ložisku, spolehlivosti výsledku, tak i přístupnosti místa pro umístění snímače AE zkušební stanice typu AXMAT, viz obr. 3 (A-zatěžovací páka, B-měřící uzel, C-unášec, D-elektromotor).



Obr. 3 Zkušební stanice AXMAT a detail uložení vzorku (vpravo)  
Fig. 3 The test-rig AXMAT and detail of specimen placement (right)

Výsledky zkoušek v podobné konfiguraci zkušební stanice jsou prezentovány v pracích [12–15]. Vzorkem bylo axiální kuličkové ložisko SKF 51210, jehož horní kroužek byl nahrazen kroužkem axiálního válečkového ložiska SKF 81210 TN, což reprezentuje stejnou konfiguraci valivého kontaktu, jako je znázorněno na obr. 3. Zkoušky proběhly při otáčkách  $72 \text{ min}^{-1}$  a zatíženích 20, 30 a 50 kN. Byla provedena i zkouška hladovění ložiska při zatížení 50 kN. Výsledky jsou prezentovány v obr. 4.



Obr. 4 Aktivita AE – časová četnost překmitů pro zkoušky (20, 30, 50) kN  
Fig. 4 AE activity – count rate for the test (20, 30, 50) kN

[15]

Parametry akustické emise bez ohledu na typ zkoušeného kovového materiálu při těchto zkouškách vymezují tři stádia zkoušky trvanlivosti či odolnosti materiálu proti kontaktní únavě. V první fázi je patrný nárůst a následný pokles hodnot těchto parametrů (energie, RMS, časové četnosti překmitů přes detekční práh) cca během 20 min při otáčkách 1380 min<sup>-1</sup>. Tento jev charakterizuje plastickou deformaci při vytváření valivé stopy na povrchu vzorku a záběh takto vzniklé valivé dráhy. V další fázi dochází k ustálení a nezaznamenáváme výrazné změny. Následně můžeme pozorovat trend růstu hodnot, který signalizuje počáteční fázi vznikajícího pittingu, který při dalším zatěžování přechází k razantnímu růstu. Tento finální stav je detekovatelný i pomocí monitorování vibrací a při překročení stanovené hladiny vibrací je zkouška ukončena [12–15].

## 5. Závěr

V nedestruktivním zkoušení se ve většině případů využívá více metod společně pro spolehlivé určení přítomnosti defektu. V případě sledování stavu ložisek, či zkouškách materiálů na odolnost proti kontaktní únavě je také vhodné využít kombinaci metody akustické emise a monitorování vibrací, případně monitorování přítomnosti kovových částic v oleji. Bylo zde prezentováno využití metody AE v oblasti ložiskového průmyslu, kde v oblasti monitorování velkorozměrových ložisek, pomaloběžných ložisek a ve zkouškách materiálů přináší významné informace o počátečních stádiích únavového poškození, poškození povrchu valivých drah a elementů. Nejvýznamnější je přínos metody AE v monitorování pomaloběžných ložisek, kde standardní metody reagují až v pokročilém stádiu poškození a ve výzkumu mechanismu poškození materiálů kontaktní únavou.

## Předpokládaný směr vývoje

V následujícím období bude výzkum v oblasti využití metody akustické emise pro monitorování stavu ložisek a zkoušky materiálů na odolnost proti kontaktní únavě zaměřen zejména na zobecnění metodiky zkoušení a optimalizaci zpracování surového signálu. Vzhledem k vysokému útlumu vysokofrekvenčního signálu AE se jako řešení jeví využití bezdrátových snímačů AE a jejich umístění co nejbližše sledovanému místu, zejména u komplexnějších celku, jako jsou například převodovky apod.

## Poděkování

*Tento článek vznikl za podpory projektu **FSI-J-13-2117** "Aplikace moderních fyzikálních přístupů v diagnostice strojních uzlů" a projektu MŠMT ČR **NETME Centre - Nové technologie pro strojírenství** (ED0002/01/01), jehož řešitelem je VUT v Brně.*

## Literatura

- [1] SIKORSKA, J.Z. and MBA, D., AE Condition Monitoring: Challenges and Opportunities In *the Proceedings of the 1st World Congress of Engineering Asset Management*, Gold Coast Australia. pp 125-136, 2006, 978-1-84628-583-7
- [2] ELFORJANI, M., MBA, D. Natural Mechanical Degradation Measurements in Slow Speed Bearings. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 1, January 2009, pp. 521-532, ISSN 1350-6307.
- [3] KIM, Y. H., TAN, A.C. C., MATHEW, J., YANG, B. S. Condition Monitoring of Low Speed Bearings: A Comparative Study of the Ultrasound Technique Versus Vibration Measurements. *Engineering Asset Management*, Springer London, 2006, pp. 182-191. ISBN 978-1-84628-814-2.
- [4] AL-DOSSARY, S., HAMZAH, R. I. R., MBA, D. Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing. *Applied Acoustics*, Vol. 70, No. 1, January 2009, pp. 58-81, ISSN 0003-682X.
- [5] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [6] NOHÁL, L.; HORT, F.; MAZAL, P. An Experimental Study on Damage Monitoring of Rolling Bearings Using Acoustic Emission Method. In *The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. Krakow: The British Institute of NDT, 2013. s. 1-9. ISBN: 978-1-901892-37- 6.
- [7] HANZAL, R.; WANG, L.; WOOD, R. Monitoring of a Hybrid Rolling Contact. In *The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. Krakow: The British Institute of NDT, 2013. s. 1-9. ISBN: 978-1-901892-37- 6.
- [8] ROGERS, L. M. Detection of incipient damage in large rolling element bearings. *Advanced Materials Research*, *Trans Tech publications*, SWITZERLAND, Vol. 13-14, 2006, pp. 37-44, ISSN 1662-8985.
- [9] TANDON, N., YADAVA, G.S., RAMAKRISHNA, K.M. A Comparison of Some Condition Monitoring Techniques for the Detection of Defect in Induction Motor Ball Bearings. *Mechanical systems and signal processing*. Vol. 21, No. 1, INDE : ITMME Centre. ew Delphi, 2005, pp. 244-256, ISSN 0888-3270.
- [10] ZHOU, W., HABETLER, T. G., HARLEY, R. G. Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review. In *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, SDEMPED 2007, September 6-8. 2007, pp.3-6, ISBN 978-1-4244-1061-3.
- [11] Miettinen, J. and Andersson, P., Acoustic Emission of Rolling Bearings Lubricated with Contaminated Grease, *Tribology International*, Vol 33, No 11, pp 777-787, November 2000.
- [12] MAZAL, P.; PAZDERA, L.; SMUTNÝ, J.: *Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise*. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3826-2.
- [13] RAHMAN Z., OHBA H., YAMAMOTO T. AND YOSHIOKA T. A Study on Incipient Damage Monitoring in Rolling Contact Fatigue Process Using Acoustic Emission, *Tribology Transactions*, 2008, 51:5, 543-551.
- [14] ELFORJANI, M., MBA, D. Monitoring the Onset and Propagation of Natural Degradation Process in Slow Speed Rolling Element Bearing with Acoustic Emission. *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, ASME, USA, Vol. 130, No. 4, 2008, pp. 14, ISSN 1048-9002.
- [15] Elforjani, M. and Mba, D. (2011), Condition Monitoring of Slow-Speed Shafts and Bearings with Acoustic Emission. *Strain*, 47: 350-363. doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00776.x



## LOKALIZACE ZDROJŮ AKUSTICKE EMISE NA GEOMETRICKY ŘÍDKÝCH KONSTRUKCÍCH

## LOCATION OF ACOUSTIC EMISSION SOURCES IN GEOMETRICALLY SPARSE STRUCTURES

Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Laboratory

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

### **Abstrakt**

*V posledních letech se zvyšují nároky na bezpečnost v mnoha průmyslových oblastech. Nabývá tak na významu moderní filozofie tzv. sledování stavu konstrukcí (SHM - Structural Health Monitoring). SHM systémy jsou dnes postupně integrovány např. do leteckých či mostních konstrukcí a stávají se nově také součástí některých moderních budov, u nichž by zhroucení způsobilo velké materiální nebo lidské ztráty. Jednou z efektivních metod včasné výstrahy je sledování akustické emise (AE). Jelikož je ale v praxi poměrně často aplikována na geometricky složité konstrukce, je nutné využívat komplikovanější lokalizační metody. V příspěvku je pro případ „geometricky řídkých“ konstrukcí diskutováno využití umělých neuronových ve srovnání se segmentovou lokalizací na základě chronologie příchodu elastické vlny k vybraným skupinám snímačům AE. Obě metody a jejich výsledky jsou demonstrovány na případě experimentu s postupným zatěžováním části střešní konstrukce až do finálního kolapsu.*

**Klíčová slova:** Akustická emise, lokalizace zdrojů AE, sledování stavu konstrukcí.

### **Abstract**

*In recent years, the safety demands in many industry fields are increasing, analogous to the importance of modern philosophy of Structural Health Monitoring (SHM). SHM systems are gradually integrated into, e.g., aircraft or bridge structures and also become newly a part of certain modern buildings, where the break down would cause significant material or human losses. One of the effective prewarning methods is the detection of acoustic emission (AE). Since the method is in practice frequently exploited for geometrically complex structures, it is needed to apply more sophisticated localization algorithms. The paper yields the discussion about the utilization of artificial neural networks in comparison with the segment location based on the chronology of signal arrivals to selected groups of AE sensors for “geometrically sparse” structures. Both methods and their results are demonstrated in case of experiment with gradual loading of a part of a roof construction until the final breakdown.*

**Key words:** Acoustic emission, location of AE sources, Structural Health Monitoring.

### **1. Úvod**

Problematika zřícení střech a dalších stavebních konstrukcí v důsledku přetížení je již delší dobu aktuální nejen v ČR. Ačkoliv existuje povinnost většiny provozovatelů

objektů zajistit monitorování vzniku požáru, nebo vniknutí neoprávněných osob, monitorování reálného (fyzického) stavu objektu (SHM – Structural Health Monitoring) nebo jeho částí se téměř neprovádí a předpokládá se správnost statických výpočtů při projektování a kvalitní provedení stavby. Zcela opomíjeny jsou navíc aspekty jako stárnutí materiálů, koroze, narušení vniknutím vody, skryté vady při výrobě konstrukcí nebo při provedení stavby apod., které vzdalují reálný stav objektu od stavu předpokládaného projektem. Monitorování skutečného stavu je jedna z cest, jak zjistit vliv aktuálního přetížení nebo napětí v konstrukci v důsledku např. vysokého teplotního gradientu apod., následně předpovědět nebo odhalit narušení, či destrukci konstrukce a v důsledku předcházet fatálním selháním, čili materiálními škodám a ztrátám na životech. Vhodně zvolené metody navíc umožňují monitorování těžko přístupných a nebezpečných částí objektů.

V současné době existuje řada možností jak za přiměřenou cenu kontinuálně monitorovat zatížení i deformace stavebních prvků se zaměřením na konstrukce střech objektů s možností vyslání varovných zpráv, pokud dojde k statickému přetížení, deformaci a nebezpečí destrukce. Tato problematika byla řešena v rámci projektu MPO FR-TI1/198 s názvem „Automatizovaná diagnostika extrémně zatížených stavebních konstrukcí“, jehož cílem byl návrh a odzkoušení SHM systému na reálné stavbě, konkrétně části ocelové střešní konstrukce. Jako jeho nezastupitelná část byla prokázána metoda akustické emise (AE). Zahrnutí této metody může v korelaci s dalšími měřenými veličinami podstatně zvýšit vypovídací schopnosti celého SHM systému. Následující kapitoly pojednávají o konkrétním nasazení metody AE při reálném experimentu, během něhož byla provedena zátěžová zkouška ocelové střešní konstrukce až do finálního zhroucení.

## 2. Problém lokalizace zdrojů AE

Po detekci a digitalizaci signálu AE odpovídajícím analyzátozem je z diagnostického hlediska pro charakterizaci mechanismu poškození prvotním úkolem dostatečně přesné určení polohy emisního zdroje [1]. Souřadnice zdroje AE jsou nejčastěji počítány známým triangulačním algoritmem na základě časových diferencí příchodů napětových vln k jednotlivým snímačům. Známé analytické vztahy jsou ale většinou využitelné pouze pro několik typů jednodušších konstrukcí, u nichž se neuvažuje vlnová disperze a navíc se předpokládá pouze jediná rychlost šíření elastických vln v tělese s danou geometrií. Při monitorování složitějších konstrukcí bývají s ohledem na různé geometrické i materiálové vlivy tyto algoritmy prakticky nepoužitelné. V těchto případech je výhodnější alternativou použít postupy založené na umělých neuronových sítích (ANN), které lze aplikovat i na vysoce anizotropní materiály, přičemž rychlost šíření elastických vln není jejich vstupním parametrem [1-3].

Základní metody na bázi ANN využívají časové diference jako vstupní parametry, obdobně jako triangulační algoritmy. I přes velkou výpočetní efektivitu jsou ale aplikační možnosti neuronových sítí značně omezeny. Jedná se zejména o nepřenositelnost konkrétní naučené sítě na jinou úlohu a problémy při získávání dostatečného počtu tréninkových a testovacích dat, což může být v praxi velmi náročné a v mnohých případech i nemožné. Výše zmiňované problémy řeší nově navržená parametrizace časů příchodů signálů ke snímačům AE, tzv. časové profily, které jsou nezávislé na změně materiálu a měřítka [4]. Za určitých předpokladů umožňují numerické generování dostatečného počtu přesných tréninkových dat (tj.



nezatížených experimentální chybou) a následnou aplikaci na reálné konstrukce různých měřítek a materiálů. Tento přístup, umožňující mimo jiné i přenositelnost naučených sítí, se osvědčuje zejména v případech, kdy díky vysokým experimentálními chybám nelze zaručit dostatečně jemné pokrytí vstupního prostoru jednoznačnými tréninkovými daty.

### 3. Lokalizace zdrojů AE na reálné stavební konstrukci pomocí ANN

I přes evidentní výhody aplikace umělých neuronových sítí mohou nastat případy, kdy je jejich nasazení z hlediska interpretace výsledků nevhodné. Zejména pokud jsou určené časy příchodů signálů ke snímačům zatíženy velkou chybou (např. vlivem disperze a útlumu elastických vln), neuronové sítě zareagují neodhadnutelným způsobem a za lokalizaci zdroje AE označí místo na konstrukci (resp. zcela mimo ni), které nemá fyzikální smysl. Interpretace takových výsledků je problematická zvláště pro tělesa typu „příhradové konstrukce“, kdy nosný materiál představují např. ocelové trubky, profilové nosníky apod. Tyto případy včetně podobných (jako jsou např. tělesa s velkými otvory, podstatně objemově převažujícími materiál samotný) zahrňme do pojmu „geometricky řídké konstrukce“.

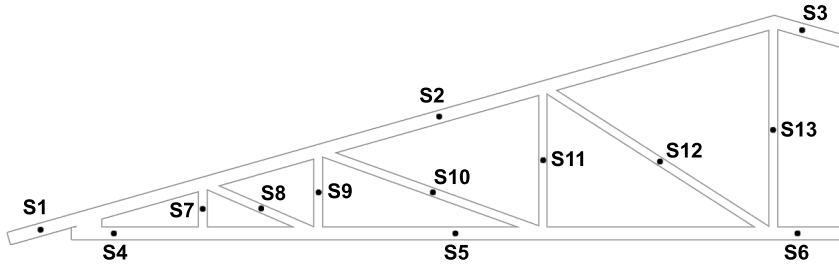


*Obr. 1 Zatěžovaná část střešní konstrukce.*

*Fig. 1 Loaded part of roof structure.*

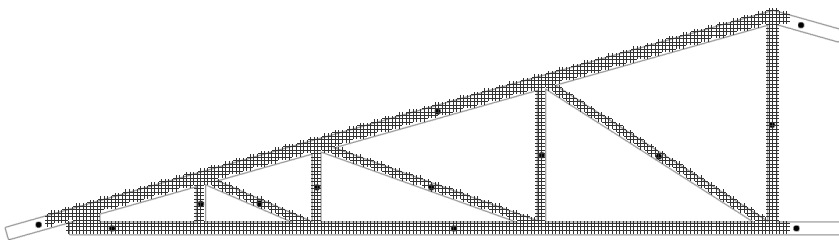
Za konstrukci pro závěrečnou ověřovací zkoušku SHM systému v praxi byla vybrána část střechy segmentu relativně nízké ocelové montované haly určené k demolici (viz obr.1). Pro monitorování části haly, postupně zatěžované až do kolapsu, byl použit SHM systém sestávající z několika částí integrujících měření mechanických veličin (posuvů a deformací) se dvěma ultrazvukovými metodami nedestruktivního testování (NDT). Zaměříme se dále pouze na metodu AE, speciálně na problematiku lokalizace emisních zdrojů v průběhu celé zkoušky.

Při stupňovitém zatěžování jedné poloviny střešní konstrukce separované části haly až do destrukce byl na základě předcházejících výpočtů monitorován pouze prostřední z 3 příhradových střešních nosníků s využitím 13 emisních kanálů (konfigurace snímačů viz obr.2).



Obr. 2 Rozmístění snímačů AE.  
Fig. 2 Arrangement of AE sensors.

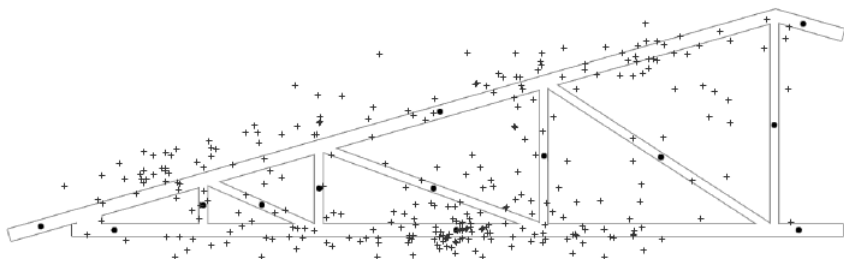
Přesnější lokalizace emisních událostí v jednotlivých etapách zatěžování trubkové konstrukce představuje problém plošné lokalizace nespojitých oblastí s komplikovanými cestami šíření elastických vln od emisních zdrojů. Jako první metoda lokalizace zdrojů AE byly aplikovány vrstevnaté neuronové sítě, odhadující souřadnice detekovaných událostí na základě profilů časů příchodů signálů k jednotlivým snímačům. Algoritmus je podrobně popsán v [4], přičemž jako tréninková data byly uvažovány časové profily (vypočtené na základě nejkratších vzdáleností zdroj-snímač) odpovídající virtuálním zdrojům rozmístěným podle obr.3. Konstrukce je tedy uvažována jako 2D, jelikož třetí rozměr nelze vzhledem k rozmístění snímačů a především geometrii nosníků zohledňovat.



Obr. 3 Rozmístění virtuálních učících zdrojů AE.  
Fig. 3 Layout of virtual learning AE sources.

Již při učení neuronových sítí bylo patrné, že úloha je numericky velmi citlivá, tj. časové profily, které se liší jen nepatrně, mohou příslušet dvěma poměrně

vzdáleným zdrojům. Dalším předpokládaným nežádoucím faktorem jsou velké chyby při určování začátků signálů, které jsou vlivem vlnové disperze a útlumu značně zkreslené. K naměřenému časovému profilu tak mnohdy neodpovídá žádná poloha emisního zdroje na konstrukci a emisní události jsou tak lokalizovány mimo materiál, což není snadno interpretovatelné a dostatečně ilustrativní. Problém je dobře patrný na obr.4 s demonstrativními výsledky lokalizace pro zkompletované emisní události ze všech 13-ti snímačů v případě závěrečné (osmé) zatěžovací etapy. Jelikož vzdálenost mezi krajními snímači přesahovala délku 5m, lze problémy se zkreslením signálů při kompletaci hitů ze všech 13-ti kanálů předpokládat. Proto byla oblast lokalizace pro neuronové sítě v dalších krocích pokusně rozdělena horizontálně na dvě části, aby pro události potencionálně z levé poloviny nebylo třeba uvažovat signály ze snímačů 3, 6, 11-13 a obdobně pro pravou část nebyly využívány kanály 1, 4, 7-9. Toto řešení ale nepřineslo významné zlepšení výsledků, tj. zmenšení rozptylu shluků jaký je patrný na obr.4. Redukovaná úloha je rovněž numericky velmi citlivá a i přes relativní robustnost časových profilů vzhledem k chybám určení začátků signálů je nutno hledat jiná řešení.



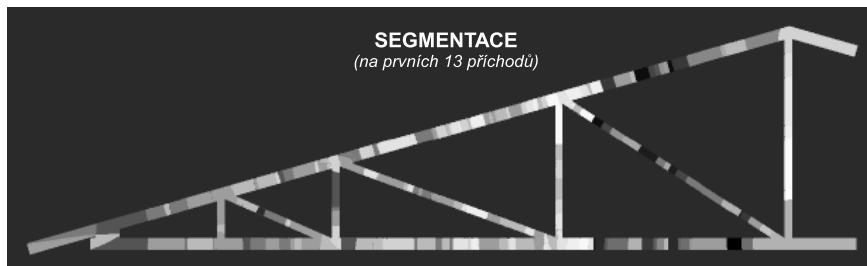
*Obr. 4 Výsledky lokalizace pro finální zatěžovací fázi.*

*Fig. 4 Localization results for final loading period.*

#### **4. Segmentová lokalizace zdrojů AE na reálné stavební konstrukci**

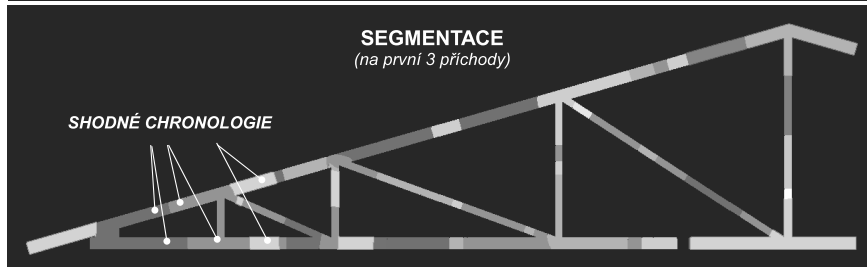
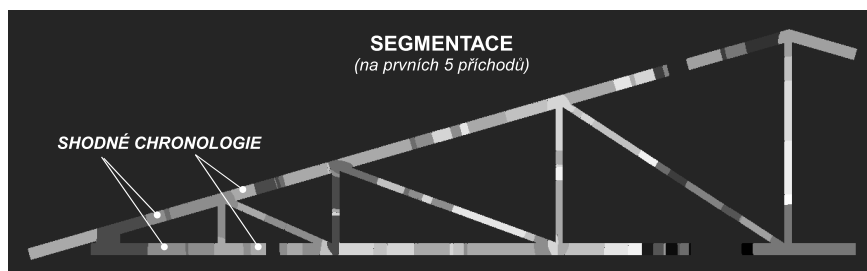
Ikdyž nelze prohlásit výše popisované výsledky neuronových sítí za zcela nepoužitelné, je zřejmé, že jako výstup SHM systému jsou především z uživatelského hlediska složité, či málo vypovídající, tj. nedostatečné. V praxi je nutno jasně označit alespoň segment konstrukce, kde s největší pravděpodobností dochází k nebezpečnému poškození. Jako vyhovující a snadno aplikovatelná alternativa byl testován algoritmus segmentové (zónové) lokalizace, kdy je sledovaná konstrukce rozdělena na zóny podle specifické chronologie detekce příchodů signálů příslušnými snímači. Tímto způsobem mohou být zdroje AE zběžně lokalizovány pomocí tabulky všech možných posloupností příchodů signálů AE k jednotlivým senzorům. Oproti jednoduchým spojitým součástem (jako např. rovinná deska) je však v případě geometricky řídkých konstrukcí poměrně složité stanovit jednotlivé segmenty se specifickou chronologií příchodů elastických vln k uvažovaným snímačům. Klasické dělení pomocí pomyslných os mezi snímači nemá smysl a je nutné využít algoritmus pro hledání nejkratších cest v materiálu. Takto lze analyzovat všechny možné chronologie příchodů, které v konstrukci mohou fyzikálně nastat

a rozdělit ji na patřičné segmenty. V případě diskutované střešní konstrukce bylo z celkového počtu permutací snímačů 1-13 (tedy  $13! = 6227020800$ ) zjištěno 235 možných chronologií. Výsledná „segmentace“ konstrukce je ilustrována obr.5, kde jsou různé zóny příslušející konkrétní chronologii příchodů vyznačeny specifickým odstínem šedi.



Obr. 5 Segmentace části střešní konstrukce podle chronologie příchodů elastických vln k jednotlivým snímačům.

Fig. 5 Segmentation of roof structure part by chronology of elastic waves arrivals to each sensors.



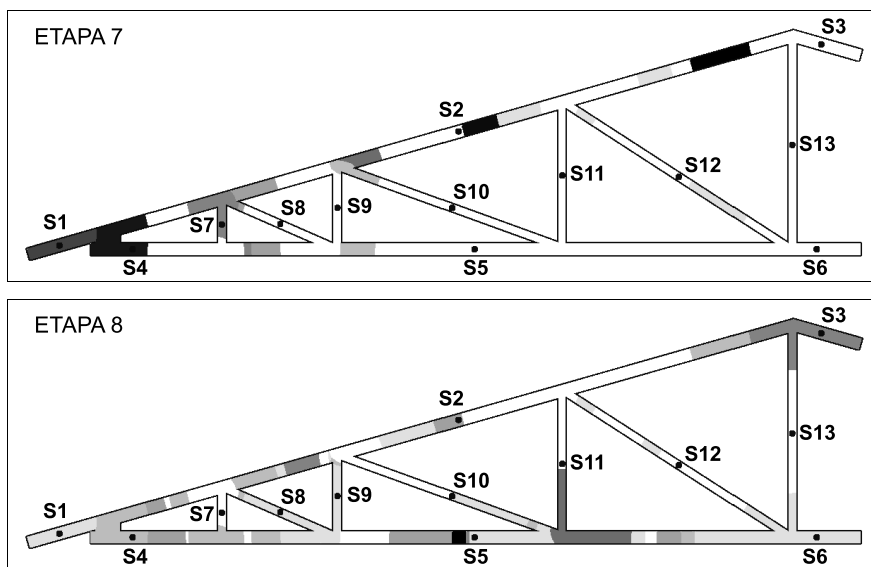
Obr. 6 Segmentace části střešní konstrukce podle daného počtu prvních příchodů.

Fig. 6 Segmentation of roof structure part by selected number of first arrivals.

Je zřejmé, že poměrně triviální lokalizace na základě pořadí příchodu elastických vln k jednotlivým snímačům podává z praktického hlediska dostatečně přesnou informaci. Problémem jsou ale chyby určení začátků signálů a potažmo pořadí příchodů ke snímačům. I relativně malá chyba může způsobit, že určená chronologie nemá fyzikální opodstatnění, nemůže v konstrukci nastat a nelze tedy přiřadit k některé numericky spočítané. Jak již bylo předesláno, toto se děje především vlivem dlouhých cest při šíření elastických vln, zejména přes celou uvažovanou délku konstrukce, jako např. od snímače 13 ke snímači 1. Je tedy nutné uvažovat chronologie vzhledem k podstatně menším skupinám senzorů, kdy nejsou chyby v určení začátků signálů tak velké. I když výsledná segmentace již není tak detailní, lze ji považovat za dostačující i pro případ pěti nebo dokonce tří snímačů (viz obr.6). Jistou nevýhodou je částečná nejednoznačnost. Pro některé chronologie nelze odlišit, zda má emisní událost původ v horní, či dolní nosné trubce (viz popisky v obr.6) a jako směrodatnou je nutno brát pouze lokalizaci ve vodorovné ose.

## 5. Diskuze výsledků

Veškerá data AE naměřená při postupném zatěžování střešní konstrukce byla kromě neuronových sítí zpracována rovněž algoritmem pro segmentovou lokalizaci na základě prvních tří příchodů signálu. Na obr.7 je ilustrován vývoj emisní aktivity v posledních dvou stupních zatížení (etapa 7 a 8). Místa nejsilnější AE (nejtmavější zvýrazněné segmenty) korespondují s postupným (skokovým) zvyšováním zatížení střechy, při němž je patrná aktivita především na horním segmentu nosníku (etapa 1-7), a finálním zhroutilím (etapa 8), kdy se silně zdeformovala i spodní trubka.



Obr. 7 Výsledky lokalizace emisních zdrojů v posledních dvou etapách zatěžování.

Fig. 7 Localization results in the last two loading periods.

Z lokalizačních diagramů je zřejmé, že emisní aktivita byla do značné míry ovlivněna deformací Z-nosníků, přenášejících zátěž z krytiny na příhradový nosník, neboť místa s nejvyšší aktivitou jsou téměř totožná s polohami Z-nosníků a finálními největšími průhyby konstrukce, které jsou dobře patrné na obr.8.



*Obr. 8 Testovaná konstrukce po poslední zatěžovací fázi.  
Fig. 8 Tested structure after the last loading period.*

### **Poděkování**

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č.FR-TI1/198 a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998.

### **Literatura**

- [1] Blaháček M.: 'Lokalizace zdrojů akustické emise pomocí umělých neuronových sítí'. (Diplomová práce, ČVUT FJFI, 1999).
- [2] Blaháček M., Převorovský Z.: 'Probabilistic Definition of AE Events'. Proc. of the 25th European conference on Acoustic Emission Testing, Prague, 2002, (1), pp. 63-68.
- [3] Grabec I., Sachse W.: 'Synergetics of Measurements, Prediction and Control'. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [4] Chlada M., Blaháček M., Převorovský Z.: 'AE Source Location by Neural Networks with Arrival Time Profiles'. 5th Internat. Workshop "NDT in Progress 2009", Prague, 12-14 Oct. 2009, Proc. ed. by P. Mazal, CNDT, DGZfP 2009, ISBN 978-80-214-3968-9, pp. 11-18.



## **VYUŽITÍ POLOHOVÝCH PROFILŮ PRO LOKALIZACI ZDROJŮ SPOJITÉ AKUSTICKÉ EMISE UTILISING OF POSITION PROFILES FOR LOCATION OF CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION SOURCES**

**Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Petr SLADKÝ**  
Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Laboratory  
Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

### **Abstrakt**

*Detekci zdrojů spojité akustické emise (AE) v materiálových objektech lze předejít potenciálním havarijním stavům, jako jsou např. úniky médií z tlakových nádob, potrubních rozvodů apod. Dosavadní způsoby lokalizace zdrojů spojité AE vycházející z útlumových charakteristik elastických vln mají jistá aplikační omezení. Mezi ně patří např. nutná znalost koeficientu útlumu a vhodnost metod spíše pro lineární lokalizaci. Tyto nedostatky lze řešit zavedením tzv. polohových profilů, pomocí nichž dochází k převedení útlumové závislosti amplitud vln AE na vzdálenosti od zdroje na závislost polohových profilů na efektivních hodnotách (RMS) snímaných napěťových signálů spojité AE. Vlastní lokalizace reálného zdroje AE se provádí porovnáním polohových profilů odpovídajících modelovým virtuálním zdrojům s polohovým profilem vypočteným pro reálný zdroj, přičemž lze aplikovat optimalizační porovnávací metody, nebo neuronové sítě. V příspěvku je uvedeno podrobné odvození a popis nové metody, která je předmětem patentového řízení.*

**Klíčová slova:** Spojitá akustická emise, polohový profil, lokalizace zdrojů AE.

### **Abstract**

*By detecting of continuous acoustic emission (AE) sources it is possible to precede potential emergencies as e.g. leaks of the media from pressure vessels, pipelines etc. Present location methods using attenuation characteristics of elastic waves have certain application restrictions as required knowledge of attenuation coefficient and suitability more likely for linear location. These disadvantages can be solved by introduction of so called position profiles. In this way, the attenuation dependencies of AE wave amplitude and the distance from emission source are converted to the dependencies between position profiles and Root Mean Square (RMS) of captured voltage signals of continuous AE. Proper location of real AE source is done by comparing of position profiles corresponding to model virtual sources with the position profile computed for a real source, while it is possible to apply optimization comparative methods or artificial neural networks. The paper presents detailed derivation and description of the new method, which is a subject of patent pending.*

**Key words:** Continuous acoustic emission, position profile, AE source location.

### **1. Úvod**

Porušení integrity materiálu je primárním nebezpečím z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti provozu většiny extrémně zatěžovaných konstrukcí jako jsou např.

tlakové nádoby, jaderné a chemické reaktory, důležité stavby apod. Současné náročné požadavky na jejich spolehlivost a bezpečnost nejsou realizovatelné bez efektivních nástrojů nedestruktivního testování (NDT), resp. systémů monitorování okamžitého fyzikálního stavu konstrukce (SHM - Structural Health Monitoring). Akustická emise (AE) představuje jednu z významných NDT a SHM metod pro detekci a identifikaci rostoucích materiálových defektů [1]. Původ různých typů detekovaných emisních signálů lze vysvětlit rozdílnými mechanismy poruch nebo provozními šумы. Současný nejnovější přístup k lokalizaci zdrojů AE pomocí časových profilů [2] využívá interpolačních schopností umělých neuronových sítí ve vícerozměrných parametrických prostorech. Výhodným předzpracováním naměřených časů příchodů signálů k jednotlivým snímačům zaručuje navíc univerzálnost konkrétní naučené neuronové sítě, tj. nezávislost na změně materiálu a měřítka. Časové profily zohledňující chronologii příchodů signálu k jednotlivým senzorům mohou být přitom počítány rovněž na základě nejkratších vzdáleností od zdroje ke snímačům. Tyto vzdálenosti ale nemusejí být odvozeny pomocí různých algoritmů hledajících nejkratší vzdálenosti v geometrických tělesech. V případě jednoduchých tvarů materiálu postačí eukleidovská vzdálenost zdroj-snímač. Tento způsob lokalizace se ovšem týká analýzy nespojitě akustické emise, kdy lze naměřený emisní signál na základě vývoje amplitudy rozdělit na časové úseky odpovídající jednotlivým zdrojům pulsního typu. Pokud nelze naměřený signál takto rozdělit, mluvíme o spojitě akustické emisi. Jejimi zdroji mohou být např. úniky tekutin z různých netěsností (signál je vyvolán turbulentními tlakovými fluktuacemi média proudícího skrz štěrbinu), souběžné velké množství poskoků dislokací při plastické deformaci, nebo spojitě šumové pozadí v měřeném tělese či konstrukci. V těchto případech nelze mluvit o začátcích signálů a lokalizační algoritmy musejí být založeny na jiných principech. Mezi způsoby lokalizace zdrojů spojitě AE patří metoda porovnání intenzity signálu AE, crosskorelační algoritmus, zónová lokalizace, lineární lokalizace na potrubí a v případě více zdrojů metoda zvaná „blind source separation“ [3]. Nově navržená metoda vychází z principu lokalizace zdrojů nespojitě AE pomocí časových profilů. Za předpokladu zanedbatelného geometrického (prostorového) útlumu, který se v případě spojitě AE prakticky nerealizuje, lze odvodit modifikaci časových profilů, tzv. „polohové profily“, které mají obdobné výhodné vlastnosti.

## 2. Modelování útlumu elastických vln v materiálu

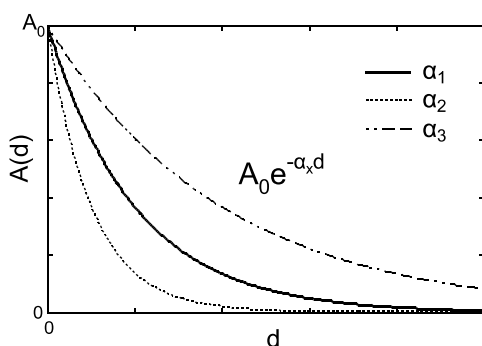
Velikosti posuvů částic materiálu způsobených elastickými vlnami klesají se vzdáleností od místa zdroje. Realizuje se jednak útlum geometrický, kdy se energie elastického napětového pulsu vln neztrácí, pouze klesá amplituda pulsu se vzdáleností v závislosti na geometrii „trasy“ mezi zdrojem a snímačem AE, a útlum materiálový v důsledku ztráty energie pulsu vlivem její absorpce, disipace, nebo difuzního rozptylu. Útlum amplitudy AE pulsu v závislosti na vzdálenosti  $d$  od místa zdroje s amplitudou  $A_0$  se popisuje jako kombinace obou mechanismů útlumu, přičemž závislost na vzdálenosti je mocnná s parametrem  $\beta$  resp. exponenciální s parametrem  $\alpha$  v případě útlumu geometrického resp. materiálového:

$$A(d) = A_0 \cdot d^{-\beta} \cdot e^{-\alpha d} \quad (1)$$



Pokud se v tělese či konstrukci realizuje zdroj spojité AE, pak dochází se zpožděním řádově až desítek ms k postupnému vyplnění celého tělesa „difuzně“ rozptýleným akustickým šumem. Elastické vlny šířící se v tělese různými směry náhodně superponují v akustické pole. Vlny se odrážejí od stěn, překážek a různých nerovností a podle Huygensova principu se rozšíří s dostatečnou intenzitou i do „akustických stínů“ za překážkami do vzdáleností mnohonásobně větších než by dosáhl jednorázový akustický puls. Útlum spojité AE bývá řádově nižší, než útlum maxima amplitudy pulsů nespojitě praskavé AE. Pokles amplitudy signálu  $A(d)$  se vzdáleností  $d$  od zdroje se tedy v případě spojité AE obvykle modeluje pouze exponenciální závislostí (viz obr.1):

$$A(d) = A_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2)$$



Obr.1 Pokles amplitudy v závislosti na různých parametrech útlumu.

Fig.1 Amplitude decline subject to attenuation parameters.

### 3. Odvození polohových profilů

Nový přístup parametrizace chronologie příchodů signálů k jednotlivým snímačům vychází z modifikované (normované) verze časových profilů definovaných v [2]. Chronologie příchodů signálu od zdroje AE ve vzdálenostech  $d_i$  od jednotlivých senzorů  $i=1, \dots, N$  je nově porovnávána s chronologií odpovídající referenčnímu zdroji ve vzdálenostech  $D_i$  od senzorů. Modifikovaná verze časového profilu, tzv. polohový profil  $p_i$ , je definována vztahem

$$p_i = \frac{N d_i - \sum_{j=1}^N d_j}{N D_i - \sum_{j=1}^N D_j} \quad (3)$$

kde  $p_i$  je  $i$ -tá složka polohového profilu obecného zdroje ( $i=1, \dots, N$ ) a  $d_i$  je vzdálenost emisního zdroje ke snímači  $i$ . Pro potřeby dalšího odvozování označme rovněž

amplitudy signálů naměřených snímačem  $i$  ve vzdálenosti  $d_i$  od emisního zdroje jako  $A(d_i)$ . Obdobně efektivní hodnoty RMS (root mean square) naměřené příslušným senzorem  $i$  jako  $RMS(d_i)$ . Zlogaritmováním vztahu (2) dostáváme pro amplitudu ve vzdálenosti  $d_i$  od zdroje AE:

$$\ln(A(d_i)) = \ln(A_0) - \alpha \cdot d_i \quad (4)$$

Po následném vyjádření vzdálenosti  $d_i$  a dosazení do vztahu (3) má vzorec pro výpočet polohového profilu tvar:

$$p_i = \frac{N \ln A(d_i) - \sum_{j=1}^N \ln A(d_j)}{N \ln A(D_i) - \sum_{j=1}^N \ln A(D_j)} \quad (5)$$

Je tedy odvozena možnost výpočtu polohového profilu i pro spojitě emisní signály, u nichž nemá smysl určovat začátek. Jelikož efektivní hodnota (RMS) spojitěho signálu je přímo úměrná jeho amplitudě a předpokládáme-li jediný zdroj signálů naměřených různými snímači, lze polohový profil aproximovat pomocí RMS. Jelikož je RMS za daný časový úsek stabilnější veličina, nepodléhající různým lokálním fázovým interferencím jako amplituda, je možné očekávat přesnější lokalizační výsledky na základě „RMS“ verze polohových profilů:

$$p_i = \frac{N \ln RMS(d_i) - \sum_{j=1}^N \ln RMS(d_j)}{N \ln RMS(D_i) - \sum_{j=1}^N \ln RMS(D_j)} \quad (6)$$

#### 4. Podstata lokalizace pomocí polohových profilů

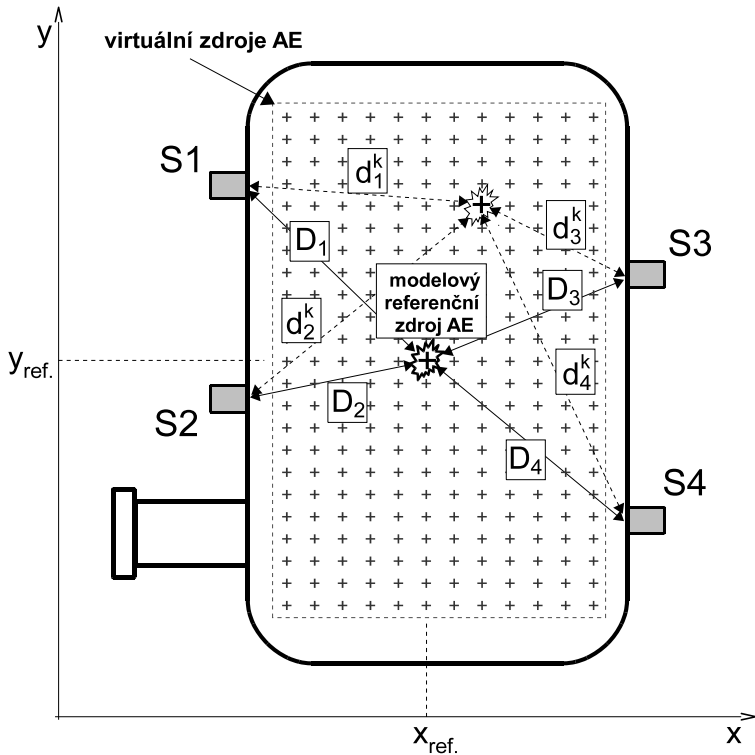
Výše popisovaný postup představuje robustní parametrizaci vzájemného poměru energie signálů spojitě akustické emise z jednoho zdroje naměřených více snímači, nezávislou na parametru exponenciálního útlumu. Tzv. polohový profil, nezávislý rovněž na změně měřítka konstrukce, je východiskem pro následnou lokalizaci emisního zdroje pomocí umělých neuronových sítí, nebo srovnávacích, či jiných metod. Různé verze polohových profilů (vzdálenostní viz (3), amplitudovou viz (5) a „RMS“ viz (6)) lze efektivně využít v jednotlivých krocích lokalizačního algoritmu. Principem metody je nalezení polohového profilu (jeho souřadnice jsou pak výstupem algoritmu) z předem vyčíslené referenční tabulky  $P$ , který je nejbližší reálně naměřenému. Tzv. referenční tabulkou  $P$  rozumíme sadu energetických profilů o celkovém počtu  $M$ , tj. vektorů  $P_k = (p_{1k}, \dots, p_{Nk})'$ , odpovídajících zvoleným emisním zdrojům se známou lokalizací, s nimiž budeme zdroje neznámého původu srovnávat:

$$P = (P_1, \dots, P_M), \text{ kde } P_k = (p_1^k, \dots, p_N^k)' \quad (7)$$

Pokud je k dispozici dostatečný počet naměřených emisních zdrojů na reálném tělese v bodech, které adekvátně pokrývají oblast konstrukce, na níž je třeba

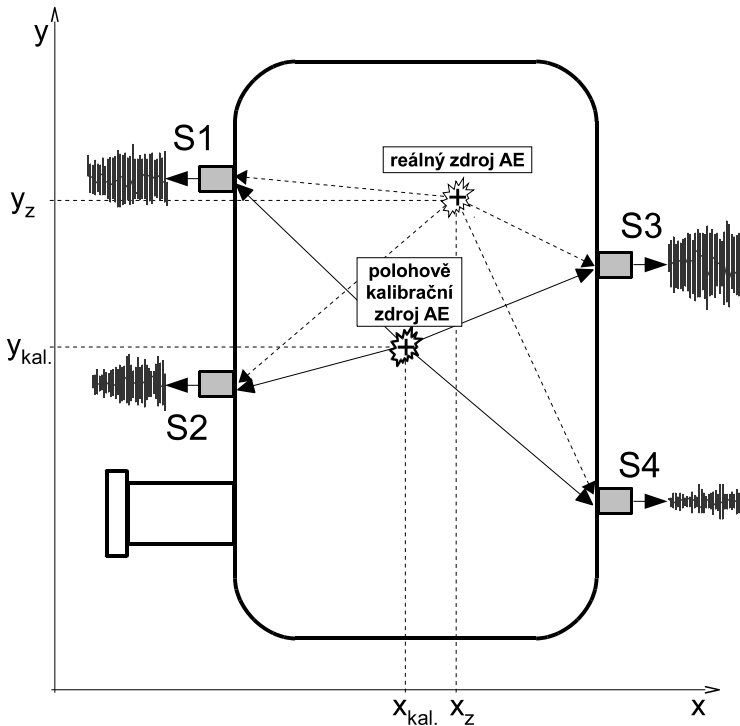
lokalizovat neznámé zdroje, lze referenční tabulku sestavit z hodnot vypočítaných podle vzorce (5) nebo (6). V praxi je ale většinou sběr takto rozsáhlého souboru dat velmi náročný, komplikovaný nebo z různých technických důvodů nemožný. Řešením, kromě jiného potlačujícím měřicí chyby, je výpočet srovnávacích polohových profilů na numerickém modelu tělesa s využitím vzorce (3). Chronologie příchodů signálu od  $k$  téhož virtuálního zdroje AE ve vzdálenostech  $d_{ik}$  od jednotlivých senzorů  $i=1, \dots, N$  je porovnávána s chronologií odpovídající modelovému referenčnímu zdroji ve vzdálenostech  $D_i$  od senzorů (viz obr.2). Definiční vzorec (3) je tedy modifikován následovně:

$$p_i^k = \frac{N d_i^k - \sum_{j=1}^N d_j^k}{N D_i - \sum_{j=1}^N D_j} \quad (8)$$



Obr.2 Rozmístění senzorů a virtuálních zdrojů AE na modelové nádobě.  
Fig.2 Arrangement of AE sensors and virtual AE sources on model vessel.

Na obr.2 je znázorněno demonstrační schéma rozmístění snímačů AE na modelu potrubního rozvodu. Vyznačena je oblast virtuálních emisních zdrojů, pro něž je počítána referenční tabulka  $P$  na základě vzdáleností  $d_{ik}$  (tj. vzdáleností virtuálního zdroje  $k$  ke snímači  $i$ ). Díky nezávislosti polohových profilů na změně měřítka a koeficientu útlumu lze tuto tabulku při zachování stejné konfigurace emisních senzorů na reálném tělese použít pro lokalizaci nových emisních zdrojů srovnávací metodou, nebo využít pro učení neuronových sítí.



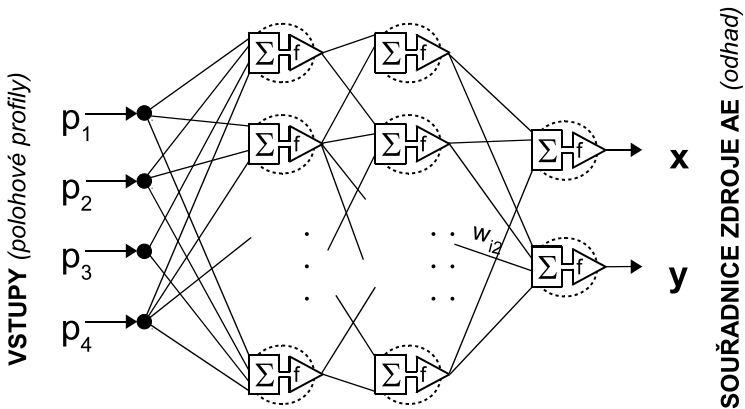
Obr.3 Schéma měření reálných zdrojů AE na modelové nádobě.

Fig.3 Real AE source measuring scheme on model vessel.

Pro finální určení souřadnic zdroje AE je potřeba provést kalibrační měření. Spočívá ve vybuzení reálného emisního zdroje na tělese v místě zvoleného modelového referenčního zdroje (viz obr.3), určení RMS na všech kanálech a výpočtu jmenovatele ve vzorci (6), který pak bude použit k odvození polohových profilů. Výsledná lokalizace neznámého reálného zdroje je dána polohou virtuálního zdroje  $k$ , jehož polohový profil  $P_k$  má nejmenší vzdálenost od profilu  $p=(p_1, \dots, p_N)$ , vypočítaného podle (6) na základě naměřených RMS.

## 5. Shrnutí

Výše uvedený způsob lokalizace zdrojů spojitě akustické emise v materiálových objektech může být aplikován zejména na detekci úniků médií z tlakových nádob, potrubních rozvodů apod., tj. hledání materiálových poruch vedoucích k potenciálním havarijním stavům. Nově zavedené polohové profily samy o sobě relativizují vzájemnou polohu virtuálního a modelově referenčního emisního zdroje v modelovém, resp. lokalizovaného a polohově kalibračního zdroje v reálném případě. V dalším ohledu takto dochází rovněž k převedení útlumové závislosti amplitud vln AE (závislost amplitudy na vzdálenosti od zdroje) na závislost polohových profilů na efektivních hodnotách snímaných napěťových signálů spojitě AE. Vedle zmiňované nezávislosti hodnot polohových profilů na změně měřítka konstrukce je pro praxi výhodná i nezávislost na materiálovém útlumu, který tak není nutno měřit. Jedinou nutností je provést kalibrační vybuzení zdroje spojitě AE v místě odpovídajícím modelovému referenčnímu zdroji a stanovení amplitud, či RMS signálů zachycených jednotlivými senzory. Tento postup rovněž kompenzuje případné odchylky na jednotlivých měřicích cestách (různá zesílení emisních kanálů vlivem např. odlišných citlivostí snímačů, akustické vazby apod.) a provede jistou kalibraci celé měřicí soustavy.



Obr.4 Obecné schéma umělé neuronové sítě pro lokalizaci zdrojů AE.  
Fig.4 General scheme of artificial neural network for AE source location.

Vlastní lokalizace reálného zdroje AE se provádí porovnáním polohových profilů odpovídajících modelovým virtuálními zdroji s polohovým profilem vypočteným pro reálný zdroj, přičemž lze aplikovat optimalizační porovnávací metody, nebo umělé neuronové sítě (viz obr.4). Za odhad souřadnic emisního zdroje lze považovat polohu virtuálního modelového zdroje, jehož polohový profil nejlépe odpovídá hodnotám vypočteným podle vzorce (5) nebo (6) pro lokalizovaný zdroj. Přesnost lokalizace by v tomto případě korespondovala s jemností pokrytí uvažované oblasti virtuálními

emisními zdroji (viz obr.2). Vrstevnaté umělé neuronové sítě podávají navíc interpolované výsledky, čímž jsou spolu s jinými svými vlastnostmi aplikačně velmi výhodné a efektivní.

Vzhledem k aplikačnímu potenciálu metody lokalizace zdrojů AE v materiálových objektech pomocí polohových profilů byl způsob přihlášen pod číslem PV 2013-627 na Úřadě průmyslového vlastnictví s žádostí o udělení patentu.

### **Poděkování**

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR-TI3/775 a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998.

### **Literatura**

- [1] Miller, Ronnie K., McIntire P.: 'Nondestructive testing handbook; v.5' American Society for Nondestructive Testing, INC., USA, ISBN 0 931403 02 2, 1987.
- [2] Chlada M., Prevorovsky Z., Blahacek M.: 'Neural Network AE Source Location Apart from Structure Size and Material' Journal of Acoustic Emission, vol. 28, 99-108, 2010.
- [3] Koldovský Z., Tichavský P.: 'Způsob slepé separace akustických signálů z jejich konvolutorních směsí' CZ pat no 303 191, 2008.



## **INSPEKCE KONSTRUKCÍ METODOU MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU INSPECTION OF STRUCTURES BY MAGNETIC MEMORY METHOD**

**Václav Svoboda, František Žemlička, A. A. Dubov**

Preditest, s.r.o., Praha

**Klíčová slova:** magnetická paměť materiálu; potrubí; vyhledávání defektů; diagnostika

### **Anotace:**

*Metoda Magnetické paměti materiálu je NDT metoda založená na měření a analýze rozložení zbytkových magnetických polí v kovových materiálech odrážejících technologickou historii materiálu. Využívá se pro určení **SCZ** (Stress Concentration Zones), poruch a heterogenity v mikrostruktuře materiálu a svarových spojů. Magnetická paměť materiálu reprezentuje jev, který nastává v materiálu ve formě zbytkové magnetizace vlivem procesu výroby, tepelného zpracování, ochlazování, tváření, ohýbání, tvarování, lisování, sváření apod. v prostředí zemského magnetického pole a vlivem provozního zatížení.*

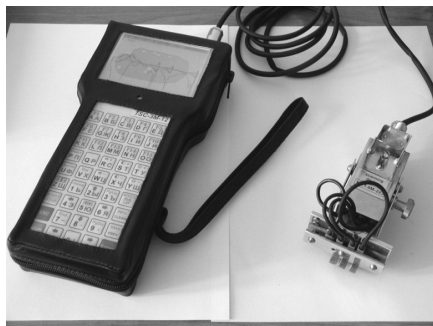
### **Abstract:**

*Method of Metal Magnetic Memory is method of a nondestructive inspection based on registration and analysis of distribution of self-magnetic leakage fields (SMLF) arising on products and equipment in stress concentration zones (SCZ) and metal defects. At that, SMLF reflect irreversible change of a magnetization in a direction of maximal stresses action from working loads. Also SMLF reflect structural and technological heredity of products and welded joints after their manufacturing and cooling in a weak magnetic field.*

MPM je založena na měření narušení magnetického pole Země, v důsledku změn magnetizace kovových trubek v oblasti koncentrace napětí (SCZ) a v oblastech rozvoje koroze a únavového poškození. Charakteristické oblasti změn (frekvence, amplituda) vzhledem k deformaci potrubí, vznikají v důsledku řady faktorů: vlivem procesu výroby, tepelného zpracování, ochlazování, tváření, ohýbání, tvarování, lisování, sváření apod. v prostředí zemského magnetického pole a vlivem provozního zatížení, za kolísání teploty venkovního vzduchu a vliv životního prostředí (půda, voda, atd. )..

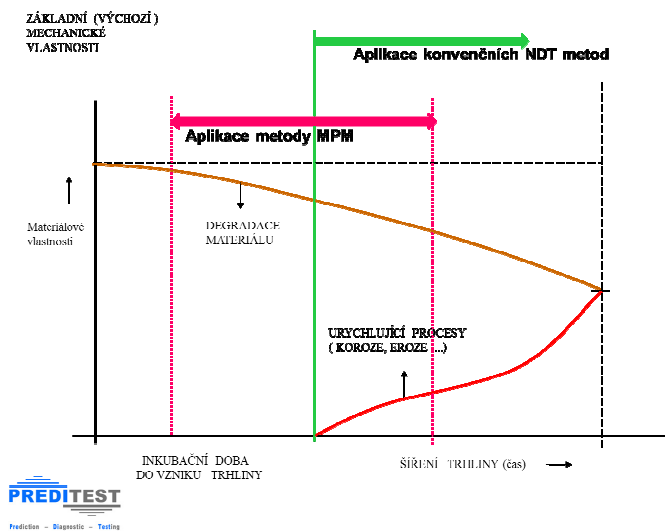
Principem metody je scanování **intenzity magnetického pole  $H_p$  těsně nad povrchem materiálu** pomocí scanovacího zařízení, viz obrázek 1 – je to vozíček, na kterém jsou upevněny snímáčí sondy, opatřené kolečky pro snímání vzdálenosti  **$L_x$**  a příslušnou elektronikou pro zesílení a digitalizaci signálů ze sond za použití ověřených kritérií a softwaru, kterým jsou data zpracovávána.

Pro vlastní měření není třeba speciální úprava povrchu nebo odstraňování krycí nátěrové vrstvy. Četnost snímání dat ve vztahu k měřené vzdálenosti je možno volit ve vlastním měřicím programu.



Obr. 1 – Měřicí přístroj MPM se scanovací sondou

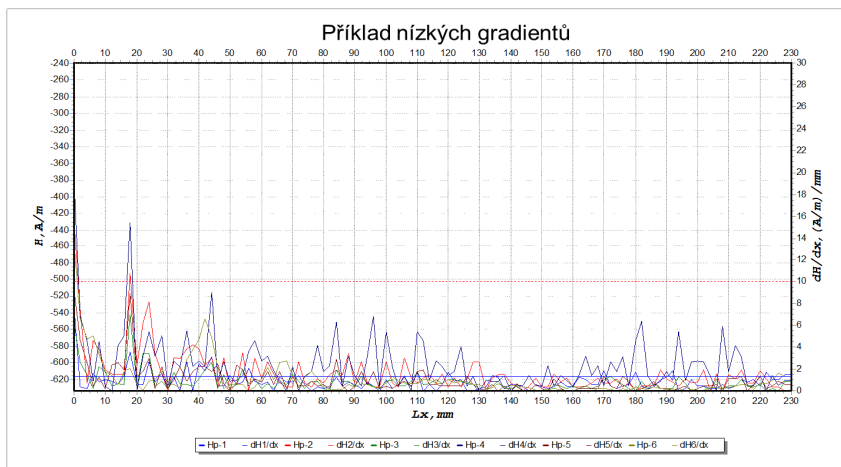
Obecně je aplikace MPM využitelná ke sledování změn koncentrací namáhání od samého počátku uvedení konstrukcí do provozu a dále pak v periodických časových intervalech stanovených pro danou konstrukci. V následujícím schématu je znázorněna možnost využití této metody pro diagnostiku konstrukcí.



Obr. 2 – Schéma aplikace metody MPM pro diagnostiku konstrukcí

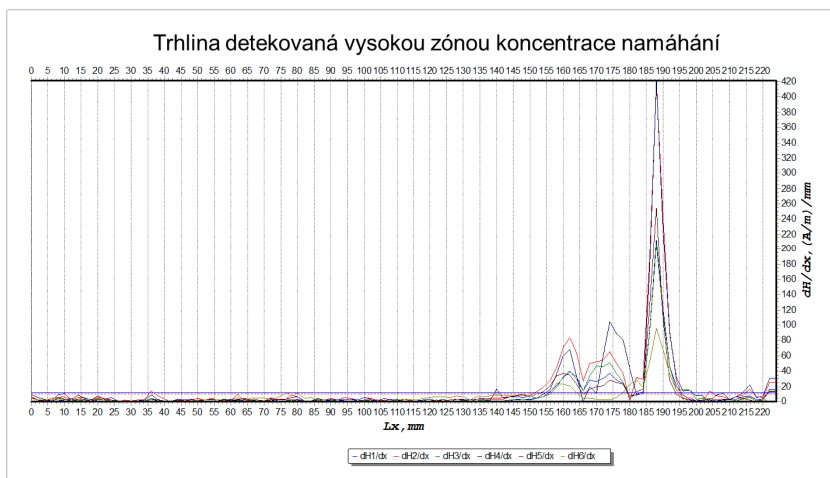


Na obrázku 3 je příklad měření nízkých gradientů na potrubí. Z hlediska úrovně amplitud se jedná o těleso bez výskytu defektů a trhlin.



Obr. 3 – Nízké hodnoty zón koncentrací namáhání

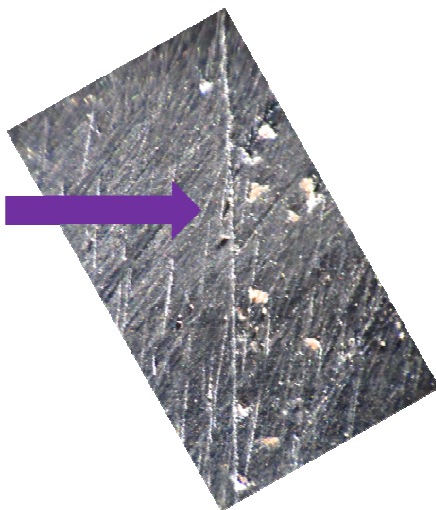
Naproti tomu obrázek č. 4 reprezentuje lokalizaci místa zvýšené koncentrace namáhání v konstrukci vyvolané vznikem a šířením únavové trhliny. Příslušné amplitudy gradientů řádově přesahují základní úroveň vůči materiálu bez defektu.



Obr. 4 – Záznam reflektující existenci únavové trhliny

Na obrázku 5 je detail zjištěné trhliny metalograficky. Je vidět, že ostrá koncentrace namáhání odpovídá z hlediska lokalizace místu, ve kterém se trhlina nachází.

Detail trhliny



Obr. 5 – Reálná trhlina



### Příklady využití MMM metody



**Elektrárny, plynovody, naftovody**

**Kovové konstrukce, doprava, letectví**



**Lodě, zdvihací stroje, strojní součásti**

**Metalurgie, vědecká výzkumná činnost**



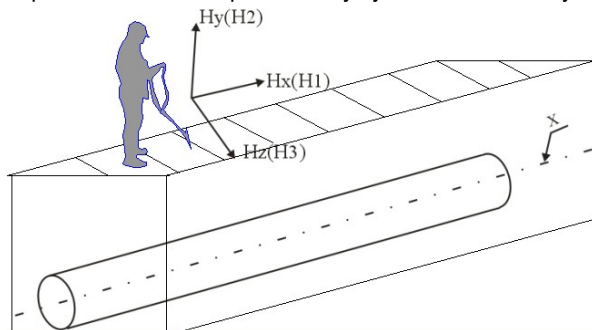
### **Diagnostika potrubí uložených v zemi**

#### **Bezkontaktní magnetometrická diagnostika – BDM**

Tímto způsobem lze kontrolovat **plynovody, ropovody, teplovody, vodovody, obecně: produktovody.**

Snímání intenzity magnetického pole:

- vertikální (osa Y)
- axiální, vodorovná podél osy trubice (osa X)
- kolmo k ose trubky (osa Z);
- gradient  $dH/dx$  po délce  $dX$  trubka pro všechny výše uvedené složky magnetického pole.

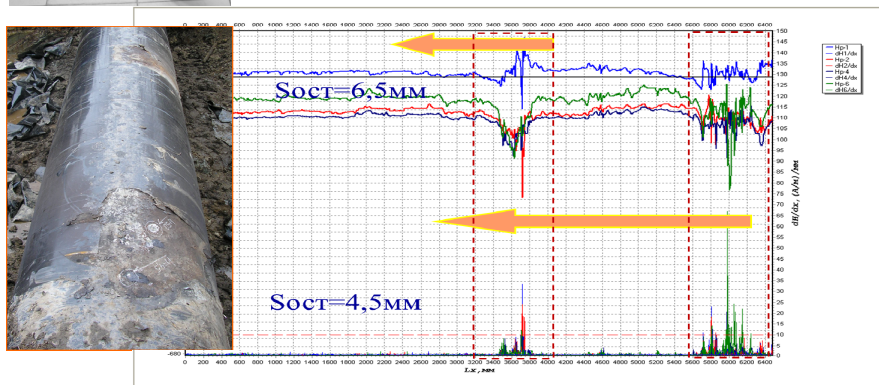


Obr. 6 – Znárodnění měření ve třech osách



Obr. 7 – Měřící kolo s měřící sondou – 1 - silniční kolo a 2 - systém měřící vzdálenost, 3 - držák skeneru Typ 11/12, 4 - snímač typu 11/12, 5 - rukojeť: 6 - držák měřícího zařízení, 7 - skládací stojan, 8 - univerzální hlavy.

Na obrázku 8 jsou znázorněna místa zvýšené koncentrace namáhání, která po odkrytí potrubí reprezentovala korozní poškození materiálu na vnějším povrchu.

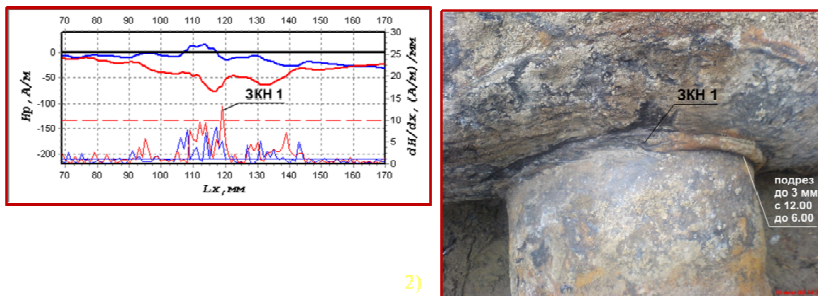


Obr. 8 – Výsledky měření bezkontaktní diagnostikou (BDM)

Na obrázku 9 je záznam magnetogramu a gradientů pro oblast napojení potrubí DN 300 na hlavní potrubí DN 1200.

Výsledky scanování MMM kontaktní metodou na potrubí D1020 mm přípojka D 300mm.

- 1 - rozložení magnetického pole  $H_p$  a jeho gradient  $dH/dx$  podél koutového svaru.
- 2 - zářez až 3 mm v rohu svaru, který se shoduje se zónou maximální koncentrace napětí SCZ.



Obr. 9 – Záznam magnetogramu a gradientů

Praktický postup provádění inspekce BDM je na obrázku č. 10.

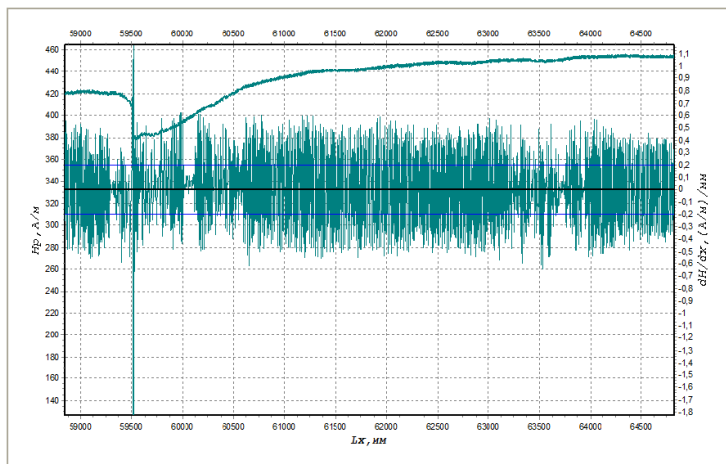


Obr. 10 – Inspekce pomocí BDM



Obr. 11 – Vyznačené potrubí

V místě výrazné anomálie bylo provedeno odkrytí potrubí a detailní diagnostika, jejíž výsledky jsou na obrázku 13.



Obr. 12 – Typický záznam signálu v závislosti na vzdálenosti s významnými anomáliemi

Na obrázku 13 byl detailní diagnostikou zjištěn defekt typu vnější trhlinka, jejíž velikost a hloubka byla ověřena ultrazvukem. Daný úsek potrubí byl vyříznut a nahrazen novou částí potrubí. Na vyříznutém úseku potrubí s defektem byla provedena tlaková destrukční zkouška.



Obr. 13 – Detail zjištěného defektu

## Závěr

### Mezi hlavní výhody této metody patří:

- rychlost měření
- opakovatelnost měření
- není třeba úprava povrchu měřeného materiálu
- inspekce je možná za provozu
- včasná diagnostika únavového poškození
- vibrace nemají vliv na měření

Metoda magnetické paměti materiálu (MPM) má široké oblasti použití, ale i dílčí omezení, vlivem vysoké citlivosti.

K limitujícím faktorům patří: nemagnetické materiály, uměle zmagnetované kovy, přítomnost cizích magnetických materiálů v těsné blízkosti kontrolovaného objektu, přítomnost externího magnetického pole nebo elektrického svařování do vzdálenosti 1 m.

### Autoři:

Ing. Václav Svoboda  
technický ředitel  
Preditest, s.r.o.  
Novodvorská 1010/14  
14200 Praha 4  
+420602331005  
[svoboda@preditest.cz](mailto:svoboda@preditest.cz)

Ing. František Žemlička  
vedoucí pracovník diagnostiky  
Preditest, s.r.o.  
Novodvorská 1010/14  
14200 Praha 4  
[zemlicka@preditest.cz](mailto:zemlicka@preditest.cz)



## **CO NÁS STOJÍ SELHÁNÍ KONSTRUKCE (LOM) - ANEB RIZIKO HAVÁRIE? WHAT IS THE COST OF FAILURE OF STRUCTURE BY THE CRITICAL CRACKS?**

**Václav Svoboda**

Preditest, s.r.o., Praha

Contact e-mail: svoboda@preditest.cz

### **Abstrakt:**

*Diagnostické metody umožňují stanovovat chování konstrukcí a určovat jejich technický stav na základě nedostatečného počtu informací o sledovaném objektu. Každá diagnostická metoda má vzhledem k svému fyzikálnímu principu jisté výhody a jistá omezení. Právě kombinace několika metod podstatně zvyšuje možnost zjištění případných defektů a závažných poruch v konstrukcích. Z časového hlediska je kromě pravidelných periodických diagnostických kontrol je dále důležité, v některých případech, provádět kontroly nepřetržité, takzvané monitorování stavu. Tímto způsobem lze zabránit případným nenadálým poruchám a haváriím.*

### **Abstract:**

*Diagnostic methods allow you to define the behavior of structures and determine their conditions based on insufficient information about the observed object. Each diagnostic method has due to its physical principle certain advantages and limitations. It is the combination of several methods which significantly increases the possibility of finding any defects and serious failures in structures. In terms of time, in addition to regular and periodic diagnostic checks are also important in some cases, to carry out inspections so-called on-line monitoring. By this way it can avoided any of unexpected breakdowns and serious accidents.*

## **1. Úvod**

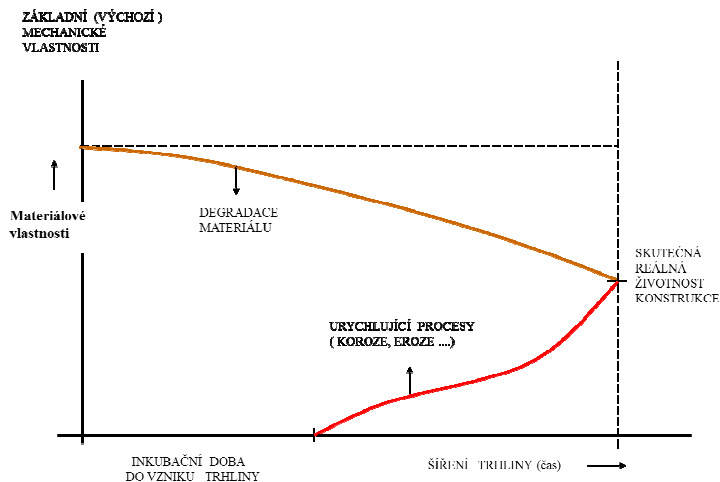
Diagnostické metody umožňují stanovovat chování konstrukcí a určovat jejich technický stav na základě nedostatečného počtu informací o sledovaném objektu. Akustická emise slouží ke zjišťování integrity materiálu, k detekci trhlin, ke sledování vzniku a rozvoje trhlin, k monitorování těsnosti systémů (úniky), k detekci materiálových vad tlakových zařízení či jednotlivých komponentů, k vyhodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálu, ke sledování kritických míst tlakových nádob, potrubí a konstrukcí, ke sledování procesů při únavových materiálových zkouškách a destrukčních testech.

## **2. Obecné postupy pro sledování technického stavu konstrukcí**

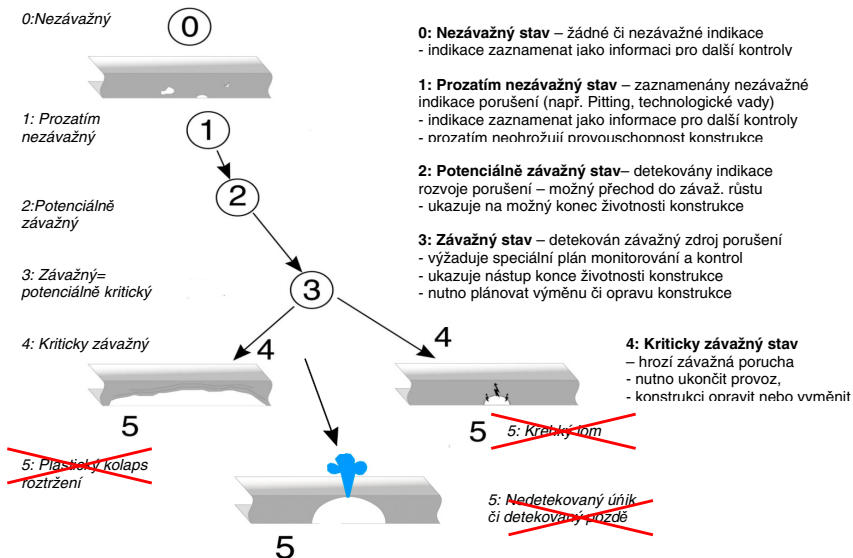
### **2.1. - Cíl a smysl diagnostických metod**

Diagnostické metody umožňují stanovovat chování konstrukcí a určovat jejich technický stav na základě nedostatečného počtu informací o sledovaném objektu.

Na obr.č.1 je schematicky znázorněn vývoj degračních procesů v materiálu a vznik a rozvoj defektu , který vede ke stanovení skutečné životnosti konstrukce.



Obr. 1 Degradace vlastností materiálu  
Fig. 1 Degradation of material properties



Obr. 2 - Hodnocení,  
Fig. 2 Evaluation



## **2.2 - Možnosti technické diagnostiky**

- a) Sledování měřitelných fyzikálních veličin za provozu (tlak, teplota, průtok, výkon apod.)
- b) Sledování změn mechanických veličin jako důsledek provozních procesů (síla, deformace, napětí apod.)
- c) Stanovení vlivu stárnutí konstrukcí a provozních zátěžných podmínek na degradaci materiálových vlastností (mez kluzu, mez pevnosti, mez pevnosti při tečení, tažnost, tvrdost, vrubová houževnatost apod.)

## **2.3 - Postupy provádění inspekcí**

- a) Periodické - četnost provádění inspekcí je stanovena normativními předpisy, zvyklostmi a také na základě provozních zkušeností
- b) Kontinuální (monitorování) - sledování stavu zařízení podává časově detailní návaznou informaci o chování objektu a jeho dílčích změnách s možností okamžitého zásahu resp. změny provozních podmínek včetně odstavení zařízení z provozu

## **2.4 - Dodatečné provozní měření mechanických veličin**

- s cílem ověření původních výpočtových metod pro dostatečnou pevnostní únosnost a životnost konstrukcí (měření úrovně namáhání, sil, deformací a jejich změny)

## **2.5 - Zpřesněné odhady životnosti konstrukcí po dané době provozu**

- aplikace moderních metod lomové mechaniky a statistické přístupy odhadu zbytkové životnosti zařízení

## **2.6 - Efektivní přístupy k zajištění bezpečnosti provozu konstrukcí**

- Risk Based Inspection (RBI) byl vyvolán

- a) Zvyšujícími tlaky společnosti na bezpečnost průmyslových provozních jednotek
- b) Vlivem tlaku trhu na snížení výrobních nákladů včetně nákladů na inspekce a údržbu
- c) Požadavky na prodloužení původní projektované životnosti dožitých konstrukcí
- d) Zvyšujícími se parametry moderních výrobních celků včetně náročných komplexních inspekčních metod

Jedním z principů RBI je odhad rizik a tomu odpovídající rozložení nákladů (prostředků) v čase

*RBI - zavádí 3 úrovně hodnocení*

- I. nízké riziko
- II. střední riziko
- III. vysoké riziko

Těmto třem úrovním odpovídají adekvátní postupy inspekce

Z hlediska ekonomického hodnocení účinnosti inspekce lze posuzovat její aplikaci na dané technické zařízení dle následujícího schématu:

$$B = P_e \times P_f \times (C_o - C_h) - C_i$$

B - Ztráta nebo Zisk

$P_e$  - Pravděpodobnost, že defekt existuje (pokud defekt existuje .....  $P_e = 1$ )

$P_f$  - Pravděp., že defekt najdeme NDT metodou (pokud defekt najdeme  $P_f = 1$ )

$C_o$  - Cena opravy zařízení po odhalení defektu

$C_h$  - Cena havárie zařízení zaviněná defektem

$C_i$  - Cena inspekce

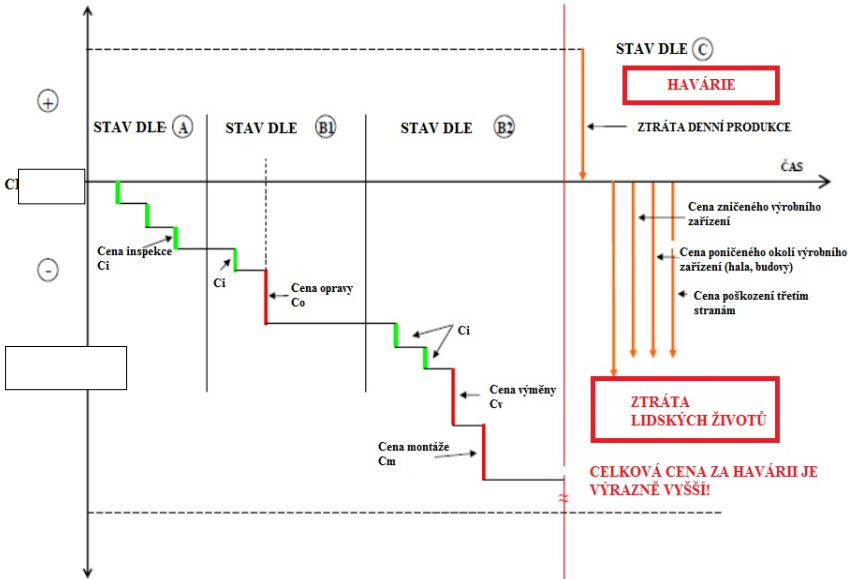
Celá záležitost hodnocení se zúží na rozdíl mezi cenou opravy zařízení a cenou za havárii, neboť cena za inspekci ve srovnání s oběma cenami je zanedbatelná.

Časový vývoj zisku nebo ztrát výrobního zařízení je znázorněna na obr. č.3.

Je zřejmé, že pro ekonomu je požadavek na inspekci zařízení vždy ztrátovou položkou a proto téměř vždy vyžaduje co nejlevnější řešení, čímž – bohužel – zvyšuje riziko přiblížení se potenciální havárii.

V případě vzniku havárie dojde k ztrátě denní produkce, destrukci výrobního zařízení a dalším případným škodám, které jsou úměrné rozsahu havárie – většinou o několik řádů vyšších než vynaložené dosavadní náklady. Tyto náklady jsou dílče hrazeny pojišťovnou eventuálně ze zisku společnosti.

V případě ztráty lidských životů je tato ztráta nenahraditelná.



Obr. 3 Schematické znázornění nákladů během životnosti konstrukce

Fig. 3 Schematic view of costs during the lifetime of structure

### Co nás stojí selhání konstrukce (lom) vedoucí k havárii?

Klasické metody nedestruktivních kontrol jsou používány jednak při výrobě konstrukcí - tlakových nádob a potrubních systémů a dílčích komponent, a dále zejména při provozních odstávkách a revizích zařízení po určité době provozu.

Perioda odstávek a inspekcí je stanovena většinou individuálně a musí splňovat obecně kladené požadavky norem.

U starších zařízení, která většinou pracovala, a v celé řadě případů stále pracují, při nižších výkonových parametrech a většinou byla při výpočtech předimenzována, jsou tyto metody kontrol adekvátní.

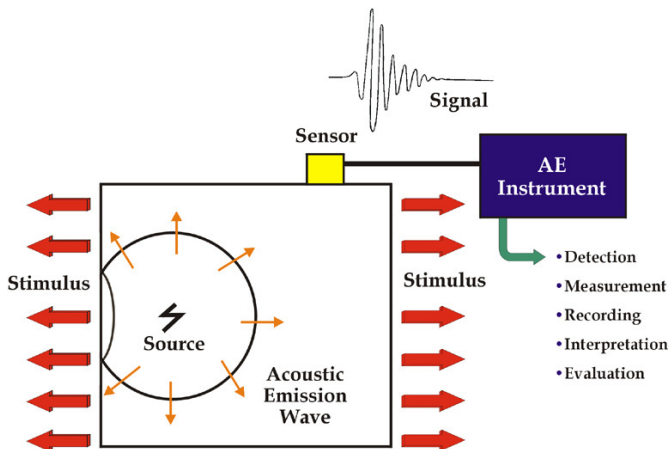
Naproti tomu nově navrhované průmyslové provozy, u nichž je zvýšené riziko selhání z důvodů požadovaných maximálních výkonů, je nutné kromě klasických nedestruktivních metod aplikovat metody, které umožňují již od samého počátku, kontinuálně sledovat chod a stav zařízení pracujících s vysokými provozními parametry, jako je tlak, teplota, prostředí apod.

Dle obrázku 2. je důležité monitorovat provozovaná zařízení některou z novějších NDT metod, které svým charakterem tuto možnost nabízejí.

Jednou z těchto metod je metoda akustické emise.

### 3. Akustická emise – princip a definice

Akustická emise je transientní elastická vlna generovaná náhlým uvolněním energie z lokalizovaného zdroje v materiálu, viz Obr. 4.



Obr. 4 Principy detekce akustickou emisí,  
Fig. 4 Principles of Acoustic Emission Detection

Akustická emise je defektoskopická metoda na integrální detekování, lokalizaci a vyhodnocení materiálových vad a trhlin.

Principem metody je „odposlech“ a vyhodnocení procesů probíhajících v materiálu během zatěžování zařízení, tedy při tlakových zkouškách nebo za provozu. U sledovaného zařízení se na vytypovaná místa rozmístí snímací sondy (v případě

horkého tělesa se na povrch navaří tzv. vlnovody procházející izolací a sonda se montuje na jejich konce). Sonda je přes předzesilovač signálu a koaxiální kabel připojena na analyzátor vln a řídicí počítač, umístěné v bezpečné vzdálenosti. Jako pomocná veličina je zaznamenáván tlak, případně teplota. Naměřená data jsou nahrávána do počítače k dalšímu zpracování (vyhodnocování).

### 3.1 - Aplikace metody akustické emise

- Hodnocení fyzikálních procesů probíhajících v materiálu
- Monitorování kritických míst tlakových nádob, mostů, potrubních uzlů
- Detekce materiálových vad tlakových nádob, mostů...
- Monitorování únavových a destrukčních procesů

#### Oblasti použití:

- Mosty
- Tlakové potrubní uzly
- Části tlakových potrubí
- Tlakové nádoby
- Zásobníky (kulové, tlakové)
- Ocelové a betonové konstrukce
- Ventily
- Armatury
- Skladovací nádrže

#### Monitorování úniků

- Monitorování kritických míst
- Monitorování netěsností ventilů

#### Možnosti použití :

- Petrochemický průmysl
- Energetika
- Plynárenství
- Vodárenství
- Chemie

#### Výhody akustické emise

- vysoká citlivost
- detekce defektu v celém objemu testovaného objektu
- možnost trvalé instalace
- flexibilita aplikace
- možnost měření za provozu

#### 4. Závěr

Defektoskopická a diagnostická činnost je v současné době na okraji zájmu společnosti, neboť nepřináší v ekonomickém pojetí bezprostřední zisk vlastníkům výrobních zařízení. Ve svém důsledku se jí věnuje poměrně úzká skupina odborníků, z nichž většina – troufnu si tvrdit – má toto povolání jako koníčka, hobby.

Přesto se snaží provádět osvětu a propagaci nedestruktivních činností pro širokou technickou veřejnost prostřednictvím České společnosti pro nedestruktivní testování, pořádáním odborných akcí, seminářů, národních a mezinárodních konferencí.

Důležitou oblastí, která je opomíjena, je i výchova mladých odborníků z tohoto oboru, neboť zkušený odborník defektoskopie dozrává po základním teoretickém úvodu v praktickém procesu získávání zkušeností, což je časově náročný proces.

Jen málo vysokoškolských pracovišť má ucelený program výuky a výchovy odborníků z této oblasti. Nutno si uvědomit, že riziko selhání konstrukce je nepřímou úměrou našim znalostem. Což opět naráží na ekonomické přístupy k tomuto stavu.

Jestli by si měli ekonomové, potažmo vlastníci technických zařízení něco uvědomit, tak je to skutečnost, že defektoskopická činnost - na rozdíl od jiných, mnohdy zbytečných činností ve společnosti, které přinášejí ve svém výsledku nulový efekt – je vlastně na úrovni prevence, kdy na základě včasných informací pro provozovatele lze vzniku havárií a katastrof, zabránit.

Praktické zkušenosti z ignorování těchto defektoskopických a diagnostických informací, dokazují vznik malých i velkých havárií celosvětovém měřítku. Na základě vyčíslení nákladů na řešení následků těchto katastrof, dostáváme odpověď k titulní otázce článku, co nás stojí případná havárie.

Ing. Václav Svoboda  
technický ředitel  
Preditest, s.r.o.  
Novodvorská 1010/14  
14200 Praha 4  
+420602331005  
[svoboda@preditest.cz](mailto:svoboda@preditest.cz)







## ZMĚNY V NORMÁCH PRO PRŮMYSLOVOU RADIOGRAFII SVARŮ

### CHANGES IN STANDARDS FOR A WELD RADIOGRAPHY

Ing. Michal KUBÍNYI, Ph.D.  
TESTIMA, spol. s r.o.

#### **Abstrakt**

*Předmětem tohoto článku je letmá diskuze nad novými pojmy a změnami v průmyslové radiografii a potažmo radioskopii. Digitální systémy jsou pro práci k dispozici už řadu let, ale platná legislativa a normy doznaly změn až v posledních měsících. Nejvýznamnější změnou, kterou tento článek reflektuje je vydání nové normy ČSN EN 17 636.*

**Klíčová slova:** Průmyslová radiografie, digitální radiografie, ČSN EN 17 636, ASTM E2597

#### **Abstract**

*This article is dedicated to a discussion about new terms and changes in standards for radiography and radioscopy in heavy industry. It has been a long time since digital systems started to be used, but standartization and general rules for their usage has been instroduced fo public use during this year. The most significant change is publication of a new standard ČSN EN 17 636 which is also discussed in this article.*

**Key words:** Radiography, digital radiography, ČSN EN 17 636, ASTM E2597

V průmyslové defektoskopii existují metody, které vyžadují použití přístrojů, ale jejich vývoj se do značné míry liší. Pokud bychom porovnávali ultrazvukové a radiografické zkoušení tak zjistíme, že obě metody jsou zaměřeny na hledání vad v objemu zkoumaného materiálu, ale vývoj přístrojového vybavení se liší. Ruku v ruce jde s tímto i rozdíl ve standardizaci zkoušení a souvisejících normách.

Digitální systémy se ve zkoušení pomocí ultrazvuku používají už skoro 30 let. Více než 100 let byla průmyslová radiografie spojena s filmy. V případě prozařování s digitálními systémy existují příklady už také dlouhá léta, ale nepoužívají se v radiografii v míře a rozsahu jak tomu je u ultrazvuku. Důvodů může být několik, ale jeden z hlavních je harmonizace norem, které novou techniku akceptují a vytváří prostor pro její použití.

Pojmout problematiku digitální radiografie je možné pouze jako komplexní záležitost celého systému. Pro kvalitu snímku je tedy důležitý i zdroj záření. V případě použití rentgenky se používá k měření ohniska předpis ASTM E1165, ze kterého vychází i Evropská norma 12 543. V současné době byla uvolněna nová revize normy ASTM a na aktualizaci Evropské normy se pracuje. Jedním z problémů předchozích revizí bylo rozdělení do 5 sekcí, které je nepraktické a může způsobit nejednoznačné ohodnocení ohniska. Nový standart zavádí matematické operace do vyhodnocení ohniska, místo ručního vyhodnocení a tím snižuje směrodatnou odchylku měření pod 1% hodnoty. Výsledkem má být do budoucna měření, které nabídne uživateli jednoznačné výsledky.

Digitální průmyslovou radiografií lze z pohledu záznamového média rozdělit na systémy používající paměťové fólie, též značeno jako CR, a systémy využívající plochých detektorů záření značených DDA. Filmy pro použití v průmyslové radiografii byly vyvinuty s cílem dosažení maximální kvality obrazu. U digitálních systémů lze popsat kvality výsledného obrazu více parametry. Neostrost obrazu se měří pomocí místního rozlišení označovaného též SRb z anglického „basic spatial resolution“. Hodnota zčernání se u digitálních snímků nepoužívá jak tomu je v případě radiografie na filmy. Místo toho byly zavedeny jiné parametry určující kvalitu obrazu na základě hladiny šumu v obraze.

Hlavním parametrem pro popis kvality obrazu se tedy stává normalizovaná hodnota odstupe signálu od šumu. Zjednodušeně to tedy lze popsat jako poměr hodnoty střední hodnoty jasu ku jeho směrodatné odchylce. Tento poměr je sám značen jako odstup signál šum. Dobře popisuje chování případného detektoru na rovnoměrném pozadí. Hodnota tohoto parametru bohužel nezávisí na jemnosti detailu, který v obraze je možné rozeznat. S cílem zavést závislost odstupe signálu od šumu na velikosti detailu rozeznatelného v obraze byla uvedena pro průmyslovou radiografií normalizovaná hodnota tohoto parametru. Normalizace spočívá především v dělení odstupe signál šum hodnotou SRb, která zde reprezentuje právě jemnost detailu v obraze. Dalším hodnotícím kritériem může být ještě hodnota kontrastu vůči šumu. Na rozdíl od samotného signálu je kontrast už rozdíl hodnot na volné části radiogramu a na zkoumaném objektu. Platné evropské a ASTM normy pro digitální radiografií tento parametr už neuvádí jako hodnotící parametr kvality obrazu. Důvodem může být už jen to, že normalizovaná hodnota poměru signálu a šumu v sobě obsahuje už jádro hodnotícího kritéria odstupe kontrastu od šumu.

Pochopením provázanosti mezi třídou filmového systému a hodnotou normalizovaného odstupe signálu od šumu u digitálního systému dává uživateli možnost použít pro stejnou aplikaci jak film tak digitální systém. Toto výrazné zjednodušení práce je díky nově platné normě ČSN EN 17 636. Tato norma pro průmyslovou radiografií tedy v plné šíři nahrazuje jak EN 1435 tak EN 14 784. Srovnání hodnocení kvality obrazu je též uvedeno v Tabulce 1.

Film	Digitální radiografie
Třída filmového systému (C3, C4, C5 ...) - Klasifikace dle ISO 11 699	Místní rozlišení / Basic spatial resolution (SRb) - Dvojdírková měrka dle EN 462/5 či ASTM E2002-98
Optická hustota / zčernání (2.0, 2.5, ... ) - Citlivost na základě EN 462-1,2,4	Normalizovaný odstup signálu od šumu (SNRn) - Citlivost na základě EN 462-1,2,4

Tabulka 1. Hodnotící faktory kvality obrazu

V rámci hodnocení kvality obrazu jsou zvláštní kapitolou ploché detektory DDA. Stávající analogové systémy používající převaděče obrazu pracovali především v rámci norem ČSN EN 12 681 a ČSN EN 13 068. Tyto normy odkazují pracovníka na starou normu EN 1435. Nová norma EN 17 636 už zavádí korekce vadných bodů dle ASTM E2597. Vyhodnocení a správná korekce vadných bodů má význam při hodnocení kvality obrazu. Z tohoto důvodu musí být u systému dostupné ověřit si rozsah korekce plochého detektoru. Aspekt v digitální radiografii, který dává možnost zásahu do snímku před vyhodnocením je průlomový v kontextu nahlížení na práci s radiogramem.

Použití plochých detektorů tedy přináší i práci s vadnými body či pixely. Důležité je uvědomit si, že při práci s vadnými body či pixely se ne vždy jedná pouze o tzv. mrtvé



body, které už nereagují na dopadající záření. Klasifikace se provádí i na základě času nutného, aby bod dosáhl své hodnoty. Body, které reagují zpožděně jsou považovány za vadné. Tyto vadné body jsou významné především u radioskopických systémů. Na druhou stranu: pokud pixel reaguje příliš rychle, tak je jeho hodnota zašumělá a je tedy vadný. Pokud bude bod ve své výsledné hodnotě mít intenzitu výrazně větší nebo menší než je střední hodnota okolí, tak pak bude také vadný. Celý popis vychází z norem ASTM, které jsou přebírány do evropských předpisů.

Další významnou změnou je, v oblasti použité techniky a norem, zobrazení získaného radiogramu. Při prozařování na filmy jsou následně použity negatoskopy jejichž minimální požadavky specifikuje norma ISO 5580. U digitální radiografie je to o poznání jiné. Je třeba za každých okolností použít výpočetní techniku. Hlavní důraz je především kladen na zobrazovací jednotku, na monitor. Parametrů je vyžadováno více, ale jako první stojí rozlišení, které by mělo být minimálně srovnatelné s rozlišením zobrazovaného digitálního radiogramu. Sama norma 17 636 diskutuje práci při maximálním skládání dvou sousedních pixelů. Pokud tedy chceme aby nedošlo ke ztrátě informace, tak přepočítávání na větší i menší počet pixelů není vhodné. Se ztrátou informace souvisí i hloubka zobrazení. Minimální požadavek je 8 bit ve stupních šedi. Běžné monitory mají 8 bit, ale v barvách. Pokud se má tedy dosáhnout srovnatelných výsledků, tak je třeba minimálně grafický monitor s 10 bit v barvách.

## **Závěr**

S příchodem nových norem pro průmyslovou radiografii přichází do běžné praxe i použití digitálních systémů. Tyto nové systémy vyžadují, aby si uživatel osvojil především nové termíny a metriky pro určení kvality obrazu. Tento článek přinesl rychlý pohled do této problematiky v kontextu platných norem. Lidé pracující s digitálními systémy se budou muset seznámit s ukládáním a archivací radiogramů pomocí bezztrátové komprese dat. Pro vlastní vyhodnocení se musí už požívat kvalitní grafické monitory místo klasických negatoskopů. Pro další práci v průmyslové radiografii je tedy nutné, aby se čtenář seznámil se zněním ASTM E2597 nebo ČSN EN 17 636.



## ANALÝZA MIKROSTRUKTURY ČLÁNKU ŘETĚZU POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY

### USING OF ULTRASONIC TESTING FOR MICROSTRUCTURE ANALYSIS OF CHAIN LINK

Lukáš PINDOR\*, Štěpán HEFNER\*, Renata SIKOROVÁ\*, Jiří KRUMPHOLZ\*,  
Vojtěch DUDEK\*\*

\*TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, 739 70 Třinec  
E-mail: lukas.pindor@trz.cz, stepan.hefner@trz.cz, renata.sikorova@trz.cz,  
jiri.krumpholz@trz.cz

\*\*ŘETĚŽÁRNA, a.s., Polská 48, 790 81, Česká ves  
E-mail: retezarna@pvtnet.cz

#### **Abstrakt**

*Příspěvek se zabývá posouzením možnosti detekce mikrostruktury, případně vnitřních necelistvostí v článku řetězu pomocí ultrazvukové metody. V rámci experimentu bylo několik článků již hotového řetězu ultrazvukově testováno v imerzní vaně, přičemž výsledky poukázaly na přítomnost různých oblastí lišících se hodnotou koncového echa. Po odbroušení povrchové vrstvy článku byly některé oblasti opětovně ultrazvukově verifikovány. Detekované lokality byly následně z článku vyřezány a byla provedena metalografická analýza se zaměřením na hodnocení mikrostruktury a přítomnost vměstků či jiných nehomogenit.*

**Klíčové slova:** článkový řetěz, ultrazvuk, mikrostruktura

#### **Abstract**

*This paper deals with examining the possibility of detecting of the microstructure or internal discontinuities in the link of chain by using ultrasonic methods. In the experiment, several links of finished chain have been tested in the ultrasonic immersion bath. The results have shown the presence of different areas with different end echo. The surface layer of a link was grinded off and the link of chain was again ultrasonic tested. Some areas were verified, cut off from the link and then the metallographic analysis focused on the analysis of the microstructure and the presence of inclusions or other inhomogeneities was proved.*

**Key words:** chain link, ultrasound, microstructure



## NEDESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ A MONITOROVÁNÍ OCELOVÝCH A BETONOVÝCH STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

### NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND MONITORING OF STEEL AND CONCRETE CIVIL STRUCTURES

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Jan KOBER, Josef KROFTA, , Milan CHLADA

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Praha  
e-mail: zp@it.cas.cz

#### Abstrakt

Stavební konstrukce jako jsou budovy, průmyslové objekty, inženýrské stavby, atd. jsou dlouhodobě vystavovány různým nepříznivým okolním vlivům, které ve spojení s přirozeným stárnutím mohou vést k narušení stability konstrukce až po její katastrofické zhroutilí. Haváriím konstrukcí lze předcházet údržbou a opravami na základě výsledků NDT a monitorování systémem SHM (Structural Health Monitoring). V příspěvku jsou diskutovány výsledky dvou testů stavebních konstrukcí, získané pomocí SHM systémů zahrnujících akustickou emisi (AE) a nelineární ultrazvukovou spektroskopii (NEWS). Prvním testem byla zatěžovací zkouška až do destrukce střechy ocelové skladové haly, kde instalovaný SHM systém s oběma NDT metodami závčas spolehlivě varoval před blížícím se kolapsem již od 60% mezního zatížení. Druhý test se týkal vývoje metodiky určování stupně poškození obtížně diagnostikovatelných stínících betonových bloků, propojených s ocelovými díly. Modelové bloky byly zhotoveny z různých typů pevnostního betonu a testovány třemi procedurami NEWS: Nelineární vlnově modulační spektroskopii (NWMS), procedurou s amplitudovým škálováním buzení (SSM) a procedurou s časovou reverzací tří fázově posunutých signálů (TR-ESAM). Těmito testy byly určeny počáteční elastické nelinearity betonových bloků. Změny těchto nelinearit jsou vysoce citlivými indikátory stárnutí a poškození betonu v provozních podmínkách. Příspěvek je doplněn filmovým záznamem destrukční zkoušky ocelové konstrukce haly.

**Klíčová slova:** Monitorování stavu konstrukcí (SHM), stavební konstrukce, nelineární ultrazvuková spektroskopie (NEWS), akustická emise (AE).

**Poděkování:** Tato práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR TI1/198 a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998

#### Abstract

Civil structures like living and industrial buildings, engineering structures, etc. are exposed to various adverse influences for a long time. These effects in connection with natural aging can lead to structural damage up to catastrophic collapse. Maintenance and repairing based on NDT and structural health monitoring (SHM) can prevent such accidents. Two practical examples of testing supported by SHM systems including acoustic emission and nonlinear ultrasonic spectroscopy (NEWS) are discussed in this paper. First was up to break overloading test of the steel stock roof. SHM system with both NDT methods reliably detected and forewarned incoming limit state of the structure. Second tests were related to design of method for concrete damage assessment at hardly diagnosed shielding concrete segments connected with steel parts. The segment models were made from different concretes. They were tested by three NEWS procedures: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS), scale subtraction method (SSM), and procedure with time reversal of 3 phase shifted excitation signals (TR-ESAM). Initial elastic nonlinearities of the concrete were determined in these tests. Their changes during the service are very sensitive indicators of concrete aging and damage. The short video records of steel structure failure supplement the paper.

**Key words:** Structural health monitoring (SHM), civil structures, nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS), acoustic emission (AE).

**Acknowledgements:** This work was supported by the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic in the projects no. FR TI1/194, with institutional support RVO:61388998.



## K OTÁZCE JEDNOBODOVÉ KALIBRACE FÁZOVÝCH VÍŘIVOPROUDÝCH TLOUŠŤKOMĚŘŮ KOVOVÝCH POVLAKŮ

### ON THE ONE-POINT CALIBRATION OF EDDY CURRENT PHASE METALLIC COATING THICKNESS GAUGES

Vladimír A. SYASKO\*, Irina V. PILATOVA\*, Adam POLÁČEK\*\*

\* Constanta Ltd, PO box 89, St-Petersburg, 198095, Russia,  
tel. +78123722903, e-mail: office@constanta.ru

\*\* NDT1 Kraft Ltd, Krymská 238/18, 101 00 Prague 10, Czech Republic,  
tel. +420267313996, e-mail: info@ndtone.com

#### Abstrakt

*Je zajímavé měřit tloušťku neferomagnetických povlaků na vodivých feromagnetických podkladech při použití fázové vířivoproudé sondy tří vinutí. Známé principy rovnováhy umožňují potlačit vliv mezery, poloměru a drsnosti povrchu na odchylku měření. Ovšem při stejném typu kovového povlaku naneseném na kovové podklady s různou magnetickou permeabilitou a elektrickou vodivostí známé techniky kalibrace zahrnují výrobu vzorových měrek povlaků pro všechny kovy použité jako podklady výrobků. Tento příspěvek předkládá teoretické analýzy úlohu měření a prezentuje, že existují algoritmy změny měřících informací a výpočtu správných kalibračních křivek v celém rozsahu měření při použití jednobodové kalibrace na vzorku kovového podkladu bez povlaku. V příspěvku jsou pojednány základní teoretické principy, algoritmy kalibrace a měření a rovněž výsledky praktické implementace a testování fázové vířivoproudé sondy tří vinutí s elektromagnetickým tloušťkoměrem povlaků K5G.*

#### Abstract

*It is interesting to measure thickness of non-ferromagnetic coatings on electrically conductive ferromagnetic basis using eddy current phase three-winding probe. Known principles of balance provide a possibility to suppress influence of a gap, radius and product surface roughness deviation. However, when the same type of metal coating is applied to the metal substrates with different magnetic permeability and electrical conductivity the calibration of known techniques involves making coating thickness reference specimens of all metals to be used as bases for products. The paper gives a theoretical analysis of the measurement tasks and shows that there are algorithms of measurement information change and calculation of correct calibration curves in the whole range of measurement using only a single-point calibration on a sample of metal base without coating. The basic theoretical principles, the algorithms of calibration and measurement, as well as the results of the practical implementation and testing of the eddy current phase three-winding probe with the electromagnetic thickness gauge K5G are presented in the paper.*

## **POTENCIÁLNÍ NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY NANOVLÁKEN A NANOTEXILÍÍ POTENTIAL NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR DIAGNOSTIC OF NANOFIBRES AND NANOTEXTILES**

**Lubomír SODOMKA**

Adhesiv, Liberec

lubomir.sodomka@volny.cz

### **Abstrakt**

*I když se s existencí nanovláken ve výrobních procesech setkáváme již od 40tých let 20tého století podáním patentů na elektroztvlákňování A Formhalsem, je možné, že nanovláčna zlata a stříbra již znali staré kultury, jakou je např. Starý Egypt a že se uhlíkovými nanovláknými nepřímo i setkal T.A.Edison. Produkce nanovláken se rozvinula až po využití patentů Formhalse na technologie přípravy polymerových nanovláken elektrostatičky, takže zatím nejrozšířenější jsou elektrostatičké zvlákňovací metody, které zkráceně nazvané elektroztvlákňovací. Ukázalo se však, že kromě elektroztvlákňování bylopoději navržené produktivnější metody na výrobu nanovláken, a to metody rozfukování a metody odstředivého zvlákňování nazývané též silové zvlákňování. Kromě přípravy polymerových nanovláken, byly rozvinuté technologie přípravy uhlíkových tubulenových nanovláken, které mají proti polymerovým vláknům univerzální vlastnosti a mnohem větší možnosti aplikací. Rozsáhlá výroba nanovláken si vyžaduje diagnostické metody jak technologií, struktury a vlastností, neboť nanovláčna se stanou materiály budoucnosti.*

**Klíčová slova:** nanovláčna, polymerová, uhlíkova nanovláčna technologie nanovláken: elektroztvlákňování, technologie rozfukování, odstředivé zvlákňování, aplikace nanovláken, nanomateriálová éra

### **Abstract**

*Although the existence of nanofibers in production processes meet since 40th years of the 20th century filing patents on electrospinning by A Formhals, it is possible that gold and silver nanofibers already knew also ancient cultures, such as ancient Egypt, and that the carbon nanofibers indirectly met Edison. Production of nanofibers has evolved to the use of patents Formhals on the preparation of polymer nanofibers electrostatically, so far the most widely used are electrostatic spinning method, which in short called electrospinning. However, it appeared that besides electrospinning were proposed more productive method for the production of nanofibers, melt blowing methods and centrifugal spinning method, also called forcespinning. In addition to the preparation of polymer nanofibers have been developed technology of preparation of carbon nanotubes, which have more universal properties than polymer fibers and much more application options. Because the nanofibers are the new universal materials it is necessary to use all the known diagnostic methods for the determination their structures and properties which review is made in this contribution.*

**Key words:** nanofibers, polymer nanofibers, carbon nanofibers, electrospinning, melt blowing and forcespinning, nanofiber application, nanofiber era

### **Úvod**

I když nanovláčna jako materiálové struktury jsou v použití známá pravděpodobně již ve starých civilizacích jako je staroegyptská, pojmy nanočástice a nanovláčna jsou produktem 20.století. Podnět k zavedení dal R.Feynman, nositel Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1963 [1]. Na seminární rozpravě

po přednášce upozornil, že je velký prostor pro studium v oblasti rozměrů od 1 nm po 100 nm a v budoucnu bude možné vytvářet „stroje“ v rozměrech nanometrů (1nm =10<sup>-9</sup>m), na kterých je založena celá molekuleová biologie a život. Tak R.Feynman předpověděl éru mikroelektroniky a nanoelektroniky. Práci a manipulaci dokonce s jednotlivými atomy uskutečnil již japonský fyzik, laureát Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1973 [1]. L.Esaki, známý též objevem esakiových diod, když vytvářel tenké vrstvy karbidu křemíku ukládáním jednotlivých atomů a vytvářením umělých krystalových vrstev i vytvářením v nich poruch zavedl jako první atomovou technologii. Cílem bylo vytvořit elektronické prvky pro generátory vysokých frekvencí. Pojmy nanofyzika, nanověda a nanotechnologie zavedli pak později E. Drexler a japonský fyzik. Název jako první prosadil do názvosloví v roce 1974 japonský fyzik Norio Tagiguci a posvětil je v roce 1979 v knize Engines of creation: The dominy era of nanotechnology a tím byla zahájena éra nanotechnologie i terminologicky [1]. Zavedení nano-, mělo ten význam, že se rozměr částic kvantifikoval pomocí nanometru (10<sup>-9</sup> m), tj. do rozměrů násobků atomů a molekul, se kterými již pracovala chemie (suspenze, koloidy) i biologie v rozměrech bakterií a virů. Nanočástice se definují v geometrických rozměrech nula jako bodové částice s velikostmi 10 až 100 nm a výše. Nad 100 nm je možné částice označovat také jako mikročástice. Pro částice s hodnotami rozměrů 10nm a více ve dvou rozměrech byl zavedený pojem nanovláknka, kolem 1µm pak mikrovláknka. I když molekuly mají rozměry zlomků nm a jsou a mají mezní rozměry kolem 1nm, jednotlivé molekuly se do nanočástic nepočítají. Nanovláknka mají geometrický rozměr jedna, D1. Nejvíce NV je vytvořených z polymerových látek, výjimečně pak z látek krystalických a dnes již i velkém množství nanovláken grafitových. Příprava NV založená na vědě 19. a počátků 20. století se datuje do 40.let 20.století. První pokusy o přípravu NV byly provedené v letech 1934 až 1944. První známá publikace o přípravě NV se přisuzuje A. Formhalsovi v patentes z let 1934 až 1944 [2], [3], [4], [5], [6]. Další krok v přípravě nanovláknkových rounin učinil v roce 1966 H.L.Simons [7], který využil jako první elektrostatického zvláknování k přípravě rounin (netkaných textilií). O historii NV najdeme pojednání také např. v [9]. Nanovláknka se stávají, pokud jde o jejich vlastnosti materiály s kvantově fyzikálními vlastnostmi zaplňujícími materiálovou mezeru až do samotného dna. Pokud jde o jejich využití, jsou aplikovatelná ve všech oborech lidské činnosti svými univerzálními vlastnostmi právě tak, jako byl kámen ve staré době kamenné a opacovaný v neolitu, bronz v době bronzové a železo s jejími modifikacemi v obě železné. Lze tedy předvídat, že nanovláknka vytvoří novou materiálově civilizační éru, eru nanovláken, navazující na dobu železnou. Tím se zakončí materiálově civilizační éry až ke dnu kvantových vlastností, jak to předpověděl R. Feynman. K tomu je třeba připravit také v současné době technologicky dostupná v libovolném množství nanovláknka k diagnostice jejich struktury a k hodnocení jejich vlastností zvláště pak kvantově fyzikálních vlastností. K tomu je třeba vybrat ty existující disgnostické metody a metody určování vlastností nanovláken, aby byly připraveny vytvořit novou materiálově civilizační éru, éru nanovláken. Nyní provedeme výběr a klasifikaci těchto metod, které budou poskytovat nadále informace o struktuře a vlastnostech nanovláken. Je třeba podotnout, že nanovláknka lze vyrábět v takovém množství, aby pokryla požadavky všech oborů, zvláště pak textilních a poskytla mu nanovláknka v takovém množství, které požaduje textilní výroba. Vzorky takových textilií již existují, jak svědčí obr.1.



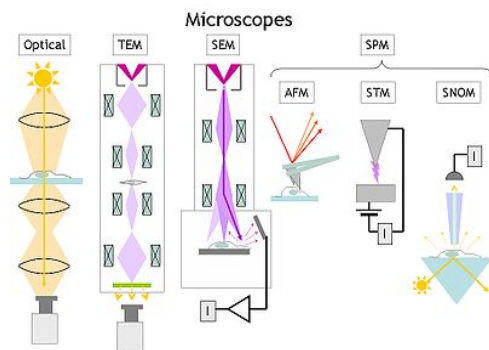
*Obr. 1 Konfekční výrobky z nanovláken:čepice, župan, šála. Vynikají hebkostí a tepelnou izolací*

Obecně považujeme za lineární (D1) textilie vlákna, příže, kabílky, kabely a lana, za textilie plošné (2D) tkaniny, pleteniny a rouliny a prostorové (3D) jako jsou hadice, oděvy a další. U všech je třeba hodnotit jejich strukturu a vlastnosti, které spolu úzce souvisejí. Struktura je zodpovědná za vlastnosti a určuje také technologii. Strukturou objektu rozumíme soustavu určenou základními stavebními

jednotkami, jejich uspořádáním a silami vzájemné koheze v textilích. U vláken jde o atomy či molekuly jako základní součásti a jejich uspořádání ve vláknech. U složitějších textilií jsou základními strukturními prvky pak vlákna a zjišťujeme jejich rozložení a vazbové síly mezi vlákny v textilích. Např. u tkanin jde o síly tření. Při hodnocení struktury vláken se zjišťuje rozložení základních prvků v nanoměřítku, v rozložení vláken ve složitějších textiliích měříme v makroměřítu. K metodám určování struktury užíváme metody přímého zobrazování jako jsou metody mikroskopické a k metodám nepřímým užíváme reciprokého (Fourierova) zobrazování. Ke zjišťování struktury v nanoměřítku se užívají na přímé zobrazování metody optického, elektronového mikroskopu, atomového silového mikroskopu a z nepřímých difrakční metody rentgenového záření, elektronů a neutronů, různé spektroskopické metody, rezonanční metody, metody akustické emise, laserové difrakce a další.. Tyto metody, které jsou pak zvláště důležité k hodnocení struktury, vlastností a technologii nanovláken, postupně probereme.

### 1 Přímé (zobrazovací) metody

Jde o metody mikroskopické a interferometrické, které jsou také vhodné pro zobrazování povrchů. Mezi mikroskopické metody pro zobrazování nanovláken řadíme optické mikroskopy, elektronové mikroskopy TEM, SEM a řádkovací (rastrovací, skanovací) silové mikroskopy (AFM). Podstata jednotlivých metod je uvedena na obr. 2.



*Obr. 2. Porovnání podstaty mikroskopického zobrazování zleva do prava. Světelný mikroskop (optical), transmisní elektronový mikroskop (TEM), řádkovací elektronový mikroskop (SEM). Atomový silový mikroskop (AFM) (google).*

Všechny typy mikroskopů se hodí pro zobrazování nanovláken. Nejjednodušší obsluhu mají optické mikroskopy, neboť pracují ve vzduchu a není třeba zvláštní přípravy vzorků. Laserové konfokální mikroskopy poskytují zvětšení v rozsahu 400 až 14 000 násobném zvětšení, zatímco optický mikroskop pracuje nejvýše se zvětšením 1000násobném. Pro vícenásobné zvětšení se pak využívají elektronové mikroskopy na průchod (transmisní, TEM), řádkovací elektronové mikroskopy (SEM), řádkovací tunelové mikroskopy (STM), atomový silový mikroskop (AFM) a řádkovací optický mikroskop v blízkém poli (near field scanning optical mikroskopy, SNOM). Tento mikroskop je zvláště vhodný pro zobrazování nanočástic a tedy i nanovláken. Mikroskop AFM je vhodný pro zjišťování kohezních sil povrchů nanovláken a adhezních sil k jejich povrchům. Příklady zobrazení jsou uvedené u konkrétních typů vláken později. K zobrazování povrchů se s výhodou používá také optických interferometrických metod [4]. Nyní probereme jednotlivé přímé metody poněkud podrobněji.

### Optické mikroskopy

Zobrazování optickým mikroskopem, jehož podstata je vidět z obr.2, ve srovnání s ostatními typy mikroskopů, je nejméně náročné a dají se ze zobrazení nanovláken určit průměry a tvary vláken. Metoda je běžná v každé laboratoři. Zvětšení optickým mikroskopem může dosáhnout až tisícínásobné

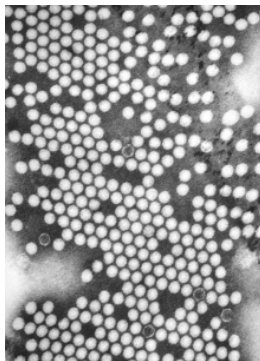
hodnoty. Mnohem užívanější pro přímé zobrazení (nano)vláken jsou metody elektronové mikroskopie a metoda atomové tunelové mikroskopie, která je výhodná zvláště k zobrazování povrchů. Jde o elektronovou mikroskopii na průchod (TEM) a o rádkovací elektronovou mikroskopii (SEM). Postata jejich funkce je analogická k optické mikroskopii a je patrná, z obr. 2 pod označením TEM a SEM.

### **Elektronový mikroskop na průchod (transmisní elektronový mikroskop, TEM)**

Při transmisní elektronové mikroskopii je zobrazovací svazek elektronu směřovaný na plochu velmi tenkého vzorku, kterým svazek elektronů prochází a na stínítku zobrazuje v projekci i vnitřek nanovlákn a při vytváření obrazu zastupuje světelný svazek, který se snímá CCD kamerou. Na obr.2 je představený jeden z typů TEMu a na něm získaný obraz (obr.3).



*Obr. 3. TEM typu JEM 2100F*

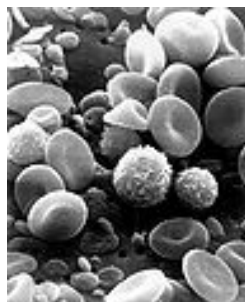


*Polio virus 30 nm*

Dalším typem elektronového mikroskopu je SEM typ JEOL 6300, který je na obr.4 a snímek krve na obr.5 ukazuje jeho hloubku ostrosti. Z něho je vidět, že na SEMu se dosahuje větší hloubka ostrosti a rozlišení až do 1,2 nm. Pro studium povrchu nanovláken se užívá zvláště ke studiu povrchů, kohezčních a adhezčních sil atomový silový mikroskop AFM (ASM) (obr.6), který umožňuje také určovat kohezční síly povrchu a adhezční síly částic k povrchu. Podstatu funkce tohoto mikroskopu popisuje další text.



*Obr. 4 SEM JEOL 6300*



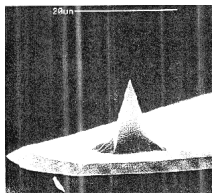
*Obr. 5 Snímek SEM krve*

### **Podstata a funkce AFM**

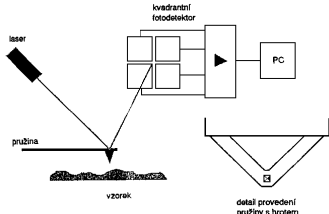
Podobně jako u STM je povrch vzorku mapován hrotem pikometrových (pm) rozměrů, který je obvykle odleptán na křemíkové destičce nebo připravený z uhlíkových nanotrubiček (obr.6.). Destička tvoří dokonalou pružinku, jejíž síla je úměrná výchylce. Princip ATM (ASM) je uvedený na obr.6.



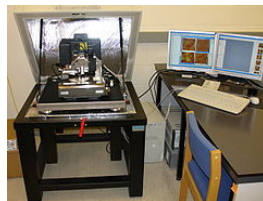
Prohnutí pružinky se měří odrazem laserového záření na kvadrantový fotodetektor, který určuje přesnou polohu pozorování. Hrot je přitahován atomovými silami povrchu až do vzdálenosti, kdy začínají převládat síly odpudivé. AFM je schopen zobrazovat i takové meziatomové síly, které označujeme fyzikální (van der Waalovy). Používají se dva způsoby snímání sil, a to při konstantním a proměnném ohybu pružiny. Kromě toho AFM může pracovat v kontaktním režimu hrotu a vzorku (k měření odpudivých sil), nekontaktním a poklepovém režimu. Komerční provedení AFM je na obr.8.



Obr. 6. Hrot AFM



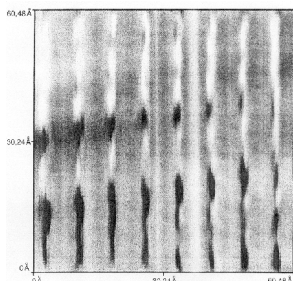
Obr. 7. Podstata AFM



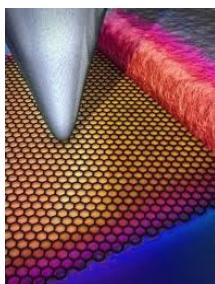
Obr. 8 Komerční AFM  
Züreks 2007

Dnes již existuje velké množství modifikací AFM. Některé z nich jsou schopné měřit i povrchové náboje a některé i mnohem větší síly než jsou fyzikální, chemické, vodíkové můstky a síly kovalentní. Příklady topografií povrchů makromolekul polytetrafluorethylenu (obr. 9), grafenu (obr. 10) a uhlíkových nanotrubiček (obr. 11) jsou na uvedených obrázcích.

K pochopení struktury nanovláken a mechanismu adhezního spojování a pojení nanovláken a textilií bude třeba přistoupit i k výzkumu povrchů metodami STM a AFM. Podrobnosti o STM a AFM a jejich využití lze najít v celém čísle Československého časopisu pro fyziku svazku 48 v roce 1998 v dvojčísle 3-4 a v pozdějším textu.



Obr. 9 Povrch PTFE  
molekul pořízených AFM



Obr. 10. AFM snímek  
grafenu



Obr. 11 AFM snímek  
nanotrubiček

### Interferenční metody

Interferenci nazýváme jev, při kterém dvě nebo více vln, vycházejících z různých zdrojů, které se setkají v daném místě a čase se složí ve výslednou vlnu jedinou. Ta je pozorovatelná pouze v daném časovém okamžiku. Se změnou času mění se i výsledný interferenční obrazec v závislosti na frekvenci obou zdrojů a výsledný interferenční obrazec může být při větším frekvenčním rozdílu, než je časová rozlišovací schopnost oka, nepozorovatelný. Uvažujme interferenci dvou rovinových vln  $u(1)$ ,  $u(2)$  popsanych následujícími vztahy

$$u(1) = A(1) \exp i(\omega t - k(1)x_1), \quad i \text{ je imaginární jednotka } i = \sqrt{-1}, \quad (1)$$

$$u(2) = A(2) \exp i(\omega t - k(2)x_2 + \varphi),$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence a  $k$  je úhlový vlnčet  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  vlnová délka,  $x_{1,2}$  jsou polohy zdrojů 1 a 2.

Výsledná vlna  $u(x,t)$  v místě  $x$  a čase  $t$  je určena podle principu superpozice (skládání) kmitů rovna

$$u(x,t) = u(1)+u(2) = \exp i\omega t \exp i(\Delta\omega t) (A(1) \exp i k(1)+A(2) \exp (i k(2)+\varphi))$$

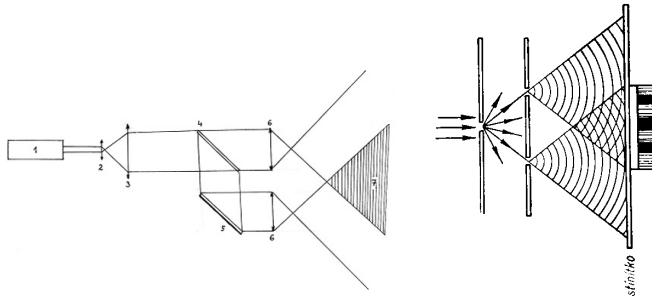
$$= A \exp i \omega, \text{ kde } A = \exp i(\Delta\omega t) (A(1) \exp i k(1)+A(2) \exp (i k(2)+\varphi)) \quad (2)$$

$$= (\Delta\omega t) (A(1) \exp i k(1)+A(2) \exp (i k(2)+\varphi)) \exp i\omega t$$

kde  $A$  je amplituda výsledného kmitání. Při pozorování vln vyšších frekvencí (větších než 25Hz ) je měřitelná pouze plošná hustota výkonu (intenzita) vlnění

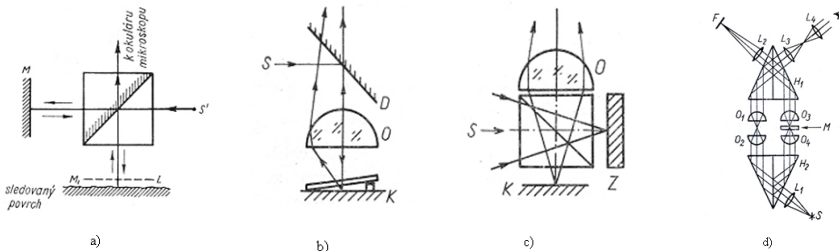
$$I = au^2, \quad (3)$$

kde  $a$  je rozměrová konstanta.



Obr.12 Vznik interference z jednoho zdroje

Dnes při existenci laserů, zdrojů koherentního záření lze uskutečnit interferenci rozdělením laserového svazku jediného laseru, nebo interferencí světla ze dvou laserů, jak ukazuje obr. 12. Na základě jevu interference byla zkonstruována celá řada interferometrů pro různé účely použití od přesného měření délek (Michelsonův interferometr), k měření indexu lomu (Jaminův interferometr) až k interferometrům pro přesné měření povrchů pevných látek, krystalů i kondenzovaných látek (např. Linnikův, Gollastonův) a různé typy interferenčních mikroskopů. Příklady principů čtyř typů interferenčních mikroskopů jsou uvedené na obr.13a, b, c, d.



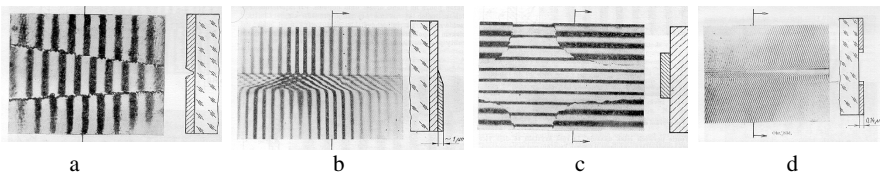
Obr. 13 Různé typy interferometrů: a) Linnikův, b) jeho varianta, c) pro pozorování proužků stejné tloušťky, d) pro pozorování v prošlém světle.

### Interferometrie ke studiu povrchů

Interferenční studium povrchů nanoláčen provádíme pomocí interferenčních mikroskopů. Jak se projevují různé tvary výstupků na povrchu na interferenčním obrazu ukazují obr. 14 a, b. Zobrazování bylo prováděné při pozorování proužků stejné tloušťky (obr.14). Na obr.15 jsou v levé části interferenční obrázce a v pravé části je odpovídající profil povrchu. Směr šipek ukazuje směr stoupání klínu.

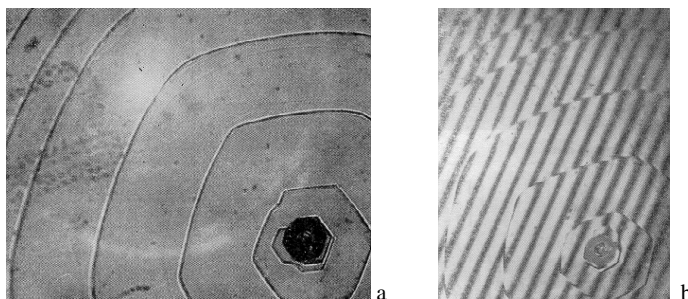
## Interferometrie ke studiu povrchů

Interferenční studium povrchů nanovláken provádíme pomocí interferenčních mikroskopů (obr.13). Jak se projevují různé tvary výstupků na povrchu na interferenčním obrazu ukazují obr.14 a, b, c, d. Zobrazování bylo prováděné při pozorování proužků stejné tloušťky (obr.14.c). Na obr.14 jsou v levé části interferenční obrazce a v pravé části je odpovídající profil povrchu. Směr šipek ukazuje směr stoupání klínu.



Obr. 14.a, b, c, d. Interferenční zobrazení různých reliéfů (profilů) povrchu.

Mnohem více informací poskytuje interferenční mikroskop proti obyčejnému mikroskopu, jak ukazují obr 4.16 a, b na povrchu monokrystalů karbidu křemíku (SiC), který znázorňuje růstové plochy na šroubové dislokaci. Z interferenčního obrazce je možné určovat i tloušťku růstových ploch.



Obr. 15. a) Mikroskopický snímek povrchu SiC, b) snímek téhož povrchu interferenčním mikroskopem

## Některá další využití interferometrické mikroskopie

povrchy představují plošnou poruchu v krystalech a vykazují jevy odlišné od jevů v objemu látek a zvláště pak v nanovláčkách. Jsou proto středem zájmu fyziky, techniky a nanotechnologie, neboť také představují vstupní bránu do objemu krystalů i nanovlken. Jeví také odlišné zákonitosti než má objem krystalů a nanovláken, jak je ukázané také ve fyzice povrchů.

Ke studiu povrchů je třeba znát jejich vlastnosti jako je rovinnost povrchů, jejich drsnost, jejich mikrostruktura. Interference je možné užít ke kontrole technologických operací opracování povrchů a tak se stává interferometrická mikroskopie významným pomocníkem studia a technologie povrchů. Světelnou interferometrií je možné také měřit povrchové vrstvy kondenzovaných látek a určovat některé jejich strukturální parametry. Interferometry, kterými se uskutečňuje interferometrické měření jsou za využití laserů dokonalé měřicí a yhodnocovací přístroje. Pro měření nanovlken je výhodný výběr zařízení, která dovolují provádět rutinní laboratorní přístroje, jejichž dva příklady jsou na obr.17A,B, z nichž A pracuje v infračervené oblasti, B ve světelné oblasti s laserem o vlnové délce 522 nm. Při výběru interferometru lze volit i vhodnou vlnovou délku jeho laseru. Přívýběru interferometru pro danou úlohu se lze poradit např. s literaturou v Gogolu/interferometer, kde lze nalézt celou škálu zobrazených typů interferometrů.

## Příklady interferometrů



A



B

Obr. 16 A Infračervený interferometr, B světelný interferometr

### Některé laserové metody uživatelné k určování struktury nanovláken

Velmi výhodné je použití laserů k měření průměru vláken, které je pak zvláště výhodné pro měření průměru nanovláken. Stejně výhodné je použití skvrnkové interferometre a laserové difraktografie, které jsou předmětem stručného zpracování v dalším textu.

#### Laserové měření průměru vláken světelnou difrakcí

Difrakční metody určování stejnoměrnosti vláken jsou založené na měření průměru a indexu lomu vláken. K difrakčním měřením na vláknech užíváme nejčastěji Fraunhoferovu difrakci. Difrakční pole popsané interferenční (difrakční) funkcí zobrazujeme při Fraunhoferově difrakci v ohniskové rovině zobrazující čočky.

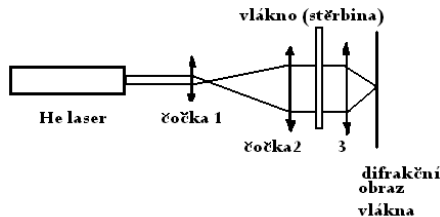
V ohniskové rovině získáme průběh intenzity difraktovaného záření na šterbině v závislosti na vzdálenosti od středu záření a v závislosti na vzdálenosti ohniskové roviny od šterbiny (vlákna). Podle Babinetova principu ([6], díl 2.kap.7,článek 7.1.1.3) je difrakce na šterbině ekvivalentní difrakci na neprůhledném vlákně, takže difrakce na šterbině a vlákně jsou ekvivalentní. Intenzita  $I(Q)$  záření difraktovaného na šterbině šířky  $a$  ve směru popsaném úhlem  $\Theta$  je určena funkcí tvaru nemonotonního průběhu intenzity difraktovaného záření určuje pak průběh interferenční funkce  $\sin^2 u / u^2$ , ve které veličina  $u$  je po úpravě vyjádřena vztahem

$$u = a \sin \Theta / \lambda \quad (4)$$

Uvážíme-li, že difrakční úhel  $\Theta$  je malý, můžeme vztah (4.6) s uvážením difrakce na šterbině či vlákně, upravit na tvar

$$u = \pi a y / D \lambda, \text{ kde } \sin \Theta \approx y / D \quad (5)$$

a  $y$  je vzdálenost v ohniskové rovině čočky o ohniskové vzdálenosti  $f$  od středu stopy kolmo na směr záření dopadajícího na vlákno,  $D$  je vzdálenost vlákna od ohniskové zobrazovací roviny (obr.17).



Obr.17. Experimentální uspořádání k zjišťování průměru vlákna (šterbiny) z difrakčních měření

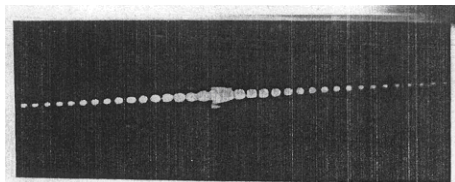
Průběh difraktované intenzity  $I(\theta)$  je nemotonní a intenzita nabývá podle v závislosti na  $\theta$  maxim a minim. N-té minimum je užitím (7.22) určeno podmínkou  $\sin u_N = 0$ , což vede k podmínce

$$\pi a \sin \theta_N / = N\pi \text{ a } y_N / D = N \quad (6)$$

Ze vztahů (7) je zřejmé, že vzdálenosti minim jsou ekvidistantní s periodou  $y_1$  určenou vztahem

$$y_1 = \lambda D / a \quad (7)$$

Minima vytvářejí tmavá místa v difrakčním obrazci periodicky rozložená, jak je patrné z obr. 18.



Obr. 18. Difrakční obrazec pořízený na vlákně. Jsou na něm patrná difrakční maxima a minima, která jsou ekvidistantní k určování průměru (nano)vláken podle vztahu (8)

Vzdálenosti mezi jednotlivými minimy jsou určeny taktéž vztahem (9). Určíme-li ze snímků na obr.19 vzdálenosti mezi jednotlivými minimy, je možné úpravou vzorce (7) určit rozměr štěrbinu  $a$ , který se rovná průměru vlákna  $d$  při difrakci na neprůhledném vlákně. Průměr vlákna  $d = a$  určíme pak užitím vztahu

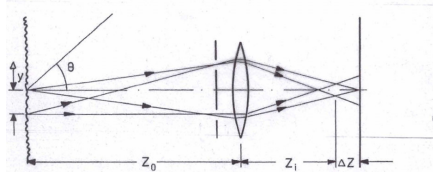
$$d = a = \lambda D / y_1 \quad (8)$$

K určení průměru vlákna  $d$  je tedy třeba znát vlnovou délku užitého laserového záření  $\lambda$ , vzdálenost vlákna od ohniskové roviny  $D$  a naměřit vzdálenost mezi difrakčními minimy  $\Delta y$ , jak je patrné z obr.17 a obr. 18.

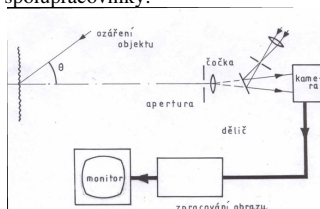
### Skvrnková (speklová) interferometrie k hodnocení povrchů nanovláken a nanomembrán

Další laserovou technikou, které je možné užít k hodnocení stejnoměrnosti vláken a textilií, je spekulová interferometrie. Nyní si všimneme blíže této techniky.

Dopadá-li na drsný povrch laserové záření obr.20, vznikají difrakční obrazce relativně malých rozměrů, skvrnky, speckly, a to jak v odraženém, tak i v proslém záření. Celkové uspořádání spekulové techniky je na obr.20. Laserové záření dopadá na měřenou rovinu pod úhlem  $\theta$ . Polohy skvrnek jsou určeny souřadnicí  $y$ . Jejich zobrazení obstarává čočka. Obraz skvrnek se vytváří na zobrazovací rovině vzdálené od čočky o  $Z_1 + \Delta Z$ . Celkové schéma spektrové zobrazovací techniky, spekulometrie je na obr.21. Ve speklech jsou pak zakódované informace o stavu povrchu ozářeného materiálu. Ke kvantifikaci spekulogramů, tj. k hodnocení velikosti skvrnek a jejich počtu je možné využít metalografického kvantometru, který umožňuje exaktně vyhodnotit měřený povrch objektu. Příklady pořízených spekulogramů jsou na obr.22. Dosud se spekulové techniky užívá jen velmi málo pro praktické účely, zvláště pak pro využití k hodnocení textilií. Použitím spekulové techniky k řešení stejnoměrnosti textilií zvláště tkanin se zabýval E. Toba se spolupracovníky.

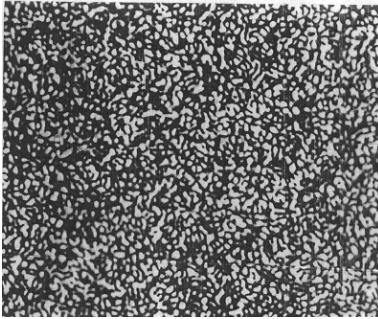


Obr. 19 Podstata skvrnkové interferometrie

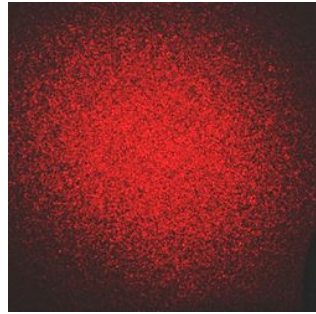


Obr. 20 Podrobnosti o spekulovém hodnocení povrchů lze nalézt např. v [11].

Speklové hodnocení povrchů nanovláken je vhodné pro technické využití nanovláken k adhezi, ke konstrukci kompozitů a pro tribologické účely. I když je možné povrchy nanovláken sledovat na elektronových mikroskopech, speklometrická měření skýtají mnohem snadnější a rychlejší informace o povrchovém stavu nanovláken.

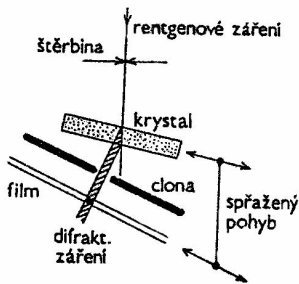


Obr. 21 A Záznam skvrnek hladké stěny

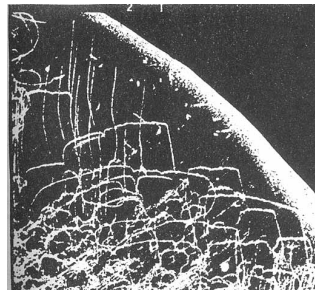


B Záznam skvrnkové interferometre papíru

### Zviditelňování poruch ve struktuře



Obr. 22. Princip Langovy difrakční topografie



Obr. 23 Zviditelnění dislokací v monokrystalech křemíku Langovou difrakční topografií

V poslední době byla pro zviditelňování poruch ve struktuře materiálů zvláště dislokací navržena řada difrakčních metod, z nichž nejrozšířenější je Langova projekční topografie. Její princip je na obr. 22. Pro Langovu metodu je třeba upravit krystal ve tvaru destičky vhodné tloušťky  $t$  splňující podmínku

$$\mu t \leq 1, \quad (9)$$

kde je  $\mu$  lineární absorpční faktor pro rentgenové záření, tak, aby některé význačné krystalografické roviny ležely přibližně kolmo k povrchu destičky. Na destičku necháme dopadat vycloňený svazek charakteristického rentgenového záření tak, aby krystalografické roviny kolmé k povrchu destičky krystalu svíraly s dopadajícím zářením Braggův úhel  $\Theta$ . Difraktovaný svazek vycloňíme k němu kolmou štěrbinou, která musí zachytit prošlý primární svazek rentgenového záření. Za štěrbinou kolmo na difraktovaný paprsek umístíme film, jehož translační pohyb ve vlastní rovině je vázán na translační pohyb destičky krystalu, při němž se nesmí narušovat orientace reflexních rovin vzhledem k dopadajícímu záření. Při současném pohybu krystalu a filmu se na film postupně zobrazují všechna místa krystalu. Neobsahuje-li krystal poruchy, zobrazí se v difraktovaném svazku záření celý krystal jako mírně rovnoměrně zčernalá plocha. Krystal mající vysokou hustotu dislokací (větší než

$10^{10} \text{ m}^{-2}$ ) se od určité tloušťky zobrazuje na film rovnoměrně zčernalým polem. Jestliže krystal obsahuje přiměřené množství dislokací, tj. v jeho tloušťce se vzájemným překrýváním dislokací vytvoří husté neprůhledné sítě, zobrazují se dislokace nebo jiné poruchy, vytvářející ve svém okolí dostatečně veliké napětěvé pole, tmavými stopami na světlém pozadí difrakčního obrazu. Tak je možné zviditelnit napětěvé pole kolem poruch, a tedy i poruchy bez jakéhokoli destruktivního zásahu do struktury krystalu. Vznik obrazu dislokací nebo i jiných poruch jako např. Stonesových-Walesových v nanotubulonových nanovláken, se vykládá snížením primární extinkce, a tedy zvýšením difraktované intenzity v místech poruch, kde mřížka není již dokonalá. Langovou difrakční projekční topografií je možné sledovat jakékoli útvary v krystalu, které v něm vytvářejí napětěvé pole, jako jsou např. dislokace, hranice domén ve feromagnetických a feroelektrických látkách aj. Příklad zobrazení dislokací a jiných poruch v monokrystalu křemíku Langovou metodou je na obr. 23.

Jiná nadějná difrakční topografická metoda je založena na jevu anomální absorpce rentgenového záření v dokonalých krystalech. Objevil ji G. Borrmann. Touto metodou byly činěny pokusy kvantitativně určovat napětěvá pole v okolí poruch (dislokací). Metoda je vhodná jen pro zvláště dokonalé krystaly.

Neřímé metody. Neřímými metodami určování hustoty poruch jsou většinou difrakční metody. Hustoty poruch se dají určovat z profilů a šftek difrakčních linek výpočetní technikou. Tyto metody se používají k určování poruch v polykrystalických materiálech, kde se přímé metody určování hustoty poruch (dislokací) nedají použít. Jsou vhodné i pro určování poruch v nanovlákech.

V poslední době se také k určování dislokací a jiných poruch používají nepřímé metody vnitřního tlumení (tření) a metody akustické emise. Metoda spočívá v tom, že se měří ztráty energie způsobené poruchami v látce. Teorie vlivu poruch na experimentálně určené veličiny při měřících metodách vnitřního tření je složitá. Přesto však bylo dosaženo touto technikou značných úspěchů při zjišťování poruch v pevných látkách. Tato metoda je nedestruktivní.

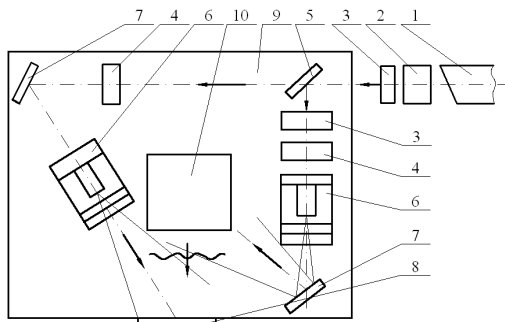
Langovu metodu lze použít k hodnocení poruch i v textilích jako jsou nanovlákná. Stačí nahradit rentgenové záření v obr.22 laserovým He-Ne laserem a film CCD snímačem světla a získat přímý záznam poruch v nanovlákech.

## Rezonanční metody

Během vývoje se ukázaly jako výhodné diagnostické metody v nanoměřítku rezonanční metody. Vzhledem k poměrně malé frekvenci jejich užívání je uvedený pouze jejich přehled: Jde o tyto rezonanční metody: cyklotronovou rezonanci, paramagnetickou rezonanci, feromagnetickou rezonanci, nukleární magnetickou rezonanci a akustickou paramagnetickou rezonanci. Bližší seznámení s těmito metodami lze najít v [5] [7] a ve speciální literatuře.

## Holografie

K prostorovému hodnocení rozdělení vláken a jejich deformaci textilií a rozložení pnutí v textiliích bylo využito holografie. K tomu účelu byla realizována holokamera se směrovým jednoosovým namáháním



k hodnocení prostorového rozložení pnutí v textiliích při jednoosovém namáhání, jejíž podstata zobrazování na odraz je na obr. 24.

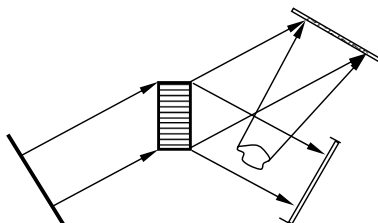
K prostorovému zobrazování textilií je vhodné použít také ultrazvukové holografie [5,7] (díl 1, kap. 3, str. 145).

Obr. 24 Schéma konstrukce holokamery na odraz publikovaná v [16], [17].

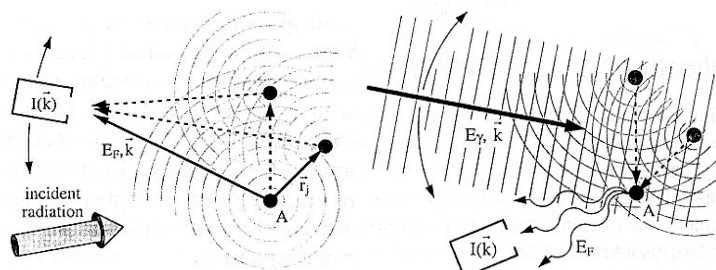
## Rentgenová holografie



Od doby, kdy se ukázalo, že krystaly, obecněji pevné a kondenzované látky jsou tvořeny atomy a molekulami, zajímaly se vědci o polohy a rozložení atomů a molekul v těchto látkách. Když se ukázalo, že světelné mikroskopy rozlišovací schopnosti nedosáhnou a po roce 1914 experimenty s difrací rentgenového záření ukázaly možnost nepřímého nahlédnutí do nitra látek a jejich struktury využitím recipročního (Fourierova) prostoru [5,7] (viz článek 1.1.3), obrátila se pozornost na rentgenovou holografii. Zobrazení struktury rentgenovou difrací bylo však nepřímé a bylo třeba provádět složité výpočty po transformaci z Fourierova (reciprokého) prostoru do prostoru přímého, aby byly určeny polohy atomů v látkách, případně výchylky atomů a jejich kmity. Bylo snem strukturměří najít metody, které by zobrazovaly atomy přímo v jejich polohách v látkách a pořídily přímé „fotografie“ jejich dynamiky. Po objevu optické holografie a prozkoumání jejích vlastností, se přiblížila možnost přímého obrazu atomů a jejich pohybů v látkách. Cesta vedla přes uskutečnění holografického zobrazení atomů v látkách. Držíme-li se analogie s optickou holografií, bylo by třeba uskutečnění holografie v atomovém měřítku využít koherentního záření s vlnovými délkami meziatomových vzdáleností. To splňuje rentgenové, elektronové, neutronové a atomové záření. Vlnové délky těchto částic spadají podle de Broglieovy teorie do oblasti atomových rozměrů (0,1nm). Prvně byla uskutečněna holografie elektronů. Po objevu laserů byla snaha vytvořit i „lasery“ kratších vlnových délek pro rentgenové záření xasery. Ozáříme-li látku (krystal) dílem xaserem, jehož část svazku je referenční, dojde k interferenci látkou, objektem rozptýleného rtg záření s referenčním svazkem a vytvoření hologramu (obr.25). Takto vytvořený hologram je možné rekonstruovat optickým laserem a získat prostorové zobrazení ozařované látky. Zatím se touto cestou holografické zobrazování nepodařilo uskutečnit. Překážky jsou jednak ve vhodném xaseru a detektoru, který by umožňoval snadnou a rychlou rekonstrukci hologramu. Podobnou cestou lze uskutečnit i neutronovou holografii se srovnatelnými obtížemi.



Obr. 25. Jedna z metod rtg holografie



Obr. 26. Princip rentgenové (rtg) vnitřní holografie

Přesto se podařilo uskutečnit rentgenovou (rtg) holografii se soudobými prostředky. Podstatu uskutečnění rentgenové holografie je možné pochopit spolu s komentářem z obr.26. V něm jsou plnými kroužky označeny tři stronciové atomy zkoumané látky SrTiO<sub>3</sub> (titaničitanu strontnatého). Ozáříme-li destičku SrTiO<sub>3</sub> např. molybdenovým rtg zářením (Mo K $\alpha$ ), vybudí v atomech stroncia čáry rtg záření SrK $\alpha$ . Ty se šíří látkou jednak přímo do detektoru (referenční svazek) a jednak z rozptýleného záření atomem stroncia A. Obě části záření interferují ve výsledný hologram, který se

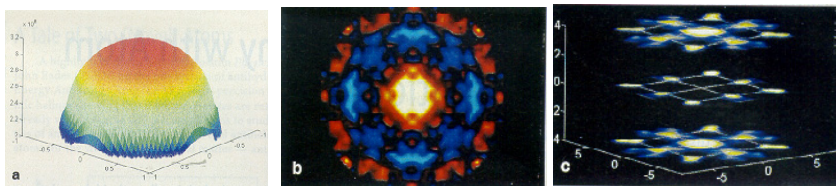


počítačově dá rekonstruovat. Výsledky experimentu vysvětleného na obr.26 jsou uvedeny na obr. 27a, b, c.

Na obr.27a je uveden prvotní záznam, kde není patrný hologram. Ten je získaný na obr. 4.35b, po odečtení vlivu absorpce rtg záření. Tím byl na obr.27 získán hologram. Ze tří takových hologramů pořízených ve třech směrech byly pak již rekonstruovány polohy stronciových atomů v mřížce SrTiO<sub>3</sub>, jak znázorňuje obr.27c. Atomy Ti a O se nezobrazily, neboť mají malý atomový rozptylový součinitel. Rentgenová holografie je prozatím v samých začátcích a vnímavý čtenář si dovede jistě představit další cesty výzkumu v tomto oboru, zvláště pak pro uhlíková nanotrubičková vlákna.

Je možné se pokusit také i o neutronovou holografii.

Z naznačeného vyplývá, že před fyziky je v tomto oboru velké množství výzkumné práce, která přinese i významné aplikace.



Obr. 27. a, b, c Holografie SrTiO<sub>3</sub>, titaničitanu stronnatého

### Spektroskopické metody elektromagnetického záření

Spektroskopické metody tvoří důležité diagnostické metody k hodnocení optických a elektrooptických vlastností a vypovídají o energetické struktuře látek důležité pro jejich optické vlastností. Energetické luminescenční spektrum poskytuje důležité informace o optických vlastnostech látek jako je luminescence důležitá pro aplikace v elektrooptice. Luminescenčních vlastností nanovláken lze používat pro nejrůznější čidla záření, magnetismu, elektrických jevů tepelných a deformačních jevů. To poznáme z nejrůznějších druhů luminescence, které nyní představíme.

**Ramanova spektroskopie** je založena na měření spektra elektromagnetického záření rozptýleného díky **Ramanově jevu** (*neelastický rozptyl*), který způsobuje, že rozptýlené záření má mírně odlišnou vlnovou délku od dopadajícího záření kvůli předání části energie na vibračních přechodech molekuly. Tato spektroskopická technika poskytuje informace o struktuře a prostorovém uspořádání molekuly.

**Spektrometrie s Fourierovou transformací** je založena na matematické transformaci interferogramu (závislosti intenzity signálu na dráhovém rozdílu paprsků) získaného detekcí signálu vystupujícího z interferometru. Interferující paprsky putují přes kyvetu se vzorkem. Spektrometry Fourierova typu jsou v současné době poměrně hodně rozšířeny.

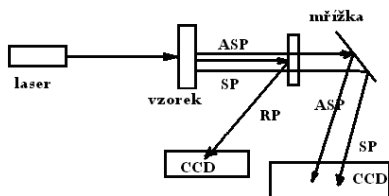
2. Infračervená spektroskopie
3. Ultrafialová spektroskopie
4. Světelná spektroskopie
5. Zeslabený úplný odraz
6. Atomová absorpční spektroskopie
7. Rentgenová a gama spektroskopie
8. Hmotnostní spektroskopie – měření poměru hmotnosti a náboje iontů
9. Spektroskopie využívající jaderné magnetické rezonance – určuje rozložení atomů v okolí jader s nenulovým jaderným spinem (<sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>31</sup>P, ...)
10. Spektroskopie využívající elektronové paramagnetické rezonance – měření částic obsahujících nepárové elektrony.

Pro studium fyzikálních charakteristik nanovláken jsou nejužívanější spektroskopie 1.až 5., dale pak i rentgenová spektroskopie. Světelná spektroskopie slouží k proměřování luminescenčních spekter.

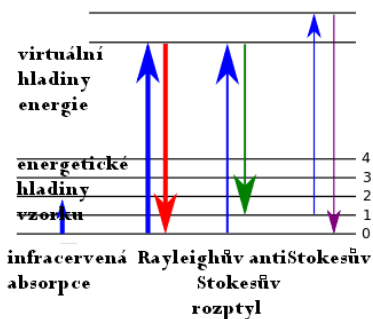
Nejúživanější pro studium struktury nanovláken je ramanovská spektroskopie, kterou probereme podrobněji.

### Ramanův rozptyl [8]

Nanovlákná patří v současnosti mezi velmi složité jednosložkové a dvojfázové soustavy. U polymerových jde o suroviny organických polymerů, u trubičkových jde o suroviny uhlovodíků a katalyzátorů jako je železo, kobalt a nikl a podložkové materiály jako jsou destičky křemene, korundu a další. Poslední dva druhy materiálů je možné ještě rozšířit. Strukturní složitost polymerových nanovláken spočívá ve stabilní povrchové vrstvě a vnitřku vlákna a méně stabilního rozhraní mezi povrchovou a vnitřní strukturou nanovlákná. U trubičkových nanovláken jejich složitost spočívá v dokonalé dvojrozměrové krystalové struktury grafenu a velkého množství nejrůznějších poruch, z nichž nejpodstatnější jsou Stokesova-Walesovy, deformace trubiček nejrůznějšího druhu a příměsové atomy či molekuly. Tyto všechny strukturní informace počinaje chemickým složením, vnitřním pnutím, znalostí souměrnosti a orientace součásti struktury, množstvím plastické deformace, tloušťkou průhledné povrchové vrstvy, je možné získávat Ramanovým rozplyem. Ramanův rozptyl je proto důležitý k vyhodnocování uvedených jemných strukturních charakteristik nanovláken, takže je třeba se seznámit s jeho podstatou. Význam Ramanova rozptylu ještě více vzrostl po objevu laserového záření. Ukazuje se, že čím je kratší vlnová délka užitého laseru, tím roste účinnost Ramanova rozptylu na úkor rizika vzniku luminiscence vzorku, poškození vzorku přehřátím a prodražení měřicí aparatury. Pro ramanovskou spektroskopii se užívají ultrafialové lasery nejčastěji o vlnové délce 244 nm pro biologické katalýzy, světelné o vlnových délkách 488 nm pro katalýzu polovodičů, 633 nm pro obecné použití a lasery s vlnovými délkami v blízké infračervené oblasti o vlnových délkách 785 nm a 850 nm pro analýzu polymerů, biologických materiálů a pro všeobecná použití. Experimentální uspořádání Ramanova rozptylu je uvedené na obr. 28a.



Obr. 28a Experimentální uspořádání pro ramanovský a Rayleighův rozptyl. ASP antiStokesův paprsek, SP Stokesův paprsek, RP Rayleighův paprsek, CCD snímače světla



Obr. 28b Mechanismus vzniku Rayleighova a Stokesova rozptylu. RR, Stokesova SR a antiStokesova rozptylu (ASR)

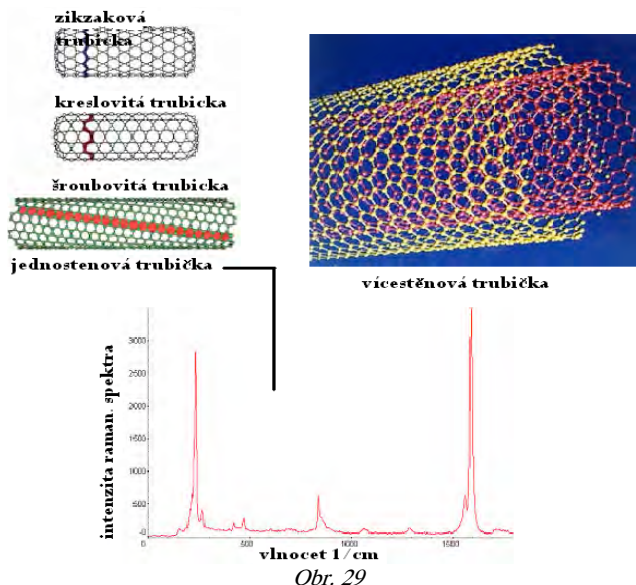
Při experimentálním uspořádání zdroj záření zajišťuje laser. Z něho vychází záření procházející vzorkem Rayleighův paprsek je odražený na odrazeči, Stokesův a antiStokesův paprsek procházejí a jsou rozloženy optickou mřížkou a zachyceny optickými CCD snímači. Tak je možné získat ramanovské spektrum, jehož mechanismus vzniku na struktuře vzorku objasňuje obr. 28b. Stokesův rozptyl má kratší vlnovou délku než vychází laserové záření, antiStokesův má vlnovou délku delší. Příklady ramanovského spektra pro jednoděnové a víceštěnové uhlíkové trubičky v závislosti na vlnučet  $1/\lambda$  v  $\text{cm}^{-1}$  je na obr. 29. Z polohy maxim intenzity ramanovského spektra lze identifikovat látku chemicky, z posuvu maxim vnitřní pnutí a nepřímou existenci poruch. Růst intenzity při zachování polohy maxima představuje rostoucí orientaci zrn materiálu, pološířka maxima intenzity

odpovídá úrovni plastické deformace a nepřímo i úrovni poruch v nanovláknu a mechanickou kvalitou materiálu, výška maxima i množství materiálu ve zkoumaném vzorku.

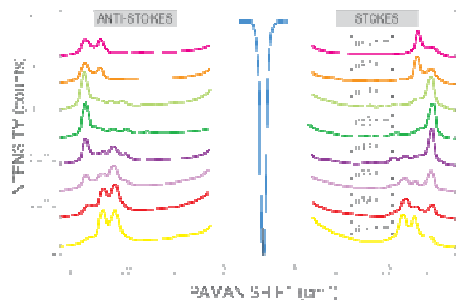
### Ramanovské spektrometry

Pro přesná měření ramanových spekter se vyrábějí dokonalé spektrometry, a to jak přenosné, tak i laboratorní. Jejich příklady jsou uvedené na obr.31 A a B. Studovat nanovlákna bez vybavení zařízeními hodnotících jejich strukturu a vlastnosti mezi něž náleží i ramanovská spektrometry, je v současnosti již nemožné.

Ramanovských spektrometrů existuje velké množství. Některé z nich je možné nalézt např. v odkazu [8]. Soudobé ramanovské spektrometry jsou řízené počítači, takže měření a jeho vyhodnocování získáváme s reálným časem. Některé jsou vybavené i programem na Fourierovu transformaci získaných naměřených spekter.



Obr. 29



Obr. 30 Posuvy stokesovských a antistokesovských maxin působením nejrůznějších vlivů. Uprostřed je vyznačené maximum laserového záření vytvářející ramanovský rozptyl.



Obr. 31 A Laboratorní Ramanův spektrometr



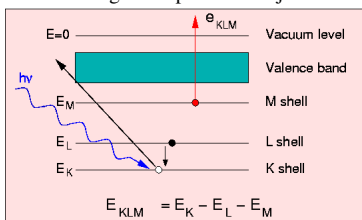
B přenosný Ramanův spektrometr

### Augerova spektroskopie (AS)

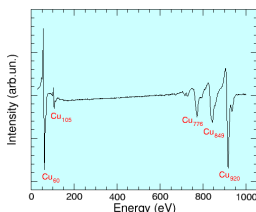
Augerova spektroskopie je výhodným nástrojem k chemické analýze povrchů. Byla objevená v roce 1920-1925 P.Augerem a L.Meitnerovou. Povrch vzorku je ozařovaný vysokoenergetickým rentgenovým zářením nebo elektrony, tak, aby uvolnily elektrony z hladiny K ozářeného prvku. Na tuto hladinu pak přecházejí elektrony z vyšších hladin L a z atomu je pak emitovaný elektron z nejvyšší hladiny M o energii  $E_{KLM}$ , která je určená výrazem

$$E_{KLM} = E_K - E_L - E_M,$$

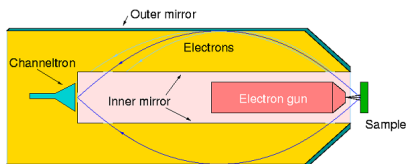
jak je znázorněné na obr.4.41A. Příklad Augerova spektra elekonů pro izotopy mědi je na obr. 4.41B. Podstata jedné z konstrukcí Augerova spektrometru je na obr. 4.41C a jeho skutečné provedení na obr. 4.41.D.



Obr. 32A mechanismus vzniku augerova jevu



Obr. B Augerovo spektrum mědi (Cu)



Obr. 32C Princip jedné z konstrukcí Augerova spektrometru



Obr. 32D Laborať s Augerovým spektrometrie

Augerovy spektrometrie je možné s výhodou používat k hodnocení elektronických vlastností.

### Emise napěťových vln (akustická emise)

#### Úvod

Pro technologii textilií a její ovlivňování je třeba znát souvislosti mezi jejich strukturou a vlastnostmi. Zatímco strukturu lze technologií ovlivňovat, jsou vlastnosti strukturou určovány. Obecně lze říci, že vlastnosti vzniknou vhodnou transformací struktury, takže mezi strukturou v místě  $r$  a v čase  $t$ ,  $S(r,t)$  a vlastnostmi platí transformační vztahy (10) [9].

$$S(r,t) = T(r,t) \cdot V(r,t) \text{ nebo } V(r,t) = T^{-1}(r,t) \cdot S(r,t) \quad (10)$$

kde  $T(r,t)$  je transformace mezi  $S$  a  $V$  a  $T^{-1}(r,t)$  je převrácená (inverzní) transformace k  $T$ . Vyvstává tedy problém najít vhodné strukturní  $S$  a vlastnosti  $V$  charakteristiky textilií a transformace  $T$  a  $T^{-1}$  mezi nimi splňující vztahy (10). Lze očekávat, že některé charakteristiky textilií jako je souměrnost a od ní odvozené vlastnosti jako je např. stejnoměrnost, nebo různosměrovost (anizotropie), se přenesou ze struktury na vlastnosti podle Neumannova principu [7] (díl 1, kap. 1 str. 40, díl 2, dodatek str. 669).

Příkladem vlastnosti, která je odrazem stejnoměrnosti je pružnost (elasticita) textilií. Je-li textilie pružná, můžeme ji považovat za stejnoměrnou. K hodnocení vlastností je nutné používat dostatečně citlivých a pokud možno nedestruktivních metod.

Jednou z takových metod, které našly rozsáhlá použití je emise napětových vln. Byla vyvinuta ke kontrole provozních podmínek konstrukcí jako jsou mosty, letadla, rakety a nejčastěji různé strategické části jaderných elektráren jako jsou tlakové nádoby a potrubí reaktorů, provoz lan v nejrušnějších konstrukcích apod. Akustická emise se s výhodou používá k zjištění předhavarijních stavů konstrukcí a v dalších důležitých aplikacích. Tyto aplikace jsou umožněny vysokou citlivostí emise napětových vln (akustická emise).

### Emise napětových vln (akustická emise) a její možnosti

Emise napětových vln (akustická emise) je fyzikální jev, při kterém vznikají při namáhání látek vnějšími účinky (fyzikálními poli) vnitřní a povrchové napětové vlny dynamickou změnou struktury v látkách. Energie napětových vln vznikla z energie nahromaděné ve struktuře látek (materiálu).

U kovových materiálů se podílejí na vzniku akustické emise pohyby dislokací fázové transformace, vnitřní tření, vznik a šíření trhlin a jiné mechanismy, u plastomerových materiálů přistupují ještě disklinace a krejisy (crasy) a u trubičkových nanovláken navíc nové Stokesovy-Walesovy poruchy. U vzniku emise napětových vln v textilních přístupuji navíc povrchové efekty jako je tření, tj. tribologické a triboelektrické jevy. Na emisi napětových vln se podílejí dynamické jevy ve třech měřítkách, nanoskopických, mikroskopických a makroskopických. Zdroje emise napětových vln (akustické emise) v mikroskopickém měřítku jsou pochody při vnitřním a vnějším tření, šíření a zániku poruch jako jsou dislokace, disklinace, konce řetězců a stupňovité poruchy v polymerech. Zdroje emise napětových vln v makroskopickém měřítku jsou plastické deformace, makroskopické nestejnomyěrnosti, trhliny, vnější tření apod. Tepelný pohyb atomů v pevných látkách vytváří akustický šum jehož frekvence leží v intervalu zlomků Hz až  $10^{13}$  Hz. Energie napětových vln od zdrojů atomových rozměrů má hodnotu řádově  $10^{-19}$  J (přibližně 1eV). Odpovídající amplitudy emise napětových vln kmitů jdoucí do hodnot zlomků atomů vysunutých z rovnovážné polohy při jejich teplem pohybu jdou až do hodnot  $10^{-14}$  m. Z těchto hodnot je patrné, že akustická emise se stává velmi citlivým nástrojem hodnocení vlastností látek jak v nano- a mikroskopickém tak i v makroskopickém měřítku a i vlastností tření spolu s mechanickými vlastnostmi nanovláken. Akustická emise má svou slouholetou historii, o které se lze poučit např. v [5] [6] [7] [10].

### Podstata měření akustické emise

K měření akustické emise je třeba zvolit způsob zatěžování, kterým je u textilií obvykle tahové namáhání, nebo tření textilií. Z naměřených charakteristik akustické emise se zaznamenává spektrum akustické emise aktivity,  $A$ , tj. počet pulsů  $N$  za jednotku času nebo délková hustota pulsů  $D$ , definované vztahy:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (11)$$

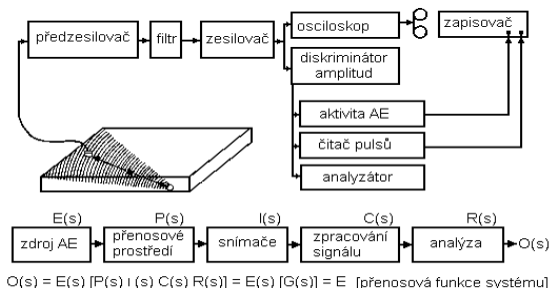
$$D = \frac{dN}{dL} \quad (12)$$

V měření závislosti počtu pulsů  $A$  na čase a výchylky akustické emise pulsů na čase, resp. na prodloužení  $L$ , je možné užít nejrušnějších způsobů detekce a registrace. Dnes již existují komerčně dostupné a dostatečně citlivé aparatury pro snímání a záznam s počítačovým vyhodnocením emise napětových vln [15], [16], [17], [18].

Vzhledem k tomu, že aktivita emise napětových vln bývá vysoká, provádějí komerční aparatury záznam v logaritmické stupnici a výsledky se zaznamenávají v dB. Zaznamenává se tedy hladina akustické intenzity  $H$ , která souvisí s výchylkami  $u$  akustické emise výrazy :

$$H = 20 \log \left( \frac{u}{u_o} \right), \quad u = u_o 10^{(H+20)} \quad (13)$$

kde  $u_o$  je amplituda charakterizující efektivní výchylku akustického šumu, nebo je možné ji nastavit podle potřeby na aparatuře i na vyšší hodnotu. Ze vztahu (13) je možné určit výchylku akustické emise z naměřené  $H$  již výpočtem.



Obr. 33 Experimentální uspořádání k měření akustické emise.

Při experimentálním uspořádání je třeba použít vhodného detektoru, kterým je dnes nejčastěji piezoelektrický detektor. Pro měření akustické emise užíváme detektorů širokopásmových i rezonančních. Detektory připevníme na vhodné místo, nejčastěji na čelisti dynamometru (případně i na vzorek textilie) a elektrický signál detektoru (měniče) vedeme na předzesilovač a z něho na zesilovač. Registraci provádíme pak různými způsoby. Poněvadž při měření spekter akustické emise se pracuje obvykle ve frekvenčním rozsahu 5 kHz až 5 MHz, je třeba užívat širokopásmových předzesilovačů a zesilovačů . Příklad experimentálního uspořádání k měření akustické emise je na obr. 33.

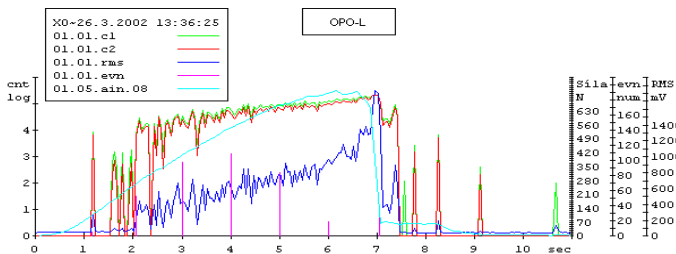
Ze záznamu akustické emise je možné určit i polohu zdroje akustické emise (nehomogenity, přetruhu) použitím tří detektorů umístěných v rovině textilie. Kalibrací detektorů a experimentálního uspořádání je možné určovat absolutní hodnoty výchylek akustické emise, které obvykle uvádíme v relativních jednotkách (voltech).

### Význam akustické emise pro hodnocení textilií

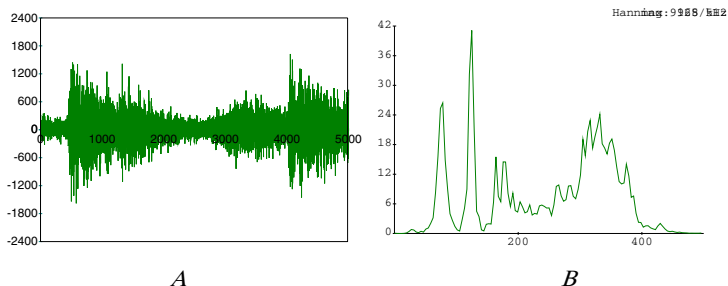
Jak ukázala spektra akustické emise na příkladech několika textilních vzorků, jeví se akustická emise jako vhodnou diagnostickou metodou k hodnocení mechanických vlastností vláken a textilií. Z křivek hladin akustické intenzity, počtu pulsů akustické emise, případně amplitud spektra akustické emise je možné velmi citlivě určit elastickou oblast chování textilie. To strukturně znamená, že v oblasti tohoto namáhání se chová textilie jako stejnosměrná. V plastické oblasti dokáže akustická emise rozlišit jednotlivé mikro- a makromechanismy plastické deformace, a to tření vláken mezi sebou při změně jejich orientace, při jejich plastické deformaci vláken samotných. Je možné také z inkubační doby přetruhu určit kritickou oblast namáhání textilie zvláště při jejím užití pro technické účely, jako jsou textilní kompozity.

Jak ukázala spektra emise napětových vln tkanin, lze spekter akustické emise užít k hodnocení anizotropie eventuálně ortotropie [13], [14], [15], [16], [17] textilií. Charakteristik spekter akustické emise je možné užít rovněž i k hodnocení kvality nanovláken a textilií. Z odpovídajících si grafů na obr. 34 a 35 jsou patrné rozdíly ve spektrech akustické emise tkanin před a po zušlechtnění. Podstatně odlišná spektra mají typické spanbondové rouliny z polypropylenových vláken typu Tatrutex, kde se dají ve spektru rozlišit i jednotlivé mechanismy elastické či plastické deformace

těchto textilií. U emisí lze detekovat jak mikromechanismy probíhající ve vláknech samotných, tak i makromechanismy mezi vlákny, jako je jejich přeorientace, tření, mikropřetrhy a další. Velmi cennou je pak předpověď pomocí akustické emise i kritického stavu textilií, který je v konstrukcích textilních kompozitů stavem předhvarijním.



Obr. 34 Komplexní záznam akustické emise dozimetrem DAKEL-XEDO-5 na tkanině OPOL.



Obr. 35 Komplexní záznam akustické emise dozimetrem DAKEL-XEDO-5 na tkanině OPOL.

V tomto smyslu se neliší použití akustické emise na výzkum a diagnostiku textilií od klasických konstrukčních materiálů, jakými jsou materiály kovové. Příklad záznamu (spektrogramu) akustické emise tkané textilie pořízené dozimetrem DAKEL-XEDO-5 je na obr.34. V něm jsou zachyceny spolu s průběhem dynamometrických záznamů křivky akustické emise, a to záznamy dvou hladin čtů, střední hodnota průběhů intenzity akustické emise, spektrum akustické emise události a frekvenční spektrum akustické emise. Na grafech obr.35 je zachycený časový záznam A akustické emise tkaniny OPOL spolu s jejich Fourierovou transformací B, tj závislosti na frekvenci. Ostrá maxima svědčí o rezonanční schopnosti textilie. Je možné tedy měřením akustické emise zjišťovat rezonanční absorpci zvuku textilií zvláště pak textilií z nanovláken. Použití akustické emise je vhodné také k hodnocení nánosu nanovláken na podkladovou textilií a rounových textilií z nanovláken.

Je možné očekávat, že při použití akustické emise na další typy textilií získáme pro pochopení chování textilií a zvláště pak k hodnocení jejich mechanických vlastností řadu nových a významných poznatků. V tomto smyslu je možné chápat emisi napěťových vln (akustickou emisi) jako nadějnou metodu i pro výzkum textilií jako jsou nanovlákná, nanorouniny a v budoucnosti i nanotkaniny. Akustická emise se uplatní také při kontrole kvality nanovláken přímo při jejich technologii.

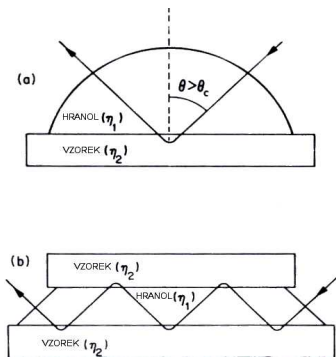
Tím byly v podstatě vyčerpány všechny diagnostické metody známé z diagnostiky textilií a použitelné k diagnostice nanovláken a z nich vyrobených nanotextilií.

### Metoda zeslabení intenzity úplného odrazu [18]

Další nedestruktivní a rychlou metodou k hodnocení povrchových vlastností vláken a textilií je metoda zeslabení intenzity úplného odrazu testovaným povrchem. Označuje se anglickou zkratkou ATR. Její dva principy jsou znázorněny na obr.36a,b. Na rovinnou část poloválčové části optického materiálu se umístí vzorek povrchu. Z infračerveného spektrometru se nechá dopadat na válcovou část optického

prvku svazek infračerveného záření pod úhlem menším, než je kritický úhel pro úplný odraz. Část záření tuneluje do povrchu vzorku a podle kvality povrchu zeslabí odražené záření. Vedle kulového optického prvku je možné použít i optické destičky, jak ukazuje obr.4.46b. Přesnost metody ATR k hodnocení převyšuje metody předchozí.

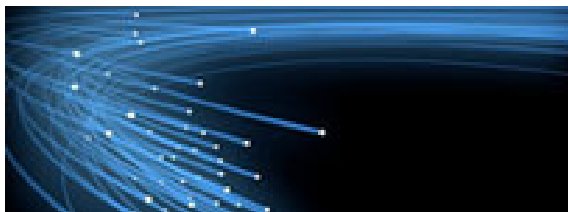
Metoda je vhodná k hodnocení povrchů nanovláken



Obr. 36 a ), b) uspořádání k měření kvality povrchů, c) ultrarychlostní kamera

### Vysokorychlostní kamera

Chceme-li sledovat tvorbu nanovláken v reálném čase a ověřovat její časový průběh a pohybové rovice ukládání nanovláken, které může být zvláště pro odstředivé zvláknování velmi rychlé, je třeba pro snímání těchto dynamických jevů užívat ultrarychlých enímáčích kamer, z nichž jedna je na obr. 36c. Příklad využití rychlostní kamery k hodnocení odstředivé technologie přípravy nanovláken je na obr. 37-



Obr. 37 Tvorba nanovláken při odstředivé technologii rychlostní kamerou

### Literatura

- [1] Sodomka, L., et al.: Kronika Nobelových cen I, II. Adhesiv Liberec 2003, 2003, Knižní Klub Praha 2004, Sodomka, L., Sodomková Magdalena.: Nobelovy ceny za fyziku Set OUt Praha 1997
- [2] Sodomka, L.: Rentgenová difrakografie pevných látek. SNTL Praha 1960
- [3] Kalvoda, V., et al.: Základy strukturální analýzy. Karolinum 1992
- [4] Prosser, V., et al.: Experimentální metody biofyziky. Academia Praha 1989
- [5] Sodomka, L.: Fyzika, teorie, technologie a užití nanovláken, Adhesiv 2013 na CD (Struktura, vlastnosti, diagnostika, fyzika, chemie a technologie nanovláken, nanovláčna jako materiály příštího tisíciletí) Rozsah cca 250 stran
- [6] Sodomka, L.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Adhesiv, Liberec 2013 Na CD 1200 stran.



- [7] Sodomka, L., Fiala, J. *Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi 1, 2*. Adhesiv Liberec 2003, 2004 .
- [8] google/Raman spectroscopy
- [9] Sodomka, L., et al.: Experimentální technika AE a její využití k vyhodnocování povrchových vlastností textilií. Defektoskopie Praha 2007
- [10] Sodomka, L.: Struktura, vlastnosti, diagnostika a technologie ... textilií. TUL Liberec 2002
- [11] Sodomka, L., et al.: Experimentální technika AE a její využití k vyhodnocování povrchových vlastností textilií. Defektoskopie Praha 2007
- [12] Sodomka, L.: Acoustic emission of textiles and their anisotropy. *Fibers and Textiles* 9,2002, No.3 pp.99
- [13] → [4]kap.26. *Textilie*.
- [14] Sodomka, L.: Acoustic emission of textiles fields. Defektoskopie Ostrava 2003
- [15] Hloch, S., et al.: Struktura, vlastnosti, diagnostika a technologie textilií. Zvolen 2006.
- [16] google / Sodomka, L'acoustic emission of fibers and textiles.
- [17] Sodomka, L., et al.: Fyzika, struktura a technologie textilií. Na CD 2012
- [18] Sibilia, J.P.: Application of ATR technique. In Schick, M. J.: Surface characteristics of fibers and textiles..M. Dekker. New York 1977, chap. 8.





Název **NDE for Safety / Defektoskopie 2013**  
sborník příspěvků  
Editor Pavel Mazal, Luboš Pazdera  
Vydal Vysoké učení technické v Brně  
ve spolupráci s Českou společností pro NDT  
Tisk Betis s.r.o. Praha  
Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice  
Vyšlo listopad 2013  
Vydání první  
Náklad 200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

**ISBN 978-80-214-4799-8**

**mediální partneři / media partners**



*Technický týdeník*



all·for **power**

**partneři / partners**



**FOR INDUSTRY**



**11<sup>th</sup> ECNDT**  
PRAGUE 2014  
October 6 – 10, 2014  
[www.ecndt2014.com](http://www.ecndt2014.com)  
11<sup>th</sup> European Conference on NDT

ISBN 978-80-214-4799-8