

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2010

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

40. mezinárodní konference
40th International Conference



10.–12. listopad 2010
November 10–12, 2010

Plzeň, Czech Republic

40. mezinárodní konference DEFEKTOSKOPIE 2010/ NDE for Safety

je sponzorována:

hlavní sponzoři / main sponsors

AQUACHEMIE 



GE
Measurement & Control Solutions

OLYMPUS[®]

Your Vision, Our Future



NDT



sponzoři / sponsors



Czech Society for Nondestructive Testing
Česká společnost pro nedestruktivní testování



NDE for Safety DEFEKTOSKOPIE 2010

**40th International Conference and NDT Exhibition
40. mezinárodní konference a výstava NDT techniky**

PROCEEDINGS SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

**November 10 - 12, 2010
10.- 12. listopad 2010**

Pilsen / Plzeň, Czech Republic

Edited by Pavel Mazal and Luboš Pazdera

All articles were reviewed.

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. Vítaly Muraviev – SSTU Novosibirsk (RU)
- Dr. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha (CZ)
- Dipl.Eng. Piotr Sullik (PL)
- Prof. Josef Šikula – VUT v Brně (CZ)

Editors: Pavel Mazal, Luboš Pazdera

Copyright © 2010
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 978-80-214-4182-8

CONTENTS / OBSAH

Josef BAJER, Karel HÁJEK

Low-Noise Voltage and Charge Preamplifiers for Piezosensors 3

Nízkošumové napěťové a nábojové předzesilovače pro piezosnímače

Jiří BĚHAL

Inspection Reliability in the Mean of Signal Amplitude Interpretation 11

Petr BENEŠ, Jiří FIALKA

Main Problems with AE Sensors Calibration 17

Hlavní problémy při kalibraci snímačů AE

A.A. DUBOV

Development of Magnetic Memory Methods in Russia, Poland, the Czech Republic and other Countries 25

ИТОГИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА В
РОССИИ, ПОЛЬШЕ, ЧЕХИИ И ДРУГИХ СТРАНАХ

Jiří DVOŘÁK, Břetislav SKRBEK

Acoustic Emission of Magnetic Impulse of Magnetic Spot Method 29

Akustická emise magnetických impulsů metody magnetické skvrny

Zuzana FAROVÁ, Václav KŮS

Statistical Methods in Signal Processing and Discrimination 39

Statistické metody pro zpracování signálu a jejich klasifikace

Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, Michal KOLEGA, Petr LIŠKUTÍN

X-Ray Examination of the Fatigue Process 49

Rentgenografické zkoumání únavového procesu

Matej FINC, Janez GRUM

NDT Wire Connection Investigation in Household Appliances Industry 57

Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA

The Use of Acoustic Emission for the Assessment of the Effect of
Nonmechanical Service Conditions on the Degeneration and Fatigue Strength
of Selected Concretes 65

Radek HÉDL, Jindřich FINDA, Girija PARTHASARATHY

Optimization of PZT Actuator/Sensor Array for Monitoring of Aircraft Fuselage
Panel Using Ultrasonic Lamb Waves 73

Anna HOŁA, Krzysztof SCHABOWICZ

Nondestructive Tests of Damp Masonry Walls in Buildings of New Residential
Complex 81

Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI, Krzysztof SCHABOWICZ

Comprehensive Nondestructive Way of Identifying Delaminations in Concrete
Floor Toppings with Large Surface Area 89

Filip HORT, Frantisek VLAŠIC, Pavel MAZAL, Ivan MAZŮREK

Detection of Damage of the Automobile Gearbox 95

Detekce poškození automobilové převodovky

Tomaž KEK, Janez GRUM	
AE during Laser Cutting and Resistance Spot Welding	103
Libor KELLER	
Magnetic Field Camera	111
Zobrazovač magnetického pole	
Jan KOLÁŘ	
Inspection of the Thick-Walled Dissimilar Weld by the Phased Array Method	117
Kontrola silnostěnného heterogenního svaru metodou Phased Array	
Bernard KOPEC	
What Really Determines the Non-Destructive Testing of Materials?	125
Co skutečně zjišťuje nedestruktivní zkouška materiálů?	
Marta KORENSKA, Pavel VYROUBAL	
On the Effect of the Aerating Agent Content in the Concrete Mix on the Consequences of Freeze Cycles Induced Degradation	133
Milan KOSTELECKÝ, Miloslav PROCHÁZKA	
Non-Contact Thermography in Equipment Status Diagnostics	141
Nekontaktní termografie v diagnostice stavu zařízení	
Ivo KUSÁK, Miroslav LUŇÁK, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Vlastimil BÍLEK	
Long-Term Monitoring of Hydration and Concrete Curing Using Methods of Impedance Spectroscopy	149
Dlouhodobé sledování hydratace a zrání betonu s využitím metody imedanční spektroskopie	
Miroslav LUŇÁK, Ivo KUSÁK, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Vlastimil BÍLEK	
Long-Term Monitoring of Concrete Setting by Using Two Electrodes Impedance Spectroscopy	157
Kontinuální sledování tuhnutí betonu dvouelektrodovou imedanční spektroskopií	
Miroslava MALÁ, Jiřina ŠAŠKOVÁ, Václav TREPKA	
Machining Optimization of Selected Parts in Relation to NDT Requirements	161
Optimalizace obrábění vybraných dílů s ohledem na požadavky NDT	
Monika MANYCHOVA	
Nondestructive Integrity Testing of Sandwiches Made of Hurdis Ceiling Slabs	167
Michal MATYSÍK, Iveta PLŠKOVÁ, Marta KOŘENSKÁ	
Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Methods Proper for Defectoscopy of Concrete Parts	175
Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Vlastimil BILEK, Jaroslav SMUTNY, Ivo KUSAK, Miroslav LUNAK, Marta KORENSKA, Michal MATYSIK, Pavel MAZAL	
Application Non Destructive Testing During Concrete Hardening and Setting	183
Využití metod nedestruktivního testování při tuhnutí a tvrdnutí betonu	

Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Vlastimil BILEK, Jaroslav SMUTNY	
Jointed Time Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals During Concrete Hardening	191
Analýza signálů akustické emise časově frekvenčními spektry při tuhnutí a tvrdnutí betonu	
Iveta PLŠKOVÁ, Michal MATYSÍK, Marta KOŘENSKÁ, Zdenek CHOBOLA	
Indication of Internal and Surface Defects of Ceramic Tiles by Means of the Impact Echo Method	199
Indikace vnitřních a povrchových poruch keramických materiálů metodou impact echo	
Miloslav PROCHÁZKA, Roman BENEŠ, Jan JELÍNEK	
Small Mechanisation in Ultrasonic Inspection	205
Malá mechanizace při zkoušení ultrazvukem	
Mehran ROOHNIA, Ajang TAJDINI, Negin MANOUCHEHRI	
Effect of Drillings as Artificial Defects on Dynamic Shear Modulus of Wood	211
Maciej ROSKOSZ	
Metal Magnetic Memory Testing of Welded Joints of Ferritic and Austenitic Steels	219
Maciej ROSKOSZ, Michał BIENIEK	
Analysis of the Methodology of the Assessment of the Technical State of a Component in the Method of Metal Magnetic Memory Testing	229
Jaroslav RYBAK, Krzysztof SCHABOWICZ	
Survey of Vibrations Generated in Course of Geotechnical Works	237
Jaroslav RYBAK, Krzysztof SCHABOWICZ	
Acoustic Wave Velocity Tests in Newly Constructed Concrete Piles	247
Krzysztof SCHABOWICZ	
Empirical Relations for Nondestructively Determined Strength of Concrete on Different Days of its Maturing	255
V. SYASKO, V. SEVASTYANOV	
Ultrasonic Angle Beam Transducers with Stabil Properties in Large Temperature Range	263
Ultrazvukové dvojité úhlové sondy se stabilními vlastnostmi v širokém rozsahu teplot	
Miroslav UHER, Petr BENEŠ	
Influence of Parameters of Particle Impact on Shape of Acoustic Emission Signal	269
Vliv parametrů nárazu částice na tvar spektra signálu akustické emise	
David VARNER, Michal ČERNÝ	
Monitoring of Acoustic Emission in Destila Micro-Brewery	277
Monitorování akustické emise v mikropivovaru Destila	
Jan VÍT, Zdeněk SKÁLA, Lukáš STAINER	
Automated Ultrasonic Testing Of WWER RPV	285
Automatizované zkoušení tnr typu VVER ultrazvukem	

ABSTRACTS AND PAPERS AFTER DEADLINE

- Valentin PETROV, Aleksander PETROV**
New Approach to the Industrial Safety Ensuring 295
- Pavel MAZAL, Michal ČERNÝ, Filip HORT, Frantisek VLAŠIC**
Application of Acoustic Emission Method in the Area of Arboriculture and Woodworking 301
Využití metody akustické emise v oblasti pěstování a zpracování dřeva
- Václav KŮS, Jan TLÁSKAL**
Generalized PHI-Divergences and EM-Algorithm In Acoustic Emission 307
Zobecněné PHI-divergence a EM-algoritmus v akustické emisi
- Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ**
AE Source Location by Neural Networks Independent on Material and Scale Changes 317
Lokalizace zdrojů AE neuronovými sítěmi nezávisle na změnách materiálu a měřítka
- Jan KOBER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Zuzanka TROJANOVÁ**
Damage Detection in Mg-Alloys by Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy 325
Detekce poškození Mg slitin nelineární ultrazvukovou spektroskopií
- Václav KOULA, Martin DRÁB, Michal HAVAVKA**
Exploitation of Acoustic Emission Method For Flow-Accelerated Corrosion (FAC) Monitoring 333
Využití metody ae pro detekci koroze urychlené prouděním
- Zdeněk PŘEVOROVSKÝ**
Conjunction of Two Ultrasonic NDT Methods in SHM System 337
Kombinace dvou ultrazvukových NDT metod při tvorbě SHM systému
- Richard REGAZZO, Václav SVOBODA**
Porovnání ultrazvukové kontroly trubek s aplikací metody magnetické paměti materiálu 339
- Oleksandr STUPAKOV, Ivan TOMÁŠ, Břetislav SKRBEK**
Barkhausen Noise Testing of Surface Decarburization of Steel 340
Testování oduhličené vrstvy oceli metodou Barkhausenova šumu
- Zhong-soo LIM, Taek-ryong SEONG, Kyu-sik PARK**
Development and Application of Magnetostrictive NDE Technique for the Integrity Assessment of the Steel Strand Embedded in the Concrete Grout 342
- Petr DOBŠÁK**
Ultrasound for non-destructive testing of composite materials 343
Ultrazvuk pro nedestruktivní zkoušení kompozitových materiálů

AUTHORS INDEX / INDEX AUTORŮ

Bajer J.	3	Manouchehri N.	211
Behal J.	11	Manychova M.	167
Benes P.	17,269	Matysik M.	175,183,199
Benes R.	205	Mazal P.	49,95,183,301
Bieniek M.	229	Mazurek I.	95
Bilek V.	149,157,183,191	Park K.S.	342
Cerny M.	277,301	Parthasarathy G.	73
Chlada M.	317	Pazdera L.	149,157,183,191
Chobola Z.	199	Petrov A.	295
Dobšák P.	343	Petrov V.	295
Drab M.	333	Plskova I.	175,199
Dubov A.A.	25	Prevorovsky Z.	317,325,337
Dvorak J.	29	Prochazka M.	141,205
Farova Z.	39	Regazzo	339
Fiala J.	49	Roohnia M.	211
Fialka J.	17	Roszkosz M.	219,229
Finc M.	57	Rybak J.	237,247
Finda J.	73	Sadowski L.	89
Gorzelańczyk T.	65	Saskova J.	161
Grum J.	57,103	Schabowicz K.	81,89,237,247,255
Hajek K.	3	Seong T.R.	342
Havavka M.	333	Sevastyanov V.	263
Hedl R.	73	Skala Z.	285
Hola A.	81	Skrbek B.	29,340
Hola J.	65,89	Smutny J.	183,191
Hort F.	95,301	Svoboda V.	339
Jelinek J.	205	Stainer L.	285
Kek T.	103	Stupakov O.	340
Keller L.	111	Syasko V.	263
Kober J.	325	Tajdini A.	211
Kolar J.	117	Tlaskal J.	307
Kolega M.	49	Trojanová Z.	325
Koula V.	333	Tomas I.	340
Kopec M.	125	Topolar L.	149,157,183,191
Korenska M.	133,175,183,199	Trepka V.	161
Kostelecky M.	141	Uher M.	269
Kus V.	39,307	Varner D.	277
Kusak I.	149,157,183	Vit J.	285
Lim S. O.	342	Vlasic F.	95,301
Liskutin P.	49	Vyroubal P.	133
Lunak M.	149,157,183		
Mala M.	161		



Nový ultrazvukový defektoskop a tloušťkoměr

38DL PLUS

Ultrazvukový tloušťkoměr

Pokročilé funkce, jednoduché ovládání

38DL PLUS

je inovativní přístroj, který otvírá vstup do nové éry ultrazvukového měření tloušťky materiálu. Je vhodný pro téměř jakoukoli aplikaci. Jde o nebývale univerzální ale i výkonný a efektivní přístroj, který je plně kompatibilní s celým sortimentem jednoduchých (jednoelementových) i duálních (dvouelementových) sond.



EPOCH 600

Ultrazvukový defektoskop

Malé rozměry, vysoký výkon

EPOCH 600

je nový digitální ultrazvukový defektoskop, který v sobě spojuje špičkovou technologii konvenčního ultrazvuku s praktickým, snadno a intuitivně ovladatelným přístrojem. Toto optimální vyvážení přináší velice silný prostředek pro provádění ultrazvukové defektoskopie.



APC, Certifikační sdružení pro personál – Association for Personnel Certification

KVALIFIKACE A CERTIFIKACE PERSONÁLU V TECHNICKÝCH PROFESÍCH

Podnikatelská 545, 190 11 Praha 9, tel.: +420 246 061 395, fax: + 420 246 061 399

KVALIFIKACE A CERTIFIKACE



SCHVALOVÁNÍ



pracovníků v oboru
**NEDESTRUKTIVNÍ DEFEKTOSKOPIE
(NDT)**



pracovníků v oboru
KOROZE A PROTIKOROZNÍ OCHRANA



pracovníků v oboru
TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ KOVŮ



pracovníků v oboru
POVRCHOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



vedoucích pracovníků v
MANAŽERSKÝCH DOVEDNOSTECH



NDT pracovníků pro TLAKOVÁ ZAŘÍZENÍ

dle nařízení vlády č. 26/2003 Sb. ve znění pozdějších předpisů a Směrnice EU 97/23/EC



FOR INDUSTRY

10. MEZINÁRODNÍ VELETRH STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍ

Souběžné veletrhy:

FOR SURFACE – 6. mezinárodní veletrh povrchových úprav a finálních technologií

FOR WASTE & CLEANING – 6. mezinárodní veletrh nakládání s odpady, recyklace, průmyslové a komunální ekologie, úklidu a čištění

PRAŽSKÝ VELETRŽNÍ AREÁL LETŇANY

3. – 5. 5. 2011



ABF, a.s., Mimoňská 645, 190 00 Praha 9, tel.: 225 291 264-6, e-mail: forindustry@abf.cz, www.abf.cz



41st International Conference and Exhibition



DEFEKOSKOPIE 2011

NDE FOR SAFETY 2011

Ostrava, Czech Republic · November 9-11, 2011

This event will be organized by Czech Society for NDT as an international annual meeting and exhibition in the town **Ostrava** (North Moravia). The conference is aimed to all topics of non-destructive testing and evaluation of materials and structures in all areas of technical activities.

It is an opportunity to meet together all people interested in research, development, as well as in practice, standardization and application of NDT/NDE methods. All interested persons are invited to participate at the conference, and to contribute by papers in both oral and poster sections. Manufacturers and suppliers of NDT instruments, software, literature, and service providers are invited to present their products and innovations.

Main Conference Topics:

- Acoustic emission
- Magnetic and inductive methods
- Radiography
- Surface and optical methods
- Tomography
- Ultrasonic methods
- Leak detection
- NDT corrosion damage monitoring
- NDT in material and structure testing
- Industrial standards and innovations
- Functional and operational testing, reliability and safety assurance
- Education, standardisation, certification and accreditation



Ostrava

Ostrava is the third biggest town in the Czech Republic; it is an economic and cultural centre of an important industrial region and an administrative centre of the North Moravian Region. The local well-developed metallurgy, machine and chemical industries has a big importance for national economy of the whole country.

Hotel

The accommodation of participants will be reserved at comfort **Harmony Club Hotel*** Ostrava**. Harmony Club Hotel is a typical town hotel in a very advantageous position in the proximity of the town centre. The hotel is easily accessible both by car and by public transport (bus, tram). The hotel has modern and comfortable furniture. All rooms are equipped with their own sanitary facilities, TV etc. There is a guarded car-parking.

Preliminary Conference Time Schedule:

Deadline for abstracts submission:	June 30, 2011
Limit date for payment of reduced fees:	September 15, 2011
Deadline for papers delivery:	September 15, 2011
Detailed information with program:	September 30, 2011
Conference opening:	November 09, 2011 at 10 a.m.

Conference Language

All technical papers at the conference will be presented in English, Czech or Slovak languages.

More info: www.cndt.cz

E-mail: cndt@cndt.cz

VIth NDT in Progress

Prague 2011

International Workshop of NDT Experts

Prague, October 10-12, 2011

The International Workshop **NDT in Progress 2011** will be the 6th event in a series started in 2001. The primary aim of these workshops is the meeting of NDT world experts and discussion of the latest state-of-the-art of the NDT research and development in selected areas. All interested persons are invited to contribute to discussions by their oral and/or poster presentations. Next to the skilled experts, the workshop is also intended for young researchers and students who are invited to present their findings as the Workshop is an exceptional opportunity for dissemination of new experiences and methods in the NDT/NDE field. Besides the working days you will also have a nice occasion to enjoy Prague – one of the most magical cities in the Europe.

Main topics (preliminary):

- Electromagnetic and radiographic methods
- Methods based on elastic waves
- Optical methods, image and signal processing
- Nonlinear methods and inverse problems
- Numerical simulations in NDT
- Automated NDT systems and data processing
- Acousto-ultrasonic methods
- Structural health monitoring
- Student presentations and poster section

Language:

The official language of the Workshop will be English



Conference venue:

The Congress Center Floret is situated in close neighborhood of the Pruhonice Castle, just a few minutes away from the highway D1, approximately 15 km from the Prague center. The place is easy accessible by Prague public transport. The Congress Center with its unique surrounding gardens provides excellent possibility for conferences and meetings, and also for recreation. The **accommodation of participants** will be assured in comfort hotel Floret*** (with swimming pool and relax center) which is a part of the Congress Center.



Basic Time Schedule:

Deadline for abstract submission (max. 500 words):

Limit date for payment of reduced fees:

Deadline for full paper manuscript delivery:

Detailed information with program:

Workshop opening:

March 31, 2011

July 31, 2011

September 01, 2011

September 30, 2011

October 10, 2011 at 11 a.m

Local Organizing Committee:

Chairman: Dr. Pavel Mazal, President of CNDT, Brno University of Technology,
Technicka 2, CZ 61669 Brno, Czech Republic, E-mail: cndt@cndt.cz

Workshop Program:

Dr. Zdenek Prevorsek, IT AS CR,
Dolejskova 5, CZ 182 00 Praha 8, Czech Republic.

Corresponding Address:

Dr. Pavel Mazal, CNDT – NDT in P, Brno University of Technology, Technicka 2,
CZ 616 69 Brno, Czech Republic, E-mail: cndt@cndt.cz

More info: www.cndt.cz

PAPERS / PŘÍSPĚVKY

NOTES / POZNÁMKY



LOW-NOISE VOLTAGE AND CHARGE PREAMPLIFIERS FOR PIEZOSENSORS

NÍZKOŠUMOVÉ NAPĚŤOVÉ A NÁBOJOVÉ PŘEDZESILOVAČE PRO PIEZOSNÍMAČE

Josef BAJER, Karel HÁJEK

University of Defence Brno, Dpt. of Electrical Engineering

Contact e-mail: josef.bajer@unob.cz

Abstract

The sensitivity of some applications of the piezo-sensors can be limited by noise of preamplifiers in some cases with low external jamming (acoustic emission, ultrasonic measurements, nonlinear ultrasound spectroscopy etc.). A customary representation of noise properties of these preamplifiers hasn't uniformity and lucidity. Therefore users have problems with comparison of available types. It has more reasons. First, there are used two types (voltage and charge preamplifiers), further the description of the noise of charge preamplifiers is non-uniform and the noise has a frequency dependence. This paper shows an analysis of this problem and suggestion of the uniform representation of the noise properties.

Key words: low-noise preamplifier, noise, piezo-sensor, charge amplifier, comparing of noise

Abstrakt

Některé aplikace piezosnímačů v případech s malým externím rušením (akustická emise, ultrazvuková měření, nelineární ultrazvuková spektroskopie a pod.) mají citlivost limitovanou šumem předzesilovačů. Obvyklé vyjádření šumových vlastností těchto předzesilovačů není jednotné a přehledné a běžným uživatelům neumožňuje porovnání jednotlivých typů. Důvodem je jednak používání dvou rozdílných typů předzesilovačů, (napětových a nábojových), dále pak nejednotnost pro vyjadřování šumu pro nábojové zesilovače a také kmitočtová závislost tohoto šumu. Příspěvek ukazuje jak analýzu této problematiky, tak i návrh jednotného vyjádření šumových vlastností.

Klíčová slova: nízkošumový předzesilovač, šum, piezosenzor, nábojový zesilovač, porovnání šumu

1. Úvod

V některých aplikacích piezosenzorů (akustická emise, ultrazvuková měření, nelineární ultrazvuková spektroskopie a pod.) se může projevovat jen malé externí rušení, takže tyto aplikace mají citlivost limitovanou šumem předzesilovačů. Obvyklé vyjádření šumových vlastností těchto předzesilovačů není jednotné a přehledné a běžným uživatelům neumožňuje porovnání jednotlivých typů. Důvodem je jednak používání dvou rozdílných typů předzesilovačů, (napětových a nábojových), dále pak nejednotnost pro vyjadřování šumu pro nábojové zesilovače a kmitočtová závislost tohoto šumu.

Výstupní šumové napětí předzesilovače závisí na mnoha parametrech (zesílení A, šířka přenášeného pásma B, šumové parametry předzesilovače, hodnoty prvků a pod). Proto si toto vyjádření šumu maximálně zjednodušíme. Nejjednodušší šumový model napětového předzesilovače připojeného k piezoměničci je uveden na obr. 1.

Zjednodušený model samotného piezoměniče se skládá z ekvivalentního bezšumového zdroje signálu U_S , z ekvivalentního sériového odporu R_S a z ekvivalentní sériové kapacity C_S . Vstupní odpor předzesilovače vyjadřuje rezistor R_{IN} a předzesilovač je modelován ideálním bezšumovým zesilovačem A , ekvivalentním zdrojem vstupního šumového napětí U_{nV} a ekvivalentním zdrojem šumového proudu I_n . Výchozí šumový model lze dále zjednodušit (obr. 1b), když piezoměnič nahradíme ekvivalentním zdrojem tepelného šumu odporu R_S a napěťový efekt proudového zdroje šumu I_n vyjádříme napěťovým zdrojem šumu U_{nIZ} podle vztahu

$$U_{nIZ} = I_n Z, \tag{1}$$

kde Z je celková ekvivalentní impedance připojení ke vstupu, vyjadřující paralelní spojení R_{IN} s C_S , vliv sériového odporu R_S můžeme zanedbat. Impedanci vyjadřuje vztah

$$Z = \frac{1}{1/R_{IN} + j\omega C_S}. \tag{2}$$

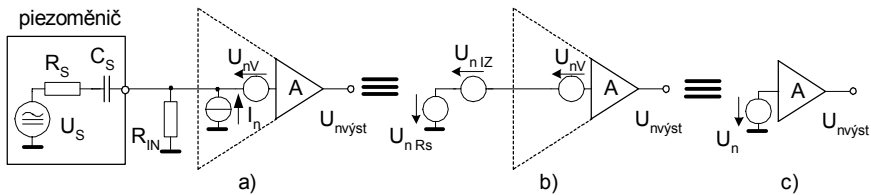
Tři sériově spojené napěťové zdroje lze sečíst do jednoho ekvivalentního (obr. 1c) podle vztahu

$$U_{n\Sigma} = \sqrt{U_{nRS}^2 + U_{nIZ}^2 + U_{nV}^2}, \tag{3}$$

takže výstupní šumové napětí U_{nvyst} je

$$U_{nvyst} = A U_{n\Sigma}. \tag{4}$$

Je zřejmé, že namísto často používaného výstupního šumu U_{nvyst} je výhodnější vyjadřovat ekvivalentní vstupní šumové napětí předzesilovače $U_{n\Sigma}$, protože to není závislé na nastaveném zesílení A a výstupní šumové napětí snadno odvodíme pro jakékoliv zesílení A podle (4).



Obr. 1: a) Zjednodušený šumový model předzesilovače připojeného k piezoměniči, b) šumové náhradní schéma s ekvivalentními šumovými zdroji napětí (U_{nRS} - šum odporu zdroje, U_{nIZ} - napěťový efekt proudového zdroje šumu na impedanci připojené ke vstupu zesilovače), c) šumové náhradní schéma s ekvivalentním šumovým zdrojem napětí ($U_{n\Sigma}$).

Fig. 1: a) Simplified noise model of preamplifier for piezo-sensor, b) noise substitution diagram with equivalent noise voltage sources (U_{nRS} - noise of source resistance, U_{nIZ} - voltage effect of noise current source for connected input impedance, c) noise substitution diagram with equivalent noise voltage source ($U_{n\Sigma}$).

Další parametr, který komplikuje vyjádření šumových vlastností předzesilovače je použitá šířka přenosového pásma předzesilovače a navíc se projevuje i závislost hodnoty šumových spektrálních složek na kmitočtu. Proto šumové napětí U_{nV} (popř. proud I_n) vyjádříme pomocí napěťové (proudové) šumové spektrální hustoty E_{nV} , která odpovídá hodnotě šumového napětí, které projde na daném kmitočtu filtrem o šířce pásma 1 Hz. Typická závislost napěťové spektrální hustoty pro napěťový šum U_{nV} předzesilovače je ukázána na obr. 2. Vidíme, že pro kmitočtové pásmo cca nad 100 Hz se projevuje jen tepelný

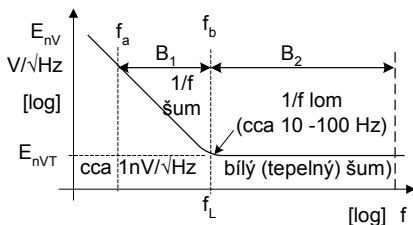
šum (E_{nVT}) a má konstantní závislost. Celkové napětí pro naznačenou šířku pásma B_2 lze jednoduše vyjádřit vztahem

$$U_{nV} = E_{nV} \sqrt{B_2}. \quad (5)$$

Přechodem na šumovou spektrální hustotu E_{nV} se jednoduše zbavíme závislosti na vlivu použité šířky pásma a můžeme tak předzesilovač porovnávat pro různé aplikace nezávisle na použité šířce pásma. Pokud se projeví kmitočtová závislost $1/f$ pro nízké kmitočty (v pásmu B_1), lze její projev vypočítat podle vztahu

$$U_{nV} = E_{nV1Hz} \sqrt{\ln \frac{f_b}{f_a}}, \quad (6)$$

kde E_{nV1Hz} je spektrální hustota pro kmitočet 1 Hz a jeho hodnotu vypočteme podle vztahu $E_{nV1Hz} = E_{nV} f_L$. Hodnota kmitočtu f_b může být volena kdekoli mezi f_a a lomovým kmitočtem f_L . Podíl příspěvků pásem B_1 a B_2 na celkovém šumu záleží na kmitočtu lomu (a tím i hodnotě E_{nV1Hz}) a šířce pásma B_2 . Při velké šířce pásma B_2 a nízké hodnotě kmitočtu lomu můžeme vliv šumu $1/f$ zanedbat. Pokud tomu tak není, je potřebné oba šумы sčítat. Samozřejmě, pokud po průchodu celým řetězcem zpracováváme úzkopásmový signál, vyhodnocujeme šum pro odpovídající pásmo.



Obr. 2 Typická závislost napět'ové spektrální hustoty pro ekvivalentní napět'ový šum předzesilovače a naznačení šířek pásma v oblasti bílého šumu a šumu $1/f$.

Fig. 2 Typical dependency of voltage spectral density for equivalent voltage noise of preamplifier and indication of bands in area of a white noise and $1/f$ noise.

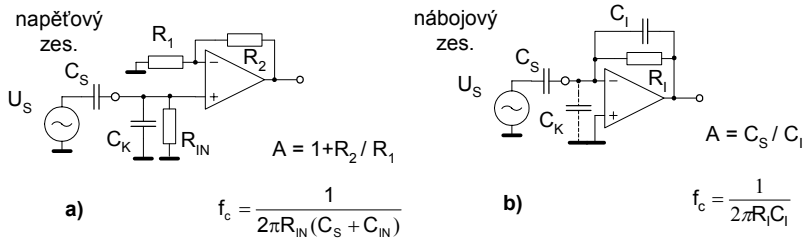
Je tedy zřejmé, že při zjednodušení, kdy neuvažujeme vliv šumu $1/f$, můžeme vyjádřit nezávislé šumové vlastnosti předzesilovače dvěma čísly, a to napět'ovou a proudovou spektrální hustotou E_{nV} a E_{nI} v typických jednotkách $[nV/\sqrt{Hz}]$ a $[pA/\sqrt{Hz}]$, jinak musíme brát v úvahu i kmitočet lomu šumu $1/f$.

Výslednou vstupní šumovou napět'ovou spektrální hustotu E_n dostaneme po vynásobení impedance Z zdroje signálu s proudovou spektrální hustotou I_n a po součtu s napět'ovou spektrální hustotou E_{nV} . Zde je typické, že pro malou impedanci zdroje signálu převládá napět'ová, pro velkou impedanci (cca pro $Z > 10 \text{ k}\Omega$) převládá obvykle proudová spektrální hustota. Z této hodnoty a použité šířky pásma pak jednoduše podle vztahu (5) získáme ekvivalentní vstupní šumové napětí a vynásobením hodnotou použitého zesílení (4) získáme efektivní hodnotu výstupního šumového napětí. Tu lze převést na hodnotu maximálního špičkového napětí (U_{np-p}) vynásobením konstantou cca $6 [1]$.

2. Šum napět'ového a nábojového předzesilovače připojeného k piezosenzoru

Pro napět'ový zesilovač byly vysloveny základní úvahy v úvodní části. Nicméně efekt kapacitní impedance zdroje signálu (piezosenzoru) je potřebné rozebrat podrobněji a porovnat

tyto vlivy na oba typy předzesilovačů. Jejich podrobnější náhradní schéma při realizaci s operačními zesilovači (OZ) je uvedeno na obr. 3 i s odpovídajícími vztahy pro zesílení a dolní mezní kmitočet f_c .



Obr. 3: Předzesilovače pro zdroje s kapacitním charakterem výstupní impedance a) základní model napěťového zesilovače, b) základní model nábojového zesilovače se vztahy pro přenos A a dolní mezní kmitočet f_c .

Fig. 3: Premplifiers for sources with capacitive source impedance a) basic model of voltage amplifier, b) basic model of charge amplifier with relations for gain A and low cut-off frequency f_c .

Jak je zřejmé, obě zapojení se chovají odlišně. Zisk napěťového zesilovače je dán poměrem nezávislých odporů a nezávisí na kapacitě C_S senzoru. Toto zapojení je ale více citlivé na parazitní kapacitu C_K v případě dlouhého přívodu k senzoru. Zesílení nábojového zesilovače je dáno poměrem vnitřní kapacity senzoru C_S a zpětnovazební integrační kapacity C_I . Je méně závislé na parazitní kapacitě C_K přívodního kabelu. Ovšem zpětnovazební kapacita musí být A-krát nižší než vnitřní kapacita zdroje, což může být technologický problém pro hodnoty $C_S < 30$ pF.

Podstatné, je, že oba zesilovače musí použít rezistor pro eliminaci svodového proudu. U napěťového zesilovače je to R_{IN} a u nábojového je to R_I . Odpor těchto svodových rezistorů musí být nižší než určitá maximální hodnota aby nedošlo k stejnosměrnému zasaturování zesilovače. Vzhledem k minimálním svodovému proudu CMOS vstupů OZ (cca 100pA) může být tato hodnota cca 100MΩ až 1GΩ. Tyto rezistory spolu s kapacitou senzoru C_S resp. zpětnovazební kapacitou C_I vytvářejí filtr horní propust, který omezuje přenos signálů s nízkými kmitočty (obr. 4a). Vztahy pro tyto mezní kmitočty f_c jsou také uvedeny na obr. 3. Zde můžeme uvažovat dva případy, a to:

- obě zapojení mají shodný mezní kmitočet f_c . Pak musí být $R_I = A R_{IN}$.
- obě zapojení použijí stejný maximální odpor. Pak napěťový zesilovač bude mít mezní kmitočet f_c A-krát nižší než nábojový zesilovač.

2.1. Porovnání šumových vlastností při shodném dolním mezním kmitočtu f_c .

Pro porovnání šumových vlastností vyjdeme z předpokladu shodného dolního mezního kmitočtu f_c (obr. 4 a) a podmínky

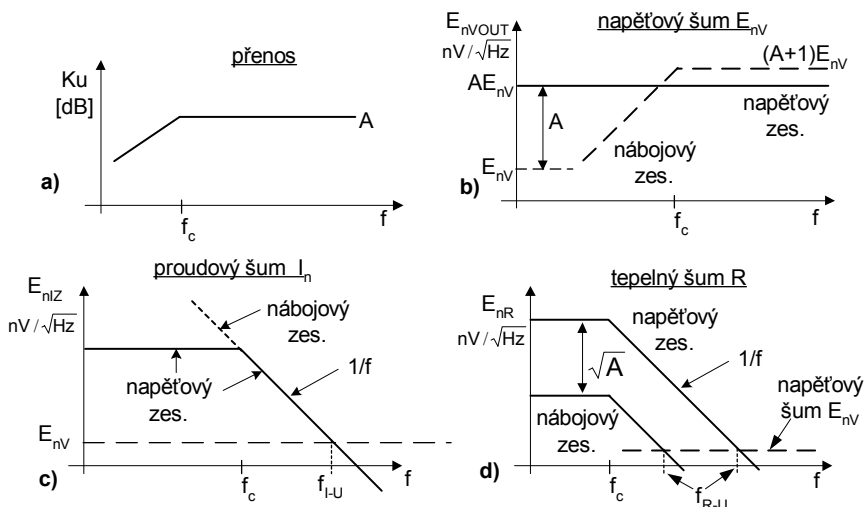
$$R_I = A R_{IN}. \tag{7}$$

Nyní diskutujeme výstupní spektrální hustotu šumu způsobenou napěťovým šumem E_{nV} operačního zesilovače (viz obr. 4.b). U napěťového zesilovače je to $A E_{nV}$, u nábojového pak $(A+1)E_{nV}$. Ten pak klesá pod mezním kmitočtem f_c , což nehraje praktickou roli. Podělíme-li

tyto hodnoty zesílením A , můžeme tedy uvažovat ekvivalentní vstupní napěťovou spektrální hustotu předzesilovače jako E_{nV} resp. $E_{nV}(1+1/A)$ pro nábojový.

Nyní diskutujeme vliv proudového šumu OZ podle vztahu (1). Ekvivalentní vstupní napěťovou šumovou spektrální hustotu tak můžeme pro napěťový zesilovač vyjádřit vztahem

$$E_{nIZ} = E_{nI} / \sqrt{1/R_{nV}^2 + \omega^2 C_S^2}. \quad (8)$$



Obr. 4: Vlastnosti napěťového a nábojového zesilovače z obr. 2: a) základní přenos; napěťová spektrální hustota b) pro napěťový šum c) pro proudový šum, d) pro tepelný šum.

Fig. 4: Properties of voltage and charge preamplifiers from Fig. 2: a) basic gain; voltage spectral density for b) pro voltage noise c) for current noise, d) for thermal noise.

Pro nábojový zesilovač za podmínky $A \gg 1$ je dominantní impedancí připojenou ke vstupu OZ kapacita zdroje, takže

$$E_{nIZ} = E_{nI} / \omega C_S. \quad (9)$$

Ze vztahů (8) a (9) a obr. 4c plyne, že proudový šum vyvolává pro oba typy zesilovačů prakticky stejnou závislost ekvivalentní vstupní napěťové šumové spektrální hustoty (obr. 4.c), mající směrnici $1/f$ (na rozdíl od blikavého šumu $1/f$ na obr. 2 zde způsobené vlivem kmitočtové závislosti impedance kapacity C_S) a protínající konstantní závislost ekvivalentního vstupního napěťového šumu OZ pro kmitočet f_{I-U} . Ten lze vyjádřit za určitých zjednodušení vztahem

$$f_{I-U} = \frac{E_{nI}}{E_{nV} 2\pi C_S}, \quad (10)$$

takže vidíme, že zde hraje dominantní roli kromě hodnoty proudového a napěťového šumu vnitřní kapacita zdroje signálu a můžeme říci, že čím je vyšší, tím je vliv proudového šumu nižší.

Posledním významným zdrojem šumu je tepelný šum odporů R_{IN} resp. R_I . Pro napěťový zesilovač lze odvodit pro závislost ekvivalentní vstupní napěťové šumové spektrální hustoty tento vztah

$$E_{nR} = \sqrt{\frac{4kTR_{IN}}{1 + (R_{IN}C_S\omega)^2}}, \quad (11)$$

a pro nábojový zesilovač

$$E_{nR} = \sqrt{\frac{4kTR_I}{1 + (R_I C_I \omega)^2}} = \sqrt{\frac{4kTR_{IN}}{A_I^2 + (R_{IN}C_S\omega)^2}}. \quad (12)$$

Za výchozích podmínek je tedy nábojový zesilovač z hlediska tepelného šumu odporu lepší úměrně odmocnině ze zesílení A_I , jak je zřejmé i z obr. 4d. Stejně jako u proudového šumu je dominantní závislost šumu $1/f$ (zde na rozdíl od obr. 2 způsobeno blokováním tepelného šumu kapacitou C_S resp. C_I se směrnici 20 dB/dec.) vytvářející průsečík pro kmitočet f_{R-U} , který má ovšem vyšší hodnotu pro napěťový zesilovač než pro nábojový zesilovač. Lze je vyjádřit ve zjednodušených vztazích. Pro napěťový zesilovač je to

$$f_{R-U} = \frac{1}{2\pi C_S E_{nV}} \sqrt{\frac{4kT}{R_{IN}}} \quad (13)$$

a pro bod zlomu nábojového zesilovače pak přibližně platí

$$f_{R-U} = \frac{1}{2\pi C_S E_{nV}} \sqrt{\frac{4kT}{R_I}} = \frac{1}{2\pi C_S E_{nV}} \sqrt{\frac{4kT}{AR_{IN}}} \quad (14)$$

a je zřejmé, že lomový kmitočet f_{R-U} a tepelný šum odporu je v případě nábojového zesilovače \sqrt{A} -krát nižší než u napěťového.

Celková ekvivalentní napěťová šumová spektrální hustota je dána součtem všech zdrojů šumu podle vztahu

$$E_{n\Sigma} = \sqrt{E_{nR}^2 + E_{nIZ}^2 + E_{nV}^2}, \quad (15)$$

přičemž je zřejmé, že výsledná závislost se skládá ze dvou částí, v nichž dominuje vždy jeden zdroj šumu a dělicím kmitočtem je f_{R-U} nebo f_{I-U} . Lze odvodit, že tepelný šum bude dominovat nad proudovým, pokud

$$R_{IN} < \frac{4kT}{E_{nI}^2} \quad \text{resp.} \quad R_I < \frac{4kT}{E_{nI}^2}. \quad (16)$$

Např. pro minimální hodnotu proudového šumu OZ s unipolárním vstupem $E_{nI} = 1 \text{ fA}\sqrt{\text{Hz}}$ musí být svodový odpor $R_{IN} < 16 \text{ G}\Omega$ (dostatečná rezerva), tudíž je lomový kmitočet výsledné závislosti roven f_{R-U} . Ovšem pro častou hodnotu cca $E_{nI} = 10 \text{ fA}\sqrt{\text{Hz}}$ již vychází $R_{IN} < 160 \text{ M}\Omega$, což již může být překročeno, a tudíž se již může podstatně uplatnit proudový šum s odpovídajícím bodem zlomu f_{I-U} .

2.2. Porovnání šumových vlastností při shodných svodových rezistorech

Předchozí východisko shodnosti mezních kmitočtů f_ζ a z něj vyplývající podmínka (7) je málo praktická, obvykle se volí shodný svodový odpor R_{IN} a R_I pro nábojový i napěťový zesilovač, a to maximálně možná hodnota. Důsledkem je pak pro stejné zesílení nižší hodnota dolního mezního kmitočtu napěťového zesilovače.

Při porovnání šumových vlastností obou zapojení při této podmínce ($R_I = R_{IN}$) se nemění šumové poměry pro napěťový šum OZ, ale ani pro proudový, protože pro něj dominuje vliv C_S . Rozdílný vztah dostaneme pro tepelný šum odporu pro nábojový zesilovač

$$E_{nr} = \sqrt{\frac{4kTR_f}{A^2 \{1 + (\omega R_f C_s / A)^2\}}}, \quad (17)$$

kde po zjednodušení lze odvodit kmitočty průsečíku s napěťovým šumem

$$f_{R-U} = \frac{1}{2\pi C_s E_{nV}} \sqrt{\frac{4kT}{R_f}} = \frac{1}{2\pi C_s E_{nV}} \sqrt{\frac{4kT}{R_{IN}}}, \quad (18)$$

což odpovídá vztahu pro napěťový zesilovač. V tomto případě se tedy tepelné šumy napěťového a nábojového zesilovače prakticky neliší a shodné jsou tudíž i kmitočty f_{R-U} .

3. Jednotný přístup k hodnocení šumových parametrů nábojových a napěťových předzesilovačů v praxi.

Z výše uvedené teorie je zřejmé, že šum napěťových a nábojových předzesilovačů lze při znalosti potřebných parametrů dobře porovnat a zhodnotit, která z možných variant je pro danou aplikaci nejvýhodnější. Bohužel různí výrobci udávají šumové parametry různým způsobem a ne vždy s dostačujícími informacemi. Běžné jsou např. tyto varianty:

- výstupní šumové napětí,
- výstupní šumový náboj,
- různé formy vstupní či výstupní ekvivalentní napěťové spektrální hustoty.

Pro určení a porovnání šumových vlastností předzesilovačů je nejvýhodnější a jednoznačná znalost hodnot napěťové spektrální hustoty E_{nV} , proudové spektrální hustoty E_{nI} , kapacity uživatelem použitého zdroje signálu C_s , svodového odporu R_{IN} a zesílení A resp. hodnota R_f a C_f pro nábojový zesilovač (C_f určí zesílení pro použité C_s). Hodnota konstantní spektrální hustoty pro $f \approx f_L$ (viz obr. 2) je tak evidentní z hodnoty E_{nV} (viz odstavce za vztahem (7) a obr. 4.b). Z ostatních hodnot lze pak určit kmitočty lomu jako vyšší z hodnot f_{L-U} (vztah (10)) a f_{R-U} (vztah (18)). Pro použitý senzor je tím dána jednoznačně kmitočtová závislost šumové spektrální hustoty ve tvaru podle obr. 2. Výstupní šum pro zvolené přenosové pásmo a dané zesílení vyplývá ze vztahů (4)-(6).

V případě, že je výrobcem předzesilovače zadán např. výstupní šum a zesílení A , je nutno vyjma případ, kdy se evidentně neprojevuje $1/f$ šum (kmitočty lomu f_L je menší než dolní mezní kmitočty filtrem omezeného a dále propouštěného přenosového pásma), zadat i další parametry pro určení kmitočtu f_L v závislosti na tom, zda jde o napěťový či nábojový zesilovač (při měření použitý C_s , dále R , C_f , E_{nI} , E_{nV}). Z těchto hodnot pak postupně dojit podle postupu z předchozího odstavce k úrovni výstupního šumu pro zvolené C_s .

V případě zadané hodnoty šumového náboje (používáno u nábojového zesilovače) při znalosti kapacity C_f přejdeme hodnoty náboje na výstupní napětí podle známého vztahu $U=QC$. Další postup je pak stejný jako v předchozím odstavci.

4. Praktické závěry k použití a porovnání předzesilovačů pro piezosnímače

Z rozboru vyplývají následující závěry:

- Použit senzor s co největší plochou a kapacitou při zabezpečení dostatečné šířky kmitočtového pásma senzoru. Tím se zajistí maximální citlivost senzoru, nejmenší hodnota šumu $1/f$ a také minimální citlivost na parazitní kapacity a možnost největšího zesílení nábojovým zesilovačem.

- Napěťový zesilovač použit pro aplikace s relativně krátkým kabelem mezi senzorem a předzesilovačem a v případě, kdy potřebujeme i co nejnižší dolní mezní kmitočet snímaného signálu.
- Nábojový zesilovač je výhodnější použit v případě delšího přírodního kabelu, kdy se jeho kapacita blíží kapacitě snímače.
- Z hlediska porovnání šumových vlastností různých předzesilovačů je dobré znát kmitočtovou závislost vstupní spektrální napěťové hustoty či alespoň hodnotu ekvivalentní napěťové šumové spektrální hustoty (E_{nV}) a kmitočtu lomu (f_L). Ovšem toto srovnání je potřebné provést pro stejnou kapacitu C_s , použitou při měření namísto senzoru a znát hodnotu zesílení (pro nábojový zesilovač tudíž hodnotu C_i)

5. Závěr

Príspevek ukazuje analýzu šumových vlastností předzesilovačů připojených k piezosenzoru a problematiku jejich porovnání. Porovnává napěťové i nábojové předzesilovače a sjednocuje definici jejich šumových vlastností. Ukazuje, že skutečné šumové vlastnosti jsou pro vyšší kmitočtová pásma (nad kmitočtem lomu f_L) dána převážně hodnotou ekvivalentní šumové napěťové spektrální hustoty samotného předzesilovače (nejnižší hodnoty cca 1-3 nV \sqrt Hz). Nicméně pro střední a nižší kmitočty může úroveň šumu podstatně záviset na kapacitě C_s použitého senzoru a přenášeném kmitočtovém pásmu, tudíž pro posouzení šumových vlastností předzesilovače obvykle nestačí jen výrobcem udaná hodnota výstupního šumového napětí [3] popř. v lepším případě výstupní spektrální napěťové hustoty [2], ale rozhodující je skutečná hodnota lomového kmitočtu f_L pro použitý senzor.

Dále z předloženého rozboru vyplývají možnosti optimalizace z hlediska zlepšování citlivosti, a to především z hlediska volby senzoru a jeho kapacity C_s a také vlivu použitého přenosového kmitočtového pásma, kdy jakékoliv širší pásmo než je potřebné může podstatným způsobem zvýšit úroveň šumu.

Tato práce byla realizována s podporou Grantové agentury ČR pod grantem č. 102/09/H074.

Literatura:

- [1] Texas Instruments - Op Amp Noise Theory and Applications.
<http://focus.ti.com/lit/ml/sloa082/sloa082.pdf>
- [2] PCB Piezotronics - Industrial Charge Amplifier Model 421A11.
http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Electronics/products/Manuals/421A11.pdf
- [3] Vallen -Acoustic Emission Preamplifiers.
<http://www.vallen.de/zdownload/pdf/pre603.pdf>
- [4] HÁJEK, K. - ŠIKULA, J.- Tacano, M.- Hashiguchi, S.: Signal to Noise Ratio and Preamplifier Noise of AE Measuring Systems. Proc. of EWGAE'02, Praha, August 2002, p. 111-118.
- [5] ŠIKULA, Josef, ŠTRUNC, Marián, MAJZNER, Jiří, HÁJEK, Karel. Electrical Noise and Sensitivity of Piezoceramic Sensors. NDT IN PROGRES - II, Praha, 2003, CD ROM ISBN 80-214-2475-3.



INSPECTION RELIABILITY IN THE MEAN OF SIGNAL AMPLITUDE INTERPRETATION

Jiří BĚHAL

A T G, s.r.o.

behal@atg.cz

Abstract

Inspection reliability has been studied in the mean of signal amplitude interpretation. Relationship of flaw size and signal amplitude is analysed using statistical approach. The data processing is demonstrated on the experimental data.

Keywords: *Inspection Reliability, Signal Amplitude, Probability of Detection, Repeatability*

Introduction

Increasing quality management provides us with demands on inspection reliability assessment and process parameter estimation. A probability of detection (PoD) value is widely used for inspection method description, however the process of signal interpretation itself can be analysed in several approaches. It may be useful to discuss parameter relationships for the purpose of correct using of statistical terms and result statement in appropriate ways.

For the purpose of clear explanation of relations and consequences regarding to practical application, the mathematic formulation and description are simplified and may contain some shortcuts. Problem can be studied in more detail using references e.g. [1], [2] or [3].

Mathematical Approach

In probabilistic analyses, an important term deals with cumulative distribution function:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt. \quad (1)$$

This expression can be used for assessment of probability, that a quantity value will be less than a given value:

$$P = F(x \leq x_0). \quad (2)$$

This function has several features, e.g. it goes from 0 to 1 (from 0% to 100% probability) in the range of quantity values or over the whole spectrum. A form of this function describes an occurrence of quantity values.

The expression $f(t)$ is called density of probability and it is a relative count of given value. The most natural distribution of measured quantity is so called normal distribution:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

In this form, a mean value μ and variance σ exist. A lot of other both symmetrical and asymmetrical distributions are formulated, e.g. Weibull's, Pearson's or exponential distribution:

$$f(x, \lambda) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \quad (4)$$

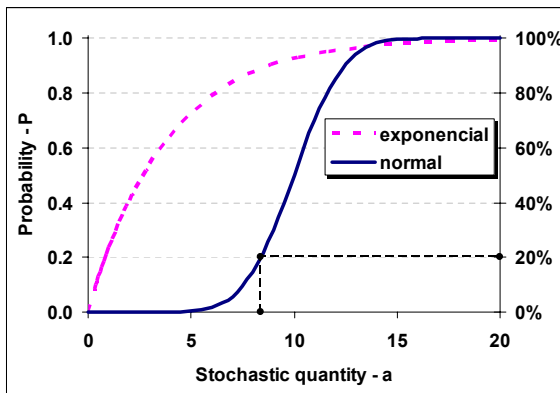


Figure 1 Cumulative distribution function

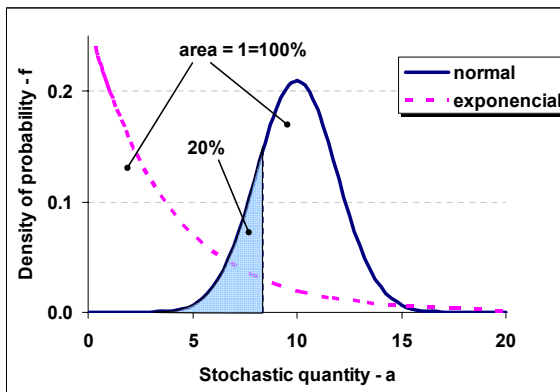


Figure 2 Density of probability

Another useful tool for experimental data processing is a logarithmic transformation. One of interesting properties is a non-linear presentation of a measured quantity. The higher the quantity value, the smaller the logarithm increasing, see Fig.3. In this manner, evaluation of low signal amplitudes is provided with high sensitivity:

$$\log(a_1) - \log(a_2) = \log \frac{a_1}{a_2}. \quad (5)$$

The logarithmic transformation is used for advance displaying of signal amplitude, processing of data with exponential nature (e.g. lifetime) etc.

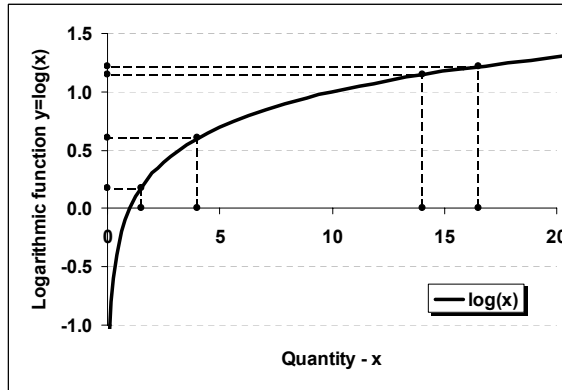


Figure 3 Logarithmic transformation

Signal Amplitude Analysis

A flaw size detectable by given method can be quantified by statistical analysis of experimental data. A similar approach is applicable when reliability of reference coupon inspection is investigated.

Let's have a system, where flaw of a size generates a signal of b amplitude. The conditions during inspection have a strong influence on the signal amplitude and the signal has random errors:

$$b = \mu(a) + \varepsilon. \quad (6)$$

The measured signal is stochastic quantity with certain density of probability $f_a(b)$. The flaw is positively detected if the signal exceeds a detection threshold. In Fig.4, this threshold value is designated as b_p . Probability of detection of flaw of the a size can be calculated:

$$\hat{PoD}(a) = P(b(a) > b_p) = \int_{b_p}^{\infty} f_a(b) db. \quad (7)$$

According to (6), we can plot a distribution of b values (in the vertical direction in Fig.4) for given flaw size. The PoD value is represented by that part of distribution, which is above the detection threshold. For small a sizes, the PoD is small. For a sizes higher then some critical

region, the PoD is close to the 100% level. Inside the region, which covers transient a sizes, the PoD is significant, but far to reliable detection. The task of PoD estimation is described in a lot of references, e.g. summary [4]. Just the question about a signal amplitude is the aim of this study.

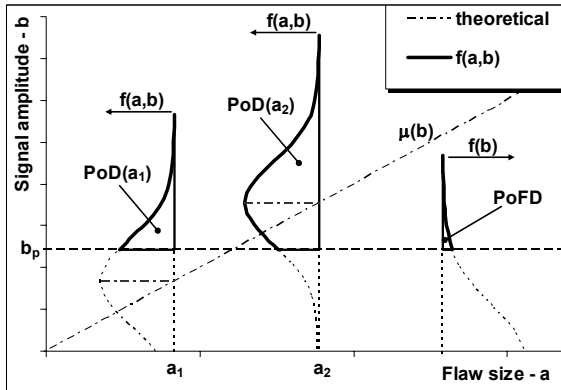


Figure 4 Statistical approach to the signal amplitude

In the case of non-linear system, the signal to flaw size can be assumed in the form of:

$$\ln b = \beta_0 + \beta_1 \ln a + \varepsilon, \quad (8)$$

where the ε is a random error with normal distribution around the mean value. Such PoD can be expressed as

$$\hat{PoD}(a) = P(b(a) > b_p) = P(\ln b(a) > \ln b_p) = F\left(\frac{\ln b - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right), \quad (9)$$

where

$$\hat{\mu} = \frac{\ln b_p - \beta_0}{\beta_1}, \quad (10)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_\varepsilon}{\beta_1}. \quad (11)$$

Because the PoD estimation is done on the set of experimental data, the confidence level is included by the h parameter:

$$\hat{PoD}_h(a) = F\left(\frac{\ln b - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} - \hat{h}\right). \quad (12)$$

The h value depends on features of data set (specimen number, variance etc.).

A specific value of PoD is observed for no flaw ($a=0$, healthy specimen). If the b distribution for this case produces a real PoD value, this value can be considered as probability of false indication:

$$P_0 = P(b_{noise} > b_p). \quad (13)$$

A noise background can be another source of the signals. These spurious signals are described as false detection. Generally, the noise level is expected to decrease with the signal amplitude, see PoFD (probability of false detection) illustrated in Fig.4. An acceptable level of false detection is crucial namely in the case of automatic stands, where an effort to achieve a maximal testing speed (object / probe movement) is important. In lot of cases, the noise has an upper limit value. It means that above certain signal level there is no noise signal. However, when equipment setting could be optimized, some portion of false detection may lead to higher performance of inspection. For example application, see repeated inspections according to [5].

Experimental Demonstration

The statistical approach is applied in the case of experimental data [6] analysis. The fatigue cracks in aluminium sheets originated in rivet holes. For non-destructive inspections, an eddy-current (ET) method was used. The common probe of 4 mm diameter was positioned manually. The signal amplitude was displayed on the single-frequency instrument. The crack length was measured visually on the backside and is logged from the hole edge. As the rivet element was presented in the coupons during ET inspection, a part of cracks were hidden under the flush heads.

The data analysis is illustrated in Fig.5. The flaw offset given by inspection outside of rivet head was about 1.9 mm. The signal amplitude is logged as the screen height (SH) percentage. We can find a band limited by confidence level percentiles, values of 5% and 95% are estimated in this example. If low signal amplitude is sufficient ($b \rightarrow 0$, it means low signal-to-noise ratio), the crack size of about 3 mm can be considered as reliably detectable ($P=95\%$; $b=10\%$) with used inspection techniques.

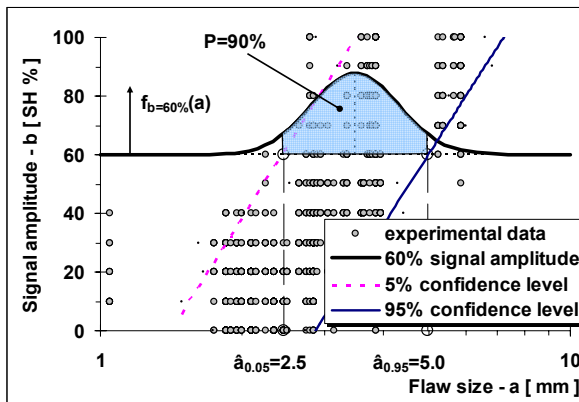


Figure 5 Analysis of experimental data

The application of analysis like this can be demonstrated on interpretation of measured signal amplitude. In Fig.5, a distribution can be also described in the horizontal direction. The distribution of flaw sizes is assumed in the log-normal form for graphical illustration. It can be estimated empirically or by regression if necessary. For given signal amplitude,

in this example $b=60\%$ of SH, we can describe the probability density of a sizes. Using the percentiles of 5% and 95%, the interval estimation of the a value can be evaluated:

$$P(\{b = 60\% : \hat{a} \in \langle 2.5; 5.0 \rangle\}) = P(a \leq 5.0) - P(a \leq 2.5) = 0.95 - 0.05 = 0.9. \quad (14)$$

Now we can declare, that if a 60% SH signal is indicated, there is a flaw size of

$$2.5 \leq a_{60\%} \leq 5.0 \Big|_{P=90\%}. \quad (15)$$

presented in the tested object.

Conclusion

A statistical approach is very useful tool to meet quality demands and prove inspection parameters. An assessment of influences is one of steps leading to optimised application of non-destructive testing. Correct interpretation of results is the key for success. It is necessary to keep in mind, that a stochastic quantity such as measured signal can be interpreted just as an estimation of the source (flaw size). Moreover, any statement based on a limited set of experimental data can be done with certain confidence level only.

Analysing signal amplitude in the flaw size domain we saw that there is certain range of flaw sizes, which produce signals with poor reliability of detection. The variance of measured signal (6) can be considered as a result of conditions such as crack opening or flaw orientation with respect to the probe direction. If influences independent of tested object are taken into account, e.g. vibration of probe, the inspection repeatability can be expressed as a bandwidth of signals produced by given flaw sizes. Evaluation of the PoD of the single (specific / reference) object tested with given detection threshold is a different task.

A statistical approach for the scheduling of periodical inspections in service is investigated in other studies, e.g. [7], [8].

Reference

- [1] Wu, Y.H., Hsiao, C.C.: Reliability assessment of automated eddy current system for turbine blades. Vol. 45-5, British Institute of Non-Destructive Testing, Northampton 2003
- [2] Berens, A. P.: NDE reliability data analysis. In Metals Handbook, 9th ed., Vol.17, ASM Int., 1989, pp.689-701
- [3] Keqin, D.: A Quantitative Method for Determining the Flaw Size in the Structure. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome 2000
- [4] Singh, R.: Three Decades of NDI Reliability Assessment. Report No.3510-99-01, Karta, 2000
- [5] EN 10246: Non-destructive testing of steel tubes, the European Committee for Standardization
- [6] Růžička M. et al: Results evaluation of the cracks detection using nondestructive methods; ČVUT report No. 2051/01/15, Prague, 2001
- [7] Běhal, J.: Crack Detection Probability and Maintenance Program. 1st Maintenance Management, Venice 2005, pp.159-162
- [8] Běhal, J.: Airframe Health Monitoring and Identification of Structural Damage, PhD thesis, Czech Technical University in Prague, 2008



HLAVNÍ PROBLÉMY PŘI KALIBRACI SNÍMAČŮ AE

MAIN PROBLEMS WITH AE SENSORS CALIBRATION

Petr BENEŠ, Jiří FIALKA
Vysoké učení technické v Brně, FEKT
Contact e-mail: benesp@feec.vutbr.cz

Abstract

This paper contains a brief description of the current situation in the laboratory for calibration of acoustic emission sensors by the reciprocity method according to the NDIS 2109 and by the step function according to ASTM 1106. Most attention is given to the problems with correct implementation of AE sensor calibration methodology. It describes in detail the influence of aperture effect on frequency response for surface calibration of the sensor. Briefly describe the basic principle and design of broadband AE sensor with conical active element and are given the frequency characteristics of the reference sensors obtained by reciprocal calibration.

Key words: *acoustic emission, reference sensor, calibration*

Abstrakt

Příspěvek obsahuje krátký popis aktuálního stavu pracoviště pro kalibraci snímačů akustické emise reciproční metodou dle NDIS 2109 a skokovou funkcí dle ASTM 1106. Hlavní pozornost je věnována problémům spojeným s kalibrací snímačů AE. Je podrobně popsán vliv aperturního jevu na frekvenční charakteristiku snímače při povrchové kalibraci. Stručně jsou popsány základní principy a konstrukční řešení širokopásmových snímačů s kuželovým aktivním členem a jsou uvedeny frekvenční charakteristiky těchto referenčních snímačů získané reciproční kalibrací.

Klíčová slova: *akustická emise, referenční snímač, kalibrace*

1. Vývoj a současný stav pracoviště pro kalibraci snímačů FEKT VUT v Brně

Cílem příspěvku je informovat o současném stavu našeho pracoviště pro kalibraci snímačů akustické emise a prováděných experimentech a jejich výsledcích. Problematice kalibrace snímačů se věnujeme se střídavou intenzitou od roku 1995. Hlavním důvodem je orientace našeho pracoviště na využití spojité akustické emise jako diagnostického signálu a s tím související potřeba používat širokopásmové snímače. Hlavní část informace signálu spojité AE je totiž ve spektrální oblasti, narozdíl od impulzní emise, využívané např. pro detekci a lokalizaci trhlin. Signál spojité AE jsme využili např. pro bezdotykové měření vzdálenosti založené na principu změny charakteru AE signálu generovaného při výtoku média definovanou šterbinou, měření průtoku jednofázových a dvoufázových médií, při diagnostice kvality teplosměnných povrchů, při fázových změnách, při tření apod. Při všech uvedených aplikacích byla kromě energie signálu významným parametrem i spektrální výkonová hustota.

Z důvodu reprodukovatelnosti experimentů bylo nutné znát a opakovaně ověřovat frekvenční charakteristiky používaných snímačů. Nejprve to byly pokusy se sekundární kalibrací snímačů pomocí duralového a ocelového konického bezodrazového bloku dle ASTM E976, kdy zdrojem byl jiskrový výboj, lom tuhy, plynová tryska, případně piezoelektrický měnič. Výsledky nebyly příliš uspokojivé, a proto byl v roce 2001 pořízen s pomocí Ing. Crhy z Vítkovických železáren ocelový válec o průměru 900 mm a výšce 430 mm s celkovou váhou 2,5 tuny. Válec byl ve Žďárských strojárnách opracován, byla planparalelně zabroušena čela válce a povrch čel byl vyleštěn. Tímto byl získán základní prvek pro vybudování pracoviště pro primární kalibraci snímačů v naší laboratoři.

Jako první byla implementována kalibrace reciproční metodou dle japonského standardu NDIS 2109, autorem metody je prof. Hatano. Metoda potřebuje tři reverzibilní snímače, které nemusí být předem kalibrovány. Výsledkem je amplituda i fáze frekvenčního přenosu všech tří snímačů. Během kalibrace je nutné změřit tři hodnoty napětí a tři hodnoty proudu pro každý kmitočet v požadovaném frekvenčním pásmu. Snímače jsou buzeny harmonickým impulsem, jehož základní frekvence se postupně během kalibrace mění v požadovaném rozsahu. Pro kalibraci je nutný rozměrný testovací blok (rozměr omezuje dolní kmitočtový rozsah) a méně běžné laboratorní vybavení, např. citlivá proudová sonda.

Pro reciproční kalibraci bylo použito tehdy dostupné vybavení, kde základem byl spektrální analyzátor HP89410A a proudová sonda Tektronix P6022. Podrobně je tehdy realizovaná sestava kalibračního pracoviště popsána v příspěvku na Defektoskopii 2001 [1]. Hlavní nevýhodou realizované reciproční kalibrace byla doba měření (téměř dvě hodiny) a nutnost trvalé přítomnosti obsluhy během kalibrace. Proto dalším logickým krokem byla snaha o automatizaci celého kalibračního procesu. V této oblasti se o pokrok rozhodující měrou zasloužil kolega ing. Keprť, který doplnil sestavu přístrojů o tříkanálový přepínač s extrémně vysokým potlačením vzájemných přeslechů, umožňující automatické „cyklování“ proměřovaných snímačů a následně plně automatizoval celý kalibrační proces pomocí vytvořeného software v prostředí LabVIEW.

Dalším krokem byla implementace primární kalibrace skokovou funkcí síly dle ASTM E 1106. Základem této kalibrační metody je znalost výchylky povrchu testovacího bloku při skokovém uvolnění síly bodově působící na povrchu bloku. Výchylka volného povrchu testovacího bloku v místě kalibrovaného snímače může být určena pomocí teorie pružnosti výpočtem nebo dostatečně věrným měřením absolutním snímačem výchylky o známé citlivosti, založeném na kapacitním nebo optickém principu. Skoková funkce síly je aproximována lomem skleněné kapiláry o průměru menším než 0,2 mm. Pomocí tenzometrového snímače je změřena velikost síly, při které kapilára pukne.

Kalibrační pracoviště bylo doplněno lámacím mechanismem umožňujícím definovaný a opakovatelný lom kapiláry a referenční snímač výchylky – laserinterferometr Polytec OFV-5000 s optickou hlavou OFV-505 a ultrazvukovým modulem DD-300 s pracovním rozsahem 75nm ve frekvenčním rozsahu do 20 MHz. Podrobný popis kalibračního pracoviště po doplnění o kalibraci skokovou funkcí byl obsahem našeho příspěvku na Defektoskopii v roce 2006 [2].

V následujících letech bylo provedeno několik set kalibrací na zhruba třiceti snímačích s cílem lokalizovat a minimalizovat možné zdroje nejistot měření pro obě metody a dosažené výsledky vzájemně porovnat. U kalibrace skokovou funkcí byl

sledován vliv průměru kapiláry, vliv rychlosti nárůstu síly potřebné pro lom kapiláry a vliv vzájemné polohy a orientace snímače a místa zdroje. U reciproční kalibrace byl sledován vliv typu a množství vazebního média, vliv doby potřebné k „usazení“ snímače, vzájemné vzdálenosti snímačů a přítlačné síly. Vzhledem k množství prováděných experimentů se ukázalo jako nezbytné nahradit spektrální analyzátor Agilent podstatně výkonnějším digitizérem National Instruments PXI 5122. Tím se nejen výrazně zkrátila potřebná doba měření, ale současně se i významně vylepšili metrologické vlastnosti celého řetězce. Rozhodující vliv na celkovou nejistotu měření má totiž kromě vazebního média také vlastní šum měřících přístrojů. Šum měřicího kanálu je kritický zejména na vyšších kmitočtech, kde dosahuje užitečný signál pouze desítek mikrovoltů. Závěry z provedených měření a experimentů byly uvedeny na Defektoskopii 2007 [4] a zejména na konferenci EWGAE 2008 v Krakově [5].

2. Hlavní problémy spojené s kalibrací snímačů

V souvislosti s kalibrací snímačů a otázkou dosažitelné přesnosti a věrohodnosti je nutné si uvědomit několik zásadních problémů a omezení [6]:

1. Okamžitá výchylka bodu na povrchu testovaného bloku je třírozměrný vektor, ale výstup ze snímače je skalární povahy. Můžeme měřit pouze hodnotu elektrického napětí nebo náboje. Často se proto předpokládá, že výstupní napětí je úměrné pouze normálové složce výchylky povrchu, to ale v některých případech nemusí být pravda.
2. Snímač zatěžuje povrch zkušebního tělesa a svojí mechanickou impedancí ovlivňuje výsledek měření. Interakce mezi impedancí bloku a snímače určuje výchylku měřicí plochy snímače. Obě tyto impedance jsou komplexní funkce závislé na frekvenci a neexistuje jednoduchá metoda, jak je změřit. Proto se při kalibraci předpokládá, že vstupem do snímače je výchylka nezátíženého povrchu bloku a interakce snímače a bloku se zanedbává. To je ovšem hrubě zkresení reálné situace - snímač umístěný na bloky vyrobené z různých materiálů s různou akustickou impedancí bude mít různé kalibrační křivky. Proto v kalibračním protokolu musí být vždy uvedeno, na jakém materiálu byla kalibrace provedena. Na druhou stranu, tvar frekvenční charakteristiky snímače svůj charakter příliš nemění, hlavní vliv má rozdílná impedance snímače a měřeného povrchu na celkovou citlivost snímače. Snižování akustické impedance měřeného povrchu vede ke snížení výstupního signálu ze snímače.
3. Výstupní signál ze senzoru je funkcí výchylky měřeného povrchu, který je v kontaktu se snímačem. Tato funkce není závislá pouze na čase, ale i na velikosti, tvaru a poloze měřicí plochy snímače. Tato skutečnost ovlivňuje výrazným způsobem charakteristiku snímače při průchozí kalibraci. Podrobněji je tento problém popsán v následující kapitole.

3. Aperturní efekt

Aperturní efekt způsobený konečnou velikostí styčné plochy snímače bývá často ignorován. To je ovšem možné pouze za předpokladu, že průměr snímací plošky je zanedbatelný v porovnání s měřenými vlnovými délkami, nebo je pohyb všech bodů snímací plošky ve fázi s povrchem snímače. První předpoklad je splněn jen pro velmi malé průměry aktivní plochy snímače (max. 2-3 mm). Druhý předpoklad je splněn pouze v případech, že na snímač přichází rovinná vlna v ose kolmé na povrch.

Obecně však výstup snímače odpovídá váženému průměru výchylky povrchu pod snímací ploškou. Praktickým důsledkem je, že kalibrace snímače se liší při různém druhu příchozí vlny (průchozí a povrchová kalibrace) a také s různými rychlostmi šíření těchto vln uvnitř testovacího bloku.

Výstupní napětí ze snímače lze vypočítat z následujícího vztahu [6]:

$$U(t) = \frac{1}{A} \iint_S u(x, y, t) r(x, y) dy dx$$

kde:

S – oblast povrchu o ploše A, kterou pokrývá čelo snímače,

$u(x, y, t)$ – výchylka povrchu,

$r(x, y)$ – lokální citlivost snímače.

Pro snímač s kruhovou snímací plochou a konstantní citlivostí v celé plošce aperturní efekt předpovídá pro procházející přímou vlnu nulovou citlivost v kořenech Besselovy funkce [7]:

$$J_0(ka) = 0$$

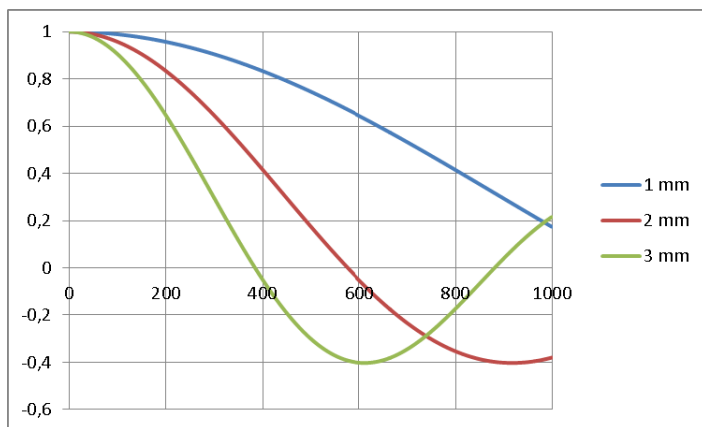
kde: $k = 2\pi f / c$ [m^{-1}],

f – frekvence [Hz],

c – je Rayleighova rychlost v testovacím bloku [$m \cdot s^{-1}$],

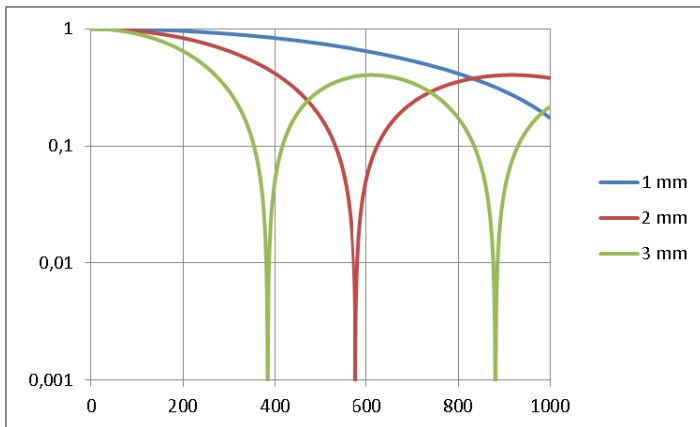
a – je poloměr snímací plošky snímače [m].

Na následujících grafech je znázorněna vypočítaná závislost citlivosti snímače na kmitočtu procházející přímé vlny pro různé průměry čelní plošky snímače a frekvenční charakteristika ideálního snímače zesílená aperturním efektem. Na vodorovné ose je vynášena frekvence procházející přímé vlny v kHz, Rayleighova rychlost byla pro výpočet zvolena $c = 3000$ m/s.



Obr. 1. Vliv aperturního efektu na citlivost ideálního snímače

Fig. 1. Influence of the aperture effect on the sensitivity of an ideal sensor



Obr.2 Vliv aperturního efektu na frekvenční charakteristiku ideálního snímače
 Fig.2 The influence of the aperture effect on the ideal sensor frequency response

4. Konstrukce širokopásmových snímačů AE

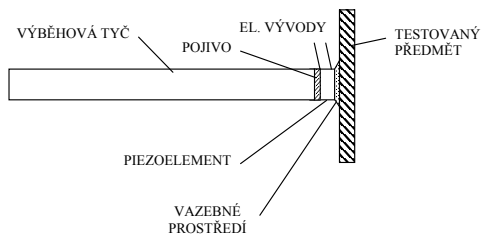
K největším problémům při povrchové kalibraci tak dnes patří nedostatečná citlivost snímačů pro kmitočty nad 500 kHz, kde se u běžných snímačů již výrazně projevuje aperturní jev. To vede na nutnost používat širokopásmové snímače s velmi malou dotykovou ploškou. V praxi se používá několik variant provedení piezoelektrických snímačů. Nejznámější jsou:

Pinducer (Obr.3) – komerční širokopásmový snímač s deskovým krystalem o průměru 2 mm s navazujícím tlumičem o délce 50 mm. Snímač má vyrovnanou frekvenční charakteristiku v pásmu 0,1 až 2 MHz [8]

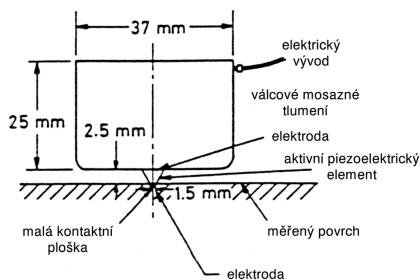
NIST laboratorní snímač (Obr.4) – s kuželovitým aktivním prvkem tvaru komolého kužele z piezokeramiky PZT-5A polarizovaný ve směru podélné osy. Tlumení je zajištěno masivním válcovým blokem o průměru asi 40 mm a výšce 25 mm. Snímač je citlivý pouze na normálovou výchylku testovaného povrchu a je širokopásmový bez výrazných rezonancí. Přenos snímače je dobře teoreticky popsán a vypočítán. Více informací v literatuře [9], [10], [11].

AERE Harwell [12] (Obr.5) – odolnější verze NIST snímače, dovolující měření i mimo laboratoř. Kapkovitý mosazný blok zajišťuje útlum vln z aktivního prvku. Snímač obsahuje pružinu, která vytváří stálý tlak mezi aktivním prvkem a povrchem testovaného tělesa. Frekvenční charakteristika je rovná do cca 2 MHz.

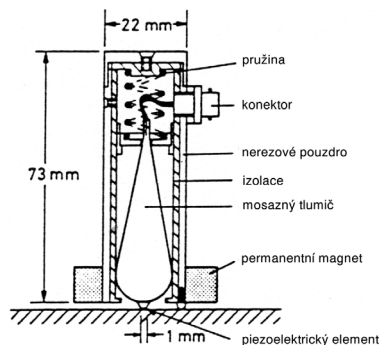
Variety širokopásmových snímačů vycházejících z kuželového aktivního prvku publikovali dále např. Koberna [13], Glaser [14], Theobald [15], Lee [16], Sebastian [17] a mnozí další. Rozdíly jsou především ve způsobu ochrany aktivního prvku před vlivy okolí, způsobu řešení tlumícího prvku, případně doplnění snímače i o možnost buzení.



Obr. 3. Širokopásmový piezoelektrický snímač, typ Pinducer [8]
Fig. 3 Broadband AE sensor type Pinducer [8]



Obr.4. Snímač NIST
Fig.4. Sensor NIST



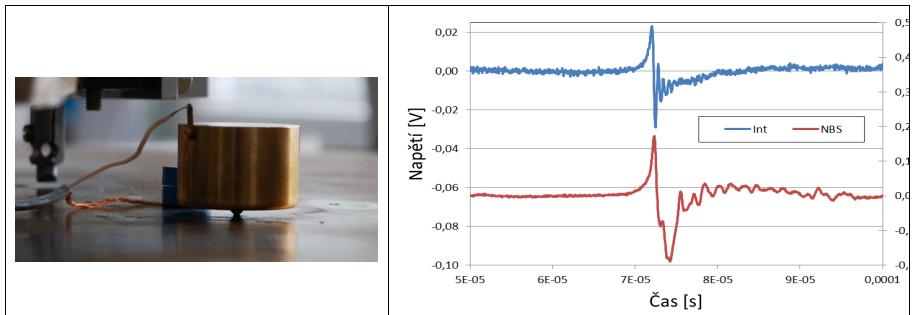
Obr.5 snímač AERE Harwell [12]
Fig.5 Sensor AERE Harwell [12]

5. Praktická realizace širokopásmového snímače

Pro praktickou realizaci širokopásmového snímače byla zvolena nejjednodušší varianta – snímač NIST. Kuželový prvek z piezoelektrického materiálu 432, niklovými elektrodami s průměrem základny 1,5 mm a 4 mm a s výškou 2,5 mm byl nalepen vodivým lepidlem Loctite 3880 na mosazný tlumič v rozměrech dle NIST.

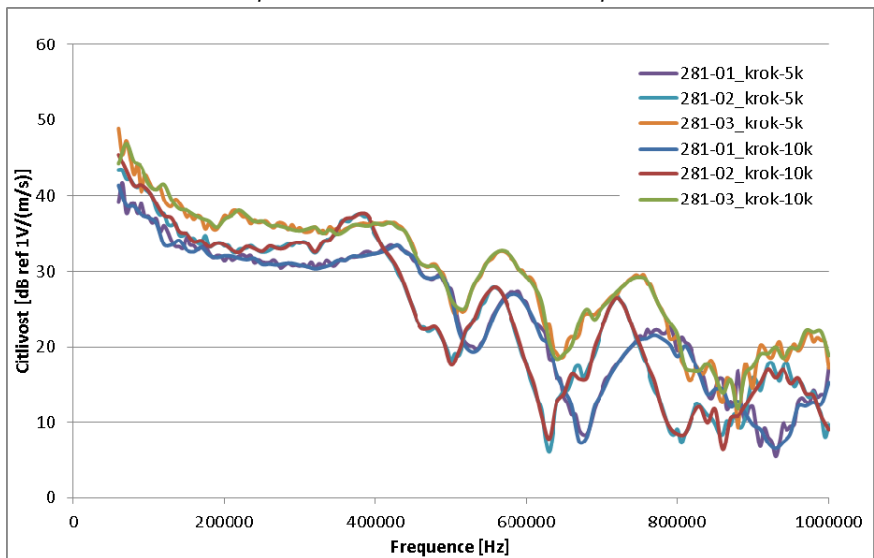
Na obr. 6 je provedení snímače a záznam průběhu výstupního napětí ze snímače ve srovnání s průběhem výchylky povrchu zaznamenané laserovým interferometrem, shoda je velmi dobrá. Nicméně pro praktické využití se ukázalo, že snímač ani v laboratorních podmínkách není možné dlouhodobě používat, měřené charakteristiky se měnily v závislosti na čase a opakovatelnost byla rovněž špatná. Důvodem je velmi pravděpodobně neurčitě definovaný mechanický a především elektrický kontakt spodní elektrody s povrchem zkušebního tělesa. Z těchto důvodů byla výroba odolnější verze referenčního snímače domluvena s Ing. Veselským z firmy Dakel. V realizované verzi je piezoelektrický kuželík krytý tenkou membránou, která současně představuje i elektrický kontakt pro spodní elektrodu

Frekvenční charakteristiky tří kusů dodaných referenčních snímačů DAKEL 281 jsou na obr.7. Do kmitočtu cca 400 kHz je frekvenční charakteristika vyrovnaná, pak se již začíná projevovat aperturní jev a zřejmě i vliv konkrétního tvaru ochranné membrány snímače. Opakovatelnost je velmi dobrá.



Obr.6. Snímač NIST (NBS) vlastní výroby a odezva na lom kapiláry ve srovnání s laserovým interferometrem

Fig.6 Self production sensor NIST (NBS) and time response on capillary break compare with laser interferometer response



Obr.7 Frekvenční charakteristiky referenčních snímačů DAKEL 281 s kuželovým aktivním prvkem

Fig. 7 Frequency response of reference sensor DAKEL 281 with conical active element

6. Závěr

Pracoviště pro kalibraci snímačů akustické emise je v rutinním provozu, povrchová kalibrace reciproční metodou i skokovou funkcí je plně implementována. Do budoucna plánujeme doplnit i měření průchozí kalibrací dle metodiky NPL prezentované na letošním EWGAE ve Vídni. Pracoviště je postupně doplňováno o další komponenty, v současné době je hlavním úkolem zjednodušit a zpřehlednit kabeláž a snížit množství používaných komponent a samostatných přístrojů vytvořením kompaktní jednotky, která bude obsahovat všechny potřebné napájecí

zdroje, oddělovací členy, filtry, zesilovače a přepínače. Stále nevyřešeným úkolem je náhrada se zdá být generátor využívající magnetostrikční měnič, který je schopen generovat velmi krátké impulzy s vynikající opakovatelností a je tak možná ještě vhodnější, než pro podobné účely používaný laserový impuls.

7. Literatura

- [1] BENEŠ, P., CHMELAR, P. Metody kalibrace snímačů AE. In *Defektoskopie 2001*. Praha, ČNDT. 2001. p. 37 - 80. ISBN 80-214-2002-2.
- [2] KEPRT, J., BENEŠ, P. Kalibrace snímačů AE. In *Defektoskopie 2006 - Sborník příspěvků*. Tábor: VUT Brno. 2006, p. 101 – 108, ISBN 80-216-3290-X.
- [3] KEPRT, J. Primární kalibrace snímačů akustické emise. *Dizertační práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 171 s.
- [4] KEPRT, J., BENEŠ, P. Stanovení nejistot primární kalibrace snímačů akustické emise. In *Defektoskopie 2007 - Sborník příspěvků*. Praha: Česká společnost pro nedestruktivní testování. 2007, p. 105 – 426, ISBN 978-80-214-3504-9.
- [5] KEPRT, J., BENEŠ, P. A Comparison of AE Sensor Calibration Methods. In 28th-European Conf. *AE Testing Proceedings*. Krakow, Polsko: EWGAE. 2008, p. 19 - 24.
- [6] MILLER, R. K., HILL, E. K. Acoustic emission testing. 3rd ed., Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005. *Nondestructive Testing Handbook*, vol.6, 446 pages. ISBN 1-57117-106-1.
- [7] ASTM Standard E1106-86. *Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors*. ASTM, Philadelphia, 1986.
- [8] SCOTT, I.G. *Basic acoustic emission*. 1st ed. Montreux (Switzerland): Gordon and Breach Science Publishers, 1991, Nondestructive Testing Monographs and Tracts, vol.6., 245 pages. ISBN 2-88124-352-5.
- [9] HORA, P. *Kalibrace snímačů akustické emise impulsní metodou*. Kandidátská disertační práce. Praha: FEL ČVUT – katedra radioelektroniky, srpen 1990
- [10] HORA, P. Calibration of Transducers for Acoustic Emission. *Acta technica ČSAV*. 1991, no. 2, p. 190 - 220.
- [11] PROCTOR T. M., Jn. An improved piezoelectric acoustic emission transducer. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982, vol. 71, no. 5, p. 1163 – 1168.
- [12] SCRUBY, C. B., WADLEY, H. N. G. A Calibrated Capacitance Transducer for the Detection of Acoustic Emission. *Journal Physics D*. 1978, p. 1487.
- [13] KOBERNA, M. Broadband Acoustic Emission Sensor with a Conical Active Element in Practice. *Journal of Acoustic Emission*, 1993, vol. 11, no. 2, p. 61 – 63.
- [14] WEISS, G., GLASER, S., D. Design And Absolute Calibration of An Embedded, Wideband Velocity Sensor. *Transport. Res. Record* 1614. 1998
- [15] YAN, T., THEOBALD, P., JONES, B. E. A self-calibrating piezoelectric transducer with integral sensor for in situ energy calibration of acoustic emission. *NDT&E International*. Elsevier, 2002, vol. 35, p. 459 – 464.
- [16] Lee, Y.-C., Lin, Z., Miniature piezoelectric conical transducer: Fabrication, evaluation and application, *Ultrasonics* 44 (2006) e693–e697.
- [17] Sebastian J., Monitoring of refractory wall recession using high-temperature impact–echo instrumentation, UDRI University of Dayton, Dayton, 2004.



DEVELOPMENT OF MAGNETIC MEMORY METHODS IN RUSSIA, POLAND, THE CZECH REPUBLIC AND OTHER COUNTRIES

ИТОГИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА В РОССИИ, ПОЛЬШЕ, ЧЕХИИ И ДРУГИХ СТРАНАХ

A.A.Dubov

ООО Energodiagnostika, Moskva, Rusko

ABSTRACT:

One of the effective method to investigate stress concentration zones in structure specially in pipes is Magnetic Memory Method (MMM). From the physical point of view stress concentration areas are predominantly sources of damage of component – where defect like cracks can propagate. This Non-Destructive Testing method is very sensitive on damage which is caused by corrosion and fatigue and also structural changes. It is very useful to investigate local places of plastic deformation initial points where fatigue cracks are created. From the practical application MMM method represent so-called express method, because results of inspection can be immediately seen on screen of equipment and inspection can be verified. One of the advantage is that inspected surface of structure does not need special surface treatment (point removal tec.)

Известно, что основными источниками развития повреждений трубопроводов, оборудования и конструкций являются зоны концентрации напряжений (ЗКН) от рабочих нагрузок. Отсюда следует, что критерием надежности оборудования в эксплуатации является его фактическое напряженно-деформированное состояние. Для своевременного выявления узлов оборудования, предрасположенных к повреждениям, необходимы методы технической диагностики, имеющие корреляцию с механическими напряжениями.

Эффективным методом при оценке напряженно-деформированного состояния оборудования, который в настоящее время получает все большее распространение на практике, является метод магнитной памяти металла (МПМ).

Процессами, предшествующими эксплуатационному повреждению, являются изменения свойств металла (коррозия, усталость) в ЗКН и деформаций. Соответственно, происходит изменение намагниченности металла, отражающей фактическое состояние трубопроводов и оборудования.

Метод магнитной памяти, основанный на измерении собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности контролируемого оборудования, позволяет производить оценку его напряженно-деформированного состояния с учетом структурных изменений. При контроле используется эффект магнитной памяти металла к зонам действия максимальных рабочих нагрузок.

Метод магнитной памяти металла лишен недостатков, присущим другим методам контроля напряжений и позволяет (имеются критерии) отличать область упругой деформации от пластической, позволяет определять площадки скольжения слоев металла и зоны зарождения усталостных трещин. Если трещина уже образовалась, метод проявляет «ветвление» (направление развития) трещины в структуре металла и позволяет ответить на вопрос - развивается трещина или нет?

Проблема внезапных усталостных разрушений оборудования с использованием традиционных методов неразрушающего контроля не может быть решена, так как они направлены на поиск уже развитых дефектов. МПМ-контроль, осуществляя раннюю диагностику оборудования, позволяет решить эту задачу.

Основные преимущества нового метода неразрушающего контроля по сравнению с известными методами следующие:

- не требует применения специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания труб и других узлов оборудования в процессе их работы;
- места концентрации напряжений заранее не известны и определяются в процессе контроля;
- не требует зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности;
- для выполнения контроля по предлагаемому методу используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства.

В отдельных случаях можно выполнять контроль оборудования без снятия изоляции.

По трудоемкости контроля он относится к экспресс-методам. Специализированные малогабаритные приборы с экраном и регистрирующим устройством позволяют выполнять контроль со скоростью 100 м/ч и более.

Основная задача МПМ-контроля – определение на объекте контроля наиболее опасных участков и узлов, имеющих ЗКН. Затем с использованием, например, УЗД в ЗКН определяется наличие конкретного дефекта.

Наиболее эффективно использование МПМ-контроля для оценки ресурса оборудования. На основе оценки фактического напряженно-деформированного состояния конструкции предоставляется возможность своевременно ее упрочнить, удалить поврежденный слой металла или заменить в ней изношенный узел.

В настоящее время в энергетике, нефтяной, газовой, химической и других отраслях промышленности России на основе метода магнитной памяти металла разработано и применяются на практике более 40 руководящих документов, согласованных с техническим надзором.

В 2009 году в России Ростехрегулированием утвержден ГОСТ Р ИСО 9712 «Контроль неразрушающий. Аттестация и сертификация персонала».

Данным стандартом вводится в практику новый вид контроля «контроль напряжений». В соответствии с этим стандартом в сентябре 2010 года в Ростехнадзоре утверждено «Положение об аттестации персонала в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НК НДС)».

Метод магнитной памяти металла в указанном «Положении» представлен как один из эффективных методов, рекомендуемый для применения на практике и, соответственно, для аттестации и сертификации персонала в области НК НДС.

Метод магнитной памяти металла, представляющий принципиально новое направление в технической диагностике прошел широкую промышленную проверку (более 20 лет) в России, Польше, Украине, Китае, Индии, США, Германии (более 30 стран мира) и в ноябре 2007 года по методу принят международный стандарт ISO 24497: часть 1 – терминология; часть 2 – общие требования и часть 3 – контроль сварных соединений.

За период времени с 1994 года по 2009 год выпущено 45 документов МИСа с положительными резолюциями по методу магнитной памяти металла.

Предприятием «Энергодиагностика» разработаны и серийно изготавливаются специализированные приборы контроля и программное обеспечение к ним:

- измеритель концентрации напряжений магнитометрический ИКНМ-2ФП;
- электромагнитный индикатор трещин ЭМИТ-1М, ЭМИТ-2М;
- измерители концентрации напряжений ИКН-1М-4, ИКН-2М-8, ИКН-3М-12, ИКН-4М-16, ИКН-5М-32, ИКН-6М-8;
- программное обеспечение «ММП-Система» для обработки результатов контроля по методу МПМ на компьютере для работы в Windows 95-2000/XP/Vista;
- программный продукт «МПМ-Ресурс».

Приборы сертифицированы в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии. Сертификаты: RU.C.34.003.A №22257, RU.C.34.003.A №22258, RU.C.27.002.A №35003.

Метод магнитной памяти и соответствующие приборы контроля используются более чем на 1000 предприятиях России. Кроме России метод опробован и внедрен на отдельных предприятиях в 29 странах мира: Австралия, Ангола, Аргентина, Беларусь, Болгария, Венгрия, Германия, Израиль, Индия, Ирак, Иран, Канада, Казахстан, Китай, Колумбия, Латвия, Литва, Македония, Молдова, Монголия, Польша, Сербия, США, Украина, Финляндия, Черногория, Чехия, ЮАР, Южная Корея.

В Москве, начиная с 1996 года, действует российский и международный центр подготовки специалистов по методу магнитной памяти металла с выдачей удостоверений на I, II и III уровень – независимый орган по аттестации персонала (НОАП) ООО «Энергодиагностика». В Варшаве и Пекине работают филиалы этого центра. По состоянию на 2010 год подготовлено более 1600 специалистов в России, более 350 специалистов в Китае, 70 специалистов в Польше и более 60 специалистов в других странах.

В 1999, 2001, 2003, 2007 и 2009 годах в Москве состоялись, соответственно, первая, вторая, третья, четвертая и пятая международные конференции «Диагностика оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла». Материалы конференций рассмотрены на специальных заседаниях международного института сварки (МИС) (Лиссабон, 22 июля 1999, Люблина, 11 июля 2001, Осака, 11 июля 2004), и итоги

конференций зафиксированы в документах МИСа № XI-714/99, № V-1196-01, № V-1252-03. В феврале 2011 года в Москве состоится шестая международная конференция по методу МПМ. На конференции будут представлены доклады по следующим темам:

- итоги развития метода магнитной памяти металла (МПМ) в России и других странах;
- опыт использования метода магнитной памяти металла при контроле и оценке ресурса газонефтепроводов, оборудования энергетики, нефтехимии, железнодорожного транспорта и других отраслей промышленности;
- критерии предельного состояния металла при оценке остаточного ресурса; контроль напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций;
- контроль качества изделий машиностроения по структурной неоднородности и остаточным напряжениям;
- новые стандарты России и международные стандарты в области технической диагностики; опыт РНТСО в области стандартизации через международный институт сварки;
- подготовка специалистов по методу МПМ и в области контроля напряженно-деформированного состояния и технической диагностики в НОАП НК ООО «Энергодиагностика»;
- опыт и перспективы развития бесконтактного магнитометрического контроля газонефтепроводов и трубопроводов теплосети, расположенных под слоем грунта и в труднодоступных каналах;
- опыт НПС «РИСКОМ» в разработке нормативной документации в области промышленной безопасности управления рисками и мониторинга оборудования;
- опыт работы научно-технического совета СРО НП «Межрегион ПБ».



ACOUSTIC EMISSION OF MAGNETIC IMPULSE OF MAGNETIC SPOT METHOD

AKUSTICKÁ EMISE MAGNETICKÝCH IMPULSŮ METODY MAGNETICKÉ SKVRNY

Jiří Dvořák, Břetislav Skrbek,

TU v Liberci, bretislav.skrbek@tul.cz

Abstract

Principles of contactless ultrasound EMAT, acoustic emission and magnetic point pole method.

Theory of mechanical waves induced by magnetic field in ferromagnetics by magnetization impulses of DOMENA B3 apparatus.

Experimental pick-up and evaluation of mechanical waves. Direction of further research for exploitation of effect in non-destructive structuroscopy of ferromagnetics.

Key words: *magnetic impulse, Acoustic emission, non-destructive structuroscopy*

Abstrakt:

Principy bezkontaktního ultrazvuku EMAT, akustické emise a metody magnetického bodového pólu. Teorie mechanických vln vyvolané magnetickým polem ve feromagnetiku vyvolané magnetizačními impulsy přístroje DOMÉNA B3.

Experimentální snímání a vyhodnocení mechanických vln. Směr dalšího výzkumu k využití jevu v nedestruktivní strukturokopii feromagnetik.

Klíčová slova: *magnetický impuls, akustická emise, nedestruktivní strukturokopie*

1. Úvod

Zatímco klasická defektoskopie je v dnešní době již dostatečně prozkoumána a její metody náležitě popsány, oblast nedestruktivní materiálové diagnostiky se neustále vyvíjí [1].

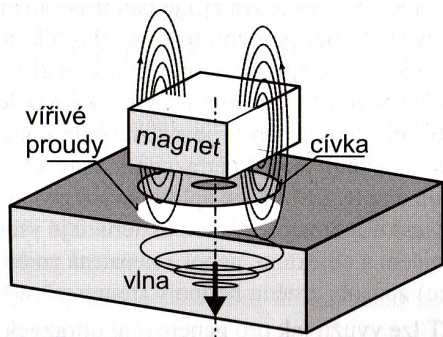
Právě do oblasti strukturokopie patří i metoda magnetického bodového pólu (magnetické skvrny), která pracuje na základě souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně-mechanického stavu materiálu. Nevýhodou je omezení aplikace pouze na feromagnetické materiály. Tato metoda se již v mnoha slévárnách v ČR používá, a to zejména k měření tvrdosti odlitků. Nebylo však ještě zkoumáno použití této metody jako zdroje akustické emise, zda mechanické vlny vznikající magnetickými impulsy mohou dosahovat ultrazvukových frekvencí. Rovněž tak otázka, zda tato metoda může být uplatněna v ultrazvukové defektoskopii, není dosud zodpovězena.

2. EMAT – Elektromagnetický akustický měnič

Jedná se o progresivní metodu bezkontaktního zkoušení ultrazvukem bez akustické vazby s použitím sond EMAT.

Tato metoda pracuje jen ve vodivých a feromagnetických materiálech a oproti klasickým piezoelektrickým sondám umožňuje řadu aplikací, které jsou u klasických ultrazvukových metod a metody magnetického bodového pólu problematické či velmi obtížně realizovatelné. Jde však o aplikace speciálního charakteru, metoda obecně nenahrazuje klasické ultrazvukové zkoušení.

Princip měniče EMAT



Sonda je opatřena magnetovací cívkou, orientovanou rovnoběžně s povrchem vodivého vzorku, který je měřen. Čelo sondy se přiblíží k povrchu vzorku na vzdálenost několik desetin mm až 2 mm, přičemž tato vzdálenost musí být přesně zachována (obvykle pomocí mechanického přípravku s vodicími kolečky). Cívka elektromagnetu je napájena proudovými

Obr. 1-Princip měniče EMAT.

impulsy, jež v materiálu vzorku vyvolají magnetické pole o indukci B . Časově

proměnné magnetické pole indukuje v povrchu vzorku vířivé proudy, které vybudí časově proměnný magnetický tok, jenž působí proti proudu tekoucímu cívkou. Magnetické pole působí na sondu Lorentzovou silou, která ji přitahuje k povrchu materiálu. Časově proměnná Lorentzova síla způsobí rozkmitání atomů krystalové mřížky zkoušeného materiálu a tím se vzbudí ultrazvuková vlna, která se posléze šíří materiálem. Typ vyzbuzené ultrazvukové vlny závisí především na orientaci magnetického pole vzhledem k povrchu vzorku a na konstrukčním provedení elektromagnetu sondy EMAT.

Za předpokladu nulového vektoru intenzity elektrického pole je vektor Lorentzovy síly dán vztahem:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Na základě hustoty vířivých proudů indukovaných magnetickým polem je lepší uvažovat vektor Lorentzovy síly ze vztahu

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}. \quad (2)$$

Odezva ultrazvukové vlny se registruje na základě napětí indukovaného na snímací části magnetovací cívkou, případně na samostatné snímací cívkě (pokud je sonda provedena jako dvouměničová). Velikost napětí pak odpovídá intenzitě budícího magnetického pole.

Generátory EMAT

Vzhledem k existenci konstantní mezery mezi čelem sondy a povrchem materiálu dochází ve vzduchu k velmi výrazným rozptylům magnetického toku, což významně snižuje účinnost zařízení a omezuje hloubku vniku vířivých proudů do materiálu. Vířivé proudy se indukují prakticky jen v podpovrchové vrstvě, zasahují do hloubky

kolem 60 μm (v závislosti na velikosti magnetovacího proudu). Potřebné parametry jsou následující:

- napětí 900 V,
- doba náběžné hrany 6 ns,
- proud 30 A – 160 A,
- výstupní pulsní výkon 27 kW až 150 kW,
- počet výstupních pulsů 1 až 20.

3. Akustická emise

Fyzikální podstata a charakteristika akustické emise:

Akustická emise je fyzikální jev, při němž vznikají v pevných látkách při jejich namáhání vnitřní pružné napěťové vlny, uvolněné dynamickou změnou struktury.

K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie působením stimulace vnitřními nebo vnějšími silami. Zdroje akustické emise v molekulárním měřítku jsou procesy při vzniku a zániku šíření poruch, dále dislokace, fázové transformace, vnitřní tření, tvorba a šíření trhlin, apod. Zdroji v makromolekulárním měřítku jsou zejména kavitační procesy v hydrodynamických systémech, turbulence při úniku kapaliny z potrubí.

Energie uvolněná těmito procesy se transformuje na mechanický napěťový impuls, jenž se šíří materiálem jako elastická napěťová podélná či příčná vlna.

Jakmile vlna dorazí na povrch materiálu (tedy na rozhraní materiálu se vzduchem), dochází částečně k jejímu odrazu a částečně k její transformaci na jeden či více módů. Vlna se pak dále šíří převážně Rayleighovou, tedy povrchovou vlnou. Kromě této vlny dochází také k transformaci např. na Lambovy, tedy deskové vlny. Jednotlivé typy vln se šíří materiálem různou fázovou rychlostí.

4. Strukturoskopie

Strukturoskopie se zabývá zkoumáním struktury z hlediska fázové analýzy a krystalické stavby kovů a jejich slitin. Zahnuje také strukturometrii, která slouží ke zjišťování chemického složení materiálu.

Lze ji rozčlenit na následující metody:

- akustické metody zkoušení
- metody vířivých proudů
- magnetické metody.

4.1 Akustické metody zkoušení

Poněvadž struktura a chemické složení materiálu má značný vliv na některé vlastnosti ultrazvuku při jeho průchodu danou látkou, využívá se změn těchto vlastností k posuzování stavu struktury, popř. chemického složení.

Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti materiálu jsou popsány rychlostí šíření pružného příčného či podélného kmitání atomů kolem jejich rovnovážných poloh a dále jejich útlum.

Pro rychlost podélného šíření zvuku platí vztah:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu')}{\rho(1+\mu')(1-2\mu')}} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

kde: E...je Youngův modul pružnosti
 ρ... měrná hmotnost
 μ'...Poissonova konstanta
 (součinitel příčné kontrakce)

Prostupnost akustických vln procházejících materiálem klesá s rostoucím útlumem a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí, čehož se využívá při hodnocení struktury litin.

U grafických litin představuje grafit ve struktuře významnou vnitřní nespojitost se značně odlišným vlnovým odporem Z_g vůči ocelové matici Z_m . Vlnový odpor Z lze obecně vyjádřit jako součin fázové rychlosti šíření a hustoty, tedy:

$$Z = c \cdot \rho \quad [\text{MPa}\cdot\text{s}] \quad (4)$$

4.2. Metoda magnetické skvrny

Patří mezi magnetické strukturoskopické metody, založené na využití souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Existuje několik způsobů, jak tyto magnetické vlastnosti, dané některou z charakteristických veličin, měřit. Jedním z těchto principů kontroly výrobků je metoda „bodového pólu“. Jde o metodu rychlou, splňující požadavky současného výrobního provozu. V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMÉNA, které navazují na předchozí sérii přístrojů REMAG.

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

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

4.2.1. Princip měření metodou

U zkoušeného objektu (např. odlitku) se pomocí magnetovací cívky sondy vytvoří na povrchu objektu magnetická skvrna – tzv. „bodový pól“. Po zániku proudového pulsu v magnetovací cívice se citlivými snímači měří remanentní intenzita magnetického pole v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu vzorku.

Snímače, nejčastěji Hallovy, jsou diferenciálně zapojeny a měří gradient normálové složky remanentní intenzity. Metoda využívá přímé souvislosti mezi remanentní intenzitou a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Se strukturně-mechanickým stavem materiálu lépe koresponduje koercitivní intenzita, ale její hodnoty jsou velmi nízké, proto se přednostně vyhodnocuje remanentní intenzita magnetického pole.

Feromagnetické látky magneticky tvrdé si po vyjmutí z vnějšího magnetického pole uchovávají své magnetické vlastnosti (v materiálu přetrvává remanentní indukce). Přispívá k tomu též existence poruch krystalové mřížky (dislokací) a jiných překážek, např. atomy uhlíku, částice cementitu, které brání návratu domén do jejich původní orientace a do celkově magneticky neutrálního stavu. Souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých strukturních složek (lamely perlitického cementitu, martenzit), které jsou zároveň i mechanicky tvrdé.

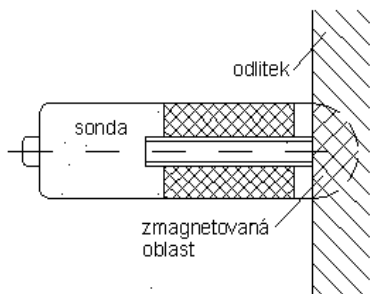
Princip této metody spočívá v měření intenzity zbytkového magnetického pole kontrolovaného materiálu pod čelem sondy, jejíž hodnota přímo závisí na množství a disperzi perlitu či martenzitu ve struktuře.

V polovodiči o tloušťce d . Pro Hallovo napětí U_H na elektrodách platí vztah:

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad [V] \quad (5)$$

Hodnota H_r se posléze zobrazí na displeji přístroje. Hallův snímač registrující remanentní intenzitu je polovodičový prvek, jenž využívá vlivu magnetické indukce na vychylování nosičů nábojů el. Proudů.

4.2.2. Charakteristika a popis přístroje DOMÉNA B3.b



Přístroj DOMÉNA B3.b je přenosný, v tomto provedení nezávislý na vnějším napájení. V běžném režimu je schopen na jedno nabití akumulátorů provést měření minimálně 600krát. DOMÉNA B3.b je tvořena vlastním přístrojem se zdrojem magnetických impulsů a příložnou sondou. Na čelním panelu přístroje zobrazuje digitální údaj naměřené hodnoty, přepínač funkcí a indikátor stavu, což umožňuje takové nastavení, aby digitální údaj ukazoval měřenou hodnotu přímo v jednotkách, na které je přístroj kalibrován.

Obr.2- Schema příložné sondy.

Mimoto je možná kalibrace DOMÉNY podle etalonů uživatele, dále výpočet statistických údajů ze zapamatovaných hodnot, kterých může být v paměti až sto. Přístroj umožňuje i komunikaci s počítačem.

Kromě tvrdosti je možné přístrojem DOMÉNA B3.b měřit i pevnost a hloubku prokalení. Jedná se o vlastnosti, jež závisí na množství a rozložení magneticky tvrdých strukturních fází jako je perlit, cementit nebo martenzit.



Obr. 3 Ukázka měření tvrdosti strukturometrem DOMÉNA B3.

Kondenzátorový zdroj s jednoduchým vybíjením

U tohoto zdroje se kondenzátorová jednotka, sestavená z jednotlivých kondenzátorů, nejprve nabíjí ze síťového transformátoru s usměrňovačem na dané napětí. Po nabití kondenzátorové jednotky se pomocí spínacího tyristoru připojí magnetizační okruh, přes který se jednotka aťb vybije. Velikost a časový průběh vybíjení proudového impulsu závisí na parametrech celého magnetizačního okruhu, tedy na kapacitě kondenzátorů zdroje a indukčnosti a rezistanci magnetovací cívky [2].

Vybíjení proudu může probíhat dvěma způsoby, buď aperiodicky nebo periodicky. Vybíjení aperiodické nastává při podmínce

$$\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC} \quad (6),$$

pro něž platí časový průběh proudu vyjádřený vztahem:

$$i(t) = -C \cdot U_0 \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} [-e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t}], \quad (7)$$

$$\text{kde} \quad \alpha_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (9)$$

přičemž koeficienty α_1 a α_2 vyjadřují vzájemný vztah mezi elektrickými parametry magnetovacího obvodu, U_0 je nabíjecí napětí na kondenzátorech. Časový průběh určený rovnicí (20) dosahuje v určitém čase t_{\max} lokálního maxima, přičemž tento čas je směrodatný pro dosažení maximální magnetické indukce v materiálu. Lze matematicky odvodit, že:

$$t_{\max} = \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (10)$$

a následně maximální proudový impuls je dán rovnicí

$$I_{\max} = -C \cdot U_0 \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[-e^{\frac{\alpha_1 - \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2}} + e^{\frac{\alpha_2 - \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2}} \right] \quad (11)$$

Pro dosažení max. proudového impulsu je třeba, aby hodnoty U_0 a C byly co největší a rezistance R co nejmenší. Tento způsob vybíjení se uplatňuje u přístroje DOMÉNA B3.b.

V případě platnosti podmínky $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ by šlo o periodický proces vybíjení, čili proud při vybíjení přechází k nule tlumenými kmity. Časový průběh proudu je vyjádřen vztahem:

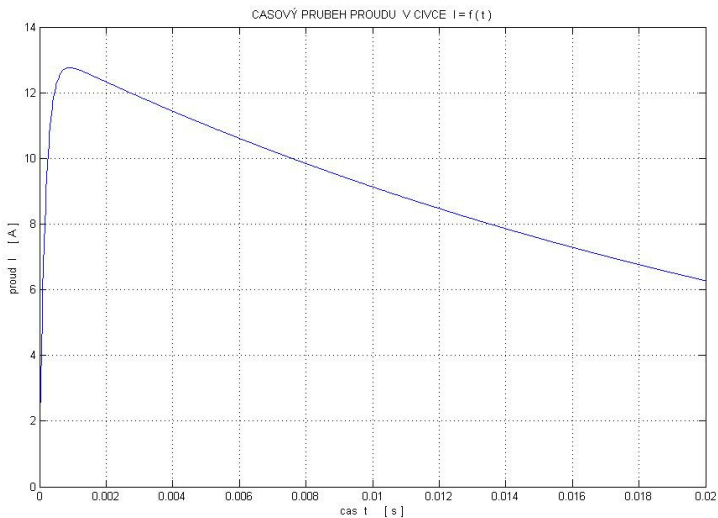
$$i(t) = U_0 \omega \cdot C \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \sin \omega t, \quad (12)$$

$$\text{kde} \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (13)$$

je úhlová frekvence tlumených kmitů

Periodickým způsobem vybíjení nelze namagnetování materiálu vlivem tlumených kmitů dosáhnout, je vhodný spíše pro odnamagnetování.

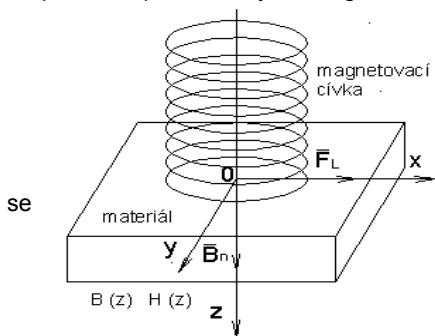
Na obrázku 4 níže je uveden časový průběh vybíjení proudového impulsu pro přístroj DOMÉNA B3.b, průběh platí pro parametry: rezistance $R = 1,22 \Omega$, celková kapacita kondenzátorů $C = 22 \text{ mF}$ a indukčnost cívky $L = 0,22 \text{ mH}$. Podle vztahu (23) vychází čas $t_{\max} = 0,95 \text{ ms}$, příslušná maximální hodnota proudu činí $I_{\max} = 12,75 \text{ A}$. Hodnota maximálního proudu byla zjištěna pro nejvyšší stupeň magnetizace.



Obr.4-Průběh proudu v cívce při aperiodickém vybíjení

4.3. Rozložení magnetického pole v materiálu u magnetické skvrny

Jak už bylo dříve zmíněno, příložná sonda metody magnetického bodového pólu pomocí magnetovací cívky zmagnetuje lokální oblast daného materiálu. Vzniklé magnetické pole je vzhledem k pulsnímu magnetování cívkou nestacionární. Exaktní výpočet rozložení magnetického pole ve zmagnetované oblasti je mimořádně složitá záležitost, především kvůli proměnné hodnotě poměrné permeability, demagnetizaci vlivem stínícího faktoru a vířivých proudů,



Obr. 5-Schema situace bodového pólu

vlivu anizotropie materiálu, rozptylu magn. toku na různých heterogenitách v materiálu a podobně. Poměrná permeabilita závisí na magnetizaci a její hodnotu nelze přesně určit, lze ji buď změřit nebo přibližně odhadnout.

Pro účely této práce postačí, bude-li uvažovat rozložení magnetické indukce a intenzity jako jednorozměrné, ve směru osy příložné sondy. Pro opravdu přesné rozložení magnetického pole a vířivých proudů je třeba simulace metodami konečných prvků, nejlépe v programu ANSYS. Situaci bodového pólu podle výše uvedeného vystihuje obrázek 5.

Ze zákona o lomu indukčních čar na rozhraní dvou prostředí o různých permeabilitách vyplývá, že se musí rovnat normálové a tangenciální složky intenzity, tedy:

$$H_{1n} = H_{2n} \quad , \quad H_{1t} = H_{2t}$$

5. Experiment

Cílem experimentu je pokusit se o snímání akustické emise magnetických impulsů metody magnetického bodového pólu pro přístroj typu DOMÉNA. V případě záznamu přítomnosti mechanických vln v materiálu pořídit akusticko-emisní spektrogram a nakonec zhodnotit možnosti aplikací a dalšího vývoje.

5.1 Vzorky materiálu

Pro potřebu snímání mechanických vln byly zajištěny vzorky materiálu v podobě plochých tenkých tyčí, přičemž dvě tyče byly litinové a jedna ocelová. Litinové tyče jsou vyrobeny ze šedé litiny tavby A s lupínkovým grafitem, ocelová tyč z oceli 12 050.1, normalizačně žíhané. Dále byla k dispozici sada litinových destiček taveb č. 1, 2, 3, 4, a 5 z litiny s kuličkovým grafitem. Destičky byly vyřezány z masivních bloků odlitých ve slévárně FOCAM Olomouc s r.o., chemické složení jednotlivých taveb těchto destiček bude uvedeno v tabulkách dále.

Rozměry vzorků jsou následující:

litinová tyč 160 x 43 x 3 mm

ocelová tyč 200 x 40 x 3 mm.

Sada destiček 40x40 mm o tloušťkách v rozmezí 4-12 mm

5.2 Měřicí přístroje a pomůcky

Měření bylo realizováno pomocí magnetického strukturuometru DOMÉNA B3.b, jenž sloužil jako zdroj magnetovacích impulsů a následně ke generování mechanických vln. Vlastní akustická emise byla snímána pomocí těchto zařízení:

Piezoelektrický snímač: miniaturní PZT (průměr 3 mm)

 citlivý na všechny typy vln

 frekvenční rozsah 30 kHz-1,2 MHz

Předzesilovač: frekvenční rozsah 0-2 MHz

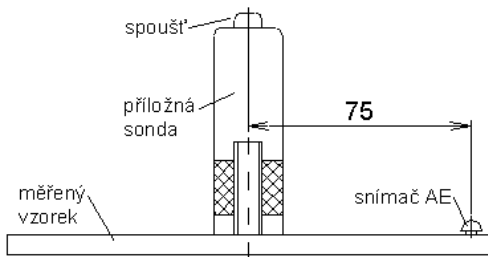
Zobrazovač: DSO LeCroy Waverunner 2350 MHz, 8 bits, 1 GS/s.

Použité zesílení při snímání akustické emise bylo v rozsahu 60 až 80 dB.

5.3 Postup měření

Po zapnutí magnetického strukturuometru Doména B3.b byla nastavena úroveň magnetizace na nejvyšší stupeň, tedy na M8. Následovalo nastavení režimu dlouhé magnetizace, při němž je do příslušného materiálu vysíláno pět po sobě jdoucích proudových impulsů. Jednotlivé impulsy jsou od sebe odděleny časovým intervalem přibližně jedna sekunda. Tímto byl přístroj připraven k magnetování.

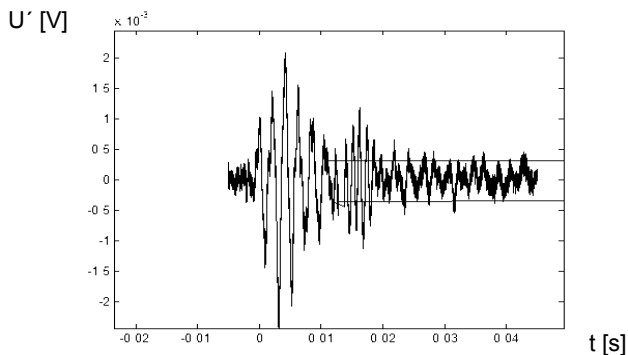
Poté byl k povrchu měřeného vzorku přilepen snímač akustické emise, přičemž akustická vazba mezi čelem snímače a povrchem materiálu byla zajištěna vazelínou. Vzájemné rozmístění příložené sondy strukturuometru a snímače AE při měření dlouhých tyčí ukazuje obr. 6. Nakonec bylo nutné vzájemně propojit snímač AE s předzesilovačem a zobrazovačem ve finální soustavu ke snímání akustické emise. Následně bylo provedeno snímání všech vzorků.



Obr. 6-Poloha příložné sondy a snímače AE

5.4 Akusticko-emisní spektrogramy

Ze souborů naměřených hodnot pořízených piezoelektrickým snímačem AE byly pomocí programu Matlab vyhotoveny akusticko-emisní spektrogramy, jež zachycují průběhy emisních událostí. – příklad na obr.7.



Obr. 7-Spektrogram dlouhé litinové tyče

6.0 Vyhodnocení a závěr.

Hodnocení parametrů naměřených emisních událostí. Celková doba trvání emisní události činí u všech měřených vzorků 20 ms, což přesně odpovídá periodě kondenzátorově vybíjeného proudového impulsu. Intenzitu emisních událostí je vhodné vyjadřovat formou elektrického napětí, poněvadž energie mechanických vln se v piezoelektrickém snímači AE transformuje na elektrické napětí. Maximální amplituda emisních událostí činí u všech vzorků 2 mV, přičemž amplituda okolního nízkofrekvenčního šumu se pohybuje kolem 0,3 mV. Maximální amplitudy by mělo být teoreticky dosaženo v době, kdy proud impulsu nabývá max. hodnoty, protože max. proud má směrodatný vliv na maximum Lorentzovy síly. Zajímavé je, že amplituda dosahuje maxima v čase podstatně delším. U litinové tyče je tato doba 7 ms, zatímco u ocelové tyče 5 ms. Tato skutečnost může souviset s možným rychlejším zmagnetováním oceli oproti litině v důsledku vyšší konduktivity, ovšem toto tvrzení není jisté. V případě destiček z tvárné litiny s feritickou maticí činí doba do dosažení max. amplitudy 5 ms, u litiny s perlitickou maticí 7 ms. Ferit je magneticky měkčí než perlit, může docházet k rychlejšímu zmagnetování.

Podle frekvenčního spektra přísluší proudovému impulsu rozsah frekvencí 0-2 450 Hz, přičemž převážně významný je do 550 Hz. Okolní nízkofrekvenční šum vykazuje frekvence kolem 100 Hz. Tomuto rozsahu pak odpovídá spektrum frekvencí emisních událostí. Jedná se tedy o emisi v pásmu slyšitelného zvuku. Jelikož emisní události nevykazují ultrazvukové frekvence, nesplňují proto kritérium standardní akustické emise. Z tohoto důvodu není možné oddělit emisní události od nepříznivých, rušivých jevů.

Vzhledem k rozsahu významných frekvencí emisních událostí se vlnové délky mechanických vln pohybují řádově v metrech, tudíž velmi vysoce přesahují velikost útvarů grafitu v litinových vzorcích. Z toho vyplývá, že útlum vln není významný. Útlum vln závisí krom frekvence na tvaru a rozložení grafitu v matrici, na obsahu nečistot, vměsků a celkově na heterogenitě litiny.

V průběhu snímání AE se ukázalo, že velmi nežádoucí vliv na průběh emisních spektrogramů mají vibrace způsobené stiskem tlačítka na sondě a ručním přidržováním sondy na povrchu materiálu. Tyto vibrace se projevovaly vnášením nežádoucích mechanických kmitů do emisních událostí. Podle obr. 36 a 37 odpovídá emisním událostem pátý až devátý výkmit zleva, ostatní výkmity jsou od vibrací. Amplitudy jsou mírně proměnné, což je opět způsobeno vnesenými vibracemi. Z tohoto důvodu není snímání příliš objektivní. Pro opravdu přesné snímání je třeba strukturometr vybavit dálkovým ovládním a polohu sondy na materiálu pevně zajistit mechanickým přípravkem. Měření též prokázalo, že magnetizace Domény B3.b je příliš slabá pro generování ultrazvuku. Bylo by třeba dosáhnout základní frekvence vln 80-100 kHz, čemuž odpovídají periody proudového impulsu 10 až 12,5 μ s. Horní hranici frekvencí je vhodné omezit na 2 MHz, aby nedocházelo k příliš velkému útlumu vln. Pro buzení ultrazvuku na základě magnetostricke je nutné, aby cívkou procházel co největší proud, přičemž není podstatný způsob, jak se toho dosáhne. Pro dosažení proudu několika desítek A je třeba zvýšit nabíjecí napětí na kondenzátoru, z 16 na 600 V a snížit odpor magnetovacího obvodu na řádově desetiny ohmu. Změna odporu je však silně omezena impedancí magnetovací cívky. Periode proudového impulsu lze snadno měnit změnou kapacity kondenzátoru. Čím nižší kapacita, tím kratší perioda pulsu a rychlejší vybití. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že metoda kondenzátorového vybíjení je pružná, levná, spolehlivá a tedy vhodná k magnetování materiálu za účelem generování mechanických vln. Pro dosažení ultrazvuku by bylo třeba snížit indukčnost cívky řádově na μ H, což bohužel není prakticky realizovatelné.

Metoda bodového pólu se zatím u nás používá k nedestruktivnímu měření tvrdosti u odlištěk, v Rusku slouží ke kontrole ocelových plechů. Umožňuje měřit také pevnost či hloubku prokalení. Pokud by se podařilo po úpravách dosáhnout emise ultrazvuku, mohla by sloužit v oblasti ultrazvukové defektoskopie. Tuto otázku a dále optimalizaci obvodu strukturoskopu je však nutno podrobit rozsáhlému výzkumu ve spolupráci s odborníky elektrotechnického a magnetického zaměření.

Příspěvek byl vytvořen za podpory výzkumného záměru MSM 4674788501.

Literatura:

- [1] DVORÁK, J. Akustická emise magnetických impulzů metody magnetického bodového pólu. Diplomová práce KMT-M-240, TU v Liberci, 2009.
- [2] TOMČÍK, P. Možnosti ovlivnění mechanických vlastností strojních součástí magnetickým pulzním zpracováním. In *Workshop 2004 Fakulty strojní*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004, s. 285-288. ISBN 80-248-0521-9.



STATISTICAL METHODS IN SIGNAL PROCESSING AND DISCRIMINATION

STATISTICKÉ METODY PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ A JEJICH KLASIFIKACE

Zuzana FAROVÁ, Václav KŮS

Department of Mathematics, FNSPE CTU in Prague

Contact e-mail: zuzana.farova@email.cz

Abstract: We deal with the classification of acoustic emission signals by means of Fuzzy Clustering (FC), Model-Based Clustering (MBC) and Support Vector Machines (SVM). These methods belong to a different group of classification techniques, e.g. the SVM is searching for optimal separating hyperplanes between clusters. The signals are compared by means of suitable parameters obtained directly from the signals and from normed frequency spectra such as ϕ -divergence distance measure as the additional attribute. We are concerned with resulting cluster comparisons and the selection of efficient classification parameters. We realize three experiments in the area of acoustic emission to test the proposed classification methods by means of laboratory data and also considering industrial data from the real life.

Key words: Signal classification, ϕ -divergences, Fuzzy method, Model-Based method, SVM method, Real data processing

1 Introduction

We search for the method which allows us sufficiently and successfully classify measured acoustic emission signals into the clusters corresponding to physical nature of the acoustic sources. The basic classification task for acoustic sources is to distinguish between the emissions arising from the real defect developing in a given material and the emissions resulting from the noisy behavior of the measurement system. Two fundamental requirements are important for finding the true type of acoustic sources: to choose appropriate numerical characteristics (parameters) of measured signals which contain maximum of compressed information about the separability of the signals and to choose suitable, robust and efficient classification method. For the classification we can use several methods coming from the cluster analysis. In this experiment we apply fuzzy method of classification, Model Based Method and method Support Vector Machines. As the input characteristic values gained from given signals we use various parameters of signals together with ϕ -divergences which are applied to the normalized spectrums of acoustic signals under consideration.

2 Fuzzy classification method (FC)

The fuzzy method belongs to the methods, which are based on optimization of so-called objective function. Let us consider N individuals x_1, \dots, x_N in the space \mathbb{R}^n which are supposed to create c clusters. Then we can minimize the objective function in the form of weighted sum of quadratic distances between individuals x_k and a set of the so-called prototypes (i.e. the representative samples) v_1, v_2, \dots, v_c of clusters

$$Q = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_{ik} d^2(x_k, v_i),$$

where $U = [u_{ik}]$, $i = 1, 2, \dots, c$, $k = 1, 2, \dots, N$, is a partition matrix, which allocates the individuals into the clusters. The elements of matrix U are called membership degrees and they range over the interval $(0, 1)$. The degree u_{ik} stands for the probability that individual x_k belongs to the cluster i . The term $d(x_k, v_i)$ denotes a distance between individuals x_k and v_i .

We employ an iterative fuzzy algorithm to find maximum of the objective function Q under the following conditions

$$0 < \sum_{k=1}^N u_{ik} < N, \quad \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, c, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

This algorithm is based on stepwise calculation of the prototypes of the clusters and the partition matrix until certain convergence criterion is satisfied. Then the classification into the clusters is done according to final membership degrees. More details can be found in [3].

3 Model based method (MBC)

We suppose that the data belong to a finite mixture of normal densities, where each component represents one cluster, it means we deal with the finite convex combination of densities corresponding to the components of the mixture. We consider observations $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$, $x_i \in \mathbb{R}^d$, and the densities of x_i in k -th component denoted by $f_k(x_i|\theta_k)$, $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, G$, where θ_k are parameters of the k -th component. The number of mixed components is denoted by G . The method MBC is based on a general EM algorithm for finding maximum of the likelihood function under consideration and it manages to work with uncomplete data sets in the form $y_i = (x_i, z_i)$, which contain the so-called unobserved data $z_i = (z_{i1}, \dots, z_{iG})$ of the binary values

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \text{ belongs to group } k, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

We seek the maximum of likelihood function

$$L(\theta_k, \tau_k, z_{ik}|\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n \prod_{k=1}^G \tau_k^{z_{ik}} f_k(x_i|\theta_k)^{z_{ik}},$$

where τ_k is the probability that an observation belongs to the k -th component with the restrictions

$$\sum_{k=1}^G \tau_k = 1, \quad \tau_k \geq 0, \quad k = 1, \dots, G.$$

Since we do not know the data z_{ik} , it is necessary to maximize the conditional expectation of log-likelihood

$$\mathbb{E}_z[l(\theta_k, \tau_k, z_{ik}|\mathbf{x})|\theta_k, \tau_k, \mathbf{x}] = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^G \gamma(z_{ik})[\ln \tau_k f_k(x_i|\theta_k)],$$

where $\gamma(z_{ik})$ is a posteriori probability that the observation x_i belongs to the k th component of the mixture and it can be computed from the Bayes theorem. By means of the EM algorithm we determine values θ_k^*, τ_k^* of the parameters θ_k, τ_k for which the likelihood function reaches its maximum. The resulting classification is done according to posteriori probability $\gamma(z_{ik})$ and the i -th observation is classified to belong to the k -th component if it holds that

$$\max_{j=1, \dots, G} \gamma(z_{ij})^{\theta_k^*, \tau_k^*} = \gamma(z_{ik})^{\theta_k^*, \tau_k^*}.$$

See [1] for more detailed analysis and proofs. We apply this procedure for different modes of classification in the sense of various numbers of clusters and their miscellaneous shapes and orientations. The best model is chosen on basis of Bayesian Information Criterion (BIC), which takes the form

$$2 \log p(D|M_l) \approx 2 \log p(D|\Theta_l^*, M_l) - \nu_l \log(n) \equiv BIC_l,$$

where D denotes overall data set, ν_l is the number of independent parameters to be estimated under the model M_l , and Θ_l^* is the estimate of parameter obtained by EM algorithm. The highest value of BIC corresponds to the most probable model of classification.

4 Support Vector Machines (SVM)

The method called Support Vector Machines requires learning process, it means we need some training data set adjusting the procedure. Let us consider we are endowed by a training data set

$$(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m) \in \mathcal{X} \times \{+1, -1\},$$

where x_i are observations from the set of vectors \mathcal{X} and y_i are separating labels for $i = 1, \dots, m$, $m \in \mathbb{N}$. The classification into two clusters is represented by two values of labels, $+1$ or -1 . The method separates data by means of a hyperplane shown in Figure 1 while we require the margin along the hyperplane to be as wide as possible. The method works with a canonical form of the hyperplanes. The pair $(\mathbf{w}, b) \in \mathcal{H} \times \mathbb{R}$ is called canonical form of the hyperplane with respect to $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m \in \mathcal{H}$ if the set is determined by

$$\{\mathbf{x} \in \mathcal{H} | \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b = 0\} \quad \text{and} \quad \min_{i=1, \dots, m} |\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b| = 1,$$

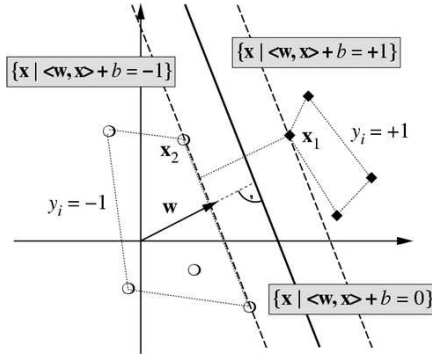


Figure 1: *The separating hyperplane with the margin.*

where \mathbf{w} is a vector orthogonal to the hyperplane and $\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle$ is the standard scalar product of \mathbf{w} and \mathbf{x}_i . The optimal separating hyperplane is designed by means of optimizing solution of

$$\min_{\mathbf{w} \in \mathcal{H}, b \in \mathbb{R}} \tau(\mathbf{w}) := \min_{\mathbf{w} \in \mathcal{H}, b \in \mathbb{R}} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2,$$

under the conditions $y_i(\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{w} \rangle + b) \geq 1$, $i = 1, \dots, m$. The result of this optimization is a pair (\mathbf{w}, b) which determines the separating hyperplane allowing us to classify observed data in two groups by means of the decision function

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \langle \mathbf{x}, \mathbf{x}_i \rangle + b \right).$$

The above mentioned minimizing solution holds on only for a simple classification problem. Unfortunately, we meet more complicated situations very often:

1. *We are not able to separate data linearly.* In this case the method uses a mapping $\Phi : x_i \rightarrow \Phi(x_i)$, which transforms observations into a high-dimensional feature space where the linear separation is available. This procedure requires the computation of dot product $\langle \Phi(x), \Phi(x_i) \rangle$ in a high-dimensional space. These extensive calculations are reduced significantly by using a positive definite kernel k such that

$$\langle \Phi(x), \Phi(x_i) \rangle = k(x, x_i),$$

leading to the decision function of the form

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i k(x, x_i) + b \right).$$

Applying various kernels we can construct variety learning machines (e.g. polynomial classifiers, exponential radial basis function classifiers (erbf), etc.)

2. *A separating hyperplane need not exist.* In this case we can tolerate a certain fraction of outliers and we introduce so-called slack variables $\xi_i \geq 0$, $i = 1, \dots, m$, which are incorporated into the optimizing problem through

$$\min_{\mathbf{w} \in \mathcal{H}, \xi \in \mathbb{R}^m} \tau(\mathbf{w}, \xi) := \min_{\mathbf{w} \in \mathcal{H}, \xi \in \mathbb{R}^m} \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i \right),$$

under the conditions $y_i(\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{w} \rangle + b) \geq 1 - \xi_i$, $i = 1, \dots, m$. The constant C gives us a compromise between two opposite targets: minimization of the errors and maximization of the margin width, simultaneously. The emphasis placed on the maximization of the margin width diminishes with decreasing value of the constant C and vice-versa.

3. *We would like to separate data into three and more groups.* A binary decision tree can be used for the classification into a greater number of groups, the SVM algorithmic classification into two groups is processed in each decision node. This method combine the effectiveness of the binary decision tree and the ability of SVM classifier to produce efficient classification. See [4] for more details.

5 Classification parameters

All processing laboratory measured acoustic signals were detected through the piezoceramic sensors attached to the thin metal plate of sizes $1,8m \times 0,6m \times 5mm$. Emitted signals were measured and stored on a computer by means of measuring device DAKEL-XEDO in 12-bit accuracy and 4 MHz sampling rate. The resolution 12-bit means that the measuring sampling apparatus was able to distinguish the voltage in the interval $[-2048mV, 2048mV]$. The acoustic emissions coming from the sensors are continuously monitored. We generated several versions of acoustic sources in the center of experimental plate.

We perform our cluster analysis with certain parameters computed from the normalized signal spectrums X_f found through discrete Fourier transform. The spectrum is normalized to one in order to obtain the estimate of spectral density of the signal $\{X_t\}_{t=0}^{T-1}$, where T stands for digital length of the emission event (in our case $T = 6144$). The normed spectrum is given by $\hat{S}(f) = |X_f| / \sum_{f=0}^{T-1} |X_f|$. The real signal and its normed spectrum are shown in Figure 2 as an example. We compute several parameters from the normed spectrums and signals and then we use these parameters in the methods of classification mentioned above. We designed the following **classification parameters** W_α , Q_β , Z_c , S_γ :

$$W_\alpha = \arg \min_{l \in [0, T-1]} \sum_{f=0}^{T-1} |l - f| \left| |X_f| - |\bar{X}_f| \right|^\alpha, \quad \alpha \in [1, \infty),$$

$$Q_\beta = \min \{ F \in [0, T-1] : \sum_{f=0}^F |X_f| \geq \beta \}, \quad \beta \in (0, 1),$$

$$Z_c = \sum_{t=\bar{t}}^{T-1} \delta(x_t), \quad \delta(x_t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(x_t x_{t+1}) = -1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad c \in (0, 1),$$

$$S_\gamma = \max J_\gamma - \min J_\gamma, \quad \gamma \in (0, 1),$$

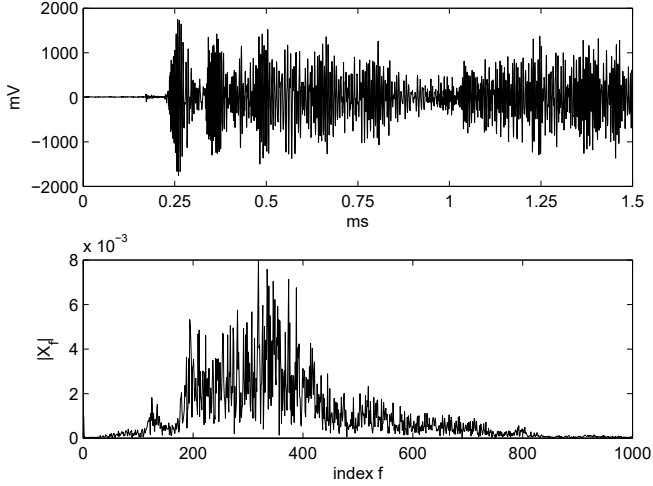


Figure 2: *Example of acoustic emission signal and related normed spectrum*

where $|\bar{X}_f|$ denotes the arithmetic mean $|\bar{X}_f| = \sum_{f=0}^{T-1} |X_f|/T$, and

$$J_\gamma = \{j \in [0, T-1] : |X_j| \geq \gamma \max_{f \in [0, T-1]} |X_f|\}, \quad \gamma \in (0, 1),$$

$$\tilde{t} = \min J_c, \quad J_c = \{j \in [0, T-1] : |x_j| \geq c \max_{t \in [0, T-1]} |x_t|\}, \quad c \in (0, 1).$$

In this paper we work with the specific classification parameters: W_2 (denoted as W), $Q_{0.33}$, $S_{\frac{1}{3}}$ (denoted as S), $Z_{\frac{1}{20}}$ (denoted as Z_c).

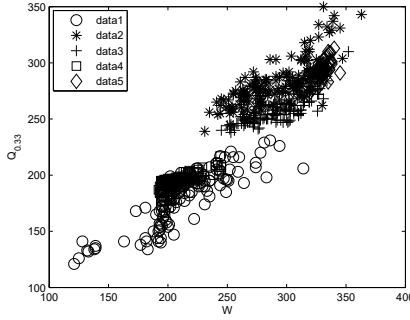
We also apply our classification methods to the global spectral parameter called *Divergence* representing the integral distance measure between normed reference spectrum and normed ordinary signal spectrum. The newly proposed **divergence attribute** D_ϕ in discrete form can be expressed as follows

$$D_\phi(\tilde{S}^{refer}, \tilde{S}) = \sum_{f=0}^{T-1} \tilde{S}(f) \phi \left(\frac{\tilde{S}^{refer}(f)}{\tilde{S}(f)} \right),$$

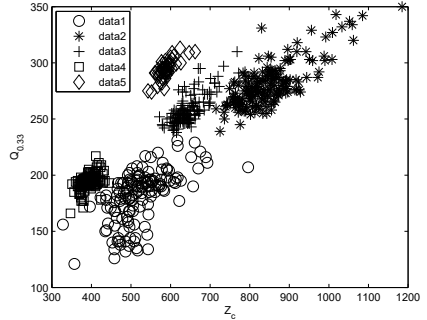
where \tilde{S}^{refer} is a normed reference spectrum $\tilde{S}^{refer}(f) = \sum_{i=1}^m |\tilde{S}^i(f)|/m$, here m denotes the number of observations from one sort of acoustic emission signals, $\tilde{S}^i(f)$ are individual realizations of the normed spectrum $\tilde{S}(f)$, and ϕ denotes the divergence function satisfying the following preconditions: $\phi : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ is a convex function in $(0, \infty)$, strictly convex at $t = 1$ with $\phi(1) = 0$. In this paper we work especially with Hellinger divergence given through the divergence generating function

$$\phi(t) = -4\sqrt{t} + 2t + 2.$$

More examples of divergences can be found in [2].



(a) Parameters W and $Q_{0.33}$.



(b) Parameters Z_c and $Q_{0.33}$.

Figure 3: Parameters for data set TOP5.

Table 1: Classification of the data set TOP5

Method	Specification of the Method	$W, Q_{0.33}$	$W, Q_{0.33}, S$	$Z_c, Q_{0.33}$
Fuzzy	Classical non-penalized	58,4%	59,9%	75,3%
MBC	5 clusters	53,2%	55,1%	95,3%
SVM	C=5, linear	74,3%	74,6%	96,7%
SVM	C=5, polynomial, degree 2	75,1%	78,1%	97,3%
SVM	C=5, erbf degree 1	70,3%	74,8%	95,4%
SVM	C=5, erbf degree 10	73,8%	75,7%	95,4%

6 Experiments and Results

In our experiment we measured several types of acoustic emissions and we applied the parameters and classification methods mentioned above. We present the classification of 5 types of acoustic emissions, the corresponding data set is denoted by TOP5. The dependence of parameter W on $Q_{0.33}$ for the observations from data set TOP5 is shown in figure 3a and the relation of parameters Z_c versus $Q_{0.33}$ is given in figure 3b.

We applied the Fuzzy method, Model Based method (MBC) and the method of Support Vector Machines (SVM) for the cases of various kernels (linear, polynomial, exponential radial basis function). The successfulness of our classification for carefully selected

Table 2: Classification of the data set TOP7

Method	Specification of the Method	$Q_{0.33}, Z_c$	$Q_{0.33}, Z_c, HDiv$
Fuzzy	Classical non-penalized	71,7%	73,7%
MBC	7 clusters	90,8%	81,3%
SVM	C=5, linear	87%	88,2%
SVM	C=5, polynomial, degree 2	90,6%	92,3%
SVM	C=5, erbf, degree 1	88,6%	88,6%
SVM	C=5, erbf, degree 10	88,7%	88,8%

combinations of parameters $\{W, Q_{0.33}\}$, $\{W, Q_{0.33}, S\}$, $\{Z_c, Q_{0.33}\}$ can be seen in table 1. Making account of the combination of parameters $Z_c, Q_{0.33}$ in MBC we obtained remarkable improvement since we achieved the 95,3% reliability of our classification. The MBC method was very successful during our experiments, but from the table 1 we can see that the choice of parameter combinations is essential throughout the classification. The method SVM yields the greatest successfulness for our data sets, particularly the case of polynomial kernel of the degree 2. In most experiments the method SVM was more successful than the other two methods used. This fact is due to the training procedure, which is a part of this method. A lower success of the fuzzy method is caused by the classification procedure itself, because this method classifies only on the basis of a distance between the samples and cluster prototypes. In contrast to this strategy, the Model Based method is based on precise probability model mixing the marginal distributions and leading to more successful results.

For the illustration purposes, we present slightly more complicated classification of the data set TOP7 consisting of 7 types of acoustic emission sources. We created data set TOP7 by means of adding 2 new types of acoustic emission to set TOP5. Classification successfulness of TOP7 is listed in the table 2 for the combinations of parameters $\{Q_{0.33}, Z_c\}$ and $\{Q_{0.33}, Z_c, HDiv\}$, where $HDiv$ denotes the spectral Hellinger divergence. In this case, the combination of parameters $\{Q_{0.33}, Z_c, HDiv\}$ was the most successful. This fact and our further experiments prove that the divergence spectral measures can be successfully applied to the area of acoustic emission to obtain variety of new parameters through the optional divergence generating functions ϕ .

7 Real data sets processing

We apply our methods FC, MBC, and SVM with the proposed classification parameters/attributes on the real data set, which contains 5 types of acoustic emission originated from the measurements handled by DAKEL through the device Xedo-5 at the different places of interest, i.e.

- Data1: Measurement of the CAVITATION
- Data2: Experiment with the PLASMATRON
- Data3: Process of WELDING
- Data4: Pressure test on BOILER VESSEL
- Data5: Rigidity test of SAIL PLAIN

Classification successfulness for the real data set is listed in the table 3 for the combinations of parameters $\{Q_{0.33}, Z_c\}$ and $\{Q_{0.33}, Z_c, HDiv\}$. The combination of parameters $\{Q_{0.33}, Z_c, HDiv\}$ for the real data set is shown in figure 4. We again achieve the highest percentage success by using the method SVM, **90,8%**, however, success by using the method MBC is also remarkable, **89%** for parameters $\{Q_{0.33}, Z_c, HDiv\}$. Moreover, it can be seen from the table 3 that the success is higher when using linear SVM with parameter $HDiv$ added.

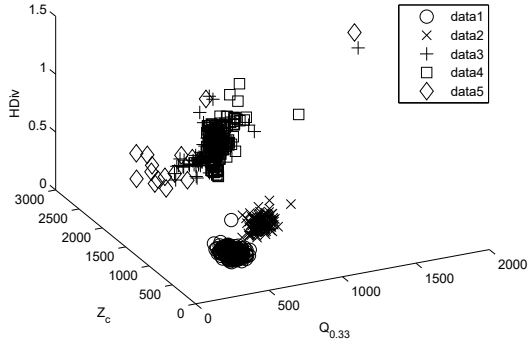


Figure 4: Parameters $Q_{0.33}$, Z_c and $HDiv$ for the real data set.

Method	Specification of method	$Q_{0.33}, Z_c$	$Q_{0.33}, Z_c, HDiv$
Fuzzy	Classical non-penalized	76,5%	76,5%
MBC	5 cluster	88,2%	89%
SVM	C=5, linear	51,4%	83,7%
SVM	C=5, polynomial degree 2	85,6%	83,9%
SVM	C=5, erbf degree 1	90,8%	90,8%
SVM	C=5, erbf st.10	89,3%	90,8%

References

- [1] Fraley, C.; Raftery A. E. Model-Based Clustering, Discriminant Analysis, and Density Estimation. *Journal of the American Statistical Association*, **97**, 611-631, 2002.
- [2] Kús, V.; Morales, D.; Vajda, I. Extension of the Parametric Families of Divergences Used in Statistical Inference. *Kybernetika*, **44/1**, 95 - 112, 2008.
- [3] Pedrycz, W. *Knowledge-Based Clustering, From Data to Information Granules*. Wiley-Interscience, New Jersey, 2005.
- [4] Schölkopf, B.; Smola, A. J.. *Learning with Kernels – Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*. The MIT Press, 2002.



X-RAY EXAMINATION OF THE FATIGUE PROCESS RENTGENOGRAFICKÉ ZKOUMÁNÍ ÚNAVOVÉHO PROCESU

J.Fiala*, P.Mazal**, M.Kolega*, P.Liškutín**
*University of West Bohemia Plzeň CZ
**Brno University of Technology

Abstract

Using x-ray diffraction, we inspected periodically (after each 5000 cycles) the crystal structure of eight samples of an aluminium alloy during their cyclic loading to failure. It has been found that the structure of polycrystalline samples cyclically subjected to an applied stress develops a preferred orientation which is changing regularly in course of time and we assume that this effect could help to predict a safe operating life more exactly.

Key words: fatigue, x-ray diffraction, preferred orientation

Abstrakt

Cyklicky jsme zatěžovali osm vzorků hliníkové slitiny až do lomu a v průběhu celé této doby jsme pomocí rentgenového záření periodicky (vždy po 5000 cyklech) testovali jak se vlivem cyklického zatěžování mění krystalová struktura této slitiny. Zjistili jsme, že ve struktuře polykrystalických vzorků vzniká vlivem cyklického zatěžování textura (přednostní orientace), která se během zatěžování mění s pozoruhodnou pravidelností. Předpokládáme, že na základě tohoto jevu bude možno zlepšit přesnost odhadu zbytkové životnosti.

Klíčová slova: únava, rentgenová difrakce, přednostní orientace

1. Úvod

Cyklické zatěžování vyvolává živé přemísťování dislokací, které v důsledku toho spolu intenzivněji interagují za vzniku imobilních konfigurací. To posléze vede k dichotomizaci mosaikové struktury a růstu větších mosaikových bloků na úkor bloků menších [1]. Přitom se hromadí parakrystalické defekty a roste hustota vnitřní i povrchové energie mosaikových bloků, což posléze vede k jejich rozpadu a desintegraci mosaikové struktury [2]. Vnitřní struktura materiálu se tedy v průběhu (a důsledkem) cyklického namáhání cyklicky mění (hrubne – desintegruje - hrubne - ...) ovšem s periodou, která je řádově větší než perioda zatěžování. Při rekrystalizaci mosaikové struktury mohou pak vzniknout necelistvosti. Čím více cykly mosaiková struktura prošla, tím větší je pravděpodobnost nukleace nadkritické trhliny.

2. Rentgenografická technika

Pomocí rentgenové difrakce sledujeme (dis)orientaci, tj. směrovou distribuci mosaikových bloků (krystalků), která se při cyklickém zatěžování materiálu periodicky

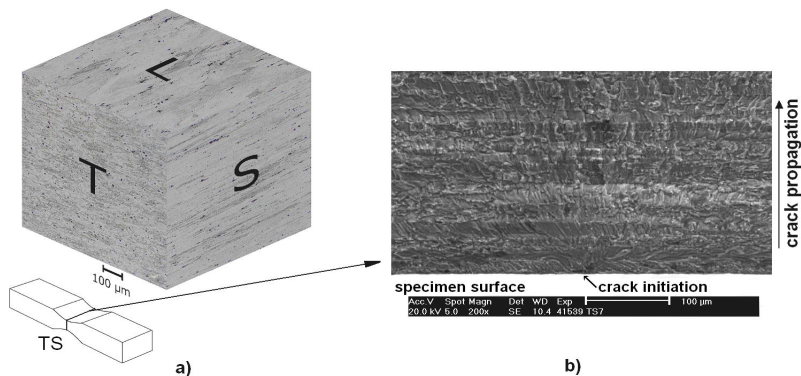
mění v rytmu střídavé destrukce a restituce jeho struktury. Disorientaci mosaikových bloků charakterisuje šířka K (tzv. azimutálního profilu, tj.) směrové distribuce intenzity difraktovaného záření podél difrakční linie (200) hliníku daná vztahem:

$$K = 100 \cdot \frac{p}{q} - K_{\min}$$

kde p je délka horizontální úsečky CD, která půlí úsečku AB mezi maximem distribuce A a bodem B. Bod B je průsečíkem vertikály vedené bodem A s přímkou r aproximující pozadí distribuční křivky. Hodnota q (měřítková korekce) je odlehlost bodů „-100“ a „-90“ na horizontální ose souřadné, charakterisující směr, v obrázku č.1. Na vertikální ose je intenzita záření difraktovaného v daném směru. K_{\min} je nejmenší hodnota veličiny $100 \cdot p/q$, kterou jsme našli v hodnoceném souboru difraktogramů daného vzorku [3, 4].

3. Použitý materiál a experimentální technika

Na konferenci Defektoskopie 2009 [4] jsme podali informaci o změnách mozaikové struktury v důsledku únavového zatěžování materiálu EN AW-6082/T6. Výsledky těchto měření byly natolik zajímavé, že jsme se rozhodli ověřit jejich platnost na jiné slitině založené na bázi Al. Tímto materiálem byla duralová slitina **EN AW-2017A**. Polotovar tohoto materiálu (plochá tyč s průřezem 15x80 mm, délka 1000 mm) byl vyroben protlačováním a důsledkem byla poměrně značná nehomogenita struktury (směrovost). Ukázka vzhledu metalografických výbrusů struktury s výraznou směrovostí v jednotlivých směrech a příklad lomové plochy vzorku s orientací TS je na obr. 1.



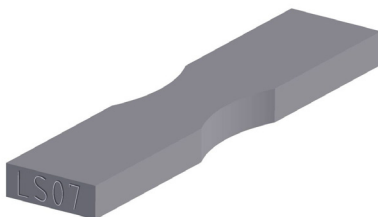
Obr. 1. a) 3D reprezentace vzhledu nehomogenity slitiny Al ve směrech L, S a T, **b)** příklad únavové lomové plochy vzorku TS orientací.

Fig. 1. a) 3D representation of non-homogeneity of Al alloy in directions L, S and T, **b)** example of fatigue fracture surface in specimen with TS orientation

Tab. I. Chemické složení sledovaného materiálu (hm %).

Tab. I. Chemical composition of tested material (wt%)

<i>prvek</i> <i>materiál</i>	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Al
EN-AW 2017A	0,7	0,7	4,0	0,6	0,6	0,2	0,1	rest



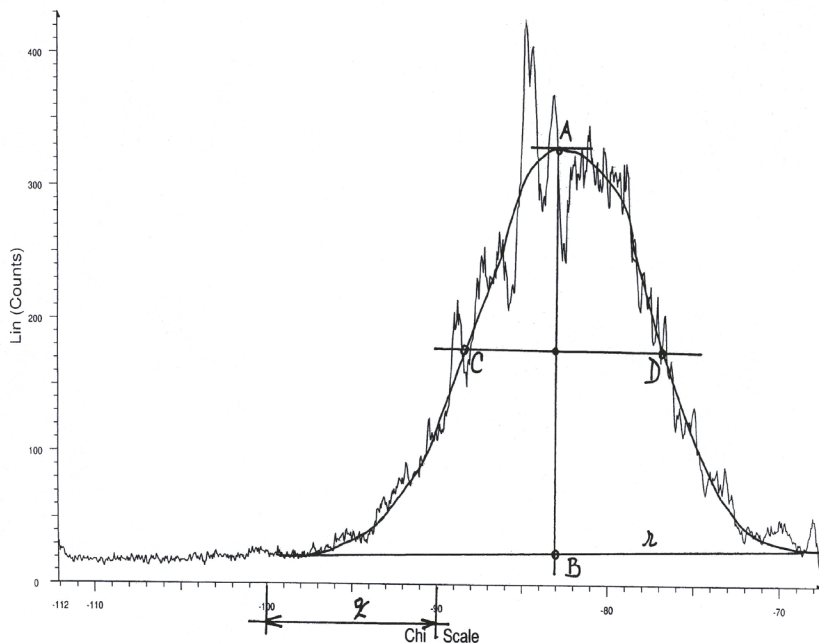
Obr. 2. Tvar zkušební vzorku (rozměry 12 x 5 x 75 mm)

Fig. 2. Shape of the specimen (dimensions 12 x 5 x 75 mm)

Vzorky byly únavově zatěžovány za podmínek čtyřbodového střídavého ohybu v rezonančním pulzátoru RUMUL Cractronic 160. Vždy po cca po 5000 zátěžných cyklech byly vzorky odeslány k RTG analýze. Současně byly provedeny analýzy signálu AE a změn frekvencí zatěžování na vzorcích zatěžovaných bez přerušení. Výsledky těchto experimentů potvrdily obdobné změny orientace strukturálních mosaikových bloků, které byly pozorovány u materiálu EN AW-6068/T5.

4. Výsledky měření a diskuse

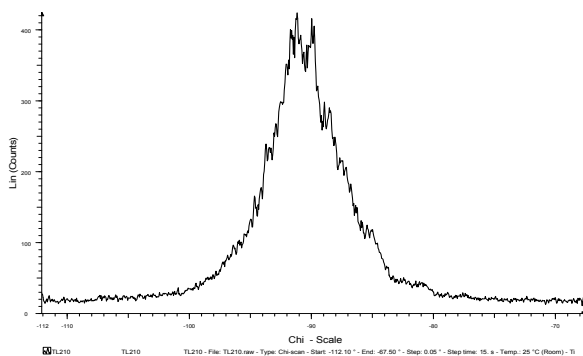
Experimenty na slitině EN AW-2017A. Směrová distribuce mosaikových bloků se během cyklického zatěžování střídavě rozšiřuje a zužuje (obr. 4 a 5). Závislost šířky K-té směrové distribuce na počtu zátěžných cyklů u čtyřech sledovaných vzorků TL1, TL2, TS1 a TS2 (viz obr. 1.) hliníkové slitiny EN AW-2017A (dural: 4%Cu; 0,6%Mg; 0,7%Si) je znázorněna na obr. 4 a 5. Průběh této závislosti dokumentuje, jak se disperse struktury střídavě zmenšuje (když dochází ke spojování mosaikových bloků do větších celků, čímž se jejich směrová distribuce zužuje a hodnota K klesá) a zvětšuje (když se velké mosaikové bloky v důsledku nahromaděných parakrystalických distorsí rozpadají na menší fragmenty, z nichž každý má poněkud jinou orientaci, takže hodnota K roste). Grafy dokladují pravidelnost, periodicitu, která se do strukturálních přeměn vyvolávaných cyklickým zatěžováním – po jakési úvodní náběhové či „panenské“ fázi – prosazuje. Periodicitu, která navozuje představy o možném využití při predikci zbytkové živostnosti cyklicky zatěžovaných dílců.



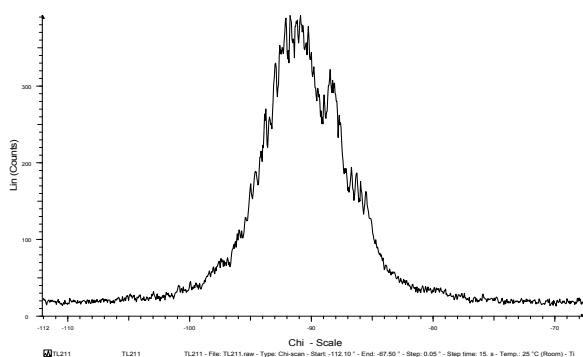
Obr. 3. Konstrukce hodnoty K, charakterisující azimutální profil difrakční linie (200) hliníku (dle textu).

Fig. 3. Construction of K value for characterisation of azimuthal diffraction line (200) of aluminium (according to the text).

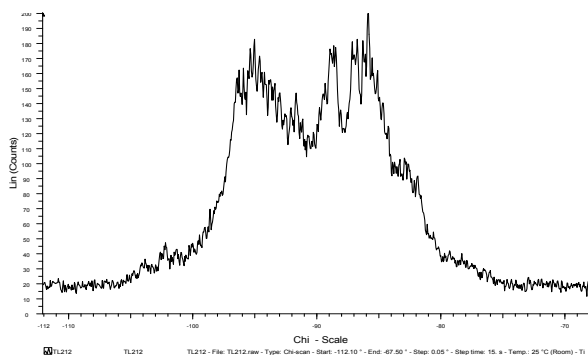
Aby měření směrové distribuce mosaikových bloků, které je principem použité rentgenografické techniky, bylo účinné, musí distribuce být dost selektivní (musí mít rezonanční charakter). Jinými slovy, je třeba, aby sledovaný materiál jevil (spíše více než méně) výraznou texturu a analysovaný výbrus byl vůči této textuře vhodně orientován. Což ilustruje srovnání rentgenogramů vzorku TL2 na obrázcích 4 a 5 s rentgenogramy vzorku LS1 na obr. 8. Oba tyto vzorky jsou vyříznuty z jednoho a téhož plechu, ale v různých směrech a v důsledku toho je vzorek TL2 pro použitou rentgenografickou techniku (mnohem) vhodnější než vzorek LS1.



a)



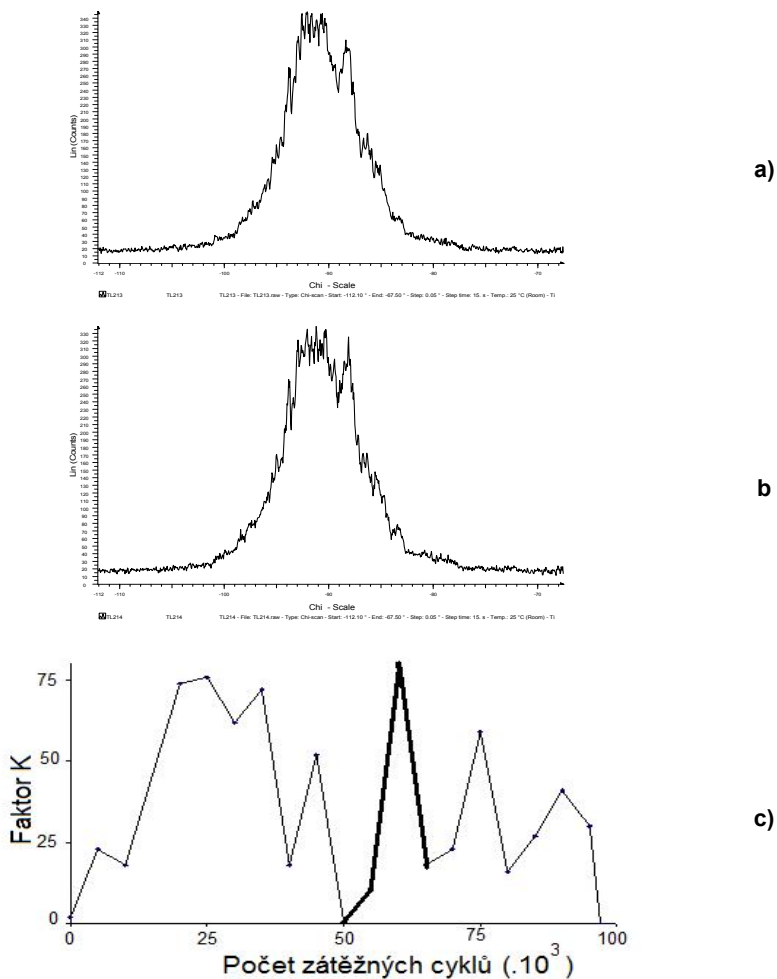
b)



c)

Obr. 4. Azimutální profil difrakční linie (200) hliníku charakterizuje směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků vzorku TL2 po **a)** 50.000 zátěžných cyklech, **b)** 55.000 zátěžných cyklech a **c)** 60.000 zátěžných cyklech.

Fig. 4. Azimuthal profile of diffraction line (200) of aluminium for characterisation of disorientation of mosaic blocks of the specimen TL2: **a)** 50.000 load. cycles, **b)** 55.000 load. cycles and **c)** 60.000 load. cycles.

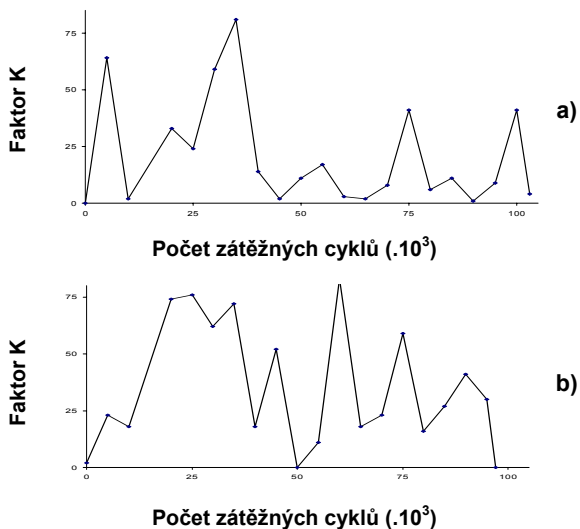


Obr. 5. Azimutální profil difrakční linie (200) Al charakterizuje směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků vzorku TL2: **a)** po 65.000 cyklech, **b)** po 70.000 cyklech, **c)** závislost veličiny K, charakterisující směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků, na počtu zátěžných cyklů (tučně je vyznačen vývoj (dis)orientace mosaikových bloků od 50.000 do 70.000 zátěžných cyklů, dokumentovaný azimutálními profily na obr.4a, 4b, 4c, 5a, 5b.

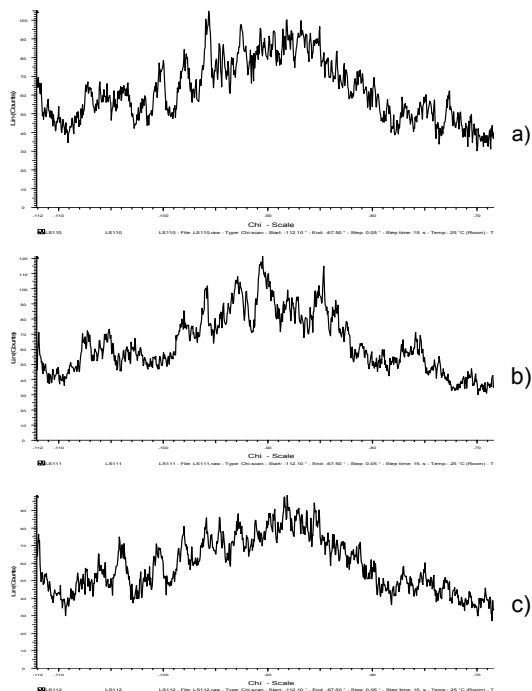
Fig. 5. Azimuthal profile of diffraction line (200) of aluminium for characterisation of disorientation of mosaic blocks of the specimen TL2: **a)** 65.000 load.cycles, **b)** 70.000 load.cycles, **c)** the dependence of K (characterics of the disorientation of mosaic blocks) on the number of loading cycles (bold line indicates development of (dis)orientation of mosaic blocks from 50.000 to 70.000 loading cycles, documented by azimuthal profiles on Fig. 4a, 4b, 4 c, 5a, 5b.



Obr. 6. Závislost veličiny K, charakterisující směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků, na počtu zátěžných cyklů: **a)** vzorku TL1, **b)** vzorku TL2.
Fig. 6 Dependence of K on the number of loading cycles – **a)** spec.TL1, **b)** TL 2.



Obr. 7. Závislost veličiny K, charakterisující směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků, na počtu zátěžných cyklů: **a)** vzorku TL1, **b)** vzorku TL2.
Fig. 7. Dependence of K on the number of loading cycles – **a)** spec.TL1, **b)** TL 2.



Obr. 8. Azimutální profil difrakční linie (200) hliníku charakterizuje směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků vzorku LS1: a) po 50.000 zátěžných cyklech, b) 55.000 zátěžných cyklech, c) 60.000 zátěžných cyklech.

Fig. 8 Azimuthal profile of diffraction line (200) of aluminium for characterisation of disorientation of mosaic blocks of the specimen LS1: **a)** 50.000 load.cycles, **b)** 55.000 load.cycles and **c)** 60.000 load.cycles.

4. Závěr

Použitou rentgenografickou technikou byly dokumentovány změny, ke kterým dochází ve struktuře materiálu vlivem jeho cyklického namáhání. Závislost těchto změn na počtu zátěžných cyklů není monotónní a má výraznou periodickou složku.

Acknowledgements. *This work is a part of the research project MSMT CR - 1M 2560471601 "Eco-centre for Applied Research of Non-ferrous Metals" financed by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic.*

Literatura

- [1] W.A.Wood: The Study of Metal Structures and Their Mechanical Properties, Pergamon Press, New York 1971.
- [2] A.M.Hindeleh, R.Hosemann: Paracrystals representing the physical state of matter, Journal of Physics C: Solid State Physics **21** (1988), 4155-4170.
- [3] J.Fiala, I.Schindler, R.Foret, S.Němeček: Sledování struktury konstrukčních materiálů a její degradace rtg difrakcí, Strojnický časopis **53** (2002), 1-23.
- [4] J.Fiala, P.Mazal, M.Kolega: Mikrostrukturní změny vyvolané cyklickou deformací. In Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2009, Praha, 2009, 7-11.



NDT WIRE CONNECTION INVESTIGATION IN HOUSEHOLD APPLIANCES INDUSTRY

Matej FINC *, Janez GRUM **

** CABLEX Group, CABLEX-T d.o.o., Cesta Ste Marie Aux Mines 9, 4290 Tržič,
Slovenia,

** University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva 6, 1000
Ljubljana, Slovenia

Contact e-mail: matej.finc@gmail.com *, janez.grum@fs.uni-lj.si **

Abstract

The quality of wire connection which appear in electric machines and devices in several industry branches e.g. household appliances, automotive, etc. may be tested with various destructive methods. The article is about investigation of wire connection in the CABLEX Group Company. Introduction of non-destructive connection testing reveals new possibilities and indicates the way of replacing existing macroscopic investigation methods. Article presents macroscopic and NDT investigation of standard crimped contacts and IDC (Insulation Displacement Connection) crimped connectors as the basis form of wire connection testing. Detailed macroscopic photographs of crimp contact slices and criteria for evaluation of connection quality are explained in the article. Furthermore the article describes NDT methods of crimp contacts testing, which is exactly the field where intensive research is taking place. The next part of the article presents some of the NDT methods of crimp contacts testing designed to cut down the testing time and improve the quality of connection.

Key words: *standard crimped contact, IDC (Insulation Displacement Connection) crimped connector, macroscopic analysis, CT inspection*

1. Introduction

The CABLEX Group Company is a high-tech industrial company with modern equipment and adequate machines for production of cable and harness products mainly for household appliances and automotive industry. CABLEX Group Company produces over 80 % of prefabricated ready made cable/wire connection for regular customers all over Europe as well as beyond its borders. Through cable connection power supply of devices is made easy. Connections are also indispensable in information transfer from sensor to control unit, providing better device control while constantly adapting to changing operating conditions. Pre-fabricated ready made cables are therefore gaining importance in technical development because faster wiring cuts down manufacturing time and improves product quality. CABLEX Group offers wide range of wiring combinations with standard crimped contacts and IDC connectors manufactured with automatic systems based on CAM. The abbreviation IDC

(Insulation Displacement Connection) means that the connector is fastened together with insulated wires by the means of cutting through the cable insulation with the connector's ID contact. CABLEX Group uses standard contacts and connectors of worlds leading manufacturers for wiring of household appliances.

2. Evaluation of ready-made wire connection quality

CABLEX Group uses the following methods for evaluation of wire connection quality:

- checking dimensions of wires, connectors and contacts before entering the production line;
- measuring of height and width of crimp connection;
- measuring of force required to pull out the wire from the contact;
- strand distribution analysis (cluster of wires in the cable) of the crimp conductor and analysis of connection form after macroscopic slice of crimp connection;
- electrical control of cable strands on layout boards;
- measurement of voltage drop across the crimp connection;
- heating measurement of connection under load.

Nowadays thermography is an indispensable non-destructive method for supervision of power supply devices, machines and premises.



a) Digital photography

b) Thermograph

Fig. 1 Thermographic analysis of the connector under load [1]

Fig. 1 shows the thermographic analysis of triple connection under load made by the IR camera. Digital photography of triple cable connection is displayed on Fig. 1a. Fig. 1b displays the snapshot of overloaded and overheated connection made by the IR camera. As the figure reveals, the left connection has significantly higher temperature than the other two connections, which may lead to premature breakdown or even cause ignition and fire break out.

Standard crimping procedure performed on automatic production line offers the possibility to measure and analyse crimping force as one of the criteria for the quality of crimp connection. Proper position of conductor in crimp connection of IDC crimping procedure may be achieved with sensors and video cameras.

3. Investigation of crimped contacts

Contact crimping is the technology of mechanical joining where conductors are crimped with contacts. Before crimping took place parameters must be set on crimp barrel/insulation grip tool. Insulation must be peeled off from the end of conductor before conductor strands are crimped with crimp barrel. Crimp barrel slice and insulation grip slice are used in destructive investigation of standard crimped contact. Crimping of conductor strands with crimp barrel requires that insulation of conductor is peeled off. Through reforming contact and conductor are transformed into inseparable and electrically conductive connection. Electrical conductivity is established by crimping the contact on the part of conductor with peeled-off insulation.

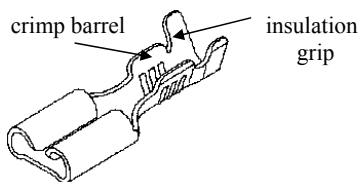


Fig. 2 Contact

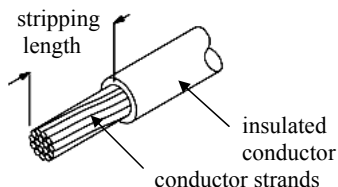


Fig. 3 Insulated conductor

Fig. 2 displays contact with crimp barrel and insulation grip, while Fig. 3 shows insulated conductor.

For destructive and non-destructive investigation was in CABLEX Group prepared crimped contact with conductor.

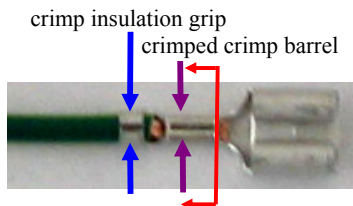


Fig. 4 Crimped contact with conductor

Fig. 4 shows contact with conductor which was crimped at the insulation grip and crimp barrel. Arrows show directions for destructive and non-destructive (CT) investigation of crimped contact.

3.1. Destructive investigation (macroscopic analysis) of crimped contact at the crimp barrel and insulation grip

Connection slice is firstly treated with rough and fine grinding and afterwards polished and etched. Inspection continues with optical microscope review and evaluation of strand distribution. Crimp height and width of the crimp barrel and insulation grip is measured with calliper gauge or micrometer calliper.

The snapshot of the crimp connection slice is taken through the optical microscope. Image quality should be on the adequate level to allow the evaluation of the connection quality with computer and suitable software. Slices are made at the crimp barrel and insulation grip.

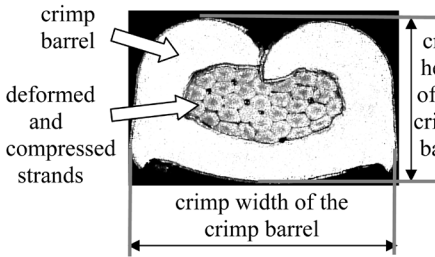


Fig. 5 Crimp contact slice at the crimp barrel

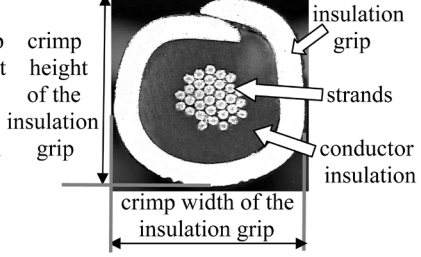


Fig. 6 Crimp contact slice at the insulation grip

Fig. 5 displays the crimp contact slice at the crimp barrel. At the crimp barrel it is possible to observe the size and distribution of deformed strands in a crimp. Strands should be tightly compressed with no gaps between them. Connection tightness is a prerequisite for required operating life under full load. Tightness is namely the best way to prevent oxidation within the connection and between strands. Therefore the form of the crimp barrel, which must be symmetrical, within required dimensions and with optimal ratio between crimp height and width is also very important part of the wire connection quality evaluation.

Fig. 6 displays the crimp contact slice at the insulation grip. It must be taken care that the form of crimped contact at the insulation grip is symmetrical, meaning that strands must be symmetrical regarding the centre of the connection. Both shanks of the insulation grip must lay tightly on the conductor's insulation and the conductor must be firmly fixed at the end of insulation. Rigidity of the conductor within insulation grip shanks reduces the influence of mechanic vibrations thus preventing breakage of copper conductor during operation.

3.2. Non-destructive (CT) investigation of crimped contact

German company YXLON International performed for CABLEX Group analysis of crimp connection with 2D and 3D X-ray Computed Tomography (CT).

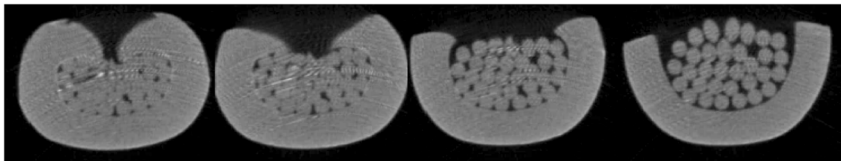


Fig. 7 Computed Tomography slices at four locations across the crimped contact.

Fig. 7 displays Computed Tomography slices of crimped contact with conductor at four locations using the X-ray. Slices serve as the basis for quality evaluation and consecutively it is possible to establish the state of the crimp connection along its whole length. Snapshots reveal the number and arrangement of strands at several points.

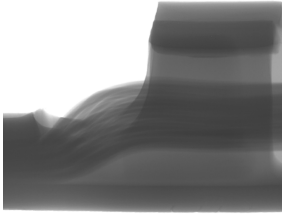


Fig. 8 2D CT reconstruction



Fig. 9 3D CT reconstruction

Fig. 8 and Fig. 9 display the newest method of Computed Tomography with 2D and 3D reconstruction of crimp connection. Evaluation of connection quality and searching for spots with inadequate quality is the excellent way to eliminate the weaknesses of ready-made cable technology. Variable connection quality may be partly attributed to poor conductor quality as well as to inadequate insulation and strands in insulated conductors. The other reason of quality variation is inadequate crimping preparation. The easiest way to change crimping parameters is to change the crimping force during pre-forming of wire connection. Differences in connection quality may be influenced by the quality of the conductor and contact. Input quality control systems use quality standards for materials of which conductors and contacts are made. Manufacturer of ready-made crimp connection may prescribe special or additional demands for conductors in most demanding crimp connection produced with mechanic pressing or crimping technique.

4. Investigation of IDC crimped connector

CABLEX Group uses destructive methods to investigate ready-made wire connection made with IDC crimp procedure. IDC crimping is a procedure where conductor is pushed between notched parts of the contact making an incision in the conductor's insulation.

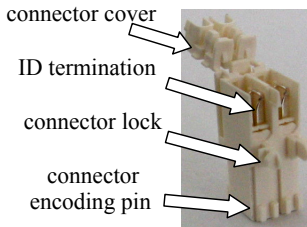


Fig. 10 IDC connector

Fig. 10 displays IDC connector consisting of the following parts: housing with cover, locks and encoding pins (they ensure correct mounting). ID terminations are inserted into the connector housing. Conductors are pushed between beams. During crimping process beams make incisions in the insulation thus establishing direct contact between strands and ID contact.

For destructive and non-destructive investigation was in CABLEX Group prepared IDC crimped connector, which was crimped with two conductors (Fig. 11).

4.1. Destructive investigation (macroscopic analysis) of IDC crimped connector

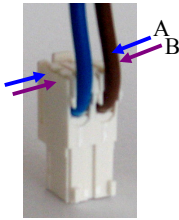


Fig. 11 Directions of destructive slices of IDC crimped connector

Fig. 11 displays directions of destructive slices of IDC crimped connector. When investigation takes place, crimped IDC connector is put into mould and covered with synthetic material to ensure fixed connection. After synthetic material hardens, connector can be prepared for macroscopic review of the connection slice. The next procedures are grinding, polishing and etching of the IDC connector (between both ID contacts). Image from optical microscope is transferred to display or computer by the means of CCD camera.

Snapshots of both slices taken from selected parts of the connector can be observed and evaluated with adequate software. Connection characteristics are analysed on the spots where ID termination make in incision in the conductor. Furthermore the height/depth of crimp connection, position of conductor's insulation and strands regarding the incision of the ID termination as well as evaluation of correct strand distribution symmetry, strand fitting and widening of the contacts in IDC connector.

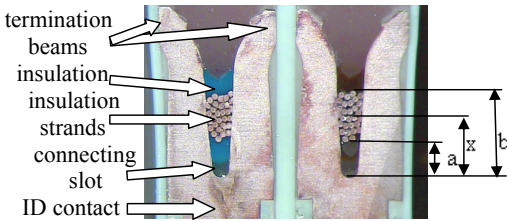


Fig. 12 Slice of IDC crimped connector in direction A

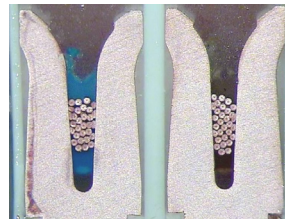


Fig. 13 Slice of IDC crimped connector in direction B

Fig. 12 and Fig. 13 display two ID crimped termination slices from IDC crimped connector in direction A and B prepared by the destructive macroscopic analysis on the optic microscope. It is possible to determine crimp depth/lower section of IDC crimping from the image. Furthermore image reveals insulation and strands situated between beams of the ID termination.

To obtain the required quality of connection, connector manufacturer requires certain crimp depth (x), which is checked on the optic microscope. Testing sample must therefore be prepared for the analysis. On the basis of span between upper and lower crimp depth the average value of crimp depth is determined. It must be within the required range. Deviation from required crimp depth is prescribed by the manufacturer of connector.

Crimp depth is calculated according to the following formula: $x = a + (b - a)/2$, where x is the crimp depth according to the lower section of IDC crimping, a is the lower limit of strands and b is the upper limit of strands. Allowable variation of crimp depth is determined by the

manufacturer of IDC connector. Among others it depends on the connector type. One of the requirements provides that min. 40 % of strands is in direct contact with ID termination and at least 70 % of strands are in contact with one another.

4.2. Non-destructive (CT) investigation of IDC crimped connector

German company YXLON International performed for CABLEX Group analysis of IDC crimped connector with 2D and 3D X-ray Computed Tomography.

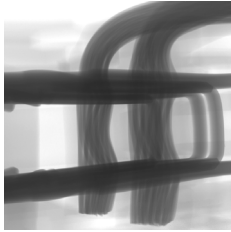


Fig. 14 2D CT reconstruction

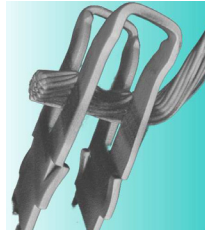


Fig. 15 3D CT reconstruction



Fig. 16 IDC crimped connector with two parallel slices made by 3D CT

Fig. 14 displays 2D CT and Fig. 15 3D CT reconstruction of IDC crimped connector, while Fig. 16 displays crimp termination with two parallel slices of IDC crimped connector.

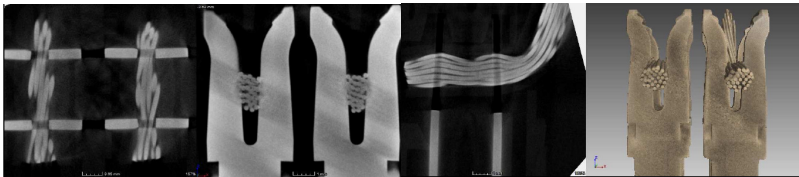


Fig. 17 CT inspection of IDC crimped connector

Fig. 17 displays CT inspection of IDC crimped connector. All images are helpful in evaluation of the crimp connection quality.

5. Conclusion

For the CABLEX Group Company the quality of wire connection is of outmost importance. Senior employees of CABLEX Group therefore constantly keep up with new development in the field of cable connection and manufacturing processes. It is no exaggeration to state that quality control is the highest priority of the company. Renowned international companies such as BSH (Bosch und Siemens Hausgeräte), Miele and Electrolux buy their ready-made cables at CABLEX Group thus proving their quality. Reliability of cable bundles is tightly connected with the quality of cable connection. CABLEX Group uses various tests e.g. measurement of crimp height and width, measurement of pull-out force and analysis of crimp

connection slices to ensure the quality of its products. At the end the electrical control of cable bundles on special layout tables took place and furthermore the evaluations of connection quality through measurement of the voltage drop across crimp connection as well as analysis of the connection temperature under load. Additional procedures required in cable bundle measurement depend on type and complexity of the cable connection. Automatic production lines for standard crimping and conductor cutting are furnished with crimping force measurement system. However the product quality in automatic machines for wire cutting and crimping IDC connectors largely depends on the conductor position (they should be parallel) in crimp termination of IDC connectors. Therefore the position is controlled with sensors or video surveillance system. The company management request is to implement automatic measuring and evaluation processes which would enable quality control of crimp connection with non-destructive methods. They are searching for the quality control method which would be fast enough and sufficiently reliable. Nowadays there are not only destructive but also several non-destructive methods for crimp connection testing. The goal of cable bundle testing is to find replacement for destructive investigation method. Non-destructive methods are normally much faster, but they should retain the same or have even better connection evaluation reliability. Therefore the company plans to initiate research project for testing all types of cable bundles with X-ray Computed Tomography. Non-destructive investigation is based on microfocus and nanofocus X-ray technique, enabling 3D image reconstruction of adequate quality as well as direct analysis of crimp connection. IDC crimped connectors are already furnished with system responsible for checking the horizontal position of wires but it could be supplemented with system checking vertical position of wires and terminations in the IDC connector housing. Furthermore the quality of the wire bundle connection may be controlled with thermography. Overloading with current exceeding nominal current (testing phase only) causes overheating of weak points in wire connection where temperature differences can be measured with IR camera.

6. Acknowledgments

The authors would like to thank German company YXLON International GmbH from Hamburg for X-ray inspection report and European Social Fund because operation part is financed by the European Union.

7. References

- [1] B. Težak: Uporaba IR-termografije v fluidni tehniki – 1. del, Ventil, 2005
- [2] M. Finc, J. Grum.: Non-destructive investigation of wire connectors in household appliances industry, ECNDT 2010, Moscow 2010
- [3] <http://www.cablex.si/T> [29.9.2010]



THE USE OF ACOUSTIC EMISSION FOR THE ASSESSMENT OF THE EFFECT OF NONMECHANICAL SERVICE CONDITIONS ON THE DEGENERATION AND FATIGUE STRENGTH OF SELECTED CONCRETES

Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Abstract

The paper presents the results of acoustic emission investigations into the degradation of two self-compacted concretes damp to a different degree and two ordinary concretes fouled with mineral oil. The levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} were determined. The test results were used to calculate the fatigue strength of the concretes. It was shown that the nonmechanical service conditions have an effect on the stress failure of the concretes and on their fatigue strength.

Key words: *acoustic emission, concrete, failure, fatigue strength*

1. Introduction

Structures made of concrete are subject not only to different loads, but also to various nonmechanical service factors such as damp and oil fouling [1-3]. Therefore the question arises: what effect do the above factors have on the degradation of concrete. The answer can be both illuminating and useful for predicting the behaviour of concrete under cyclic loads, particularly in structures such as bridge deck slabs, industrial floors, concrete carriageways and machine foundations. It seems to be worthwhile to investigate the degradation of such concretes to determine the levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} which demarcate the different stages in this process and then to calculate the fatigue strength. It should be noted that the proof of the dependence between the fatigue strength of concrete and the levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} can be found in the literature on the subject [4].

Considering the above, the degradation of two self-compacted concretes damp to a different degree and two ordinary concretes fouled with mineral oil was investigated by the acoustic emission method. The results were used to calculate the fatigue strength of the tested concretes.

2. Description of tests

Two concrete self-compacting concrete mixes (denoted by the letters A and B) differing in their aggregate grading were designed to investigate the effect of damp on the degradation of concrete. The compositions of the concrete mixes are presented in table 1. The maximum aggregate size was 16 mm and 8 mm in respectively mix A and B. The compositions of the mixes had been experimentally determined using the recommendations given in [2,5,6].

Two ordinary concretes (denoted by the letters D and F) differing in their round aggregate grading were selected to investigate the effect of oil fouling on the degradation of concrete [7]. The maximum aggregate size in the mixes was 20 mm. The compositions of the concrete mixes are shown in table 1.

The concrete samples made from the designed mixes were divided into series:

- series A_s and B_s samples were kept in a climatic chamber at an air temperature of +18°C (±1°C) and an air relative humidity of 95% (±5%) for 86 days and then dried at a temperature of 105°C to a constant weight (dry condition),
- series A_k and B_k samples were kept in a climatic chamber at an air temperature of +18°C (±1°C) and an air relative humidity of 95% (±5%) for 90 days (maximum sorptive humidity condition),
- series A_w and B_w samples were kept in a climatic chamber at an air temperature of +18°C (±1°C) and an air relative humidity of 95% (±5%) for 86 days and then they were fully saturated with water,
- series DL and FL samples (the reference samples) were kept in a climatic chamber at an air temperature of +18°C (±1°C) and an air relative humidity of 95% (±5%) for 28 days and then in a laboratory at an air temperature of +18°C (±3°C) and an air relative humidity of 65% for up to 90 days,
- series DO and FO samples were kept in a climatic chamber at an air temperature of +18°C (±1°C) and an air relative humidity of 95% (±5%) and then in a laboratory at an air temperature of +18°C (±3°C) and an air relative humidity of 65% for up to 90 days. Subsequently, the specimens were subjected to fouling with mineral oil Lux10 (commonly used in the machine-building industry). Oil fouling was done as follows. The samples were dried at a temperature of 105°C to a constant weight and then in a cuvette with oil were placed in a partial vacuum chamber inside which the air temperature was 50°C. In the chamber the samples resided under air pressure reduced to 0.006 MPa for about 24 h. During this time the oil level in the cuvette was successively increased. Then the oil-fouled samples were transferred to a laboratory and placed in a vessel with oil in which they resided until test time, i.e. for about 270 days.

Table 1. Compositions of designed concrete mixes and average compressive strengths f_{cm} for concretes made of the mixes.

Concrete mix symbol	Compositions of concrete mixes [kg/m ³]						Water-cement ratio $\frac{W}{C+P}$	Sand content [%]	Average compressive strength f_{cm} after 90 days of curing [MPa]
	Coarse aggregate	Sand	Cement	Fly ash	Water	Superplasticizer			
A	1064	581	355	143	164	4.18	0.34	35.3	59.22
B	896	747	325	109	195	4.25	0.45	45.5	41.82
D	1185	711	321	-	179	-	0.55	37.5	42.30
F	697	1045	350	-	194	-	0.55	60.0	41.90

The degradation process was investigated during the temporary compression of the concrete samples and the recorded acoustic emission descriptors were (among others) events rate N_{ev} and counts sum $\sum N$. The descriptors were used to determine the levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} , in accordance with the criteria defined in [7,8].

3. Test results and their analysis

In order to demonstrate the effect of damp on the degradation of concrete, the A_k , A_s , A_w and B_k , B_s , B_w series samples made of concretes A and B (characterized by a different degree of dampness at the time of testing) were subjected to the axial compression test and investigated by the acoustic emission method.

Figures 1 and 2 show acoustic emission events rate N_{ev} versus compression time for the tested concrete series and also diagrams of relative compressive stress σ_c/f_c versus failure time t , with marked levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} , determined in accordance with the criteria given in [8].

The tests showed that moisture in self-compacted concrete significantly affects the level of crack initiation stress σ_i . The effect of damp is particularly evident in the case of the concrete fully saturated with water. As regards stress σ_{cr} , full saturation of the concrete with water resulted in only slight increase in this stress. It was also found that drying up the concrete has a similar effect on the levels of initiation and critical stress as saturating the concrete with water.

In order to demonstrate the effect of oil fouling on concrete degradation, the samples made of concrete DL, DO, FL and FO were tested.

Figures 3 and 4 show diagrams of AE counts sum versus relative compressive stress σ_c/f_c for the tested concrete series DL, DO, FL and FO, with marked levels of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} , determined in accordance with the criteria given in [7].

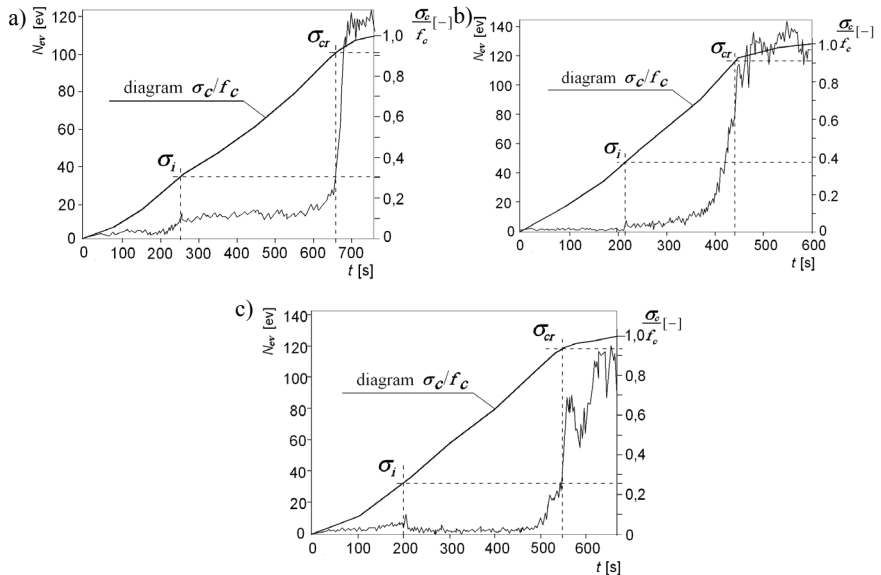


Fig. 1. Recording of AE events rate N_{ev} during failure of concrete: a) A_s , b) A_k , c) A_w , with diagram of relative value of compressive stress σ_c/f_c versus time

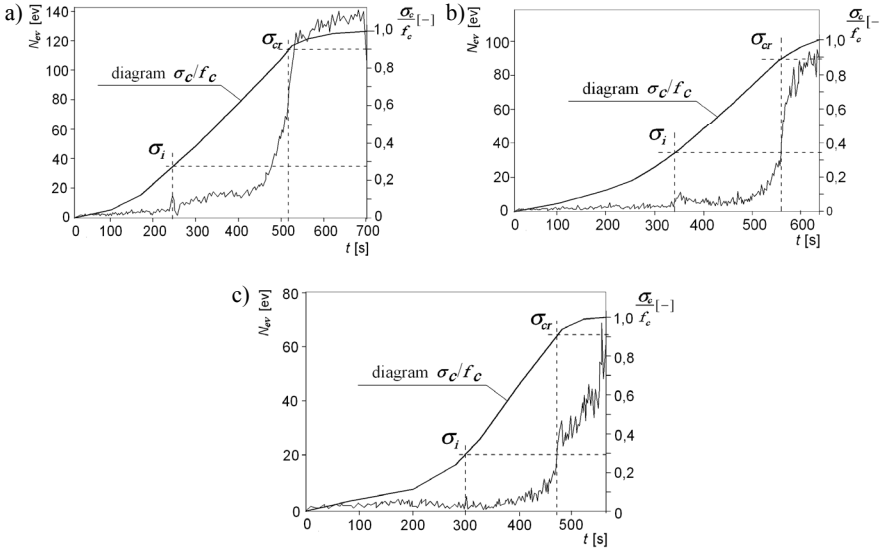


Fig. 2. Recording of AE events rate N_{ev} during failure of concrete: a) B_s , b) B_k , c) B_w , with diagram of relative value of compressive stress σ_c/f_c versus time

The results presented in figures 3 and 4 show that fouling the concrete with oil affects both the level of initiation stress σ_i and that of critical stress σ_{cr} . The level of stress σ_i went down in all the tested series of oil-fouled concretes relative to the level of this stress in the unfouled reference series concretes. A similar trend was observed for critical stress σ_{cr} : a result of fouling the concretes with oil the level of this stress also went down.

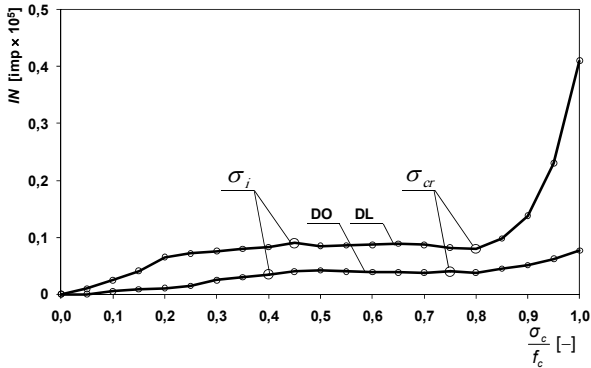


Fig. 3. AE counts increment rate versus relative stress value increment for concrete DL and DO [7]

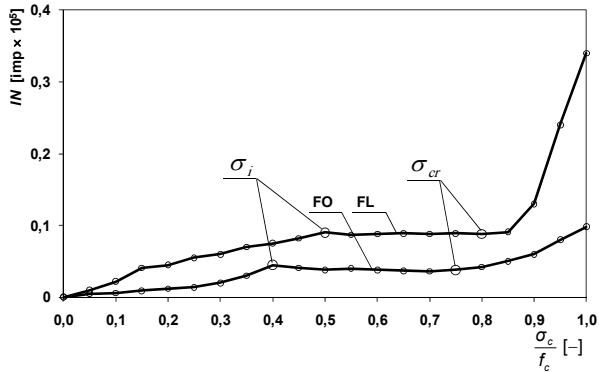


Fig. 4. AE counts increment rate versus relative stress value increment for concrete FL and FO [7]

The relative and absolute values of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} for all the tested concretes are shown in table 2.

Table 2. Relative and absolute values of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} in tested concretes, determined by acoustic emission method.

Concrete series symbol	Stress level values			
	σ_i		σ_{cr}	
	[-]	MPa	[-]	MPa
A _s	031	1836	091	5391
A _k	038	2251	092	5450
A _w	026	1481	093	5297
B _s	030	1195	087	3465
B _k	032	1275	090	3585
B _w	029	961	091	3015
DL	045	1903	080	3384
DO	040	1772	075	3322
FL	050	2095	080	3352
FO	040	1756	076	3336

The tests showed that both damp and fouling with mineral oil affect the stress failure of concrete. The test results were used to calculate the fatigue strength of the concretes.

4. Calculation of fatigue strength of tested concretes

According to [4], the levels of crack initiating stress σ_i and critical stress σ_{cr} in concrete have a bearing on the life and operational safety of the structures made of the concrete which are subjected to dynamic loads.

On the basis of [4] and experimentally determined levels of crack initiating stress σ_i and critical stress σ_{cr} the following relation for calculating the fatigue strength of self-compacting concrete under compression was adopted:

$$f_c^f / f_c = CN^{-A}(1 + B\rho^f \log N)C_f, \quad (1)$$

where:

C – a ratio of dynamic to static strength at a one-time load (in accordance with [4], it was assumed to be equal to 1.16),

ρ^f – a stress ratio,

σ_c^{\min} – a minimum cycle stress,

σ_c^{\max} – a maximum cycle stress,

C_f – a coefficient expressing the effect of the frequency of load changes on fatigue strength,

A, B – coefficients representing concrete structure condition through their dependence on stress σ_i and σ_{cr} .

Stress ratio ρ^f is expressed as:

$$\rho^f = \sigma_c^{\min} / \sigma_c^{\max}, \quad (2)$$

Coefficient C_f can be expressed as:

$$C_f = 1 + 0.07(1 - \rho^f) \log f, \quad (3)$$

where f is a load change frequency [Hz] and coefficients A and B can be calculated from relations (4) and (5)

$$A = 0.008 - 0.118 \log(\sigma_i / f_c), \quad (4)$$

$$B = 0.118(\sigma_{cr} / \sigma_i - 1). \quad (5)$$

Figures 5 and 6 show fatigue strength versus number of load cycles for the tested self-compacted concretes. The fatigue strength was calculated using the values of the stress σ_i and σ_{cr} levels presented in table 2. Similar diagrams for the tested ordinary DO and FO series concretes fouled with oil against those of the reference concretes of series DL and F are shown in figs 7 and 8. The calculations were done assuming stress ratio $\rho^f = 0$ and load change frequency $f = 1$ Hz.

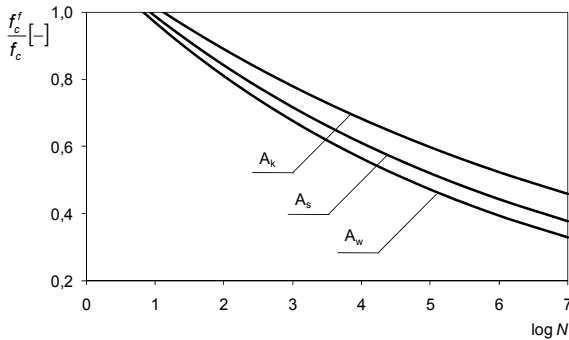


Fig. 5. Calculated fatigue strength of concretes A_s , A_k and A_w versus stress cycles at $\rho^f = 0$ and $f = 1$ Hz.

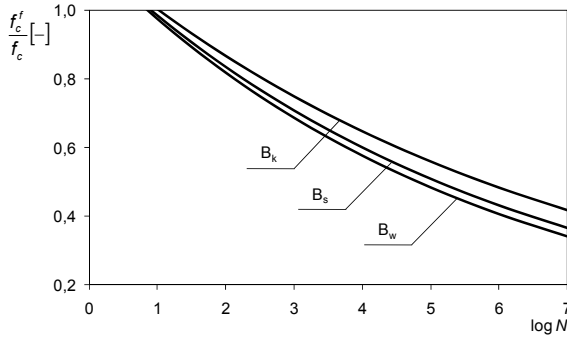


Fig. 6. Calculated fatigue strength of concretes B_s , B_k and B_w versus stress cycles at $\rho^f = 0$ and $f = 1$ Hz.

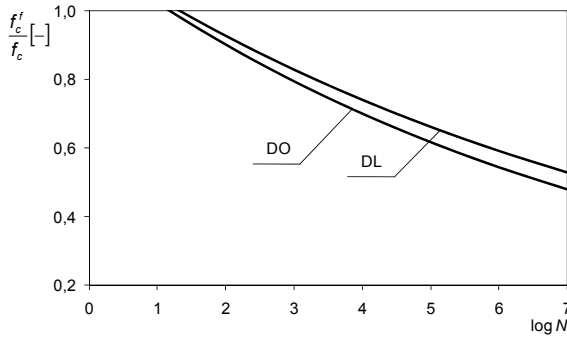


Fig. 7. Calculated fatigue strength of concretes DL and DO versus stress cycles at $\rho^f = 0$ and $f = 1$ Hz.

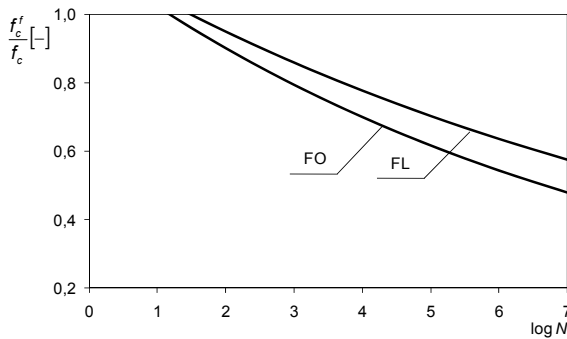


Fig. 8. Calculated fatigue strength of concretes FL and FO versus stress cycles at $\rho^f = 0$ and $f = 1$ Hz.

It is apparent from figures 5-8 that damp and fouling concrete with oil have a significant effect on its fatigue strength. As a result of drying up, damp and oil fouling this strength significantly decreases, which was observed for all the tested concretes. This has significant implications for building practice. For example, a bridge deck slab may be damaged when its water insulation is broken and the slab's self-compacted concrete becomes strongly damp as a result. In the case of ordinary concrete this may happen to, for example, a concrete foundation under an industrial machine from which mineral oil has been leaking and fouling the concrete for a longer period of time.

5. Conclusion

The acoustic emission tests showed that nonmechanical service factors may contribute to degradation of concrete under compressive load. Drying up, damp and oil fouling resulted in lower experimental values of crack initiation stress σ_i and critical stress σ_{cr} .

The analyses showed that the tested concretes markedly differed in their fatigue strength calculated on the basis of the determined levels of stress σ_i and σ_{cr} . The normally ageing concretes were characterized by higher strength than the concretes fully saturated with water or the dried up ones. Also the unfouled concretes showed higher strength in comparison with the ones fouled with mineral oil. This means that damp or oil-fouled structural concrete elements may fail after a fewer number of stress cycles.

References

1. Okamura H., Ouchi M.: Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, April 2003, Japan Concrete Institute, 2003, 5-15.
2. Domone P. L.: Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies Vitt, G.: Crack control with combined reinforcement: From theory into practice, Concrete Engineering International, Cement and Concrete Composites, Vol. 28, No. 2, 2006, 197-208.
3. Hola J.: Experimentally determined effects of technological and service factors on stress-induced destruction of concrete under compression. Engineering Transactions, Vol. 50, No. 4, 2002, 251-265.
4. Furtak K.: Load capacity of normal cross-section of bent reinforced concrete elements subjected of the changing load concerning bridges in particular. [in Polish]. Scientific Papers of Cracow Polytechnic, No. 4, 1985.
5. Li L., Hwang C.: The mixture proportion and property of SCC. Proceeding PRO33 – 3rd International RILEM Symposium: Self-Compacting Concrete. RILEM Publications S.A.R.L., 2003, 525-529.
6. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. EFNARC The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, May 2005. Available from internet: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
7. Hola J.: Initiating and critical stresses and stress failure in concrete under compression [in Polish]. Scientific Papers of Institute of Building Engineering at Wrocław University of Technology No. 76, Monograph Series No. 33, Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław, 2000.
8. Gorzelańczyk T.: The assessment of the failure of self-compacting concretes by acoustic techniques. [In Polish]. PhD dissertation, Reports of Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology, Ser. PRE nr 9, Wrocław, 2007.



OPTIMIZATION OF PZT ACTUATOR/SENSOR ARRAY FOR MONITORING OF AIRCRAFT FUSELAGE PANEL USING ULTRASONIC LAMB WAVES

Radek HÉDL*, Jindřich FINDA*, Girija PARTHASARATHY*

*Honeywell International

Contact e-mail: radek.hedl@honeywell.com

Abstract

The paper deals with design of permanently mounted PZT actuator/sensor array for corrosion damage detection, localization and size evaluation on an Aluminum alloy aircraft fuselage panel. Properties of commercially available PZT actuators are studied in the first part. In particular, frequency tuning capability of the PZTs is especially analyzed. The aim of the analysis is to provide required data for selection of appropriate sensor type for a particular application. As part of the analysis several test measurements were completed. Results of the measurements are presented and discussed in the paper as well. Finally, configuration of the sensor array including sensor array position, type of sensor, and Lamb wave excitation parameters is discussed and proposed.

Key words: fuselage panel, corrosion, Lamb waves, PZT actuator, phased array, optimization

1. Introduction

Ultrasound has been proven as a powerful tool for Non-Destructive Testing (NDT) in many branches of industry [1]. In particular, ultrasonic Lamb waves have been shown as effective means for monitoring structural integrity of plate like structures [2]. Lamb waves are guided elastic waves that can travel in a solid plate with free boundaries at their top and bottom surfaces. During their propagation through the solid plate structure, they form several symmetric and antisymmetric modes related to the plate thickness and acoustic frequency of the waves. The phase velocity of these modes is dependent on frequency and described graphically by a set of dispersion curves. An advantage of Lamb waves is that they can propagate for long distances in plate structures. Moreover, in contrast to the conventional method where inspection of the structure is made point by point, a line is inspected at each position of the transducer. Therefore, Lamb waves provide significant time savings and can form the basis of an approach to actively monitor a plate structures without moving the transducer.

The paper aims at design of PZT actuator/sensor array for in-situ monitoring of corrosion damage on an Aluminum alloy aircraft fuselage panel. Schematic drawing of the panel is depicted in Figure 1. It is a part of L-410 UVP-E airplane which is all-metal high-wing monoplane powered by two turboprop engines. The airplane is certified in the commuter category in accordance with FAR 23 requirements. The panel cut was taken from the rear part of the aircraft fuselage in the area of toilet. The location is

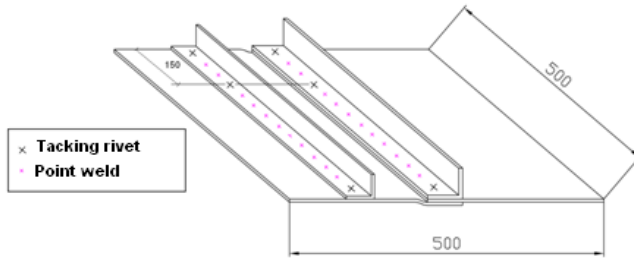


Figure 1 Drawing of the test specimen - L-410 UVP-E fuselage panel (dimensions in millimeters).

exposed to adverse corrosive environment due to leakage of corrosive liquids from the toilet. Moreover, the location is hard to reach for visual or other types of NDT inspection. A series of preliminary tests was conducted separately on the skin plate and stringer under various corrosion conditions to analyze corrosion behavior of basic materials and panel surface protection. It was found that we can expect emergence of corrosion mainly in the contact between fuselage skin and stringers, with the most critical location for emergence of corrosion damage given by the position of the tacking rivets.

2. Frequency Tuning of PZT Sensor/Actuator

Recent development in Structure Health Monitoring (SHM) revealed advantages of small, low weight, and low cost PZT actuators, which can be permanently fixed, integrated, or embedded into the monitored structure [3]. The PZT actuators permanently installed on the structure or even integrated into structure during its fabrication allow periodical or continuous monitoring of critical structural elements which are hard to reach for common inspection NDT techniques. Moreover, the PZT actuators, in contrast to common ultrasonic transducers, can be frequency-tuned to achieve optimal detection conditions for particular structure and defect type [4].

There are specific requirements for use of PZT actuators arising from particular applications. 1. actuator dimensions should be small enough to allow formation of phased arrays; 2. actuator should operate in appropriate frequency range to allow frequency tuning for particular material type and thickness (100-700kHz); 3. cost of the actuator should be reasonable enough for use in phased arrays with large number of elements without possibility of reuse after array installation. Based on these criteria, Noliac's shear plate PZT actuators were selected for the experiments. The actuator properties are summarized in Table 1. These actuators are more efficient in generation

Table 1 Parameters of used Noliac's PZT actuators.

Type	Length [mm]	Width [mm]	Height [mm]	Maximum voltage [V]	Free stroke [μm]	Capacitance [pF]
CSAP01	2	2	0.5	+/- 320	1.5	133
CSAP02	5	5	0.5	+/- 320	1.5	830

of S modes of Lamb waves than A modes. S modes are appropriate for detection of through-the-thickness defects whereas A modes are better for detection of surface defects. Further, S₀ mode is less dispersive in required frequency range and it propagates at higher velocity than A₀ mode so that mode separation in time domain can be utilized.

A model of the Lamb waves tuning mechanism with PZT transducers is described in [4]. The principle of the PZT's frequency tuning is based on the fact that maximum coupling between transducer and investigated structure is achieved when the active PZT's dimension length equals the half wavelength of a particular Lamb wave mode. Since Lamb wave modes wavelengths vary with frequency, the tuning of certain modes at certain frequencies can thus be achieved. Results of the modeling for CSAP01 and CSAP02 actuators on Aluminum plate with 0.8 mm thickness are presented in Figure 2. The theoretical results were experimentally verified. Comparison of predicted and experimental amplitudes for S₀ and A₀ modes generated by CSAP02 actuator on 0.8 mm Al plate is shown in Figure 3. Differences between prediction and experimental data are caused by some assumptions in model design (e.g. ideal bonding between actuator and plate), measuring equipment, and/or measurement assessment. The locations of minima and maxima of the curves are more significant than the exact shape, which are reproduced well in the experimental results.

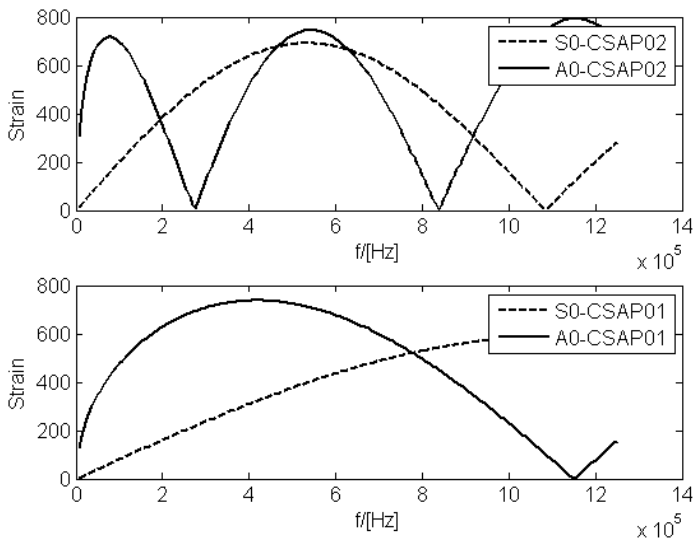


Figure 2 Predicted Lamb wave response of a 0.8 mm aluminum plate under CSAP02 excitation: strain response.

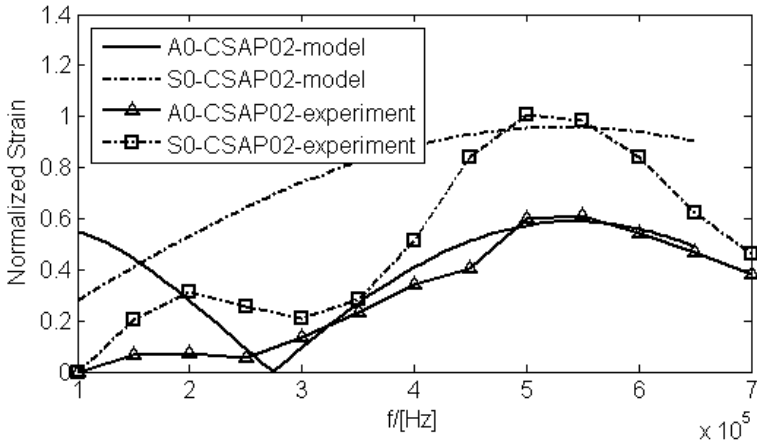


Figure 3 Comparison of theoretical tuning (normalized strain) and experimental data (normalized Volts) for CSAP02, 0.8 mm Aluminum plate.

3. Optimization of Phased Array Sensor

Utilization of phased arrays allows application of advanced digital signal processing algorithms for ultrasonic beam steering and focusing. For our purpose we use Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) and/or Embedded Ultrasonic Structure radar (EUSR) that are both based on well known delay-and-sum approach [5]. Utilization of the phased array together with the advanced signal processing improves signal/noise ratio and spatial resolution of the defect detection system.

The spatial resolution of the ultrasonic defect detection system based on Lamb waves and digital ultrasonic beam steering/focusing using delay-and-sum approach can be expressed by means of the imaging system Point Spread Function (PSF). The PSF can be obtained either experimentally or using a mathematical model. A mathematical model for the PSF estimation which accounts for position variability can be found in [6]. Using the model the position variable PSF is defined as

$$I(r_s, r_0) = \int_{-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}} \frac{x(u) e^{i2\pi fu}}{|r_s - r_0|^2} dr_s \quad (1)$$

$$u = \frac{2}{c} (|r_s - r| - |r_s - r_0|) \quad (2)$$

where $x(u)$ is ultrasound pulse envelope, A is transducer aperture, f ultrasound pulse frequency, c ultrasound velocity for investigated material, r is position variable for the PSF evaluation, r_0 is position vector of the center of the position variable PSF and r_s represents position vector of single transducer elements. Based on the mathematical

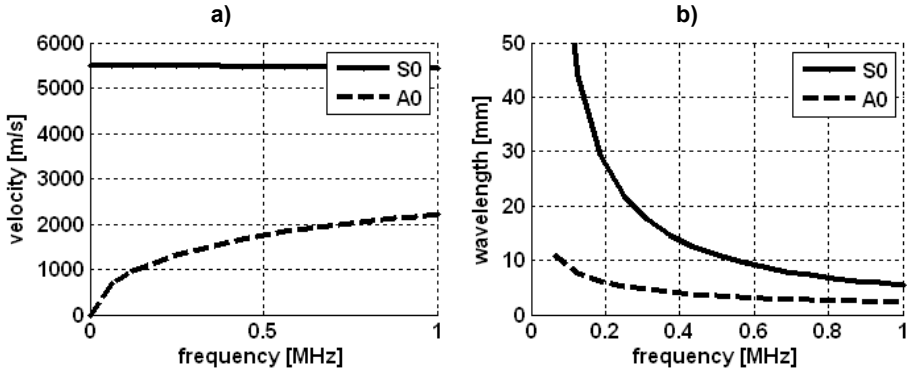


Figure 4 Dispersion curves for Aluminum 2024-T4 (thickness 0.8 mm): a) detail of A0 and S0 modes; b) variability of A0 and S0 modes wavelength with wave frequency.

model, we can say that the PSF is given by wavelength of the Lamb wave in the interrogated material, and geometrical configuration of the phased array sensor elements. Generally, higher ultrasonic pulse frequency and closer elements in the array result in better spatial resolution. However, due to dispersion properties of Lamb waves the situation is a little bit complicated. The wave velocity of Lamb waves vary with its frequency. The relationship is given by so called dispersion curves, which describe the dependence of the ultrasonic wave velocity on the wave frequency-plate thickness product for individual Lamb wave modes. An example of dispersion curves for A0 and S0 modes for Aluminum 2024-T4 plate of 0.8 mm thickness is shown in the Figure 4a). For every wave frequency at least two (A0 and S0) modes are excited and with increasing wave frequency number of modes increases. For particular mode there are areas which are less or more dispersive. Figure 4b) shows variability of wave wavelength with wave frequency for the modes.

Excitation pulse main frequency, ultrasonic pulse wavelength and actuator spacing should be taken into account to control the spatial resolution. The shear plate actuators we are using for the Lamb wave generation produce dominant S modes. Therefore, properties of S modes were considered for determination of the above mentioned parameters. In particular, S0 mode was used in our application. First, pitch between individual actuators was limited by their geometrical dimensions, which are 2 x 2 mm for SCAP01, and 5 x 5 mm for CSAP02. Regarding that, it was reasonable to define minimal pitch equal to 5 mm for CSAP01, and 10 mm for CSAP02, respectively. By contrast, the pitch should be smaller than one half of the ultrasonic pulse wavelength to prevent emergence of false artifacts in resulting ultrasonic image. This requirement gave minimal value of the wavelength for particular sensor pitch, which was 10 mm for 5 mm pitch and 20 mm for 10 mm pitch, respectively. Using dispersion curve for S0 mode (Figure 4b) maximal mean frequency of excitation pulse was defined for both the values of inter-element pitch. The limiting frequency was 550 kHz for 5 mm pitch, and 280 kHz for 10 mm pitch. Finally, the pulse excitation frequency was adjusted with regard to Lamb wave response as a function of the pulse frequency, which is shown in Figure 2,

Table 2 Selected combinations of parameters for Lamb wave excitation.

Actuator	Pitch [mm]	Wavelength [mm]	Frequency [kHz]
CSAP01	5	>10	<550 (450 or 250 optimal)
CSAP01	10	>20	<280 (250 optimal)
CSAP02	10	>20	<280 (280 optimal)

or possibly Figure 3 including experimental results. Selected excitation pulse frequency was a trade-off between maximal response for S0 mode and maximal separation of S0 and A0 modes, i.e. maximal S0/A0 amplitudes ratio. Applicable combinations of actuator type, inter-element pitch, ultrasonic pulse wavelength, and excitation pulse frequency are summarized in Table 2.

The last aspect which needed to be set was spatial distribution of the individual actuators in the phased array. The issue was thoroughly analyzed in [7]. For this work, a 2D arrangement of the actuators in square array of 5 x 5 actuators was selected. Such an array arrangement should provide good beam steering capability with reasonable number of actuators, thereby with acceptable number of signals for the following digital processing.

Results of modeling of the PSF for measurement configurations from Table 2 are shown in Figure 5. The spatial distribution of the PSF size is represented as full width at half maximum (FWHM). Asterisks (**) in the figures indicate locations at which the PSFs are calculated, i.e. centers of the PSFs.

4. Results and Conclusions

Phased sensor array configuration for monitoring of aircraft fuselage panel was designed in the paper. The paper deals with selection of the individual sensor/actuator type, draft of optimal parameters of the actuator excitation pulse, and geometrical arrangement of the sensor/actuators in the array.

Analysis of properties of a single sensor PZT element was performed in the first part of the paper. A mathematical model was used for modeling of the sensor efficiency in generation of A0 and S0 Lamb wave modes in dependence on the excitation pulse main frequency. Results provided by the theoretical model were verified by experimental measurements on a simple plate. The model allowed identification of excitation frequency for particular sensor and material of the monitored panel which is optimal from the point of view of separation of individual Lamb wave modes. Excitation of the sensor using the optimal frequency results in generation of just one dominant Lamb wave mode which is beneficial for further advanced processing of the ultrasound signal. Further, appropriate sensor/actuator layout was proposed with regard to the actuator excitation frequency identified in the previous step. Several layouts were proposed and resulting PSF describing process of ultrasound image formation by means of delay-and-sum approach was mathematically modeled.

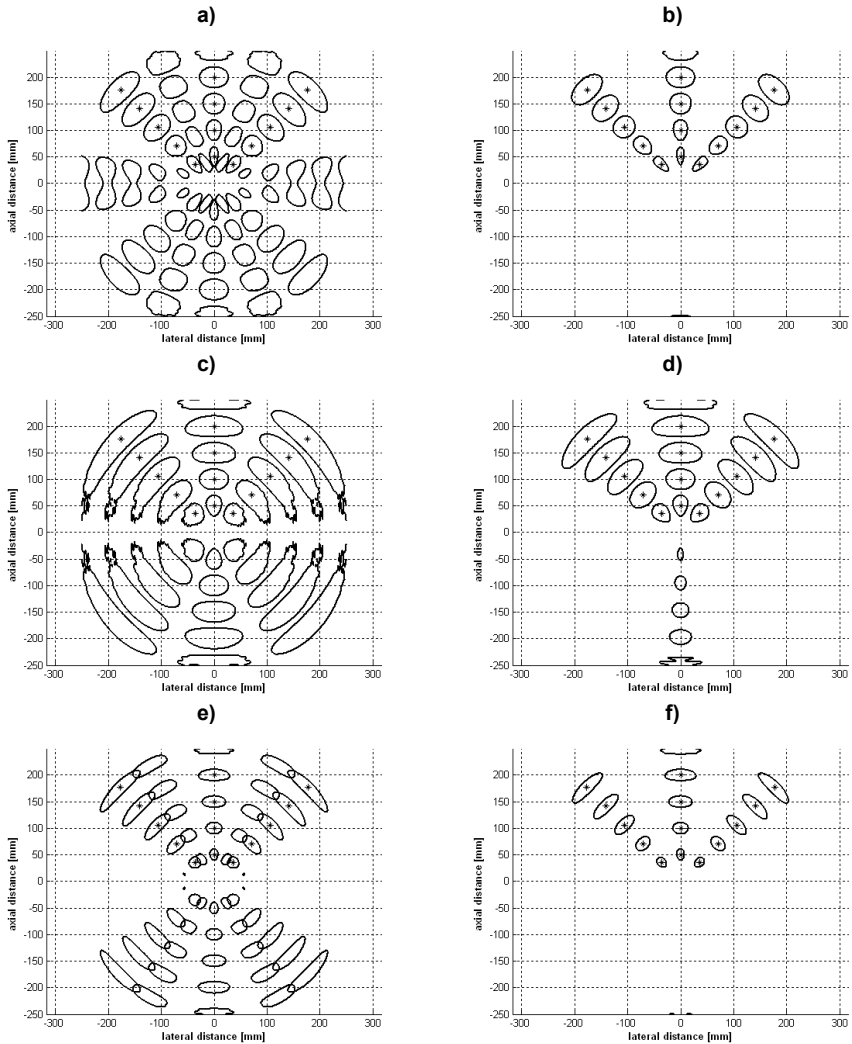


Figure 5 Spatial distribution of the PSF: a) pitch = 10mm, pulse frequency = 250kHz, 1x5 phased array; b) pitch = 10mm, pulse frequency = 250kHz, 5x5 phased array; c) pitch = 5mm, pulse frequency = 250kHz, 1x5 phased array; d) pitch = 5mm, pulse frequency = 250kHz, 5x5 phased array; e) pitch = 5mm, pulse frequency = 450kHz, 1x5 phased array; f) pitch = 5mm, pulse frequency = 450kHz, 5x5 phased array.

Results of the modeling are shown in the Figure 5. The presented results demonstrate shortcomings of the 1D sensors arrangement in comparison to 2D sensor layout. First, it is not possible to recognize whether defect is located in front of or behind the sensor array. Second, focusing capability of 1D sensor array quickly deteriorates with steering angle diverging from the sensor array main axis. Interplay between sensor spacing, pulse excitation frequency, and spatial resolution of the processed ultrasound image can be observed as well. It is obvious that configuration with 5 mm inter-element pitch (fig 5 c and d) provides worse steering/focusing capability than the configuration with 10 mm inter-element pitch (fig 5 a and b) at the same pulse frequency. The worsening is due to smaller aperture of the phased array when the same number of the sensors/actuators is used as in the case of the larger pitch. Finally, the same 5 mm pitch was used but with higher excitation pulse frequency, i.e. shorter wavelength. We can conclude that this arrangement provides similar spatial resolution in the radial direction to the ultrasonic beam propagation as the one with 10 mm pitch. However, improvement in the spatial resolution in the axial direction – direction parallel to the beam propagation – can be observed.

5. References

- [1] Krautkraemer, J., Krautkraemer, H. 1990. *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th ed., Springer-Verlag, New York.
- [2] Viktorov, I. A. 1967. *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York.
- [3] Giurgiutiu, V., Zagrai, A. 2000. "Characterization of piezoelectric wafer active sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11(12), pp. 959–976.
- [4] Giurgiutiu, V. 2005. "Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(4), pp. 291–305.
- [5] Hedl, R., Parthasarathy, G., Gordon, G. A., "Comparison of SAFT and EUSR Techniques for Linear Array Sensor," Procs. of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, 2009, pp. 745-752.
- [6] Thomson, R. N., 1984. "Transverse and longitudinal resolution of the synthetic aperture focusing technique", *Ultrasonics*, 22, pp. 9-15.
- [7] Yu, I., Giurgiutiu, V., Kendall, J.R. ,Sensors and smart structures, technologies for civil, mechanical, and aerospace systems, San Diego CA , ETATS-UNIS (2007) 2007, vol. 6529 (2), pp. 652939.1-652939.12.

6. Acknowledgement

The presented work has been supported by the Ministry of Industry and Trade of Czech Republic by grant project no. FR-T11//274 under framework program TIP.

Radek Hédli, European Aerospace AT, Honeywell International, Brno, Czech Republic.
Jindřich Finda, European Aerospace AT, Honeywell International, Brno, Czech Republic.
Girija Parthasarathy, Knowledge Services, Honeywell International, Golden Valley (MN), USA



NONDESTRUCTIVE TESTS OF DAMP MASONRY WALLS IN BUILDINGS OF NEW RESIDENTIAL COMPLEX

Anna HOLA, Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

ABSTRACT

For several years now there has been a sharp increase in demand for new small residential buildings, particularly ones located on the outskirts of cities or at a small distance from city limits. The demand is being satisfied by various building firms, but many of the houses are of poor quality and often built not in accordance with good building practice. As a result, they have many defects which become apparent usually after the houses have been accepted for service.

This paper presents a case study of one of such defects, i.e. excessive dampness of ceramic masonry walls in a newly built residential complex. The defect became apparent two years after the buildings had been put into service. As the first step towards solving the problem the damp walls were nondestructively tested.

The results of the nondestructive tests of the damp ground floor walls in the investigated complex of residential buildings were used to calculate the amount of water accumulated in the masonry in order to select a proper method of drying (in this case, microwave drying) the walls and design effective damp insulation.

Key words: *nondestructive tests, buildings, brick walls, dampness, moisture content*

1. INTRODUCTION

For several years now there has been a sharp increase in demand for new small residential buildings, particularly ones located on the outskirts of cities or at a small distance from city limits. The demand is being satisfied by various building firms, but many of the houses are of poor quality and often built not in accordance with good building practice. As a result, they have many defects which become apparent usually after the houses have been accepted for service.

This paper presents a case study of one of such defects, i.e. excessive dampness of ceramic masonry walls in a newly built residential complex. The defect became apparent two years after the buildings had been put into service. As the first step towards solving the problem the damp walls were nondestructively tested.

2. BRIEF DESCRIPTION OF TESTED OBJECT

The object of the tests were the damp masonry walls of a complex of new slab-on-grade semi-detached residential buildings which had been put into service two years before. The location plan of the housing development is shown in fig. 1.

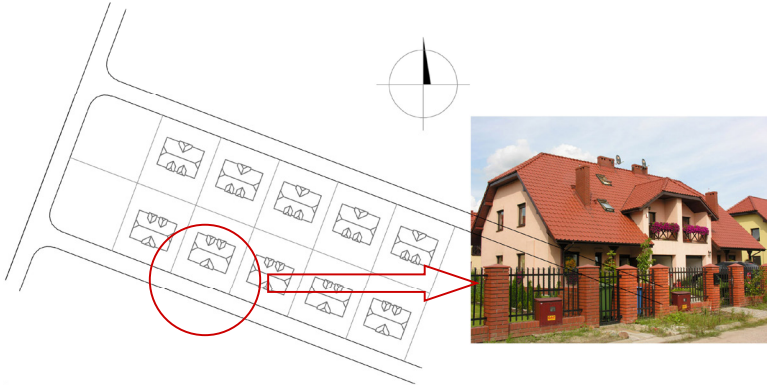


Fig. 1. Location plan of residential buildings with view of one of them.

It was mainly the ground storey walls near the concrete floor topping which were excessively damp. The walls were made from 24 cm thick hollow brick units and externally thermally insulated with a 10 cm thick Styrofoam layer. The foundation walls situated below were made from 38 cm thick concrete masonry units and rested on concrete strip footings. In all the investigated buildings the concrete floor topping is 10-30 cm above the ground which surrounds the building.

A close inspection of the buildings and test pits showed similar defects in the ground floor walls near the floor topping. The defects were as follows:

- the external and internal masonry walls in the near-floor topping zone of the ground floor were affected by damp (fig. 2). Damp extended to about 50 cm above the floor topping. Signs of damp were most visible in a 15 cm high zone contiguous with the floor and less visible above it. In many sections of the walls at the wet/dry surface boundary (30-50 cm above the floor topping) crystallized salts were visible (fig. 2);
- mildew and fungi grew on the damp masonry walls in many of the ground floor rooms (fig. 3);



Fig. 2. Exemplary view of damp external walls.



Fig. 3. Exemplary view of damp and infested with rot ground floor walls.

- test pits showed that there was practically no vertical damp-proofing of the foundation walls. The surface of the foundation walls was merely brushed with a liquid agent strongly diluted with solvent (fig. 4);
- the ground floor walls had no horizontal damp-proofing;
- the groundwater table in the surrounding terrain is merely 40 cm below the ground level.



Fig. 4. Test pit revealing damp insulation coating.

Considering the high groundwater level, it is amazing that the buildings had not been damp-proofed horizontally and that vertical damp-proofing in the form of a coating had been applied.

The ground floor walls in all the buildings were damp tested. The aim of the tests was to determine the moisture content by wt of the ceramic masonry along the perimeter of the walls up to the height of visible damp. This was needed to estimate the amount of moisture in the masonry, adopt the proper method of drying the walls and design and apply effective damp insulation.

3. TESTS AND THEIR RESULTS

The dielectric method was used to nondestructively test the damp walls [3]. For this purpose a UNI 1 meter with an active ball probe (fig. 5) was employed.

Masonry samples were taken randomly from the walls of all the buildings and dried at a temperature of 105°C to a constant weight. The weigher-dryer shown in fig. 5 was used to dry the samples. The correlation between dielectric meter indication X and moisture content by wt U_m of the tested walls was determined.

The masonry moisture content by wt was calculated from this formula:

$$U_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

where: m_w – the weight of the damp sample [g],
 m_s – the weight of the dry sample [g].



Fig. 5. Test equipment: a) dielectric meter UNI 1 with active ball probe B50, b) weigher-dryer.

The correlation, determined by the least squares method, has the form:

$$U_m = 0.13 \times X - 2.35 \quad (2)$$

Then the damp walls in all the buildings were nondestructively tested by means of the dielectric meter and the above correlation was used to calculate moisture content by wt U_m for the particular measuring points (there were several hundred of them). Since the results were similar for all the tested buildings, they are presented for one building in figs 6 and 7.

In the Polish literature on the subject [1, 2] wall damp with regard to moisture content by wt U_m is classified as follows:

- $U_m = 0 \div 3$ % - walls with allowable moisture content,
- $U_m = 3 \div 5$ % - walls with elevated moisture content,
- $U_m = 5 \div 8$ % - medium damp walls,
- $U_m = 8 \div 12$ % - highly damp walls,
- $U_m > 12$ % - wet walls.

The tests showed that the moisture content by wt of the ground floor walls in the near-floor topping zone in all the buildings exceeded the allowable level specified in the literature. In many places the walls were highly damp and wet.

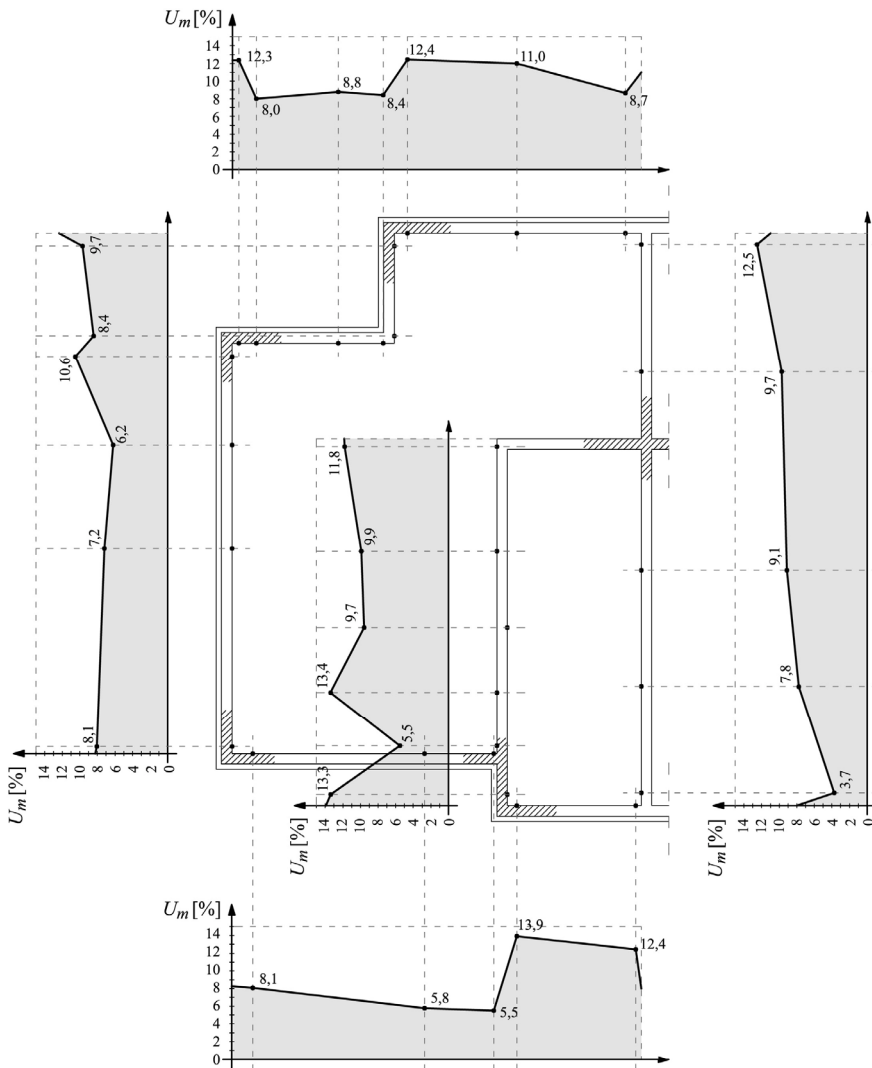


Fig. 6. Moisture content by wt U_m in masonry in ground floor walls of one of tested residential buildings, determined by nondestructive method at height of 5 cm above floor topping.

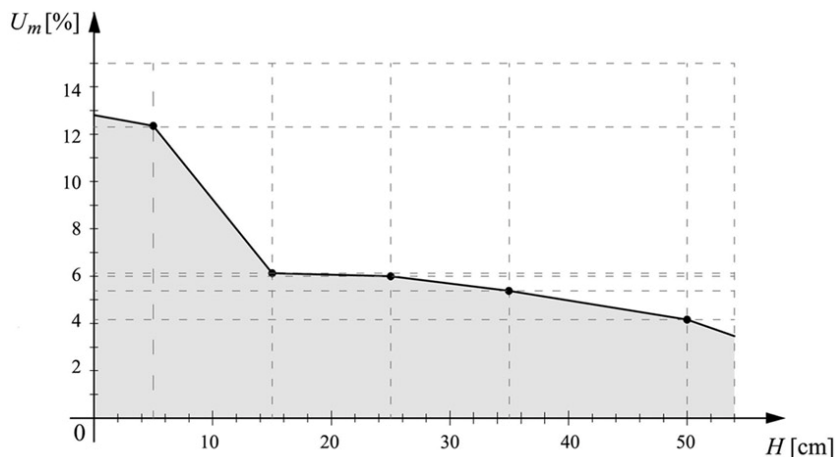


Fig. 7. Typical distributions of moisture content by wt in masonry in ground floor walls at height of 0+50 above floor topping level.

6. CONCLUSIONS

1. Evident damp and infestation with fungi of the walls near the floor topping on the ground floor was found in the complex of new slab-on-grade semi-detached residential buildings. The damp occurred along the whole perimeter of the walls up to about 50 cm above the floor topping. In many walls, sections of the walls were infested with fungi. The main cause of the excessive damp was found to be the lack of horizontal damp insulation and the improper material used for the vertical damp insulation.
2. The nondestructive testing by the dielectric method showed that the moisture content by wt in the ceramic masonry from which the walls of all the buildings were made ranged from 5 to 15%. The highest moisture content occurred in the 15 cm wide near-floor topping zone of the walls. This means that the allowable moisture content by wt level specified in the literature on the subject was exceeded and the walls were classified as wet and highly damp.
3. The results of the nondestructive tests of the damp ground floor walls in the investigated complex of residential buildings were used to calculate the amount of water accumulated in the masonry in order to select a proper method of drying (in this case, microwave drying) the walls and design effective damp insulation.

REFERENCES

1. Hoła J., Matkowski Z., Causes and effects of excessive damp of brick walls, using as example historic buildings (in Polish), Materiały Budowlane No. 3/2009, pp. 14-17.

2. Hoła J., Matkowski Z., Selected problems relating to anti-damp protection of walls in existing masonry buildings (in Polish), Scientific-Technical Conference on Structural Failures, Szczecin-Międzyzdroje, 2009.
3. Hoła J., Sikora J., et al., New tomographic method of brickwork damp identification. Wrocław University of Technology Publishing House, Wrocław, 2010.



COMPREHENSIVE NONDESTRUCTIVE WAY OF IDENTIFYING DELAMINATIONS IN CONCRETE FLOOR TOPPINGS WITH LARGE SURFACE AREA

Jerzy HOŁA, Lukasz SADOWSKI, Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

ABSTRACT

In the civil engineering industry before floor toppings are accepted for service the semi-nondestructive pull-off method is usually used for testing and detecting any areas in which delamination occurs. In the authors' opinion for the precise location of floor topping areas in which delamination occurred at the topping/concrete substrate interface it is recommended to use the combination of two modern nondestructive acoustic test methods, i.e. the impulse-response method and the impact-echo method. In the following article a procedure for the nondestructive detection and identification of delaminations in concrete floor toppings with a large surface area by means of the combined impulse-response and impact-echo methods has been proposed.

1. INTRODUCTION

The durability of a concrete floor topping is to a large degree determined by its adhesion to the concrete substrate. Therefore before floor toppings (particularly large and heavily loaded ones) are accepted for service they are tested to detect any areas in which delamination occurs. The seminondestructive pull-off method is usually used for this purpose. The method consists in drilling a grid of ϕ 50 mm boreholes in the floor topping and then pulling them off from the substrate [1, 2]. If the measured pull-off force is equal to zero, this indicates delamination in the tested place.

The effectiveness of the pull-off method in such tests significantly depends on the number of boreholes. In order to precisely determine the size of the defective area and its boundaries for repair planning purposes, the number of boreholes (test points) should be increased. But this results in higher costs of testing. Moreover, the places where boreholes were drilled need to be repaired. The drawbacks are particularly evident when floor toppings with a large surface area (in the order of thousands of square meters) are tested.

In the authors' opinion it is worth employing nondestructive methods to test floor topplings, particularly the ones covering a large surface area. For the precise location of floor topping areas in which delamination occurred at the topping/concrete substrate interface it is recommended to use the combination of two modern nondestructive acoustic test methods, i.e. the impulse-response method and the impact-echo method [3-5].

The impulse-response method involves exciting an elastic wave in the tested element by striking it with a calibrated rubber-ended hammer [6]. The signal of the elastic wave propagating in the element is registered graphically by a geophone and simultaneously amplified by an amplifier. The registered signals are then processed using a dedicated software installed on a laptop (fig. 1a).

The impact-echo method involves exciting an elastic wave in the tested element by means of a special excitor in the shape of a ball. The test kit includes measuring heads with exciters in the form a set of balls differing in their diameter and a laptop with a dedicated software enabling the graphical recording of the image of the elastic wave propagating in the tested element [7].

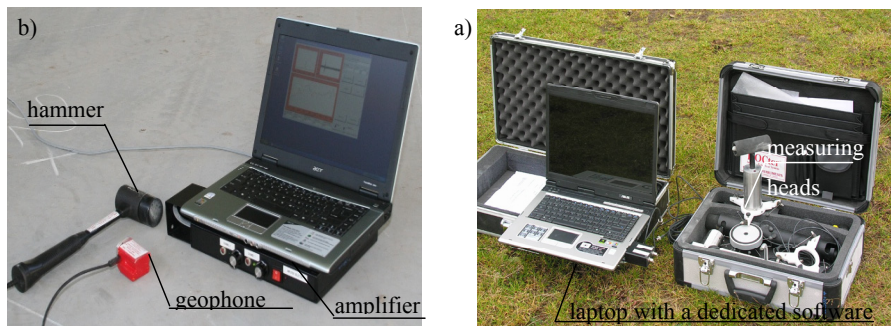


Fig. 1. Modern acoustic methods: a) impulse-response test kit, b) impact-echo test kit.

On the basis of their experience the authors can say that the nondestructive impulse-response method and the impact-echo method complement each other and when used jointly are highly suitable for detecting and identifying delaminations, particularly in floor topplings with a large surface area [8].

Considering the above, a procedure for the nondestructive detection and identification of delaminations in concrete floor topplings with a large surface area by means of the combined impulse-response and impact-echo methods is proposed.

2. PROCEDURE FOR NONDESTRUCTIVE IDENTIFICATION OF DELAMINATIONS

The procedure for the nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with a large surface area by means of the combined acoustic impulse-response and impact-echo methods is presented graphically and described in figs 2 and 3.

The nondestructive identification of delaminations is done in two stages.

In the first stage (shown in fig. 2) the floor topping areas with no adhesion at the topping/substrate interface are approximately identified. This is done using the impulse-response method. For this purpose a grid of measuring points spaced at every 1000 mm (keeping a minimum distance of 500 mm from the edge) is marked on the floor topping to be tested. If the latter's surface area is considerable, a larger spacing of measuring points should be adopted. The test can be automated by mounting the equipment on a special scanner.

Then an elastic wave is excited in each point of the grid by means of the calibrated hammer and after each excitation the value of force F excited by the hammer, the diagram of elastic wave velocity w and the diagram of mobility N are analyzed.

If the results are satisfactory, they need to be processed by the dedicated software. As a result, the values of the characteristic parameters: average mobility N_{av} , stiffness K_d , mobility slope M_p , mobility times mobility slope $N_{av} \cdot M_p$ and voids index w are obtained for each point of the grid. The parameter values are used to draw maps of their distribution on the surface. By closely examining the maps one can approximately identify areas in which delamination takes place.

In the second stage of the test, the defective area (its boundaries) is precisely identified (fig. 3). This is done using the impact-echo method. First a grid of measuring points with a spacing 100 x 100 mm is marked on the area approximately identified in stage 1. Then in each of the points an elastic wave is excited by means of the exciter and the amplitude-time spectrum is registered. Subsequently, the spectrum is converted into an amplitude-frequency spectrum by means of the dedicated software using a fast Fourier transform algorithm. Finally, the amplitude-frequency spectrum obtained for each measuring point is examined to determine whether a delamination is present.

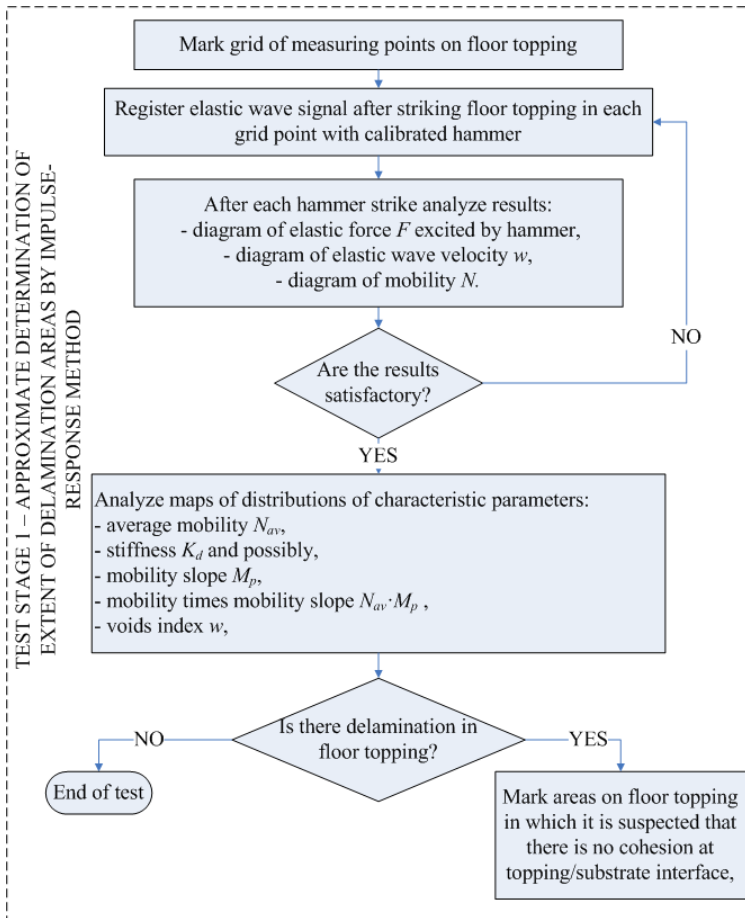


Fig. 2. Procedure for identifying delaminations in concrete floor topping by acoustic methods: impulse-response method and impact-echo method – stage 1.

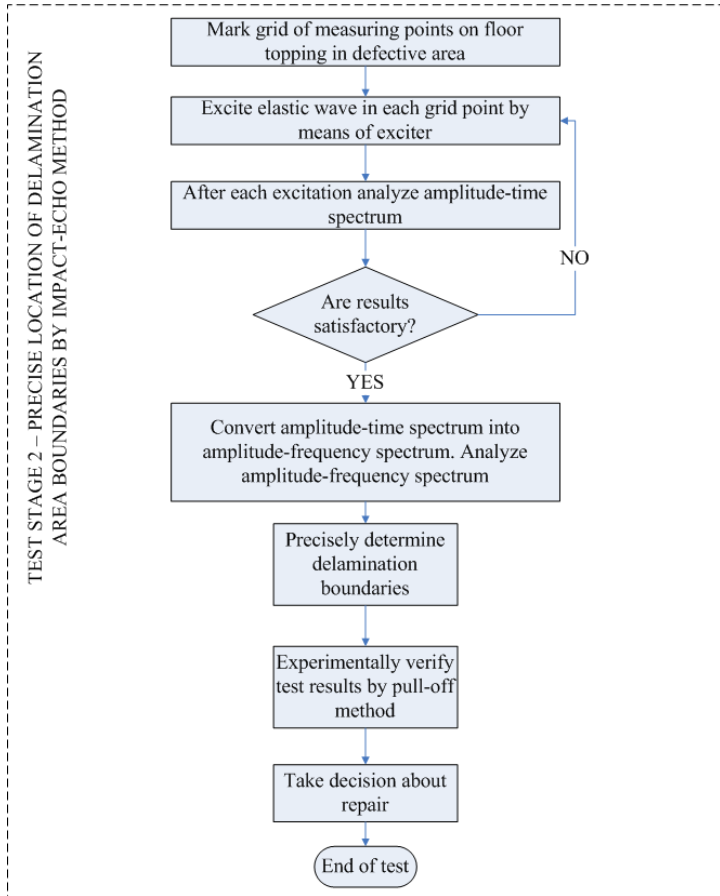


Fig. 3. Procedure for nondestructive identification of delamination in concrete floor topping by impulse response method and impact echo method – stage 2.

3. CONCLUSION

A procedure for the nondestructive identification of delaminations in concrete floor topping with a large surface by means of combined acoustic methods, i.e. the impulse-response method and the impact-echo method has been presented.

The procedure consists of two stages. In stage 1 the floor topping is tested by the impulse-response method to approximately identify the area where delaminations occur. In stage 2 the floor topping is tested by the impact-echo method to precisely identify the boundaries of the area with delaminations.

4. LITERATURE

- [1] ASTM D7234 – 05, Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.
- [2] EN 12504-3:2006, Testing concrete in structures, Part 3: Nondestructive tests, Determination of pull-off force (in Polish).
- [3] A. Davis, The non-destructive impulse response test in North America: 1985–2001, *NDT&E International*, 36 (2003) 185-193.
- [4] M. Sansalone, W. Streett, *Impact-echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, 1997.
- [5] American Concrete Institute Report ACI 228.2R-98, *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 1998.
- [6] N. Ottosen, M. Ristinmaa, A. Davis, Theoretical interpretation of impulse response tests of embedded concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004.
- [7] A. Garbacz, Non-destructive assesment of repair efficiency with impact-echo and ultrasonic methods - an overview. *Concrete Repair, Rahabilitation and Retrofitting – Alexander*, 2006.
- [8] J. Hola, L. Sadowski, K. Schabowicz, Nondestructive evaluation of the concrete floor quality using impulse response method and impact-echo method, *e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, 14 (2009) 55-62.



DETECTION OF DAMAGE OF THE AUTOMOBILE GEARBOX

DETEKCE POŠKOZENÍ AUTOMOBILOVÉ PŘEVODOVKY

Filip HORT, František VLAŠIC, Pavel MAZAL, Ivan MAZŮREK

Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav konstruování
Contact: mazal@fme.vutbr.cz

Abstract

This contribution presents basic information about the experiment focused on identification of damage of the automobile gearbox (Škoda Fabia) with usage of acoustic emission method. The experiment was implemented in the test room of Institute of Machine and Industrial Design of BUT. It consisted of measuring of signal of an intact and a damaged gearbox during different functional conditions. In the gearbox the needle bearing and tooth wheel in fifth speed gear was artificially damaged. The goal of this experiment was to compare the records of measurement of noise emission with acoustic emission signal and level of vibration. Simultaneously the temperature of gear housing was measured. In article the first measurements that show the suitability of the chosen methodology for testing are presented.

Key words: *acoustic emission, gearbox, noise emission, vibration*

Abstrakt

V příspěvku je podána základní informace o průběhu experimentu zaměřeného na identifikaci poškození automobilové převodovky Škody Fabia s využitím metody akustické emise. Experiment probíhal v laboratoři Ústavu konstruování VUT v Brně a spočíval v měření signálu z nepoškozené a poškozené převodovky za různých provozních podmínek. Na převodovce bylo uměle poškozeno ozubené kolo na 5 rychlostním stupni a jehlové ložisko volnoběhu. Cílem experimentu bylo porovnat výsledky měření hlukové emise převodovky se záznamem signálu akustické emise a hladinou vibrací. Současně byla měřena teplota na skříní. V článku jsou prezentovány první výsledky měření, které ukazují na vhodnost zvolené metodiky zkoušení.

Klíčová slova: *akustická emise, převodovka, hluková emise, vibrace*

1) Úvod do problematiky

Pojem akustické emise (AE) a její aplikace je rozšířen již do mnoha vědních oborů a průmyslových aplikací. Citlivost této metody je využívána při odhalování počátků poškození materiálových struktur, mimo jiné také při vysokocyklových zkouškách únavy materiálu. Zde jsou její možnosti podrobeny zkoumání, zda je schopna odhalit přítomnost nevratných dějů, které se v materiálu odehrávají při jeho cyklickém namáhání. To mohou být procesy jako: pohyb dislokací, změna struktur v materiálu, šíření mikrotrhlin apod. [1]. Akustická emise a její možnosti jsou zkoumány také v oblasti vnějšího poškození materiálu, zde se jedná zejména o detekci počátku vzniku únavových poškození jako je pitting, spalling, či tření povrchů [2].

Detekce poškození na převodových ústrojích je velice komplikovaná úloha a její obtížnost roste s počtem prvků, jež jsou v převodovém ústrojí obsaženy. Každý prvek (rozumějme:

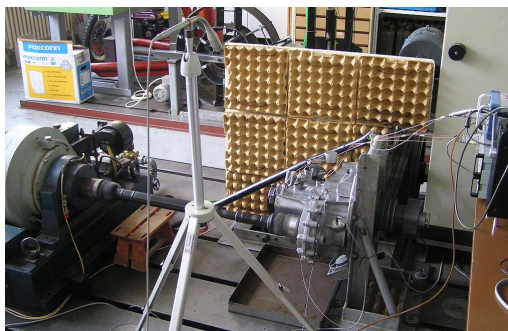
kolo, pastorek, ložisko, ...) si s sebou nese vlastní kinematické frekvence, jejich násobky a mění celkovou tuhost soustavy a její odezvu na poškození. Za účelem detekování rozsahu poškození převodových ústrojí se používají různé metodické přístupy a měření. Mohou jimi být například měření: hlukové emise mikrofonom, hladiny vibrací, použití metody AE, či měření teploty oleje (na vhodné části skříně) použitím pyrometru. Albers a kol. [3] se zabývali porovnáním signálů získaných snímači AE a laserovým vibrometrem. Poznatkem experimentu bylo zjištění, že společná frekvenční pásma získaná z měření je možné vzhledem ke stálosti citlivosti jednotlivých metod porovnávat pouze v úzkém pásmu, přibližně (20 – 60) kHz. Další autoři [4] se ve svém článku zabývali monitorováním poškození převodového ústrojí na modelové čelní převodovce následujícími metodami. Měřením vibrační hladiny signálu, měřením AE v podobě r.m.s, energie signálu a současně také zaznamenáváním hodnoty teploty. Autoři předešlých prací konstatovali vhodnost použití více metod při snímání a vyhodnocování poškození převodového ústrojí, ačkoli se jejich vzájemné porovnání většinou odehrává pouze v malých mezích vyhodnocených dat.

Analýzami převodových ústrojí se stále zabývá mnoho odborníků a ve většině případů je problematika soustředěna pouze na jednodušší převodové skříně s jedním převodovým stupněm a čelním typem ozubení kola a pastorku. Na těchto modelech bývá jednodušší umístění snímačů AE do bližší oblasti vytvořeného poškození zubů soukolí. Složitější je problematika měření na klasické automobilové převodové skříně, kde lze snímače umístit pouze na těleso skříně.

2) Experimentální zařízení a metodika zkoušek

Experimentální zařízení

Testovací stanice (obr.1) je vybavena panelem pro kompletní obsluhu všech jejích částí. Panel určuje vstupní otáčky převodovky poháněné elektrickým motorem, dále řídí vířivý dynamometr, který slouží jako brzda a také stanovuje zatěžující moment převody. Pro testování byla vybrána standardní převodová automobilová skříně značky Škoda Fabia s typovým označením MQ200 – EYX 03060. Předmětem zkoumání bylo poškození evolventního kola se šikmými zuby. Převodový olej o objemu 1,8 l nesl označení Gyrol 75W. Na obr. č. 1 je vidět část sestavy během zkoušení, převodová skříně je umístěna v pravé části, motor je umístěn za převodovkou, mezi převodovkou a motorem je absorpční přepážka a vlevo na obrázku je umístěn dynamometr.



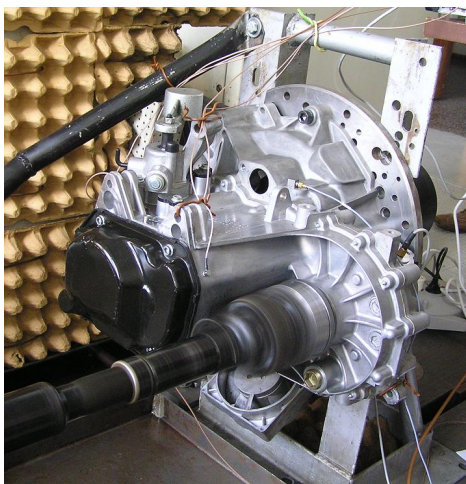
Obr. 1 Mechanická část zkušební stanice pro zkoušení převodovek

Fig. 1 Mechanical part of test stand for gear boxes testing.

Použitá měřicí aparatura

Snímání hlukové emise probíhalo mikrofonem umístěným na stativu ve vzdálenosti 1 m od převodovky. Hladina vibrací byla snímána piezoelektrickým snímačem umístěným na vrchní straně skříně. Teplota byla zaznamenávána pyrometrem zaměřeným na střed plechového víka 5. Převodového stupně. Hluk, vibrace a teplotu zaznamenával analyzátor Dewetron s následujícími parametry: mikrofon (1 V/10 kHz), vibrace (0 .. 250 m/s²; 10 kHz a teplotu (1 V/10 Hz). Pro měření signálu AE bylo využito analyzátoru Dakel XEDO se čtyřmi kanály. Snímače AE měly označení MIDI a jejich frekvenční charakteristika je dostupná na webových stránkách společnosti DAKEL, současně byly použity i předzesilovače od stejné firmy. Snímače AE byly rovnoměrně rozmístěny radiálně po obvodu skříně v její přední části, kde se nachází 5. převodový stupeň, viz obr. 2.

Softwarové vybavení analyzátoru XEDO pro měření signálu AE umožňuje zaznamenávat kromě RMS. až 16 energetických hladin signálu – Counts (počet překmitů přes nastavené prahové úrovně), což umožňuje jedno nastavení citlivosti měření pro různá stádia zkoušky (záběh – značné výkyvy v signálu, následné uklidnění signálu a jeho nárůst až do vytvořeného poškození). Software DaeShow umožňuje vyhodnocovat parametry Counts, Trends, Events a RMS... Dále je možné třídění navzorkovaných událostí a dle velikosti jejich amplitudy, délky události a hodnoty RiseTime. Software umožňuje vyhodnocovat události ve frekvenční oblasti a také exportovat získaná data pro zpracování v jiných software (Matlab).

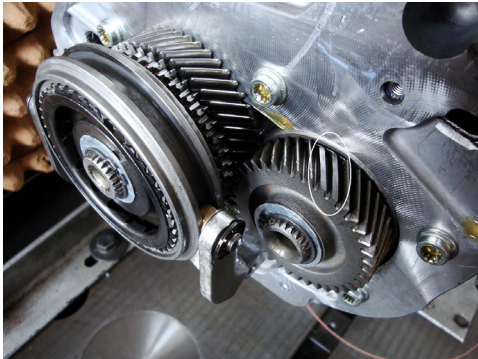


Obr. 2. Sledovaná převodovka se snímači vibrací a AE
Fig. 2. Tested gear box with sensors (vibrations and AE)

Metodika zkoušení

Cílem úvodního měření bylo zjistit, zda je možné detekovat odezvu na poškození reálné převodovky některou již dříve zmíněnou metodou a ověřit vhodnost typu poškození pro experimentální zkoušky. Experiment byl situován do třech jednotlivých etap. **První etapou** bylo naměření experimentálních dat nepoškozené převodovky (v délce měření přibližně 45 minut). V této fázi byly pozorovány provozní vlivy soustavy na odezvu signálů měřících

aparatur, tedy změny vstupních otáček, nebo zařazení neutrálu (zastavené soukolí – rotující jehlové ložisko). **Druhá etapa** měření spočívala v naměření dat poškozené převodovky, kde vytvořeným poškozením bylo odbroušení jednoho zubu kola 5. převodového stupně. Současně bylo vytvořeno umělé poškození jehlového ložiska téhož stupně, které spočívalo v odbroušení části jedné jehly ložiska o velikost cca 0,1 mm, viz obr. 4. **Třetí etapa** měření probíhala s rozsáhlejším poškozením stejného kola, kde došlo k odbroušení dalšího sousedního zubu kola, viz obr. 3.



Obr. 3. Detail poškozeného ozubení
Fig. 3. Detail of damaged gear



Obr. 4. Testované jehlové ložisko
Fig. 4. Tested needle bearing

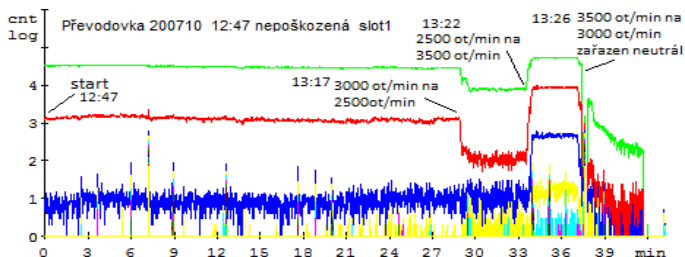
3) Experimentální výsledky AE

První etapa zkoušky:

Jak již bylo zmíněno výše, první etapa zkoušky spočívala v naměření signálu nepoškozené převodovky. Počáteční podmínky byly následující: vstupní otáčky 3000 min^{-1} , výstupní otáčky 952 min^{-1} , momentové zatížení cca 50 Nm. Měření AE probíhalo kontinuálně během celé zkoušky. Nastavení citlivosti jednotlivých (čtyř) kanálů bylo 17 dB pro kanál 1 a 2 a 12 dB pro kanál 3 a 4 (kanál je v grafu označený jako slot). Ačkoli byly snímače AE rozmístěny radiálně v různých místech po obvodu skříně, signál AE z jednotlivých snímačů vykazoval v podobě Countů přibližně identický průběh, proto jsou následující výsledky vybrány pouze ze slotu 1.

Záznam první etapy měření (obr. 5) byl spuštěn po cca 30 minutách od spuštění převodovky, aby se dosáhlo ustáleného stavu (zahřání oleje). Při spuštění zkoušky byla teplota oleje $39 \text{ }^\circ\text{C}$, postupně docházelo k pozvolnému nárůstu teploty, nejvyšší hodnota byla zaznamenána ve 37. minutě zkoušky ($59 \text{ }^\circ\text{C}$), viz obr. 10. V grafu je patrný mírný nárůst intenzity signálu AE do 29 minuty zkoušky, která je souběžná se zvyšující se teplotou oleje. Následně byly sníženy otáčky z 3000 min^{-1} na 2500 min^{-1} , při tomto snížení je patrný velký pokles intenzity signálu AE. Při zvyšování otáček se signál opět zvyšuje. Ve 36. minutě došlo k zastavení převodovky, přechazení na neutrál a najetí na původních 3000 min^{-1} . Tento stav trval až do ukončení měření (43. minuty), přičemž stanice byla vypnuta již o minutu dříve. V posledních 6 minutách chodu převodovky na neutrál docházelo k pozvolnému útlumu signálu AE, přičemž důvod tohoto útlumu zatím není autorům přesně znám, nicméně zde existuje hypotéza o vlivu nedostatku

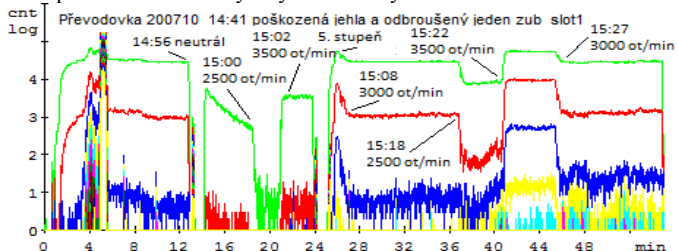
mazacího oleje v ložisku a i tento jev bude předmětem zkoumání v dalších naplánovaných měřeních.



Obr. 5. Záznam signálu AE z první etapy měření – Counts
Fig. 5. Plot of AE signal from first part of measurement – Counts

Druhá etapa zkoušky:

Výsledky záznamu signálu AE (opět v podobě Countů) jsou zobrazeny na obr. 6. Oproti první etapě zde bylo měření spuštěno zároveň s převodovkou. Jak je z tohoto grafu patrné, v první části došlo k výraznému nárůstu hluchnosti převodovky (4. minuta), poté došlo k rychlému uklidnění hluchnosti (5,5 minuta) a pozvolnému uklidnění do 12 minuty. Následovaly změny provozních otáček při zařazeném neutrálu (13. - 25. minuta). Poté byla stanice vypnuta a po zařazení 5. stupně došlo ke spuštění se zvýšenými otáčkami (3500 min^{-1}). Intenzita signálu (Countů) druhé etapy měření se po uklidnění (od 5. minuty) jevila srovnatelná s nepoškozenou převodovkou ve zvýšených i snížených otáčkách.



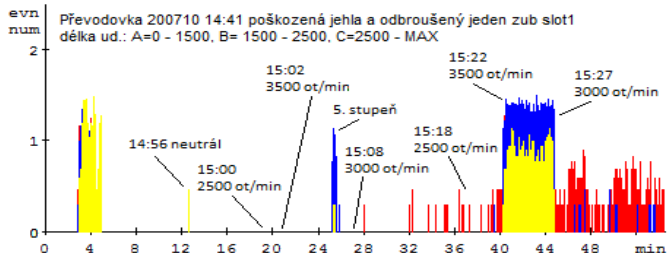
Obr. 6. Záznam signálu AE (Counts) ve druhé etapě měření
Fig. 6. AE signal plot (Counts) from second part of experiment

Výrazný výkyv ve 4. minutě je přisuzován procesům probíhajícím při styku poškozeného zubu s nepoškozenými zuby spoluzabírajícího soukolí. Odezva těchto procesů, při kterých pravděpodobně dochází k následnému otupení hrany poškozeného boku zubu, byla v signálu všech použitých aparatur detekovaná. Poškození jehly ložiska na pátém převodovém stupni se mohlo projevit při zařazeném neutrálu (cca 13. až 25. minuta), avšak signál vykazuje podobný průběh jako u nepoškozeného ložiska a nebyla zde detekovaná žádná výrazná změna.

Třetí etapa měření:

Ve třetí etapě zkoušky kdy bylo poškození rozšířeno o další sousední zub, nebyly v signálu AE pozorovány žádné výrazné odchylky od prvního typu poškození. Změny ve stupních

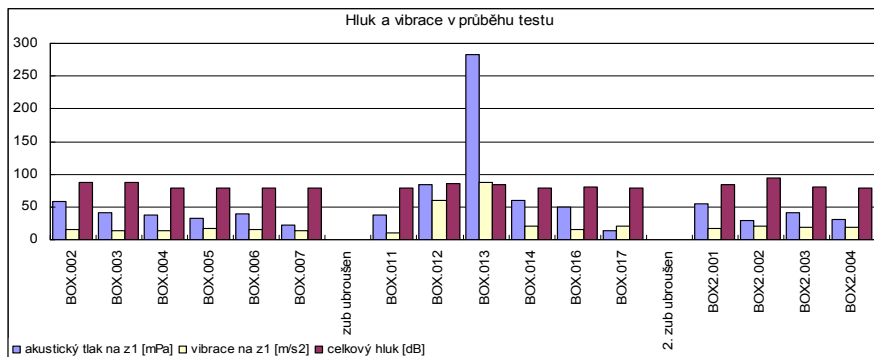
otáčkách se projeví stejně jako v předešlých představených etapách měření. Současně je ze všech tří etap měření pozorováno, že snížení otáček má za následek snížení signálu AE hladin s nejvyšší citlivostí, ale zároveň mírný nárůst hladin s nižší citlivostí. Snížením otáček dochází k úbytku událostí s malou amplitudou a naopak k mírnému zvýšení počtu událostí s vyšší amplitudou a délkou. Tento poznatek je patrný také z grafu na obr. 7, kde je zobrazeno rozložení velikosti délky událostí, podobný průběh je zaznamenán i v rozložení událostí v závislosti na jejich amplitudě. Tento poznatek ovšem nevypovídá patrně nic o detekci poškození, ale spíše o rozkmitání některých částí převodovky na jejich vlastních frekvencích.



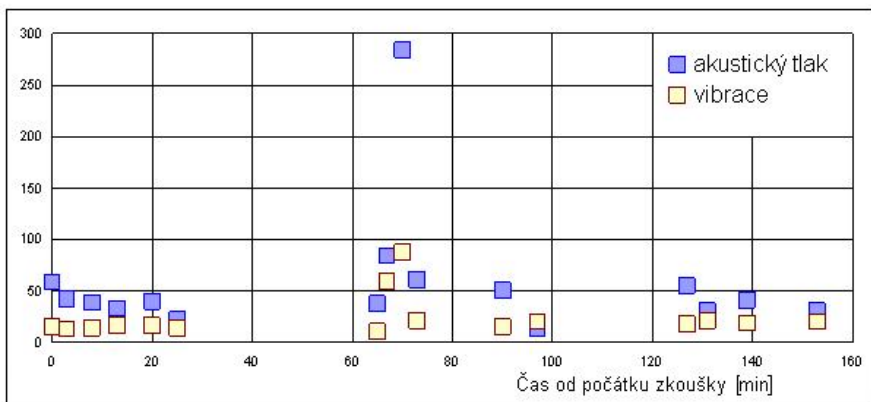
Obr. 7. Druhá etapa měření – délka událostí AE
Fig. 7. Second part of the test – duration of AE events

4) Experimentální výsledky vibrací a hlukové emise

Měření hlukové emise a vibrací je znázorněno obr. 8 a 9. Graf na obrázku 8 zobrazuje akustický tlak, vibrace a celkový hluk ve všech třech etapách měření. Při provedené analýze byla zjištěna nejvýraznější změna hlukové emise v úzkém pásmu zubového kmitočtu (2400 Hz při 3000 min⁻¹). Proto jsou akustický tlak a vibrace na obr. 8 vztahy k tomuto zubovému kmitočtu. Třetím zobrazeným parametrem je celkový hluk, který jak je vidět z grafu nevykazuje přílišné změny. Ve druhé etapě měření je vidět extrémní nárůst hodnot akustického tlaku, což je porovnatelné se záznamem AE a teplotou, viz obr. 10. Záznam na obrázku 9 obsahuje stejná data, jako záznam na obrázku 8, ale x-ové ose je přiřazen čas v minutách.



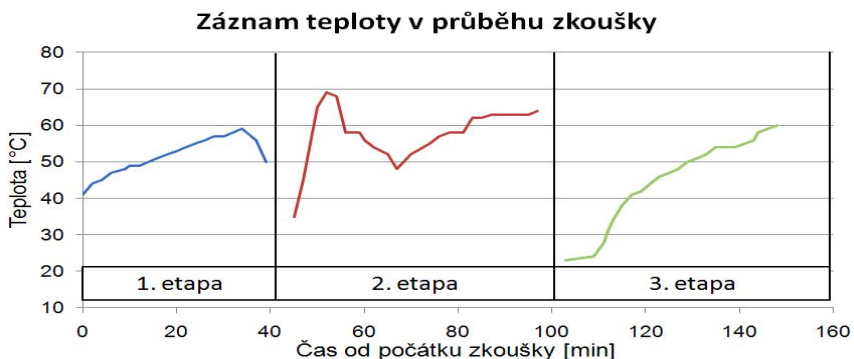
Obr. 8. Vibrace a hluk – jednotlivé etapy
Fig. 8. Vibrations and noise – different stages



Obr. 9. Vibrace a hluk – časová osa
Fig. 9. Vibrations and noise – time axis

5) Experimentální výsledky měření teploty

Záznam teploty celé zkoušky je v grafu na obrázku 10 rozdělen do třech etap měření. V první etapě je vidět pozvolný růst až do zařazení neutrálu, kdy začala teplota klesat. Ve druhé etapě po provedeném poškození se projevil extrémně rychlý nárůst teploty z 35 °C až na 54 °C za 9 minut od začátku zkoušky, teplota byla měřena na víku pátého stupně. Skutečná teplota na soukolí musela v tomto okamžiku dosahovat několikanásobně vyšších hodnot. I tento moment koresponduje s extrémními hodnotami AE a akustickým tlakem. Ve třetí etapě se další poškození kola v signálu AE již neodrazilo a ani teplota nezaznamenala nějaký výrazný posun. V grafu je také patrná reakce na snížení otáček zastavením růstu teploty.



Obr. 10. Záznam teploty v průběhu zkoušky
Fig. 10. Record of temperature during the test

6) Závěr

Cílem práce bylo experimentálně ověřit metodiku měření signálu akustické emise, hlukové emise a vibrací na detekci poškození běžného automobilové převodovky. Pro experiment byla použita převodovka z vozidla Škoda Fabia. Měření probíhala ve třech etapách, přičemž první etapa měření byla věnována nepoškozené převodovce, druhá etapa měření obsahovala poškozené evolventní ozubené kolo a poškozené jehlové ložisko. Ve třetí etapě bylo měřeno rozšířené poškození ozubeného kola. Experimentální zkoušky proběhly při různých provozních podmínkách a to v podobě změn vstupních otáček na hnacím hřídeli při zařazeném pátém rychlostním stupni a neutrálu.

Výsledky dosažené použitými metodami, samozřejmě v závislosti na jejich citlivosti, shodně reagovaly na vytvořené poškození ve druhé etapě měření, přičemž metoda AE prokázala vysokou citlivost i na změny provozních podmínek. Poškození ozubeného kola mělo za následek nárůst signálů hlukové emise i vibrací, v případě metody AE až k extrémním hodnotám. U hlukové emise byla pozorována značná změna akustického tlaku v úzkém pásmu zubového kmitočtu. Dalším parametrem potvrzujícím vhodnost zvolené metodiky měření je teplota, která dokázala dobře reagovat na procesy probíhající uvnitř převodovky a změny provozních podmínek.

Tento článek je věnovaný představení pouze prvních výsledků úvodního měření poškozeného převodového ústrojí. Z tohoto měření vyvstaly některé otázky, týkající se například procesů probíhajících při záběru poškozeného zubu kola. Tyto otázky bude nutno objasnit před dalšími zkouškami s podobným typem poškození. Zajímavou oblastí může být i měření signálu AE při přefazení rychlostního stupně na neutrálu, které úvodní zkouška nevěnovala přílišnou pozornost. Součástí příprav na příští experimentální zkoušky bude rozbor dalších možných typů poškození převodového ústrojí a detailní dokumentace nepoškozených částí před zkouškou a poškozených částí po provedené zkoušce.

Práce, představené v tomto příspěvku vznikly v rámci řešení projektu MPO CR FRR-TI1/371 „Integrovaný systém monitorování vybraných strojních částí“ a částečně projektu FSI VUT v Brně FS – S-10-30 Akustická diagnostika mechanické převodovky.

Literatura

- [1] KOPEC, B. a kol. Nedestrukтивní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno, CERM, 2008, 572 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] BRUCE T. KUHNELL, Monash University, “Wear in Rolling Element Bearings and Gears – How Age and Contamination Affect Them”. *Machinery Lubrication Magazine*. September 2004.
- [3] ALBERS, A., SCHELL, J., DICKERHOF, M., HESSENAUER, B. Validation of AE- signals recorded with conventional Equipment using 3D-Scanning-Laser-Vibrometer. *In: 29th European Conference on Acoustic Emission Testing 2010*, Vienna, Austria, September 8-10, 8 pages, CD edition, NDT.net - The Open Access NDT Database, Kirchwald, Germany, ISBN 978-3-200-01956-0.
- [4] TAN, CH. K., MBA, D. Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox. *In: Tribology International*, Vol. 38, Issue 5, May 2005, Pages 469-480.



AE DURING LASER CUTTING AND RESISTANCE SPOT WELDING

Tomaž KEK, Janez GRUM*

University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia
tomaz.kek@fs.uni-lj.si, *janez.grum@fs.uni-lj.si

Abstract

Laser cutting and resistance spot welding are frequently used techniques in automotive industry and production of white goods. The paper describes possibilities to monitor process quality of laser cutting and resistance spot welding based on measured AE signals. The results of AE signals measured during and after laser cutting are shown. The measured results confirm that laser cut quality based on measured AE signals could be predicted. Also continuous AE signals during current flow in RSW are analyzed. Selected welding parameters often cause excessive energy input, that assure better reliability of fully penetrating welds even in the case of process deviations. Excessive energy inputs lead to excessive heating of welded material that can cause unwanted expulsions and electrode tips damages. This is way users want different sensors systems to monitor and control the welding process to attain optimal conditions. In the paper continuous AE signal during current flow were analyzed in time and frequency domain.

Key words: Acoustic emission, PZT sensor, dross, laser cutting, RSW

1. Introduction

The use of laser cutting may provide high velocities of plate cutting, assuring good quality of the surface cut. Input parameters of laser cutting may be chosen from a wide range of cutting speeds and powers. For economic reasons, higher cutting speeds or lower output laser-beam powers are desired. A reduction of energy input to the cutting front, however, may result in lower laser-cut quality. For easier achievement of high cut quality, including cost-effectiveness of cutting, various system of process supervision and control have been developed. They are mainly based on measuring electromagnetic waves [1-2] and acoustic emission [3-5], which freely propagate from the cutting front in the course of cutting. They can be sensed at different locations. From the signals obtained the process in the cutting front may be assessed. Process assessment may often permit, on the basis of certain criteria, to predict optimum cutting conditions.

Similarly acoustic emission is a promising technique for monitoring resistance spot welding (RSW) process. RSW is a method which has been widely used in automotive industry for decades for the welding of metal thin sheets. In terms of use and control, it is a relatively direct production process. Numerous researches can be found in literature which were carried out with the purpose of monitoring and controlling this process in order to achieve adequate weld quality. They were based on destructive and non-destructive methods; the established

methods of the former are the peel and the chisel tests, while the latter includes visual inspection, thermal conductivity measurement, and ultrasonic testing. The main techniques of control and monitoring of RSW are [6-7]: Electrical Parameter Limits, Dynamic Electrical Parameter monitoring, Ultrasonic testing of welded joints, Nugget expansion, and Acoustic Emission. Almost all welding processes involve dynamic phenomena which have different characteristic sound sources. As a result, numerous researchers were soon attracted to the field of acoustic emission to evaluate the process of resistance spot welding. According to documented sources, researches have been performed on all characteristic phases of welding: during the welding process itself, immediately after welding, and during the loading of the weld [8-10]. The basic aim of monitoring the AE during the process of welding, during the cooling process, or during the testing of the welds is to obtain useful information on the quality of the weld and the adequacy of the selected welding parameters. Acoustic Emission is a passive technique for detecting signals occurring in the material exposed to thermal changes and mechanical strain. The key benefit of the AE technique is that the AE signal is transmitted through the material to remote areas where the sensors are safely protected from the effects of cutting and welding.

2. AE During laser cutting

During the laser cutting process a turbulent flow of the cutting gas produces continuous AE signals. When cutting is stopped, acoustic emission in the form of bursts with appertaining signal duration can still be captured. In a continuous signal changes of the signal amplitude value and frequency can be detected. In case of cutting with an optimal power and speed, signals with a relatively uniform amplitude value in the continuous signal can be measured. A lower energy input at the interaction zone with increased cutting speed will result in a lower melt temperature and, consequently, in increased melt viscosity. Under these conditions the portion of the oxidized melt will decrease as well. When the forces due to gas flow cannot exceed the adhesion forces of the melt to the sheet surface, the melt leftover will solidify quickly in the form of droplets at the lower edge of the cutting front, and, consequently, dross will form. The solidification of the molten material persisting at the lower edge of the cut and cracking of the oxide film will produce AE bursts in the continuous signal.

2.1 Continuous acoustic emission during laser cutting

Research results indicate that the amplitude value of an AE signal is a very suitable parameter for the evaluation of the laser-cut quality. For the evaluation of the captured AE signals, an average m_A of the amplitude values of a series of 20 subsequent continuous AE signals with the individual laser-cutting condition was taken. An analysis of the laser-cutting process showed that the continuous signals with a defined time interval of signal duration, i.e. 0.1 s, were suitable for its control. The assumptions on the influence of the individual factors on the variable analysed were confirmed with a factorial design. A method of orthogonal polynomials was used to determine an approximation polynomial. Fig. 1a shows a contoured representation of response surface for the signal amplitude average with the approximation polynomial.

In a similar way, intensity average m_I of a series of 20 subsequent continuous AE signals captured with the individual laser-cutting condition was treated. Signal intensity is proportional to signal energy [11] and it is defined by an integral of signal square,

$$I_{AE} = \int_0^{\infty} |V(t)|^2 dt \quad (1)$$

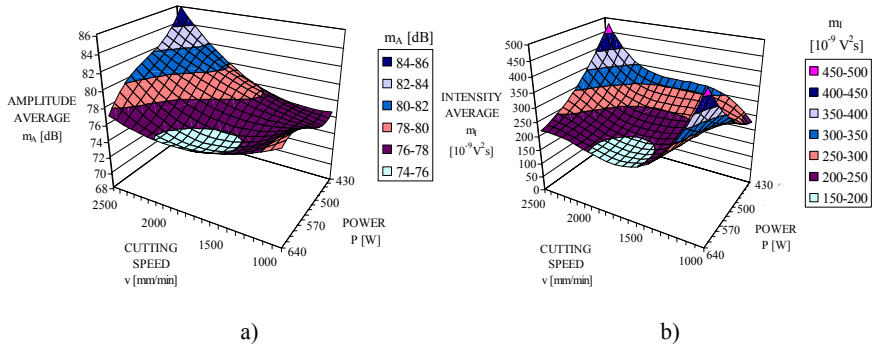


Fig. 1 Contoured representation of response surface for signal a) amplitude average m_A and b) intensity average m_I

From a comparison of the response surface for the AE signal amplitude average m_A and of the signal intensity average m_I (Fig.1), it can be inferred that an increase in AE signal amplitude is followed by an increase in the AE signal intensity.

2.2. AE bursts after laser cutting

The presence of dross at the lower cut edge is well shown by the AE bursts after the termination of laser cutting. Fig. 2 shows a distribution of the amplitude values of AE burst signals immediately after the termination of cutting of the flat DC04 steel sheet in the duration of 30 s. The number of the bursts exceeding the chosen signal amplitude level $A_{AE,N}$, i.e. 40 dB, 50 dB, ..., 90 dB, is marked N_{AAE} . Measurements show that increased energy input to the cutting front results in a lower AE activity with lower amplitude values of voltage signals, which is a result of less or even no dross presence, which, in turn, results in better laser-cut quality. It was found that the relation of the number of bursts N_{AAE} and the signal amplitude levels $A_{AE,N}$ can be described with an exponential function. A greater distance of an exponential regression line from the origin of the coordinate system in the diagrams shows a greater AE activity.

Fig. 3 shows the distribution of the amplitude values in a period of 30 s after the termination of laser cutting of the flat sheet of X5CrNi18-10 steel. In cutting with different parameters different qualities of the cut will be obtained. Similarly as with unalloyed steel, poorer cut quality will show in a larger number of bursts after the termination of cutting.

The laser cuts obtained at austenitic stainless steel differ from those obtained at unalloyed steels, which is mainly a consequence of increased chromium content in the steel. The formation of a chromium-oxide film in the cutting zone during laser cutting of austenitic stainless steel hinders further oxidation in the melt depth. In spite of tearing of the chromium-oxide film, quite a lot of melt in the cutting zone remains unoxidised. The unoxidised melt shows good adhesion to the cut surface, which hinders complete blowing-out of the melt from the laser cut with an oxygen jet. This results in a re-solidified melt holding to the laser cut surface and the presence of dross at the lower edge of the cut. Larger amounts of the solidified oxides and of the base material at the cut surface and in the form of dross at the lower edge of the cut in comparison with unalloyed steel were confirmed also by the results of the analysis of the AE bursts after the termination of cutting.

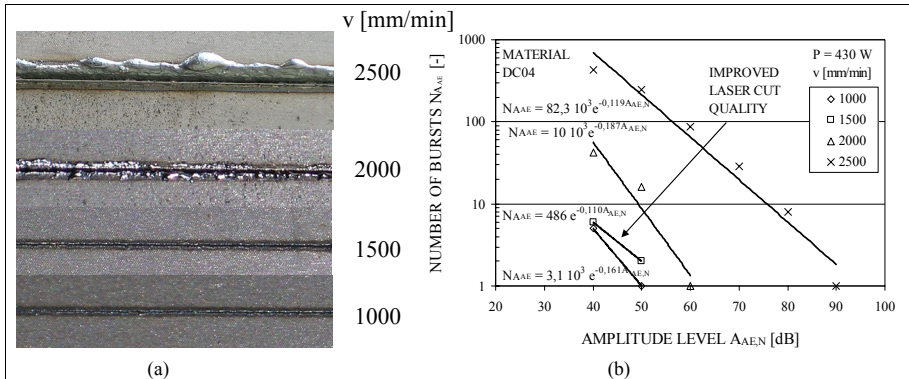


Fig. 2 a) Images of dross at lower cut edge at cutting with different cutting speeds and power $P = 430$ W and b) number of AE bursts N_{AE} above various amplitude levels of AE signals $A_{AE,N}$ immediately after termination of laser cutting of sheet DC04 with power $P = 430$ W.

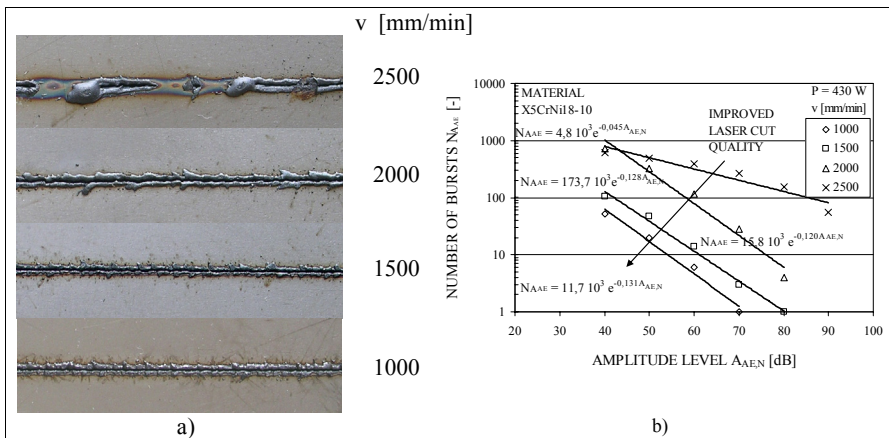


Fig. 3 a) Images of dross at lower cut edge at cutting with different cutting speeds and power $P = 430$ W and b) number of AE bursts N_{AE} above selected amplitude levels of AE signals $A_{AE,N}$ immediately after termination of laser cutting of sheet X5CrNi18-10 with power $P = 430$ W.

In laser cutting of the austenitic stainless steel sheet under the cutting conditions chosen and within a wide range of energy inputs, the occurrence of dross at the lower edge could not be avoided. The difference in dross size in laser cutting of the X5CrNi18-10 stainless steel with different parameters is less distinct than in cutting of the unalloyed DC04 steel, which was confirmed also in a parallel analysis of the AE bursts.

3. AE during resistance spot welding

The resistance spot welding process consists of the following phases: the set-down of the electrodes, the squeeze, the current flow, the hold time or forging, and the lift off. During each of these phases, various types of acoustic emission signals are produced as a consequence of different physical phenomena occurring in various RSW phases. Individual signal elements may differ significantly or they can be completely excluded from the welding process in which various materials, thicknesses and welding parameters are applied.

During the current flow, continuous acoustic emission signals can be measured. During resistance spot welding without expulsion, relatively uniform voltage and current values are obtained. The frequency spectrum of the AE signal indicates strong lower frequencies of approximately 100 kHz. These are followed by frequencies of approximately 430 kHz. During the current flow, plastic deformation, friction, nugget expansion, melting and expulsions produce AE signals. The signals occurring during the expulsion of the material are usually of a higher amplitude and can be clearly distinguished from the signals produced by other factors during the current flow through the weld piece.

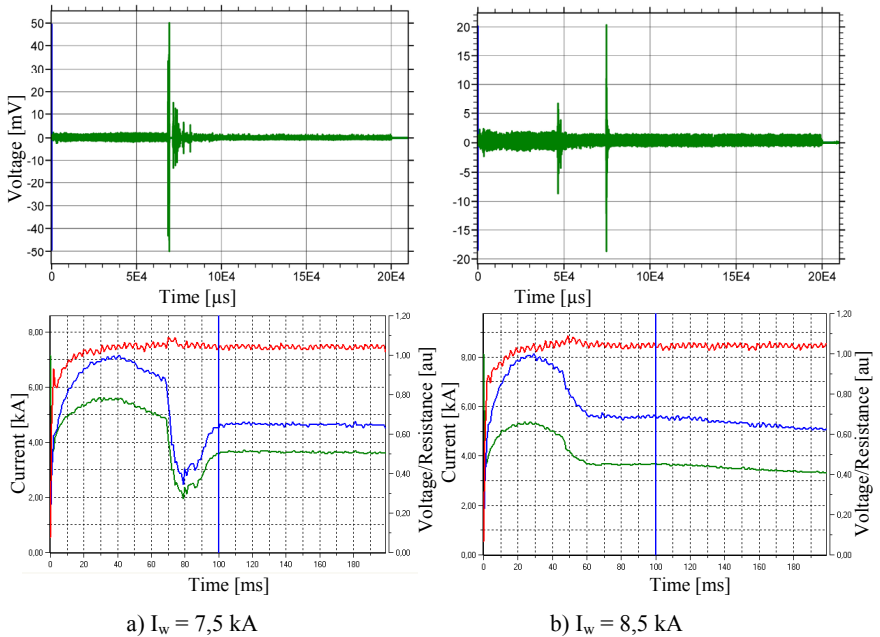


Fig. 4 Acoustic emission signal waveform with welding current (blue), voltage (red) and resistance (green) at, $t_w = 200 \text{ ms}$.

We would want to avoid the expulsion of the material as it removes the base of the material from the welding spot and spatters the welding sheet and the electrodes. Expulsions are connected to over heating of material, higher consumption of electrical energy, lower strength and lower corrosion resistance of welded joint. Nevertheless, when using systems without feedback control, expulsion is tolerated for production-oriented reasons. With a used welding

device, expulsion was reduced by regulating the voltage (Fig.4) to compensate reduction in electrical resistance. Expulsion corresponds to a rapid increase in acoustic emission and a strong decrease in the measured voltage and electrical resistance. However, the expulsion of the material need not entail a strong voltage decrease (Fig. 4b). In the experiments conducted, acoustic emission measurement proved to be the most reliable indicator of expulsion during the RSW process.

Continuous AE signal during RSW can be divided into three time periods:

- time period before expulsion
- expulsion of the material
- time period after expulsion

In a time period before expulsion a trend of increasing of mean and standard deviation and very unsteady values of kurtosis can be noticed. A trend of increasing of mean and standard deviation is approximately 20 ms before expulsion changed into trend of decreasing. Decreasing of mean and standard deviation is connected with decreasing of kurtosis of the signal that offers to predict the expulsion of the molten material during RSW. The characteristic values are very unsteady during the time period of expulsion, which is marked with a pattern on Fig. 5. After the expulsion the characteristic values becomes lower and more steady. Mean, standard deviation and kurtosis of the voltage signal of AE offers insight into RSW process state and prediction of expulsion of the material during RSW. The accuracy of the prediction can be improved with simultaneous consideration of additional characteristics of AE signal like FFT.

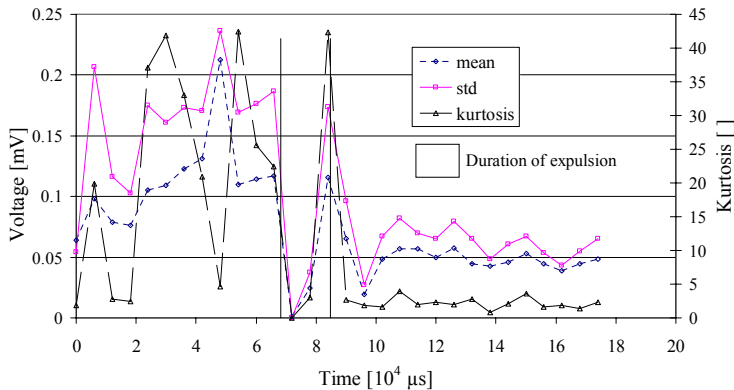


Fig. 5 Characteristic values of continuous AE signal during current flow, $I_w = 7,5 \text{ kA}$, $t_w = 200 \text{ ms}$.

4. Conclusions

The investigation conducted on laser cutting showed that a good agreement between the quality of a laser cut and the captured acoustic emission signals exist. Continuous acoustic emission gives us an insight into laser cut quality during cutting and burst acoustic emission after termination of laser cutting. Factorial analysis of experimental results shows significant influence of used laser cutting conditions on amplitude average and intensity average of AE

signals. Exponential relationship between the number of bursts in defined time interval and the signal amplitude levels after termination of laser cutting was found. Measurements show that increased energy input to the cutting front results in a lower AE activity with lower amplitude values of voltage signals, which is a result of less or even no drosp presence.

The results of the research on the acoustic emission during the resistance spot welding process of DC01 uncovered the possibilities of optimising the welding parameters and predicting the quality of the weld. The analysis of the acoustic emission signal during current flow provides useful information on nugget formation. With simultaneous calculation of signal frequency spectrum and other mentioned characteristic values of AE signal the expulsion of the material can be predicted in a very short time interval before its occurrence.

Capturing of acoustic emission with a contact PZT sensor enables monitoring of important events directly in the product material during the laser cutting and resistance spot welding and is a promising technique for optimising these processes.

References

1. Olsen F., Andersen K., Raben N., Thomassen F.: Investigations in methods for Adaptive Control of Laser Cutting; Proceedings of LAMP, maj, 1987, pp. 405 – 420.
2. Li L., Hibberd R., Steen W.: In-Process Laser Power Monitoring and Feedback Control; Proceedings of 4th International Conference on Lasers in Manufacturing, 1987, pp. 165 – 176.
3. Chryssoulouris G., Sheng P., von Alvensleben F.: Process Control of Laser Grooving Using Acoustic Sensing; Transactions of the ASME, Vol. 113, avgust 1991, pp. 268 – 275.
4. El-Kurdi Z.: Monitoring and Control of CO₂ Laser Cutting Process; Dissertation, Phd Thesis, The University of New South Wales, 2005, www.library.unsw.edu.au
5. Grad L., Grum J., Polajnar I., Slabe J.M.: Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding, International journal of machine tools & manufacture, Vol. 44, No. 5, 2004, pp. 555 – 561.
6. Cullen J.D., Athi N., Al-Jader M., Johnson P., Al-Shamma`a A.I., Shaw A., El-Rasheed A.M.A.: Multisensor fusion for on line monitoring of the quality of spot welding in automotive industry, Measurement 41, 2008, 412-423.
7. Dennison A.V., Toncich D.J., Masood S.: Control and process-based optimization of spot-welding in manufacturing systems, International journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, 1997, pp. 256-263.
8. Moore P. O., Miller R. K., Hill R. K. (eds): Nondestructive Testing Handbook, 3th Edition, Volume 6, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, INC., 2005, pp. 232 – 242.
9. Lopez-Cortez V.H., Reyes-Valdez F.A.: Understanding resistance spot welding of advanced high-strength steels; Welding Journal, Vol. 87/12, 2008, pp. 36-40.
10. Polajnar I., Esmail E.A.: Sources of acoustic emission in resistance spot welding; Journal of mechanical engineering, Vol. 45/4, 1999, pp. 147-153.
11. Wadley H.N.G., Microscopic origins of AE in: P. O. Moore (Ed.), Nondestructive Testing Handbook, 3th Edition, Acoustic Emission Testing, Volume 6, 2005, pp. 69-78.



MAGNETIC FIELD CAMERA

ZOBRAZOVAČ MAGNETICKÉHO POLE

Libor KELLER
TSI System s.r.o.
info@tsisystem.cz

Abstract

The Magnetic Field Camera MagCam contains a patented sensor chip with an integrated two-dimensional array of Hall magnetic field sensors. Each sensor independently measures the local magnetic field, resulting in a quantitative 3D magnetic field map with high spatial resolution, measured at high speed. The fully digital and compact measurement system simply connects to the computer via a single USB cable. The MagCam maps are analyzed in real time by the MagScope measurement & analysis software. The MagCam system opens up a new dimension in R&D and quality control for magnet producers and suppliers, sensor manufacturers, motor and generator constructors and NDT labs.

Key words: *magnetic field, Hall sensor, field map, quality control.*

Abstrakt

Zobrazovač magnetického pole MagCam obsahuje patentovaný čip, který má integrovanou matici Hallových snímačů. Každý ze snímačů nezávisle měří lokální magnetické pole. Výsledkem je velmi rychle změřená trojrozměrná mapa magnetického pole s vysokým prostorovým rozlišením. Plně digitální a kompaktní senzor se jednoduše připojí k počítači USB kabelem. Mapy pole ze zobrazovače MagCam lze analyzovat v reálném čase měřicím a vyhodnocovacím programem MagScope. Zobrazovač MagCam otevírá nové možnosti ve výzkumu a kontrole kvality výrobcům a dodavatelům magnetů a magnetických senzorů, konstruktérům motorů a generátorů a NDT laboratořím.

Klíčová slova: *magnetické pole, Hallův snímač, mapa pole, kontrola kvality.*

1. Úvod

Potřeba zobrazovat indukční čáry magnetického pole je ve výzkumné a technické praxi častá. Pro elementární geometrie magnetických obvodů je tvar indukčních čar známý, pro složitě tvary magnetických obvodů se průběh indukčních čar dá vypočítat. Otázkou však vždy zůstává skutečné rozložení magnetického pole při realizaci magnetického obvodu. To je totiž ovlivněno reálnými vlastnostmi materiálů, které se mohou lišit od předpokládaných jak velikostí, tak homogenitou. A to je důvod pro podrobné studium průběhu indukčních čar magnetického pole konkrétního magnetického obvodu.

Pomineme-li nejjednodušší způsob zobrazení indukčních čar pomocí magnetických suspenzí, zůstávají pro zkoumání rozložení magnetického pole elektronické senzory. Protože většina senzorů magnetického pole jsou senzory vektorové, je možné jejich pomocí stanovit průběh indukčních čar. Naprostá většina používaných senzorů magnetického pole je založena na Hallově sondě. Její výhodné parametry pro obvyklou technickou praxi jsou dostatečný pracovní rozsah magnetické indukce, frekvence magnetického pole a teploty prostředí. Další výhodou je její relativně snadná možnost integrace a miniaturizace. Její nevýhody, zejména offset a teplotní závislost, je možné dobře kompenzovat navazujícími elektronickými obvody.

Máme-li k dispozici senzor magnetického pole rozměrově přiměřený geometrii magnetického obvodu, můžeme jeho pomocí zkoumat rozložení pole v místech, která jsou pro správnou funkci tohoto obvodu důležitá. Dosavadní praxe vycházela z použití vhodného manipulátoru, buď plošného nebo prostorového, kterým se při použití senzoru magnetického pole stanovila mapa magnetického pole daného magnetického obvodu. Toto řešení je technicky náročné a vyšetřování průběhu indukčních čar pole je zdoluhavé.

Pro výzkumnou i technickou praxi je zajímavý nový zobrazovač magnetického pole, který je založený na plošném senzoru.

2. Zobrazovač MagCam

Zobrazovač magnetického pole MagCam je založený na technologii vyvinuté v centru nano-elektronických technologií IMEC. Základem zobrazovače je patentovaný senzorový čip, který obsahuje dvourozměrné pole integrovaných mikroskopických Hallových sond. Při rozlišení 128 x 128 je počet sond 16384. Jednotlivé sondy mají rozměr 100 x 100 μm , celkový rozměr aktivní části senzoru je 13 x 13 mm. Každá jednotlivá Hallova sonda nezávisle měří lokální magnetické pole. Výsledkem je trojrozměrná mapa rozložení magnetického pole s vysokým prostorovým rozlišením, změřená vysokou rychlostí.

Realizace zobrazovače magnetického pole MagCam je patrná z obr. 1. Měřicí rozsah senzoru je $\pm 0,1 \text{ mT}$ až $\pm 7 \text{ T}$, rychlost měření je až 50 snímků za sekundu. Zobrazovač je napájený přes USB rozhraní, přes které se také přenáší naměřená

data pro další zpracování. Senzorový čip je krytý ochrannou vrstvou proti mechanickému poškození a je zapuštěný 0,25 mm pod povrch pouzdra zobrazovače. Rozměry zobrazovače MagCam jsou 94 x 71 x 23 mm a jeho hmotnost je 230 g.



Obr. 1 Zobrazovač magnetického pole MagCam.

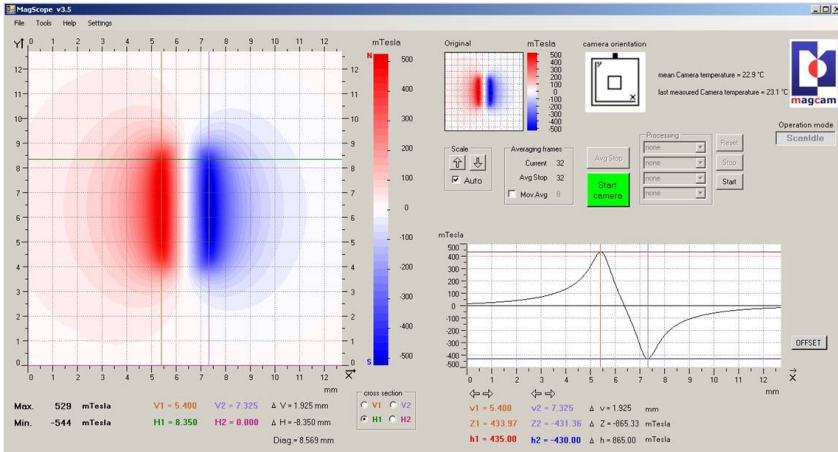
Fig. 1 Magnetic field camera MagCam

3. Program MagScope

Pro snímání, zobrazování a podrobnou analýzu dat ze zobrazovače MagCam slouží programové vybavení MagScope. Základní vlastností programu MagScope je interpolované kvantitativní barevné zobrazení magnetického pole s vysokým rozlišením. Přitom je možné provádět analýzu pole v jednotlivých řezech v kartézských nebo válcových souřadnicích, pokud je známá absolutní poloha měřeného magnetického obvodu. Také je možné měřit hodnoty magnetického pole v zadaných bodech a určovat vzdálenosti a úhly mezi nimi. Program umožňuje použít různé metody zpracování obrazu pole, naměřené hodnoty lze zpracovat statisticky a data je možné exportovat do externích aplikací.

Pro pokročilejší zpracování naměřených dat je k dispozici volitelný modul programu MagScope. Ten umožňuje provádět komplexní kontrolu konkrétních magnetických obvodů. Nejčastěji sledovanými parametry jsou velikost a směr vektoru magnetizace a homogenita magnetického pole.

Příklad vzhledu programu MagScope je na obr. 2, kde je zobrazeno magnetické pole malého permanentního magnetu.



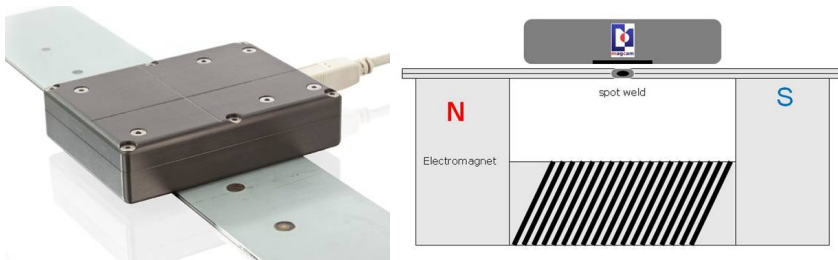
Obr. 2 Měřicí a analytický program MagScope

Fig.2 Measurement and analysis software MagScope

4. Aplikacní možnosti

Hlavní využití zobrazovače MagCam a programu MagScope je při kontrole permanentních magnetů. Nejčastější je kontrola malých magnetů pro různé snímače, zejména využívané v automobilovém průmyslu. Další častou aplikací je kontrola větších magnetických obvodů při ověřování vlastností elektrických motorů a generátorů.

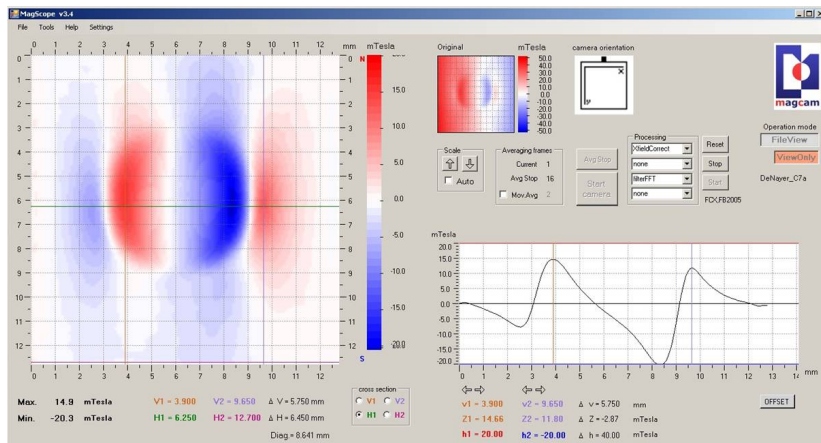
Další využití nachází zobrazovač MagCam při materiálovém výzkumu magnetických materiálů a při vývoji svařovacích metod. Na obr. 3 je schematicky znázorněna situace kontroly bodových svarů. Zobrazovač MagCam zde snímá rozptylové magnetické pole.



Obr. 3 Kontrola bodového svaru pomocí MagCam

Fig. 3 MagCam spot weld testing

Z dvouzměrného zobrazení tohoto pole programem MagScope lze získat řezem přes střed svaru typický průběh o čtyřech vrcholech, jak je patrné z obr. 4. Podle vyvinuté metodiky lze ze vzdálenosti mezi jednotlivými vrcholy získat informace o struktuře materiálu uvnitř svaru. Obdobně je možné analyzovat laserové svary.



Obr. 4 Zobrazení bodového svaru pomocí MagScope

Fig. 4 MagScope image of spot weld

5. Závěr

Zobrazovač magnetického pole MagCam spolu s programem MagScope přináší zcela nové možnosti do výzkumu a vývoje magnetických obvodů tím, že umožňuje kvantitativní digitální mapování magnetického pole. Vyšetřovanými magnetickými obvody mohou být permanentní magnety a jejich sestavy, rotory a statory elektrických motorů nebo generátorů a také svary magnetických materiálů.

Výhodou zobrazovače MagCam je vysoká rychlost měření a vysoké prostorové rozlišení. Předností je absence pohyblivých částí a jeho velká kompaktnost. Jednoduché připojení zobrazovače k počítači s programem MagScope zjednodušuje jeho nasazení.

V současné době je zobrazovač MagCam používán převážně pro výzkumné a vývojové aplikace, ale není daleko doba, kdy bude využitý ve výrobní kontrole jako součást automatického nedestruktivního zkušebního systému.

6. Literatura

[1] Magnetic Field Camera. Firemní literatura MagCam NV, 2010.



KONTROLA SILNOSTĚNNÉHO HETEROGENNÍHO SVARU METODOU PHASED ARRAY

INSPECTION OF THE THICK-WALLED DISSIMILAR WELD BY THE PHASED ARRAY METHOD

Jan KOLÁŘ

ČEZ, a.s.

Contact e-mail: jan@kolar.cz

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky praktické zkoušky provedené ultrazvukovou metodou Phased Array na obvodovém heterogenním svaru hrdla DN 250 tlakové nádoby. Zkouška byla provedena za účelem ověření schopnosti detekce a přesnosti vyhodnocení rozměrů defektů. Ultrazvukové zkoušení tohoto svaru je poměrně obtížné z důvodu omezeného přístupu, a tak je možné zkoušku provést pouze z austenitické strany svaru, která je kuželovitého tvaru. Pro ověření použité metody zkoušení bylo využito zkušební těleso, které odpovídalo skutečné inspekční oblasti a obsahovalo umělé necelistvosti. Třebaže byla pro zkoušku použita pouze jednoduchá sonda příčných vln ve spojení s manuálním provedením skenu, získané výsledky potvrdily, že metoda Phased Array poskytuje důležité údaje z hlediska určení rozměrů defektů iniciovaných z vnitřního povrchu, jejich pozice a orientace.

Klíčová slova: *ultrazvuk, Phased Array, heterogenní svar, příčné vlny*

Abstract

In the contribution results of Phased Array practical trial are being presented for the ultrasonic inspection of circumferential thick-walled dissimilar nozzle weld DN 250 of a pressure vessel. The test was carried-out to find detection ability and the accuracy of defects sizing. Ultrasonic testing of this type of welded joint is relatively difficult, because the access to the inspection area is limited so that ultrasonic scan is possible only from the austenitic conical side. For the inspection method verification was used a test block which was consistent with the real inspection area and contained artificial defects. Although only a single probe of transversal wave and manual inspection were used, gained results confirmed the Phased Array method as a useful examination providing important data about defects initiated from the inside surface especially defects sizing, position and orientation.

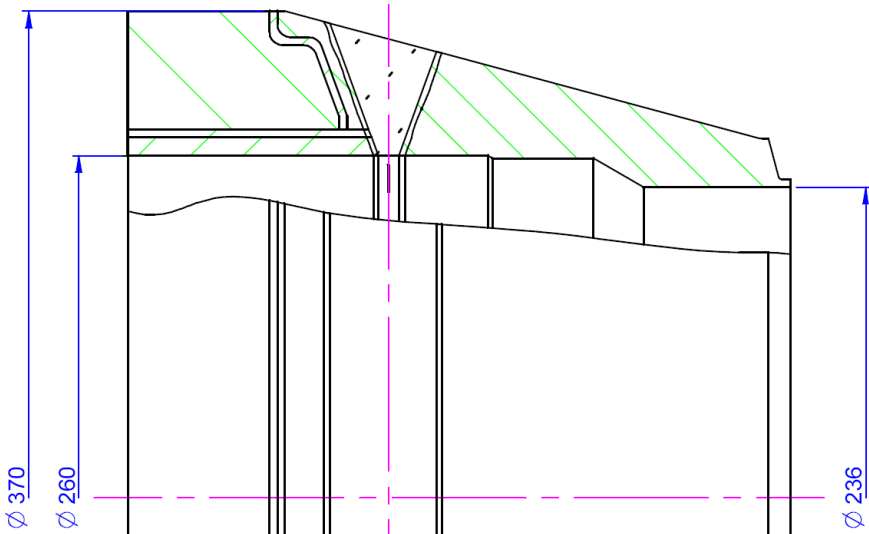
Key words: *ultrasound, Phased Array, dissimilar weld, transversal waves*

1. Úvod

Ultrazvuková metoda Phased Array se v ČEZ, a.s. používá standardně od roku 2008 zejména za účelem provádění nedestruktivních periodických provozních kontrol jaderných elektráren a ověřování indikací detekovaných konvenční impulsní odrazovou metodou. Na základě získaných zkušeností můžeme konstatovat, že použití této metody je výhodné pro zkoušení předmětů s komplikovanými tvary nebo výrobků s omezenou přístupností k oblastí zájmu. Takovým případem je také heterogenní svar hrdla DN 250 tlakové nádoby jaderné elektrárny typu VVER 440. Tento svar je pravidelně podrobován periodickým provozním prohlídkám konvenční ultrazvukovou metodou, prováděnou mechanizovaným způsobem. Pokud by byly v tomto svaru nalezeny indikace k hodnocení, je třeba disponovat další technikou zkoušení, která by byla schopna nalezené indikace potvrdit a získat další podpůrné informace o aktuálním stavu za účelem vyhodnocení zbytkové životnosti.

2. Popis inspekční oblasti

Předmětem zkoušky byl heterogenní obvodový svar nátrubku s maximálním ϕ 370 mm a max. tloušťkou stěny 55 mm. Dispoziční uspořádání v technologii elektrárny však umožňuje provedení zkoušky pouze z jedné strany, a to ze strany s kuželovitým tvarem, kde dochází v axiálním směru ke změnám průměru a tloušťky stěny nátrubku viz obr. 2.1. Tato kuželová část je vyrobena z austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T, kde je možné očekávat problémy způsobené útlumem ultrazvuku.



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

Ověření spolehlivé detekce a správného určení rozměrů a polohy nebezpečných necelistvostí, bylo provedeno na umělých necelistvostech zkušební tělesa reprezentujícího rozměrově a materiálově skutečnou inspekční oblast. Zkušební těleso obsahovalo především umělé defekty představující podélné (obvodové) trhliny iniciované z vnitřního povrchu svarového spoje nebo vnitřního povrchu návaru jak o větších rozměrech, které jsou kritické pro další provoz zařízení, tak i menších rozměrů, které bylo možné využít pro stanovení hranice detekce aplikované metody zkoušení a zjištění odchylky v určení rozměrů necelistvostí. Za účelem zjištění schopnosti detekce zkušební těleso obsahovalo umělé vady typu studeného spoje na svarovém úkosu, které jsou obtížně zjistitelné, obzvláště při zkoušení jen z jedné strany svaru.

3. Parametry zkoušky

Pro kontrolu metodou Phased Array bylo použito stávající vybavení. Jednalo se o ultrazvukový přístroj OMNISCAN PA, sondu typu A3 s 16-ti elementy a frekvencí 3,5 MHz. Tato sonda byla osazena klínem SA3-N45S, který umožňuje použití příčných vln s rozsahem úhlů $40^\circ - 60^\circ$. Pro odečítání polohy a stanovení délky případných defektů byl použit mini encoder OMNI-A-ENC1. Vyhodnocení záznamů bylo provedeno pomocí softwaru TomoView 2.7R10.

Vzhledem ke změnám tloušťky stěny a průměru v axiálním směru potrubí bylo přistoupeno ke kontrole s konstantní vzdáleností sondy od osy svaru, tzn., že vlastní sken byl proveden pouze v obvodovém směru. S ohledem na rozsah využitelných úhlů ultrazvukového svazku bylo pro detekci všech necelistvostí ve zkušebním tělese provedeno snímání dat při poloze sondy na průměru 300 mm. Za účelem přesné interpretace nálezů bylo hodnocení dat prováděno při současném zobrazení profilu inspekční oblasti na obrazovce.

4. Vyhodnocení výsledků včetně vizualizace dat

Provedení zkoušky a její hodnocení odpovídalo běžné praxi a proběhlo za obdobných podmínek jako případě skutečného zkoušení v elektrárně.

Vizualizace hodnocených defektů v sektorovém S zobrazení je uvedeno v tabulce 4.1.

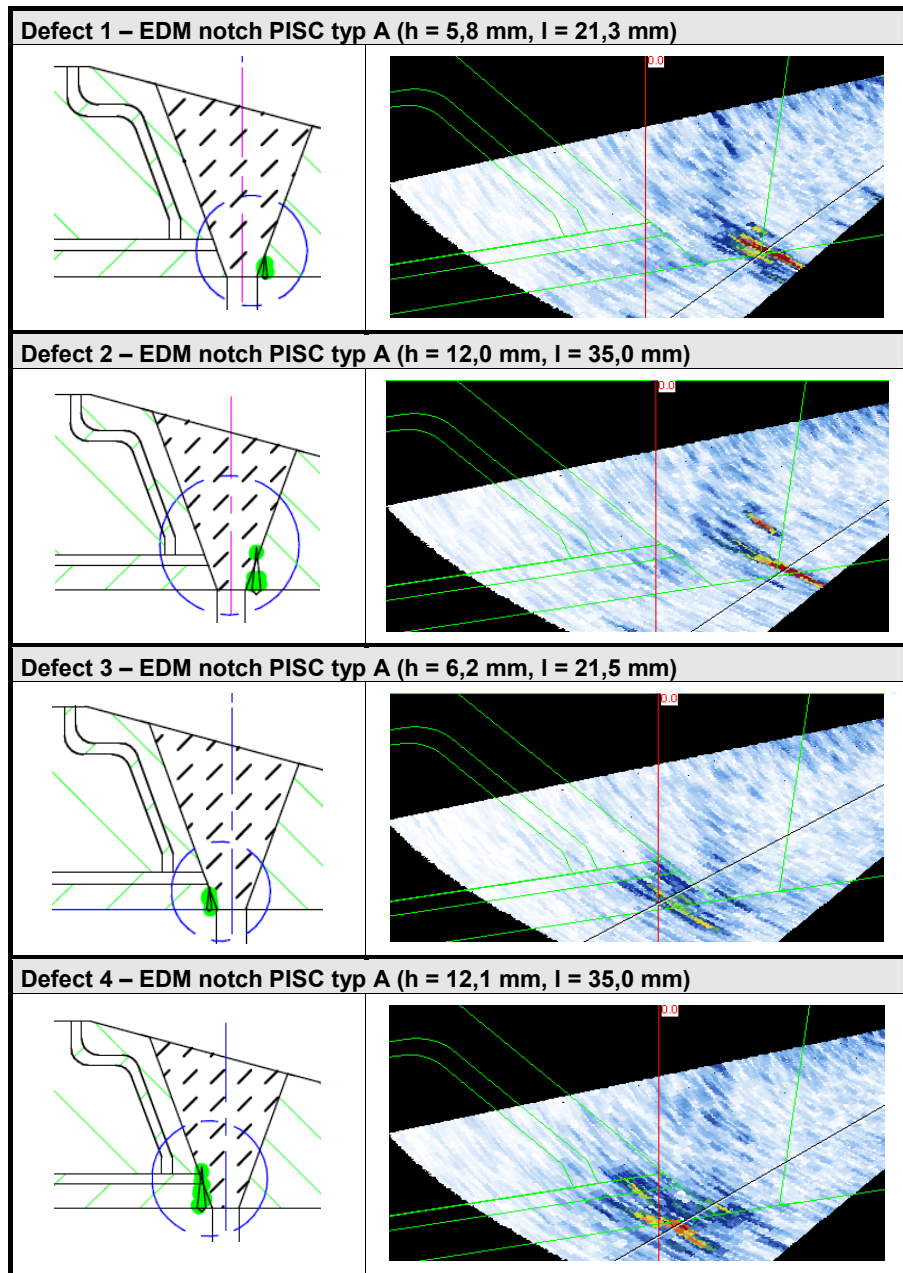
Měřením bylo prokázáno, že pokud necelistvosti komunikují s vnitřním povrchem potrubí (hrdla), není problém je detekovat a spolehlivě určit rozměry, a to i v případě, že se nachází v nepříznivé pozici.

Dále lze konstatovat, že defekty typu studených spojů na svarové úkosové ploše jsou také zjistitelné. Pokud se tyto typy vad nacházely na bližší straně k sondě, byl detekován jejich horní a spodní okraj. V případě jejich umístění na vzdálenější straně od sondy, byly identifikovány prostým odrazem od hlavní roviny necelistvostí.

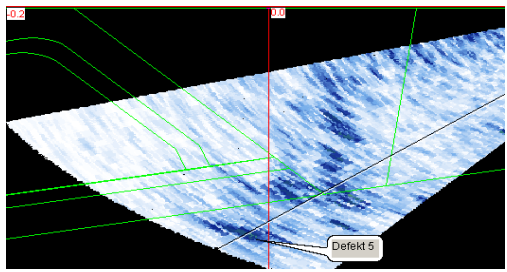
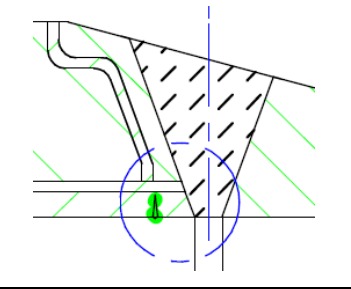
Problém však nastává v případě studených spojů umístěných na rozhraní mezi dvouvrstvým návarem a základním materiálem viz tab. 4.1, defekt č. 12, 13 a 14. Tyto typy vad nelze za stávajících podmínek spolehlivě detekovat, protože odstup užitečného signálu od šumu se pohyboval v rozmezí 3 – 5 dB.

Konečné vyhodnocení a dosažené výsledky jsou uvedeny v tab. 4.2.

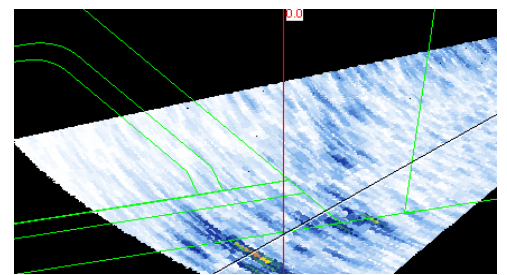
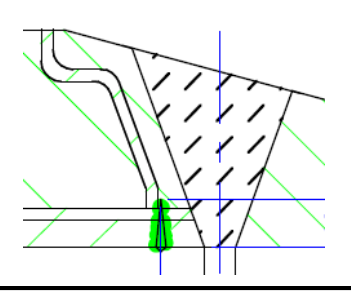
Tab. 4.1 S-zobrazení defektů / Tab. 4.1 S-scan of defects



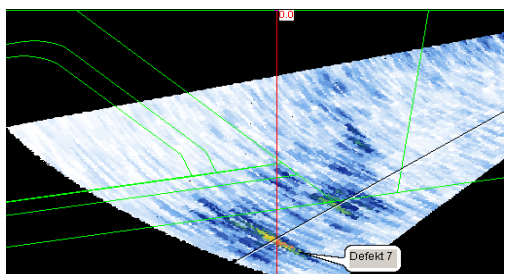
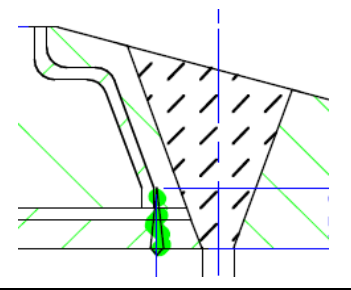
Defekt 5 – EDM notch PISC typ A (h = 6,1 mm, l = 21,8 mm)



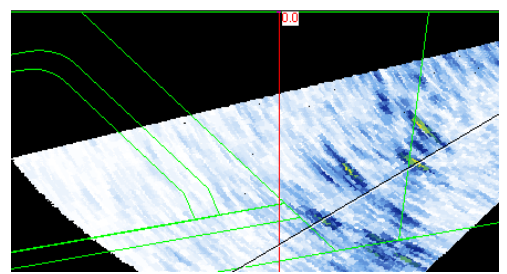
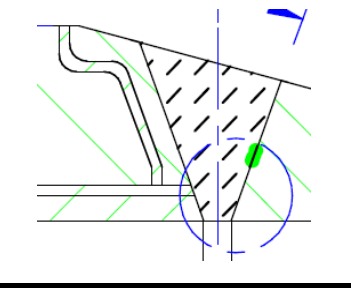
Defekt 6 – EDM notch PISC typ A (h = 12,0 mm, l = 35,2 mm)



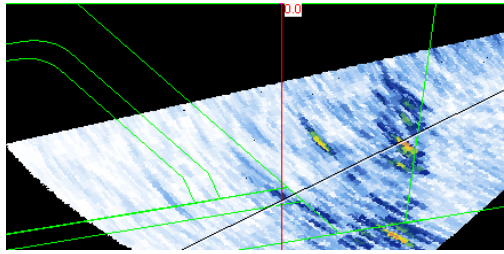
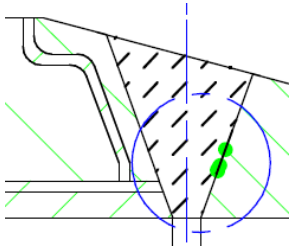
Defekt 7 – EDM notch PISC typ A (h = 15,2 mm, l = 45,2 mm)



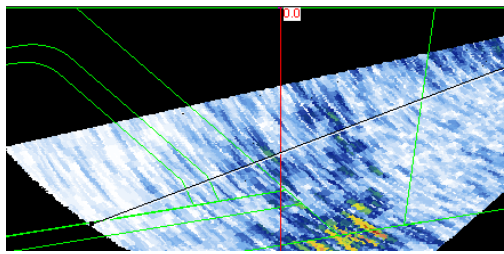
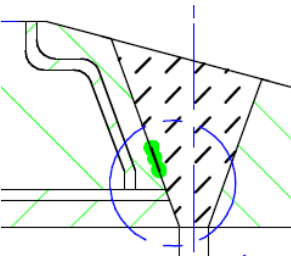
Defekt 8 – EDM notch LOF type (h = 6,0 mm, l = 15,0 mm)



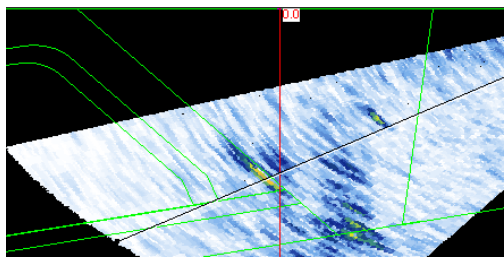
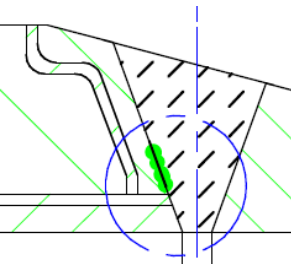
Defect 9 – EDM notch LOF type (h = 12,0 mm, l = 30,0 mm)



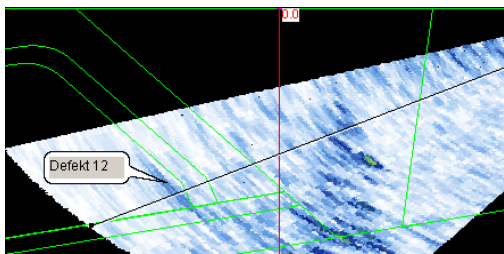
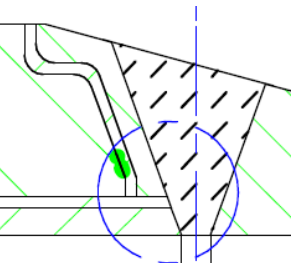
Defect 10 – EDM notch LOF type (h = 6,0 mm, l = 15,0 mm)



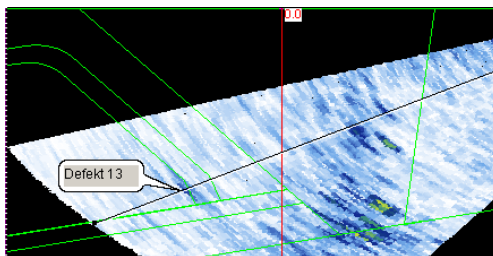
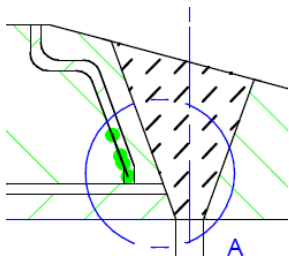
Defect 11 – EDM notch LOF type (h = 12,0 mm, l = 30,0 mm)



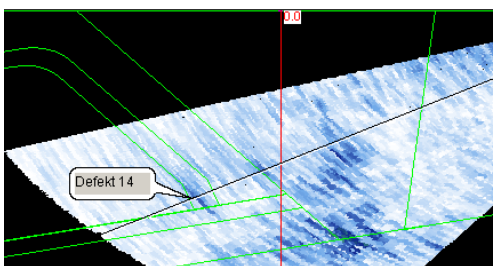
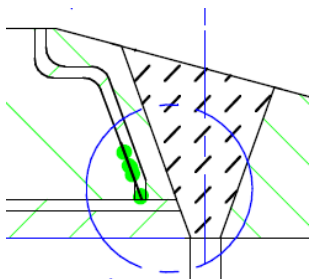
Defect 12 – EDM notch LOF type (h = 6,0 mm, l = 15,0 mm)



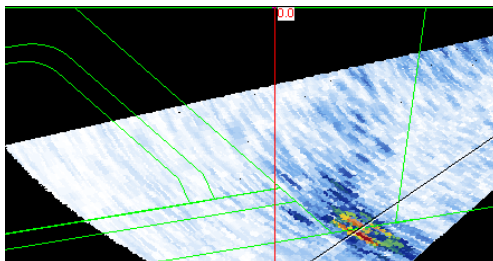
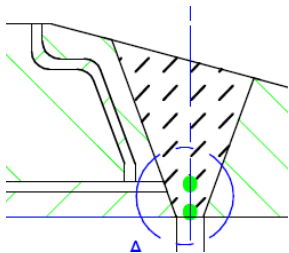
Defekt 13 – EDM notch LOF type (h = 12,0 mm, l = 30,0 mm)



Defekt 14 – EDM notch LOF type (h = 15,0 mm, l = 45,0 mm)



Defekt 15 – EDM notch PISC typ A (h = 12,0 mm, l = 30,0 mm)



Tab. 4.2 Konečné vyhodnocení / Tab. 4.2 Final evaluation

Defekt č. <i>Defekt No.</i>	Výška defektu h [mm] <i>Defects height [mm]</i>			Délka defektu l [mm] <i>Defects length l [mm]</i>		
	Skutečná <i>Real</i>	Měřená <i>Measured</i>	Δh	Reálná <i>Real</i>	Měřená <i>Measured</i>	Δl
1	5,8	5,9	0,1	21,3	31,0	9,7
2	12,0	11,8	-0,2	35,0	45,0	10,0
3	6,2	5,4	-0,8	21,5	26,0	4,5
4	12,1	9,4	-2,7	35,0	37,0	2,0
5	6,1	6,4	0,3	21,8	24,0	2,2
6	12,0	9,3	-2,7	35,2	32,0	-3,2
7	15,2	10,2	-5,0	45,2	32,0	-13,2
8	6,0	6,7	0,7	15,0	16,0	1,0
9	12,0	8,4	-3,6	30,0	34,0	4,0
10	6,0	5,1	-0,9	15,0	16,0	1,0
11	12,0	7,1	-4,9	30,0	23,0	-7,0
12*	6,0	5,5	-0,5	15,0	16,0	1,0
13*	12,0	7,5	-4,5	30,0	11,0	-19,0
14*	15,0	6,9	-8,1	45,0	42,0	-3,0
15	12,0	10,3	-1,7	30,0	36,0	6,0

*) omezená schopností detekce z důvodu nízkého poměru signál/šum
limited detection ability caused by the low signal/noise ratio

5. Závěry a doporučení

Na základě výsledků provedených zkoušek lze konstatovat, že metoda Phased Array poskytuje dostatečně přesné údaje pro stanovení rozměrů necelistvostí otevřených na vnitřní povrch. Přínosem je také zjištění, že nepříznivě orientované vady typu studeného spoje na svarovém úkosu lze dobře identifikovat a vyhodnotit i při zkoušce přímým ultrazvukovým svazkem.

V případě studených spojů na rozhraní mezi dvouvrstevným návarem a základním materiálem dochází k významnému podhodnocení jejich rozměrů, způsobené nízkou amplitudou signálu. Tato skutečnost však nemá zásadní vliv na případné využití této metody zkoušení i za stávajících parametrů, protože kontroly provozovaného zařízení jsou prováděny za účelem detekce vad způsobených provozním namáháním. Vada typu studeného spoje je prakticky vyloučena na základě kontrol prováděných v průběhu výroby.

Pro získání dalších výsledků je možné doporučit provedení opakované zkoušky se sondou shodného typu, ale o frekvenci 1,5 MHz. Další zlepšení schopnosti detekce defektů č. 12, 13 a 14 by pak mohlo přinést použití podélných vln.

Výsledky zkoušky metodou Phased Array budou, po ukončení všech testů, porovnány s hodnotami dosaženými impulsní odrazovou metodou, která je v současné době využívána pro periodické provozní kontroly.



WHAT REALLY DETERMINES THE NON-DESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS?

CO SKUTEČNĚ ZJIŠŤUJE NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKA MATERIÁLŮ?

Bernard KOPEC

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

Abstract

Contribution to the appraisal of the terminology terms used in Czech and English literature and standards ČSN, EN, ISO, etc., used in the naming of indications that we get from testing (defect, inhomogeneity, discontinuity, irregularity, imperfection, etc.). The decision on the correct terminology (naming) should be for each NDT method physical basis method, which diagnoses the character of the finding. Following an overview and explanation of terms used in non-destructive testing with ultrasound, with variations according to the applicable symbol detection for all types of non-destructive testing.

Key words : non-destructive testing, thersms, reflector, inhomogeneity, discontiuinity, irregularity, imprefection, defect, ultrasonic testing

Abstrakt

Příspěvek k úvaze nad terminologickými pojmy, používanými v české a anglické odborné literatuře a normách ČSN, EN, ISO aj., užívaných k pojmenování indikací, které dostáváme ze zkoušení (vada, nestejnorodost, diskontinuita, nepravidelnost, necelistvost aj.). Základem pro rozhodnutí o správné terminologii (pojmenování) by měl být u každé NDT metody fyzikální základ metody, který diagnostikuje znak zjištění. Přehled návaznosti a vysvětlení užívaných termínů při nedestruktivním zkoušení ultrazvukem, použitelný s obměnami dle znaku zjištění pro všechny druhy nedestruktivního zkoušení.

Klíčová slova : nedestruktivní zkoušení, terminologie, reflektor, nestejnorodost, diskontinuita, nepravidelnost, necelistvost, vada, zkoušení ultrazvukem

V současné době je vydána celá řada ČSN, které uvádějí definice termínů “vada” a ekvivalentních souvisejících termínů a vysvětlení k tomuto pojmu (viz. Tabulka 1). Některé tyto normy byly vydány v sedmdesátých letech minulého století a zohledňovaly tehdejší stav zjištělosti různými, především destruktivními zkouškami. Řada z nich neuvážovala zjištělost nedestruktivním zkoušením, vzhledem k tomu, že možnosti současných metod nedestruktivního zkoušení nebyly v této době známy. Postupným převáděním a překládáním norem ISO a EN do češtiny byly české termíny těchto, na tehdejší dobu kvalitních norem přejímány více či méně do terminologických norem oboru nedestruktivního zkoušení, které v současné době existují s malými výjimkami pro všechny obory nedestruktivního zkoušení

(viz. Tabulka 2). České ekvivalenty v řadě případů nejsou srovnatelné s anglickými ekvivalenty jak v normách ISO, EN, včetně s anglicky psanou odbornou literaturou z oboru NDT.

Nechci polemizovat, zda české ekvivalenty překladů terminologických norem z oboru NDT jsou adekvátní anglickým výrazům. Setrvačnost (vžitost) v používání pojmu “vada” se určitě na překladech anglických termínů do češtiny projevila. Různé pojmy termínů “vada” a jejich ekvivalentů se objevují v odborných publikacích NDT jak v anglické, tak v německé psané literatuře z celého oboru NDT [1], [2], [3]. Nejednotnost užití těchto termínů se rovněž vyskytuje jak v českých normách tak v normách ISO a EN, včetně národních norem (BS, DIN, aj.). Přehled některých ekvivalentních pojmů s pokusem ve zjednodušené formě návaznosti termínů o systemizaci předkládám pro diskuzi (meditaci) v Tabulce č. 3. Jsem toho názoru, že terminologie musí vycházet z fyzikálních principů NDT.

Základem pro rozhodnutí o správné terminologii (pojmenování) by měl být u každé NDT metody fyzikální základ metody, který diagnostikuje znak zjištění. Všechny metody NDT jsou metodami nepřímými, tj. zjištění je prováděno diagnostickým znakem, který je u každé metody jiný.

Předkládaný přehled v Tabulce č.3 vychází z toho, že ultrazvukové zkoušení materiálu je založeno na fyzikálním zákonu, který definuje, že vysokofrekvenční zvukové vlny se odrážejí na rozhraní médií s různými akustickými impedancemi. Předkládaný výklad různých termínů a jejich synonym vysvětluje, jednak různě nejednotně používané termíny v normách a respektuje termíny různě používané v odborné literatuře oboru NDT [4], [5], [6].

Závěr

Měli bychom v každém oboru hovořit ve stejných pojmech a pod konkrétním pojmem si představit stejný obsah, obor NDT nevyjímaje. Předpokládám, že postupným sjednocováním názvů zjištěných znaků zkoušením a hodnocením dojdeme v celém oboru NDT a v oborech využívajících NDT ke konsensu.

Literatura:

- [1] McMaster, R.C., ed. : Nondestructive testing handbook, The Roland Press Company, Volume I., Volume II., New York 1959
- [2] Corsepius, H.W., Frielinghaus, R.: Testing Forgings Ultrasonically, Krautkrämer GmbH, Cologne 1989
- [3] Corsepius, H.W., Frielinghaus, R. : The Ultrasonic Testing of Austenitic Welded Joints, Krautkrämer GmbH, Cologne 1989
- [4] Časopis : NDT & E, Guildford, Oxford, ročníky 1984 – 2010
- [5] Časopis : ULTRASONICS, Guildford, Oxford, ročníky 1973-2010
- [6] Firemní časopis : Das ECHO, Krautkrämer GmbH.,Cologne, ročníky 1966 – 1999

PŘEHLED ČESKÝCH TERMINOLOGICKÝCH NOREM Z OBORU HUTNÍCH VÝROBKŮ, ODLITKŮ A SVARŮ <i>CZECH SURVEY FIELD TERMINOLOGY STANDARDS FOR METALLURGICAL PRODUCTS, CASTING AND WELDS</i>	
ČSN 42 124 : 1964	Vady odlitků. Názvosloví a třídění vad
ČSN 42 0015 : 1968	Vady tvářených ocelových hutních výrobků. Názvosloví a třídění vad
ČSN 42 0060 : 1992	Vady hutních předvýrobků a výrobků z neželezných kovů a jejich slitin. Názvosloví a třídění vad
ČSN 42 0062 : 1994	Vady výkovků z neželezných kovů a jejich slitin. Názvosloví a třídění vad
ČSN EN ISO 6520-1: 2008 (05 0005)	Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1 : Tavné svařování
ČSN EN ISO 6520-2: 2003 (05 0005)	Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2 : Tlakové svařování

<p align="center">PŘEHLED ČESKÝCH TERMINOLOGICKÝCH NOREM Z OBORU NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ MATERIÁLU</p> <p align="center"><i>OVERVIEW OF CZECH TERMINOLOGY STANDARDS IN THE FIELD OF NDT OF MATERIALS</i></p>	
ČSN EN 1330-1 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 1: Všeobecné termíny
ČSN EN 1330-2 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Část 2: Společné termíny pro metody nedestruktivního zkoušení
ČSN EN 1330-3 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané v průmyslové radiografii
ČSN EN 1330-4 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Termíny používané při zkoušení ultrazvukem
ČSN EN ISO 12718 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Zkoušení vířivými proudy
ČSN EN ISO 12706 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při zkoušení kapilární metodou
ČSN EN 1330-7 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při zkoušení magnetickou metodou práškovou
ČSN EN 1330-8 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při zkoušení těsnosti
ČSN EN 1330-9 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při zkoušení akustickou emisí
ČSN EN 1330-10 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při vizuální kontrole
ČSN EN 1330-11 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie - Termíny používané při rentgenové difrakci polykrystalických a amorfních materiálů
ČSN EN 16018 (01 5005)	Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Termíny používané při phased arrays (v přípravě)

DETEKCE A HODNOCENÍ
ZJIŠTĚNÍ PŘI NEDESTRUKTIVNÍM ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM
DETECTION AND EVALUATION IN NDT ULTRASONIC

REFLECTOR (ECHO, INDICATION)			
REFLEKTOR, ODRÁŽEČ, ECHO, OZVĚNA, INDIKACE			
Jsou veškeré kontaktní povrchy odrážející ultrazvuk, způsobující indikaci na obrazovce defektoskopu.			
Reflektory od: trhlin, prasklin, vložek, vměstků, pórů, bublin, staženin, ředin, přeložek aj.	Reflektory od struktury materiálu: - velké zrno, hranice zrn, řádkovitá struktura, mezilamelární vzdálenost perlitu, vycezeniny legur na hranicích zrn, stupeň prokování, grafit v litině, nestejnoroďá struktura, povrchová úprava aj.	Reflektory způsobené zkoušením: - špatná akustická vazba, bubliny a nečistoty při immerzním zkoušení, elektronický šum, rozlišovací schopnost sondy, linearita zesilovače, bludná echa aj.	Reflektory konstrukčního a tvarového typu: hrany, změny průřezů, zaoblené části, větší drsnost povrchu aj.

INHOMOGENITY NESTEJNORODOST, NEHOMOGENITA Jsou veškeré reflektory ze zkoušeného výrobku, které je nutno identifikovat .	
DISKONTINUITY DISKONTINUITA	IRREGULARITY NEPRAVIDELNOST STRUKTURY
Reflektory od: trhlin, prasklin, vloček, vměstků, pórů, bublin, staženin, ředin, přeložek aj.	Reflektory od struktury materiálu: - velké zrn, hranice zrn, řádkovitá struktura, mezilamelární vzdálenost perlitu, vycezeniny legur na hranicích zrn, stupeň prokování, grafit v litině, nestejnorodá struktura, povrchová úprava aj.

IMPERFECTION NECELISTVOST, (NEDOKONALOST), (ODCHYLKA) Jsou veškeré reflektory ze zkoušeného výroku, které mohou mít vliv na použitelnost (exploataci) výrobku a musí být zjištěny a musí být identifikován druh.			
DISKONTINUITY DISKONTINUITA		IRREGULARITY NEPRAVIDELNOST STRUKTURY	
Reflektory od: trhlin, prasklin, vloček, vměstků, pórů, bublin, staženin, ředin, přeložek aj.		Reflektory od struktury materiálu: - velké zrno, hranice zrn, řádkovitá struktura, mezilamelární vzdálenost perlitu, vycezeniny legur na hranicích zrn, stupeň prokování, grafit v litině, nestejnorodá struktura, povrchová úprava aj.	
Necelistvosti nepřípustné pro užití výrobků.	Necelistvosti přípustné pro použití výrobků.	Nepřavidelnosti nepřípustné pro užití výrobků.	Nepřavidelnosti přípustné pro užití výrobků

Tabulka 3 – část 4

DEFECT, FLAW, (FAULT), (NON-CONFIRMANCE) VADA (NESHODA) Vada má takové vlastnosti, které nesplňují kritéria přípustnosti .	
DISKONTINUITY DISKONTINUITA	IRREGULARITY NEPRAVIDELNOST STRUKTURY
Reflektory od: trhlin, prasklin, vloček, vměstků, pórů, bublin, staženin, ředin, přeložek aj.	Reflektory od struktury materiálu: - velké zrno, hranice zrn, řádkovitá struktura, mezilamelární vzdálenost perlitu, vycezeniny legur na hranicích zrn, stupeň prokování, grafit v litině, nestejnoroďá struktura, povrchová úprava aj.
Vady jsou veškeré necelistvosti indikované jako diskontinuity, které jsou nepřípustné pro jeho užití a nesplňují kritéria přípustnosti .	Vady jsou veškeré indikované nepravidelnosti struktury, které jsou nepřípustné pro jeho užití a nesplňují kritéria přípustnosti .



ON THE EFFECT OF THE AERATING AGENT CONTENT IN THE CONCRETE MIX ON THE CONSEQUENCES OF FREEZE CYCLES INDUCED DEGRADATION

Marta KORENSKA*, Pavel VYROUBAL**

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

** FIRESTA-Fiser, reconstructions, buildings, a.s., Brno

korenska.m@fce.vutbr.cz, vyroubal.pavel@seznam.cz

Abstract

Specimens manufactured from concrete mixes differing from each other in the content of the aerating agent were studied in our experiments. The acoustic emission method has been applied to studying acoustic phenomena arising in the material under test as a concomitant to the generation of micro-defects, which in turn result from the application of an external load. Both intact specimens and specimens which had been subjected to two different freeze-thaw degradation cycles were tested. The frequency of the acoustic emission overshoots, as recorded in the course of the measurements, has been processed using the cumulative curve method. Moreover, the Kaiser effect and the Felicity effect have been analyzed and evaluated. Analyses of our experiments furnish evidence for the acoustic emission signals to be able to reflect quite truly the degradation-induced crack generation and development processes.

To verify the existence of correlation, if any, between the acoustic emission parameter changes and the specimen structure integrity deterioration, additional methods have been applied to the test specimens, both non-destructive (changes in the ultrasonic impulse propagation velocity, changes in the dynamic modulus magnitude) and destructive (change in the flexural tensile strength, change in the compression strength). Our check-out measurements furnish evidence for the structure integrity deterioration to result from mechanical and thermal stressing and confirm the acoustic emission parameters to correlate with the material structure defect occurrence.

Key words: *Acoustic emission, concrete, thermal stressing, structure integrity deterioration, Felicity ratio*

1. Introduction

The durability of construction materials and the life-time of building structures depend on many factors, from the design and realization up to the exploitation conditions and the construction work maintenance. One of the sources of building structure failures consists in incorrectly formulated construction work exploitation specifications and in changes of the conditions of use in the course of their service life. The condition of concrete and reinforced concrete constructions, which had been put into service in the past century, became quite a problem. For the assessment of the actual condition of the construction, non-destructive methods are being looked for which would be able to identify the building structure defects in their early stage of development, clear them away in time and minimize their consequences [1]. The absence of applicable diagnostic methods appears to be ponderous in the cases of building structure breakdowns.

Acoustic methods appear to be very promising in the field building element and structures [5-9]. The acoustic emission method belongs to the acoustic method family. This method is in

a large extent used for the defectoscopy of homogeneous materials and simple-shaped bodies. It has however not been elaborated enough to cope with diagnosing highly inhomogeneous materials, which is just the case of concrete. Our research focused on studying the effect that the concrete mix composition has on the acoustic emission behaviour. Final material properties of the concrete result from a multitude of mutually dependent variables entering into this process in the course of concrete production and ageing [2]. Our research included also a subsequent intentional degradation of the specimen and its effect on the acoustic emission response. As a degradation process most frequently met in the building industry practice, low-temperature cyclic stressing (- 20 °C) was chosen [3]. Based on the studies carried out thus far, best suited acoustic emission parameters have been selected, the acoustic emission signal analysis has been carried out and the most efficient criterion for evaluating concrete specimen structure has been selected.

2. Experiment part

2.1. Experiment setup

Concrete joists of dimensions 100 mm x 100 mm x 400 mm, prepared in compliance with the ČSN EN 12390-2 standard, were measured in our experiments. Depending on the concrete mix composition, all specimens were divided into two groups of 10 specimens each. The first group specimens were manufactured from a concrete mix containing no additive agents (the air content amounted to $V_z \leq 2\%$ by volume). The second group mix contained an air-entraining agent (the air content amounted to $V_z \geq 4\%$ by volume). Ten specimens of each group were further distributed into three subgroups. The first of them, containing 4 reference specimens, was kept in laboratory environment conditions. The second subgroup (3 specimens) underwent 25 freeze-thaw cycles and the third one (3 specimens), 50 freeze-thaw cycles.

The concrete joists were subjected to flexural bending tensile load. Mechanical load tests comprised four loading cycles each, with maximum load forces amounting to: 3 kN, 6 kN, 10 kN, which were followed by a final cycle during which the force increased until the specimen destruction. The acoustic emission method, as well as the measuring apparatus has been described in detail, for example, in [4]. We are, therefore, going to present here only the recorded signal parameters, evaluated in the framework of this research:

- ⇒ Cyclic loading induced acoustic emission overshoots
- ⇒ Kaiser effect, Felicity effect and Felicity ratio
- ⇒ Correlation between the acoustic emission parameters and the specimen structure condition
- ⇒ Verification measurements.

The AE overshoot counts resulting from the loading cycles were picked up by six sensors and analyzed by means of a measuring setup containing a LOCAN 320 analyzer. Simultaneously, the growing load force magnitude versus time plot was recorded.

2.2. Measurement results

The measurement results have been processed and evaluated graphically in the Figures that follow.

2.2.1. A group specimens

The first series of diagrams corresponds to the measurement results of the reference specimens, represented by specimen denoted A2. Cumulative overshoot count number versus the load force plot was analyzed, see Fig. 1. Kaiser effect and Felicity effect between the

different load cycles were evaluated, too. It follows from Fig. 1 that Kaiser effect was operative between the first two load cycles. Felicity effect was operative also between the third and the fourth load cycles, with the respective felicity ratio $FP_3 = 0.81$. Microcracks have most probably arisen in consequence of the load force growth during the fourth load cycle, which is evidenced by an abrupt growth in the overshoot count, see Fig. 1. The diagram makes it possible to determine the load force F_{max} attained at the specimen destruction. For the reference specimen, A2, it was $F_{max} = 16,2$ kN.

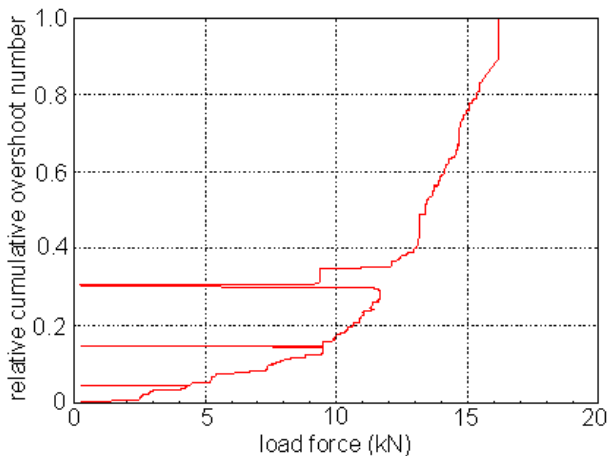


Fig. 1 Cumulative overshoot number versus load force plot, reference specimen A2

The diagram of Fig. 2 illustrates the behaviour of the subgroup of specimens which were subjected to 25 freeze-thaw cycles. This subgroup is represented by specimen denoted A9.

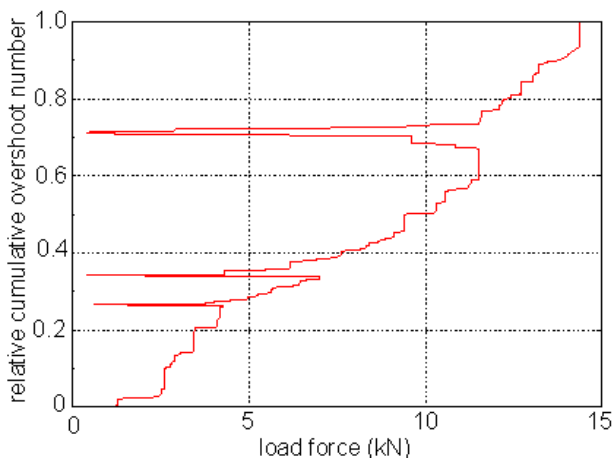


Fig. 2 Specimen A9 having been subjected to 25 freeze-thaw cycles

The Felicity effect is partly operative also in the cumulative overshoot count curve between the first and second load cycle. The respective Felicity ratio is $FP_1 = 0,86$. The Felicity ratio amounts to $FP_2 = 0.61$ and $FP_3 = 0,26$ between the second and the third load cycle, and the third and fourth cycle, respectively. The load force that brought about the specimen destruction amounted to $F_{max} = 14.4$ kN. Comparison with Fig. 1 shows that the overshoot relative counts are reaching higher values, particularly in the third load cycle.

The specimen subgroup which was subjected to fifty freeze-thaw cycles is represented by the measurement results of specimen A5, as shown in Fig. 3. Felicity effect is evident among all load cycles in case of this specimen. The FP_1 ratio between the first and the second cycle reaches the same value as that pertaining to the specimen A9 having been subjected to 25 freeze-thaw cycles. The value of the Felicity ratio occurring between the second and third cycle is lower, $FP_2 = 0.54$, being preceded by a higher growth of the overshoot count during the second load cycle. The values of FP_3 are also comparable between the third and fourth cycles. The specimen destruction took place at the load force $F_{max} = 11.9$ kN.

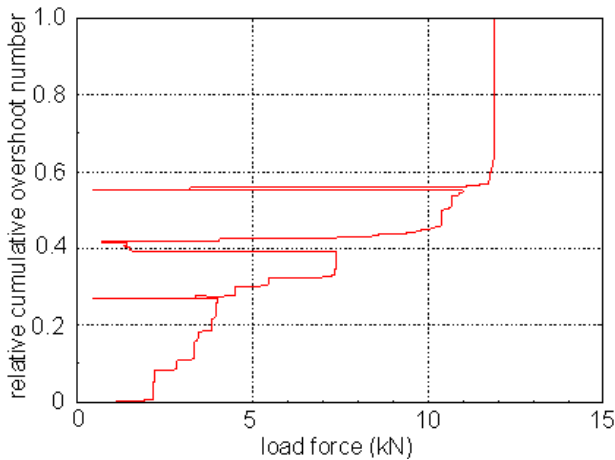


Fig. 3 Specimen A5 having been subjected to 50 freeze-thaw cycles

Verification experiments

In order to verify the results, additional physical quantities characterizing the specimen structure have been evaluated. Following quantities have been determined for the specimens under test: ultrasonic wave propagation velocity v_L , dynamic modulus of elasticity E_{bb} , flexural tensile strength f_{cb} , modulus of elasticity E_B , and, finally, the compressive strength f_c (on specimen fragments). Mean values of the measured physical quantities are shown in Table 1. When comparing the different subgroups it appears that the specimens, which underwent 25 freeze-thaw cycles, show a drop in the flexural tensile strength f_{cf} and in the mean modulus of elasticity E_B by 7.1% and 1.3%, respectively. The specimens which were subjected to 50 freeze-thaw cycles show the flexural tensile strength f_{cf} and the mean modulus of elasticity E_B to drop by 23.9% and 5.7%, respectively. The drop in the mentioned quantities correlates with the degradation degree growth.

Specimen designation	Specimen type	maximum force at destruction F (kN)	mean flexural tensile strength f_{cf} (MPa)	mean compressive strength f_c (MPa)	mean modulus of elasticity E_B (GPa)
A1	reference	15	7,1	64,2	40,3
A2		16,2			
A3		15,8			
A4		15,8			
A8	25 freeze-thaw cycles	14,3	6,6	60,3	39,8
A9		14,4			
A10		15,5			
A5	50 freeze-thaw cycles	11,9	5,4	49,1	38,0
A6		12			
A7		12,1			

Table No. 1 Flexural tensile strength, compressive strength and modulus of elasticity A specimen group

Fig. 4 shows a graphical comparison of AE parameter and selected verification quantities for the mentioned three specimens.

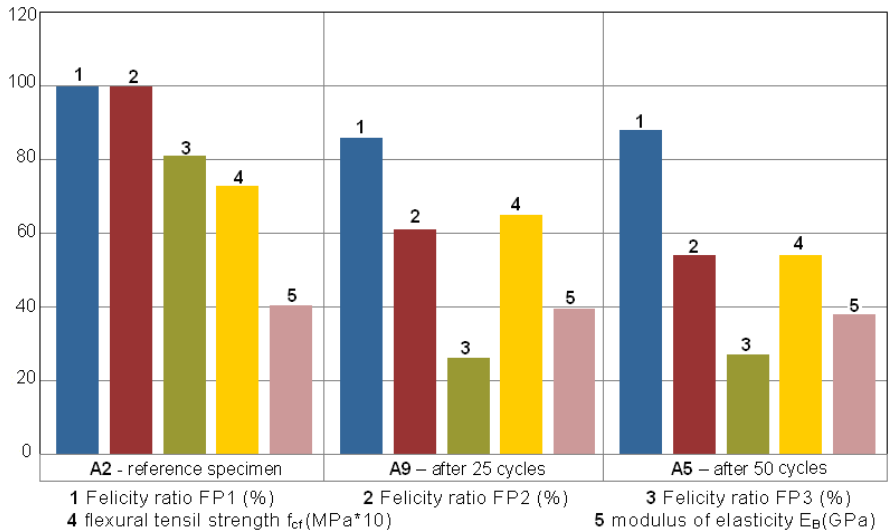


Fig. 4 Comparison of AE parameters and verification quantities as determined in the verification experiments – A specimen group

The measurement results obtained for the specimen cyclic loading show that the damaged structure of the degraded specimens really exercises influence on the the AE emission parameters. In the cumulative frequency plots, it becomes evident in both the higher number of events recorded at lower loads and the Felicity effect occurrence already between the initial load cycles. The load forces, which triggered the first Felicity effect, were as follows: specimen A2 - 55% of F_{max} , specimen A9 - 29% of F_{max} , specimen A5 - 26% of F_{max} . The values of this force are decreasing with the degradation cycle number. All of them fall into the deformation stage of the microcracks generation [10]. The FP values showed a decrease resulting from the freeze-thaw cycle number growth. The physical quantities characterizing the quality of concrete that have been measured in the framework of the verification experiments prove the deterioration of the structure integrity to be the consequence of the degradation cycle application, too.

2.2.2 B group specimens

The specimens of this group, B, have been manufactured from a mix containing the air entraining agent. The air content in the concrete mix amounted to $V_z \geq 4\%$ by volume. The distribution of the specimens into three subgroups, the measurement method and the parameters under investigation were the same as in the A specimen group. The measurement results of this specimen group are shown in a diagram, see Fig. 5, where a graphical comparison of the AE parameters and other physical quantity values, which were obtained in the verification experiments, is carried out.

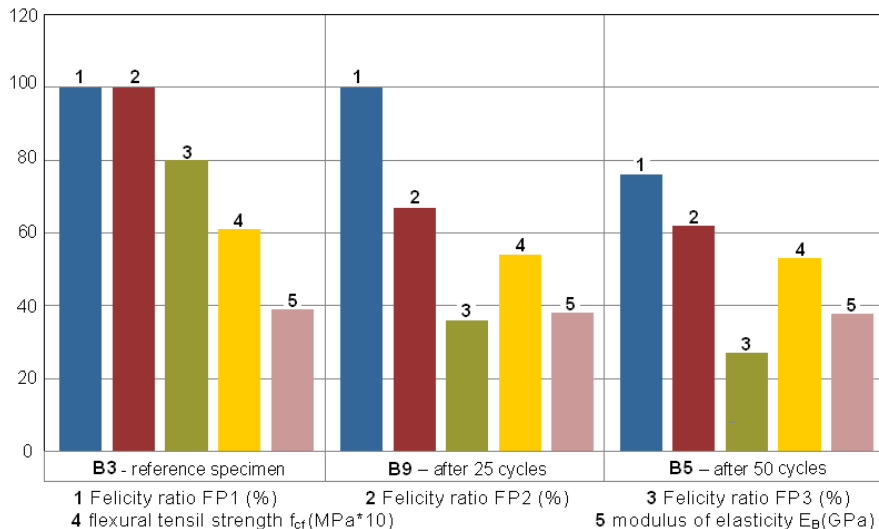


Fig. 5 Comparison of AE parameters and verification quantities as determined in the verification experiments – B specimen group

Our results of the B specimen group measurement furnish evidence of the correlation between the AE parameter changes and the damaged structure integrity of the specimen that have been subjected to degradation cycles. In the cumulative frequency plots, it has become evident in both the higher number of events recorded at lower loads and the Felicity effect occurrence already between the initial load cycles. The load forces, which triggered the first Felicity effect, were as follows: specimen B3 - 65% of F_{max} , specimen B9 - 33% of F_{max} , specimen B5 - 25% of F_{max} . The FP values showed a decrease resulting from the freeze-thaw cycle number growth, too. However, the absolute values of FP are higher as compared with those of the A subgroup, which may be indicative of the fact that the freeze-thaw-cycle-application-induced structure integrity deterioration is lower in the specimens containing the air-entraining agent. The physical quantities that have been measured in the framework of the verification experiments prove the deterioration of the structure integrity to be the consequence of the degradation cycles, too. However, if these results are compared with those obtained from the A specimen group it becomes evident that the air-entraining agent containing specimens show lower decrease in the specified quantity values. After 50 load cycles, the loss in value of the compressive strength f_{cr} amounted to 21.5% and that of the modulus of elasticity E_B , 5.6%, thus confirming the air-entraining agent containing specimens to be less damaged by the freeze-thaw cycles.

3. Conclusions

Concrete specimens were subjected to flexural bending load in cycles in compliance with ČSN EN 12390-5 Czech Standard. Acoustic emission signal were recorded throughout the measurement. Vyhodnocován byla kumulativní četnosti impulsů.

Felicity effect, carrying information on irreversible structural defects, was studied. The extent of the structure integrity deterioration amount was quantified by means of the Felicity ratio whose magnitude drops with the structure integrity deterioration. The Felicity ratio values were lower in the case of the specimens which had been degraded by freeze-thaw cycles. The amount of this decrease proved to correlate with the number of the degradation cycles applied.

The subgroups of specimens containing the air-entraining agent showed a lower drop in the Felicity ratio than the specimens with no air-entraining agent, which corresponds to the lower freeze-thaw-cycle-application-induced structure integrity deterioration in the specimens containing the air-entraining agent.

The relative values of the load force corresponding to the first occurrence of the Felicity effect are in all cases found in the deformation stage of the microcracks generation during the mechanical loading of concrete as defined in accordance with the current concepts of fracture physics.

Our verification measurements furnish evidence for the structure integrity deterioration resulting from mechanical and thermal stressing and confirm the acoustic emission signal parameters to correlate with the material structure defect occurrence.

Acknowledgments

The research described in this contribution is being solved within framework of the project No. 103/09/1499 by the Grant Agency of the Czech Republic and of the research project of the Ministry of Education of the Czech Republic under contract No. MSM 0021630519.

References

- [1] P. H. Emmons, R. Drochytka, Z. Jeřábek: *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1999.
- [2] Pytlík P.: *Technologie betonu*, Nakladatelství VUTIUM, Brno, 2000, ISBN 80-214-1647-5.
- [3] Weber, Z.: *Studium chování stavebních látek za extrémně nízkých teplot metodou akustické emise*, Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT Brno, 1983, B 94, pp. 63 – 68.
- [4] P. Vyroubal, M. Korenska: *Effect of Concrete Specimen Material Structure on Acoustic Emission Signal Parameters*. The 39th International Conference Defektoskopie 2009, 4 – 6 November 2009, Prague, Czech Republic, pp. 249 – 256, ISBN 978–214-3973-3.
- [5] Ohtsu M., Sakimoto T., Kacai Y., Yuji S.: *Evaluation of Concrete Structure Deterioration via AE Observation of Core Tests*, Journal of Acoustic Emission. 7, 1988, pp. 167-172.
- [6] Colombo S., Forde M.C., Main I.G., Shigeishi M. 2005. Predicting the Ultimate Bending Capacity of Concrete Beams from the “Relaxation Ratio” Analysis of AE Signals. *Construction and Building Materials*. 19, 2005, pp. 746 - 754.
- [7] M. Korenska, L. Pazdera, K. Pospíšil, J. Stryk, P. Vyroubal: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3 September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5.
- [8] M. Korenska, L. Pazdera, L. Ritickova: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184, ISBN 961–90610-1-3.
- [9] Kořenská M., Weber Z., Smutný J., Pazdera L.: *Aplikace moderních metod frekvenční analýzy na signál akustické emise {Application of Modern Time-Frequency Analysis on Acoustic Emission Signal}*, Medzinárodná vedecká konferencia, 60. výročie Stavebnej fakulty STU v Bratislave, Sekcia: Matematika a fyzika, Bratislava, Slovakia, November 18-20, 1998, pp. 33-36, ISBN 80-227-1135-7.
- [10] Weber Z., *Acoustic Emission of Concrete and Concrete Structures*. In: Proc. of RILEM, Brno 1987, 14 s.



NON-CONTACT THERMOGRAPHY IN EQUIPMENT STATUS DIAGNOSTICS

NEKONTAKTNÍ TERMOGRAFIE V DIAGNOSTICE STAVU ZAŘÍZENÍ

Milan KOSTELECKÝ, Miloslav PROCHÁZKA

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: info@tediko.cz

Abstract

Non-contact thermography - infrared (IR) thermography is one of thermodiagnostic branches. We know it under the name „thermovision“ in our region. People often join non-contact thermography with searching of persons by means of police or military helicopters, or with building industry and thermal state of buildings and as an auxiliary instrument for searching for electro-equipment failures. Much less known is the utilization of non-contact thermography principles in military – technique, armor and people masking (tracing of moving objects such as airplanes, rockets and missiles guidance against the target included), in agriculture – research and stock affection, in health service – general condition of human body (e.g. airports), location of inflammation in body etc., in environment sphere – dumping grounds, car industry – tyres, engines, aircraft applications, fires, heat distribution, power lines. The industry is another extensive sphere of measuring by means of non-contact thermography. We will concentrate on pipes, valves, furnaces and boilers diagnostics by means of the most common IR equipments in this article. This diagnostics is used for detection of failures, equipment condition investigation and monitoring, prediction and generally contributes to service life assessment.

Key words: *non-contact thermography, infrared (IR) thermography, equipment diagnostics, diagnostics in chemical industry and refineries, furnaces, tubes, equipment service life*

Abstrakt

Nekontaktní termografie - infračervená (IČ) termografie patří mezi obory termodiagnostiky. U nás je známější pojem „termovize“. Nekontaktní termografii mají lidé často spojenou s vyhledáváním osob pomocí policejních nebo vojenských vrtulníků, popř. ve spojení se stavebním průmyslem a s tepelným chováním budov a jako pomocník při hledání závad na elektro zařízeních. Méně je veřejnosti známé uplatnění principů nekontaktní termografie ve vojenství – v oblasti maskování techniky, lidí, apod. (včetně využití ve sledování pohybujících se objektů jako letadel, raket a navádění střel na cíl), v zemědělství – výzkum a onemocnění dobytka, ve zdravotnictví – diagnostice celkového zdravotnického stavu člověka (na letištích), lokalizace zánětů v těle apod., v oblasti životního prostředí – skládky, automobilový průmysl – pneumatiky, motory, letecké aplikace, požáry, rozvody tepla, elektrická vedení. Další rozšířenou oblastí měření pomocí nekontaktní termografie je výrobní průmysl. V tomto příspěvku se zaměříme na diagnostiku potrubí, armatur, pecí a kotlů pomocí nejmodernějších IR zařízení. Tato diagnostika slouží k odhalování poruch, zjišťování a sledování stavu zařízení, predikci a celkově přispívá i k určení životnosti zařízení.

Klíčová slova: *nekontaktní termografie - infračervené (IČ) termografie, diagnostika zařízení, diagnostika v chemickém průmyslu a rafinériích, pece, trubky, životnost zařízení*

1. Úvod

IČ termografie zobrazuje tepelné pole na povrchu snímaného tělesa pomocí energie a hustoty fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa a zabývá se jeho kvantifikací – vyhodnocením.

Zařízení určená pro infračervená termografická měření pracují jako transformační zařízení, která umí zobrazit pro člověka neviditelné infračervené (dále IČ) záření vyzařované z povrchu těles a to v závislosti na jejich tepelném stavu. Zobrazovací termografická zařízení, která umí tuto transformaci, jsou nazývána infrakamery nebo také termokamery. Výsledným produktem získaným z infrakamery je termogram – tedy zobrazení teplotního pole na povrchu měřeného objektu.

V povědomí veřejnosti je IČ termografie spojená především se zpravodajstvím, ve zprávách občas zazní informace, že policie pátrá po pohřešované osobě pomocí IČ kamer na vrtulníku. Zájemci o letectví zase znají pojem FLIR nikoliv jako jméno špičkového výrobce termovizní techniky ale jako zkratku pro Forward Looking Infra Red v navigačních a střeleckých systémech vojenských letadel, což je infračervený pohled s vysokým rozlišením, který je převáděn na obrazovku před pilotem. Koneckonců vojenská výroba je u FLIRu nejspíše dominantní.

Aplikace u rozvodů elektrické energie jsou také známější aplikací. Pomocí relativně jednodušších a levnějších systémů lze zjistit, kde se jaká část, např. kontakt, relé, pojistka, motor atd. přehřívají a lze tedy např. zjistit místo s velkým přechodovým odporem, zkratované místo atd.

Stejně tak aplikace ve stavebnictví jsou asi poměrně jasné. Hovořovalo se o tepelných auditech v programech zateplování budov. Jsou-li realizovány či ne a jakým způsobem – to nechme raději stranou, zatepluje každý a všechno a nejspíše bez znalosti stavu. Faktem ale je, že IČ termografie odhaluje pozoruhodné věci. Obzvláště pozoruhodné a často až neuvěřitelné u panelových domů.

Nechme ale aplikace ve stavebnictví tam, kde jsou, v tomto článku se budeme věnovat aplikacím zcela jiným.

2. Proč používat v ve výrobním průmyslu bezkontaktní termografii

Nabízí se hned několik odpovědí. Největší výhodou pro IČ měření je to, že měření může probíhat za plného provozu. Závady lze zaměřovat rychle a bez přerušování výrobních procesů nebo omezování příkonu elektrické energie. Zadavatel si dokonce může nasimulovat různou provozní zátěž a my můžeme v reálném čase sledovat, jak se dané zařízení chová. Tento postup se uplatňuje u nových zařízení, která jsou nově dána do provozu a mají záruční dobu. Můžeme s předstihem stanovit neplánované výpadky nebo odstávky měřených technologií. Další výhodou je, že ze změřených existuje záznam – termogram. Tento záznam je i pro laika čitelný (tedy i laik odliší od sebe místa různě teplá, samozřejmě ale těžko bude provádět vyhodnocování, které v sobě zahrnuje množství dalších aspektů). Protože se jedná o bezkontaktní metodu měření, může měření probíhat z bezpečné vzdálenosti, která chrání zdraví obsluhy, např. proti popálení. IČ termografie sama je pro zdraví člověka zcela bezpečná, stejně tak pro životní prostředí – nevytváří ani záření, ani odpadní produkty.

Kromě výše uvedeného mohou informace z měření, pokud je správně připraveno a zrealizováno, sloužit také k ohodnocení stavu zařízení a to dokonce až jako pomocné a důležité informace pro výpočet životnosti zařízení.

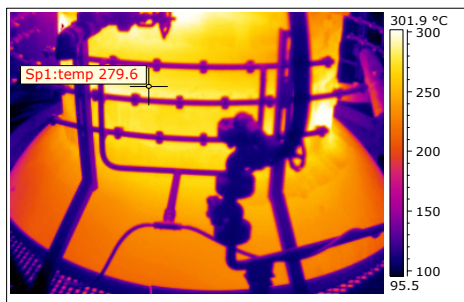
Měření ve výrobních závodech jako např. chemickém průmyslu, rafinériích, ve výrobě elektřiny a tepla apod. je realizováno za následujícími účelem :

- zjištění kritických míst z hlediska probíhajících procesů – např. přílišný ohřev nějaké části zařízení a jeho vysoká teplota, která bude degradovat jeho mechanické vlastnosti a vyčerpávat jeho životnost podstatně rychleji než bylo předpokládáno, tedy vlastně i získání informace o místech, kde je vysoká pravděpodobnost poruchy a možnost jí předejít přijetím nápravných opatření
- za provozu vytipování míst, která je vhodné v odstavce zařízení zkontrolovat některou z metod nedestruktivního zkoušení, resp. kde je třeba odebrat vzorky materiálu pro provedení materiálových rozborů
- zjištění míst, která se nechovají podle předpokladů – např. výměník nechladí či naopak neohřívá jak měl, armatury se nedají úplně zavřít a podtékají atd.
- přímo zjištění poruch – prasklé vyzdívky, chybějící izolace, mokré izolace, úniky média (někdy pro lidské oko neviditelného)

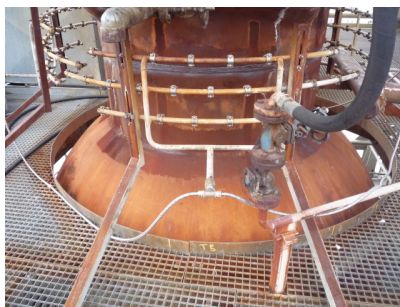
Samozřejmě asi bychom našli podstatně více účelů a aplikací ale pro základní představu je to dostatečné.

Při měřeních je dobré pořizovat nejenom termogram ale i fotografii v normálním spektru a to ze stejného či téměř stejného místa. Je nutné mít na paměti, že termogram přeci jenom vypadá trochu jinak než „náš“ a tedy i fotografický pohled na měřené zařízení a to, co na místě při měření bylo jasné a samozřejmé, nemusí být při vyhodnocování v klidu kanceláře jasné vůbec.

Na následujících dvou obrázcích je jeden z příkladů měření tlakového zařízení :



Obr. 1 Termogram kritického místa
Fig. 1 Critical area thermogram

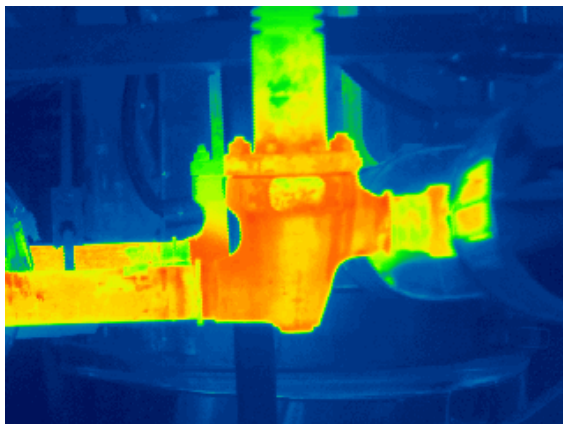


Obr. 2 Totéž místo na fotografii
Fig. 2 Photo of the same area

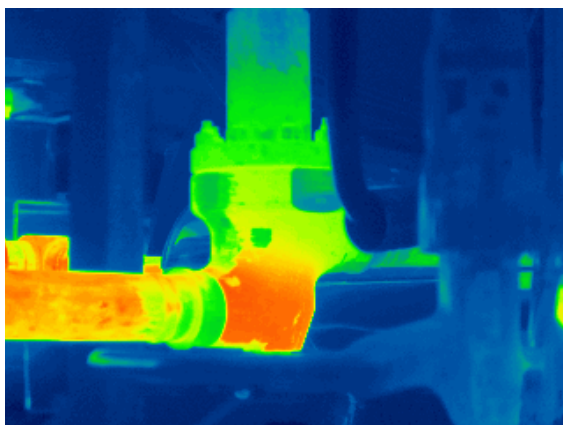
3. Měření armatur pomocí IČ termografie

Dále se budeme zabývat konkrétními příklady. Častým IČ měřením v elektrárnách je měření podcházení armatur. Tato zařízení se většinou nacházejí ve velmi teplém prostředí a navíc médium, které proudí uvnitř armatury přesahuje 100°C. Dochází k častému porušení těsnění nebo dosedacích ploch uvnitř armatur a tím

ke zbytečným ztrátám. Pomocí termovizní techniky jsme schopni rozpoznat tento problém a včas nahlásit závadu provozovateli, který může provést rychlou opravu. U armatury na obrázku č. 3 je zcela zřetelně viditelné rozložení teploty po celém jejím povrchu, což je důkazem, že tato armatura potřebuje opravu, protože netěsní. Opačným příkladem je armatura na následujícím obrázku, kde teplota největší teplota se nachází ve spodní části (světle červená oblast) a tím je zaručena její těsnost.



Obr.3 Podcházející armatura
Fig. 3 Leaky valve

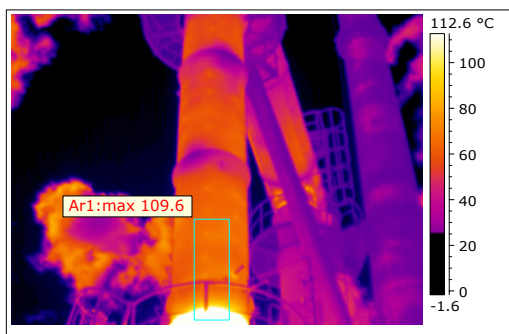


Obr.4 Nepodcházející armatura
Fig. 4 Tight valve

4. Měření izolací a vyzdívek kouřovodů

Důležitou součástí výrobních technologií v chemickém a petrochemickém průmyslu jsou vyzdívky především pecí a kouřovodů. Zde dochází během provozu k praskání a následně až vypadávání částí vyzdívek, což má za následek poškozování materiálu pláště těchto zařízení. Při provozu takto zatíženého zařízení může dojít k odstavení celé technologie nebo v horším případě i k újmě na zdraví osob pohybujících se v bezprostřední blízkosti tohoto zařízení.

Jeden z příkladů je na obrázcích 1 a 2. Na následujícím obrázku č. 5 je další příklad - část kouřovodu, kde došlo k počátečnímu narušení vyzdívky. Teplota zatím nepřekročila 109,6°C, avšak teplota na kouřovodu, kde není porušená vyzdívka, nepřekročila 37°C.



Obr. 5 Termogram kouřovodu
Fig. 5 Flue gas ducting thermogram



Obr. 6 Totéž místo na fotografii
Fig. 6 Photo of the same area

5. Měření skrz plameny nebo kouřové pliny

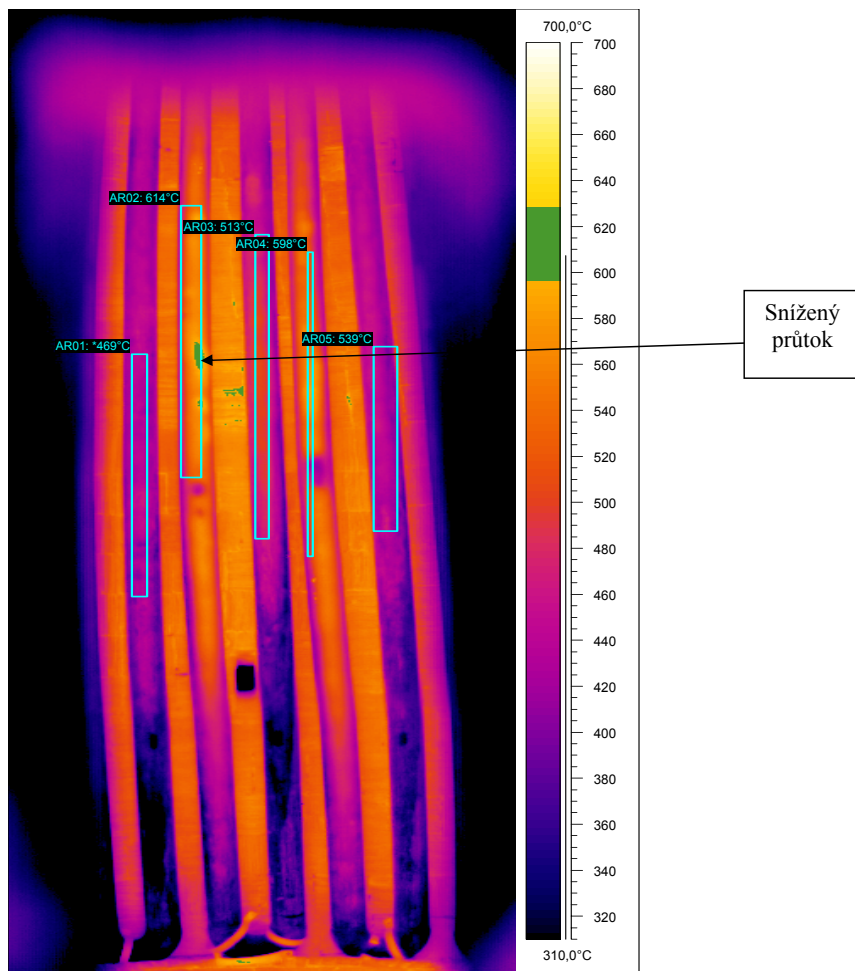
Tento způsob měření patří k nejnáročnějším technikám IČ měření. Měření se provádí za provozu, kamera je vystavena relativně vysokým teplotám a proto je chráněna speciálním štítem. Navíc kamera musí být schopná provádět měření „skrz“ plameny, což bude popsáno dále. Toto měření nelze v žádném případě realizovat běžnými termovizními kamerami používanými např. v oblasti stavebnictví, elektrických rozvodů atd. Takováto specializovaná měřicí zařízení jsou velmi drahá a cenově až o řád vyšší než „obyčejné“ kamery. V České republice se zabývá tímto druhem měřením společnost naše společnost.

Pro měření „skrz“ plameny musí být použita infракamera s vysokým teplotním rozsahem a filtrem, který umí odfiltrovat plamen, který se pohybuje ve vlnové délce 3,7 μm až 3,9 μm. Díky této speciální technice můžeme měřit teplotu na povrchu trubek – vlásenek uvnitř pece nebo kotle s přesností 2% na 100°C. Citlivost přístroje se pohybuje <25mK. Samotné měření probíhá z průzorů, které se nacházejí vně technologie. Uvnitř technologie se pohybuje teplota od cca. 450°C do 900°C. Měření v tomto uzavřeném prostředí vyžaduje velkou zkušenost operátora infракamery.

Nastavení parametrů do softwaru IČ kamery musí být přesné. Jedná se především o emisivitu, odraženou teplotu, propustnost optiky, teplotu a vlhkost okolí. Při špatném nebo neúplném zadání parametrů dojde ke zkrácení měřené hodnoty, tudíž k velké chybě měření. Dalším důležitým faktorem jsou vyhodnocovací software např.

Report 8.3. Tento software umí s velkou přesností vyhodnotit přenesená data z infrakamery do PC pomocí USB karty. Pomocí něho můžeme určit teplotu bodu, oblasti nebo si určit graficky teploty oblasti pomocí křivky atd. Velmi zajímavým prvkem je „obraz v obraze“ tj. kombinace fotky a termogramu v jednom obraze.

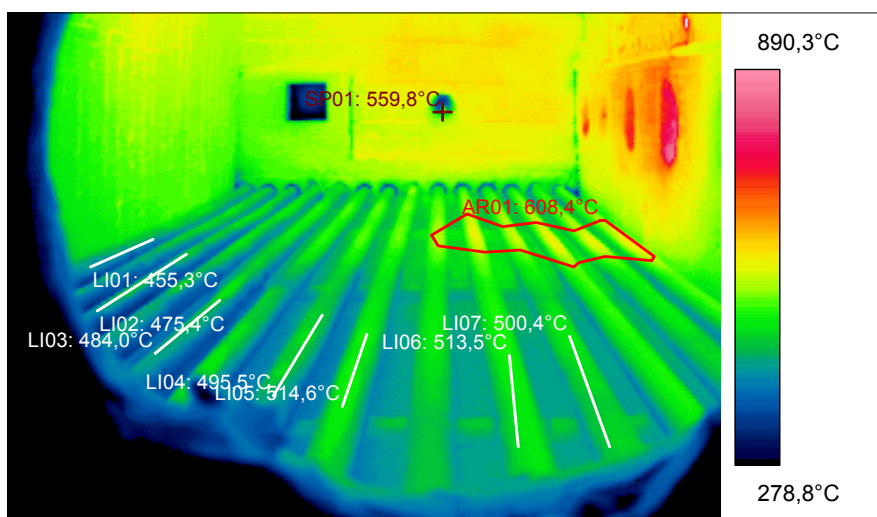
Jak jsme si nastínili, měření vlásenek uvnitř pecí nebo kotlů probíhá z průzorů z vnější strany zařízení na protilehlý průzor, kde je umístěn etalon pro upřesnění parametrů, které se zadávají do softwaru IČ kamery. Etalony jsou vlastně výřezy o stejné materiálové kvalitě jako jsou měřené vlásenky. Na zadní části jsou připevněny termočlánky, které jsou propojeny se čtecí jednotkou. Tyto etalony jsou kalibrovány v odpovídající laboratoři a jsou opatřeny kalibračními listy.



Obr.7 Snížený průtok vlásenkou
Fig. 7 Tight valve

Podstatou IČ měření vlásenek pecí a kotlů je ta, že kontrolujeme stav uvnitř technologie (vyzdívky, úchyty vlásenek, hoření hořáků apod.). Největší důraz se klade na průtok média uvnitř vlásenek. Při špatném průtoku (snížení světlosti vlásenky způsobené usazeninami) dochází k oteplení místa zúžení (viz obr.7), kde teplota dosáhla 614°C oproti vlásenkám s běžným průtokem s teplotou cca.469°C až 539°C.

Na dalším obrázku je ukázána situace, kdy dochází k velkému místnímu oteplení povrchu vlásenek díky špatnému nastavení hořáku. Teplota oblasti v době měření dosáhla 608,4°C. Vlášeny mimo měřenou oblast však dosahovaly teploty kolem 500°C. To znamená, že rozdíl byl až 100 stupňů Celsia.



Obr.8 Špatně nastavený hořák
Fig. 8 Badly adjusted burner

6. Závěr

Musíme si uvědomit, že termografie je věda postavená na šíření infračerveného záření, principů přenosu tepla, atmosférických vlivů, principů radiometrie, znalostí příslušných zařízení atd. Není to tedy v žádném případě jednoduchá záležitost. Používaná zařízení jsou cenově dokonce v rozsahu 1-2 řádů ! Od desítek tisíc po miliony korun. Liší se samozřejmě výrazně technicky, svým vybavením, softwarem atd. Z výše uvedeného je zřejmé, že přestože se všechna zařízení nazývají stejně termovizními kamerami, je to z tohoto úhlu pohledu stejně obecný pojem jako to, co si vše můžeme představit pod pojmem automobil.

Tím, že se termografická zařízení stávají dostupnější pro širokou veřejnost vzrůstá zároveň riziko, že se tyto přístroje dostávají do rukou osob, které ač jsou neznalé problému, nazývají se odborníkem termografie. Teplotu těla si může změřit téměř

každý, ale případnou léčbu musí určit odborný lékař. Stejně tak ultrazvukáře ultrazvukářem neudělá zakoupení přístroje a rentgenáře rentgenářem vlastnictví izotopu. Tím naznačuji, že bez potřebných znalostí termovizní kamera ze svého majitele odborníka na termografii neudělá, stejně jako stetoskop neučiní ze svého vlastníka doktora.

Praxe i teoretické znalosti jsou důležité. Proto musí mít operátor termografického zařízení nejméně 3 roky praxe v oboru, musí být certifikován dle ČSN ISO/ICE 17024 – Technik diagnostik termografie a dále musí znát provoz měřeného zařízení.



LONG-TERM MONITORING OF HYDRATION AND CONCRETE CURING USING METHODS OF IMPEDANCE SPECTROSCOPY

DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ HYDRATACE A ZRÁNÍ BETONU S VYUŽITÍM METODY IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE

Ivo KUSÁK*, Miroslav LUŇÁK*, Luboš PAZDERA*, Libor TOPOLÁŘ*,
Vlastimil BÍLEK**

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

**ŽPSV a.s. Company, Křížíkova 68, 60200 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: kusak@dp.fce.vutbr.cz, lunak@dp.fce.vutbr.cz,
lubos@dp.fce.vutbr.cz, topolar.l@fce.vutbr.cz, bilek@zpsv.cz

Abstract

Nondestructive diagnostics of concrete materials and non-cement-based materials is the subject of current research for developed methods of testing building materials. Behavior of concrete components in the early stages of solidification also gives information about future product qualities of concrete. Common methods include monitoring the volume change components, thermal characteristics and approaches to the study of electrical properties. Our comprehensive measurements carried out continuously and at 28 days. The values of electrical quantities of material during solidification and possible association with stress in the material are correlated. Electrical parameters are evaluated: in particular, capacity, resistance and loss factor at frequency of alternating electric field. During hardening of the concrete panel is an internal tension, which is trying to describe by mentioned electric quantities.

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

Abstrakt

Nedestruktivní diagnostika betonových materiálů na cementové i bezcementové bázi je předmětem současného výzkumu v oblasti rozvíjených testovacích metod stavebních materiálů. Chování betonového dílce v prvních fázích tuhnutí dává informace také o budoucích kvalitách betonového výrobku. Mezi běžné metody patří sledování objemových změn dílce, teplotních charakteristik a přistupuje se ke zkoumání elektrických vlastností materiálu. Naše komplexní měření probíhají kontinuálně až v délce 28 dní a dále. Do vzájemných souvislostí jsou položeny hodnoty elektrických veličin materiálu v průběhu tuhnutí a možná souvislost s napětím v materiálu. Vyhodnocovanými elektrickými veličinami jsou zejména kapacita, rezistence a ztrátový činitel při střídavé frekvenci elektrického pole. Během tuhnutí betonového dílce dochází k vnitřnímu pnutí, které se snažíme postihnout právě zmíněnými elektrickými veličinami.

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

1. Úvod

Kvalita betonu závisí na tunutí a tvrdnutí. Sledování tohoto děje je možné některými metodami nedestruktivního testování. Metodou impedanční spektroskopie, která patří do skupiny metod Nedestruktivního testování, byly charakterizovány vzorky betonu a sledovány změny ve spektru při jeho hydrataci. Byly pozorovány rozdíly ve spektru $\tan \delta(f)$ a $C(f)$, resp. $R(T)$ u vzorků a popsána kvalita pomocí druhu ztrát dominujících v materiálu.

Změna elektrických veličin je způsobena chemickým procesem a s tím spojenými aspekty jako je například prnutí v materiálu nebo tvorba pórovité struktury. Přítomnost záměšové vody při tvorbě betonové směsi ovlivňuje jakost materiálu v podobě výsledné tahové a tlakové pevnosti, ovlivňuje pórovitost.

Právě póry a jejich tvorba poskytují zdroj informací o mnohých vlastnostech látky [1]. Informují o deformacích struktury, stupni mechanických napětí a o technologických důsledcích pórovité látky (pevnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost, smrštění aj.).

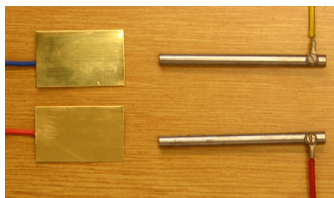
Pórovitost cementového kamene je složena z pórů jednak vzniklých v čerstvém betonu (a které zůstaly i ve ztvrdlém betonu), a jednak z pórů vzniklých při hydrataci cementu. Póry lze rozdělit na makropóry (průměr $d > 1 \mu\text{m}$, technologické P_T a provzdušňovací P_P) a na mikropóry s průměrem do $1 \mu\text{m}$ (někteří autoři uvádí až $10 \mu\text{m}$), které jsou dále rozděleny na gelové P_G , hydratační P_H a kapilární P_K .

Celková pórovitost cementového kamene P_{CK} je součtem [1]:

$$P_{CK} = (P_T + P_P) + (P_G + P_H + P_K) \quad (1)$$

2. Popis měřeného materiálu a elektrod

Elektrody (Fig. 1) byly vyrobeny dvojího typu. První z mosazného plechu tloušťky 1 mm a plošných rozměrech 25x40 mm. Druhé z hlazené oceli o průměru 6 mm a délce 75 mm (zapuštěná délka 65 mm). Zapuštěné elektrody (Fig. 2) jsou zapuštěné za pomoci teflonové desky, která zaručuje mezosovou vzdálenost elektrod 3 cm a jejich rovnoběžnost.

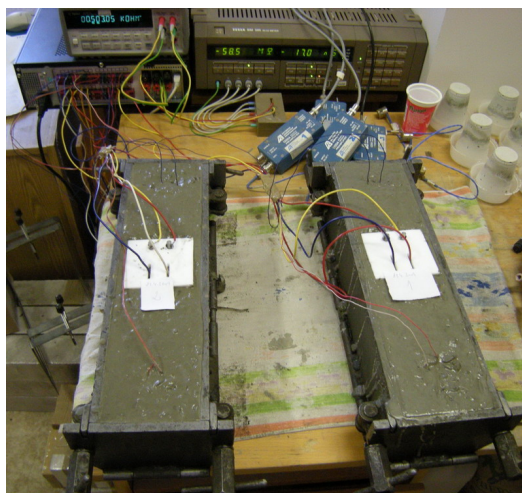


Obr. 1 Typy elektrod zapouštěných do betonu

Fig. 1 Type of electrodes sunk into concrete

Receptura betonu	1 m ³	Mechanické vlastnosti	
Vodní součinitel	0,33	Zpracovatelnost	F4
CEM I 42,5 R Mokrá	420	f _{c1} [MPa]	48,4
Metakaolin Mefisto K05	35	E ₁ [GPa]	29,0
Voda	150	f _{c2} [MPa]	60,5
Superplastifikátor	7,5	E _{2,rh=95} [GPa]	-
Písek 0/4 Kinsky	625	E _{2,rh=60} [GPa]	30,4
Drť 4/8 Litice	245	f _{c28} [MPa]	105,1
Drť 8/16 Litice	975	E _{28,rh=95} [GPa]	40,5
		E _{28,rh=60} [GPa]	37,3

Tab. 1 Receptura betonu a jeho mechanické vlastnosti
Tab. 1 Recipe of concrete and its mechanical properties



Obr. 2 Zobrazení pracoviště (betonové vzorky, přístroje a zapuštěné elektrody). Vzorek vpravo označen číslo 1, vzorek vlevo označen číslo 2 a v průběhu experimentu obalen smršťovací folii

Fig. 2 Display of work place (concrete samples, devices and embedded electrodes). Sample No. 1 is labeled on the right, left sample is labeled number 2 during the experiment wrapped in shrink foil

Beton byl míchán v laboratorní míchačce v množství 35 l. Pro měření pevnosti v tlaku f_c byly zhotoveny krychle o hraně 150 mm a pro měření metodou impedanční spektroskopie a pro měření statických modulů pružnosti E hranoly o rozměrech 100x100x400 mm. První hodnoty pevností a modulů pružností byly měřeny ve stáří

24-26 hodin, další ve stáří 2 dny a 28 dní, obojí na vzorcích uložených ve vlhkém uložení (r.h. 95 %) a na vzduchu v laboratoři (r.h. 60 %).

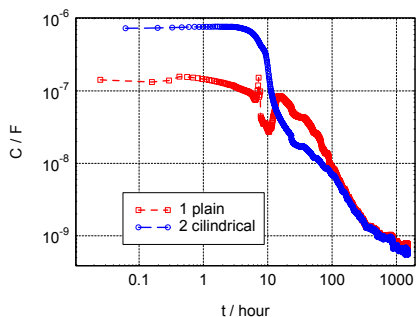
Elektrody byly do měřené směsi vloženy za cca 15 minut od namíchání, přičemž vlastní měření započalo po 1,5 hodině.

U této směsi s vodním součinitelem 0.33 je patrné, že statické moduly pružnosti a pevnosti v tlaku se se stářím zvyšují. Svoji roli zde patrně hraje voda ve struktuře a utváření výše zmíněné pórovité struktury.

3. Výsledky

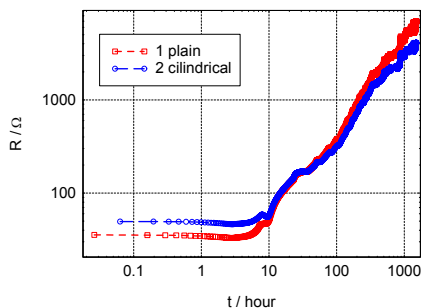
Realizovaná kontinuální měření v rozsahu až 1080 hodin poskytla řadu časových závislostí elektrických veličin. K analýze byly zvoleny níže prezentované závislosti.

Graf na obrázku 3 srovnává elektrickou kapacitu vzorku v oblasti elektrod při frekvenci elektrického pole 1 kHz. Kapacita se mírně liší pro plošné elektrody a trubičkové elektrody. Je to způsobeno tvarem elektrod, jejich plochou, vzdáleností elektrod a vlivem orientace elektrod vzhledem ke kovové formě pro výrobu experimentálního vzorku. Není naším záměrem srovnávat absolutní hodnoty elektrické kapacity mezi rozdílnými elektrodami.



Obr. 3 Kapacita vzorku za použití dvou typů elektrod, $f=1$ kHz

Fig. 3 El. capacity of sample for two different type of electrodes, $f=1$ kHz



Obr. 4 Elektrický odpor vzorku za použití dvou typů elektrod, $f=1$ kHz

Fig. 4 El. rezistance of sample for two different type of electrodes, $f=1$ kHz

V obrázku 3 pozorujeme v prvních hodině minimální nárůst kapacity u obou použitých elektrod, po první hodině od započetí měření, což odpovídá přibližně 1,5 hodiny od namíchání, dochází k poklesu kapacity o jeden řád. Krátce před 10 hodinou pozorujeme u plošných elektrod nárůst kapacity, který může být způsoben přechodem mezi měřícími rozsahy použitého RLCG mostu, ale také možnou manipulací se vzorkem při aplikaci čidel metody akustické emise. Podstatný je však nárůst hodnot kapacity u plošných elektrod po 10 hodině, u hodnot kapacity válcových elektrod k nárůstu nedochází, pouze se zvolňuje klesání hodnoty kapacity. Záměsová voda dosud zaplňuje prostor mezi částicemi směsi, vzorek je dosud plastický a napětí ve vzorku je minimální, je kompenzováno transportem vody a změnou polohy některých částic. Voda se stále více váže na částice pojiva. Pórovitost roste.

Po 15 hodině však kapacita vzorku u plošných elektrod opět klesá. Po 23,5 hodině nastává u obou křivek výraznější pokles, křivka však naváže na původní trend poklesu ve 35. hodině. Zbývající záměsová voda připomínající nyní spíše elektrolyt s permitivitou vyšší než permitivita vzduchu se navazuje na pojivo a mizí z makropórů. V materiálu klesá permitivita a tím elektrická kapacita. Lze se domnívat, že ve vzorku narůstá výrazně prnutí, vzorek přestává být plastický, roste četnost mikrotrhlin.

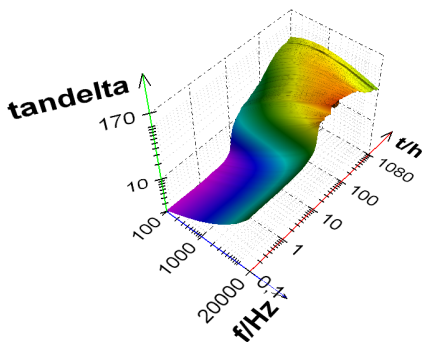
Po přibližně 100 hodinách měření nabývají hodnoty kapacit srovnatelných hodnot a po zbytek doby zrání betonu se hodnoty výrazně neliší. Tvar křivek v logaritmických souřadnicích na obou osách v čase od 10. hodiny není v celém intervalu přímkový, nelze použít aproximaci $\log C = k \cdot \log T + q$, kde k a q jsou koeficienty, proto změny elektrické kapacity neprobíhají exponenciálně v celé zbylé části intervalu.

V grafu logaritmické závislosti elektrického odporu na logaritmu času $\log R(\log t)$ srovnáváme elektrický odpor při frekvenci budícího elektrického pole 1 kHz obou typů použitých elektrod. Opět nelze porovnávat hodnoty měřené veličiny, pouze změny ve spektru a trendy. Opět pozorujeme srovnatelný tvar spektra u obou typů elektrod do doby 8 hodin. Následuje nárůst a na několik hodin pokles u křivky elektrického odporu určeného pomocí válcových elektrod, zatímco hodnoty odporu u druhé křivky neklesají. Napětí v betonovém dílci je malé, je kompenzováno plastičností materiálu. Od 10 hodiny drží obě křivky stejný trend. Roste elektrický odpor, roste pórovitost a napětí v materiálu. Po 13 hodině až do doby 100 hodin jsou hodnoty elektrického odporu srovnatelné. Hodnoty elektrického odporu měřeného deskovými elektrodami rostou více prudce než u válcových elektrod. V závěru intervalu pozorujeme hodnoty 6000 Ω a 3500 Ω .

Při pohledu na celá spektra opět nelze nahradit průběh změn elektrického odporu při hydrataci přesně exponenciální závislostí, můžeme zatím říci, že nejbližší k exponenciálnímu průběhu je křivka odporu betonu u válcových elektrod od 8. hodiny. Při hledání trendu u této křivky docházíme k tvaru pomyslné obálky křivky v podobě: $\log R = +0.832 \log T + 0.971$. po odlogaritmování: $R = 9.4 \cdot (T^{0.8})$. Nejpodstatnější je parametr exponentu 0.8, který se ukazuje velmi podobný i u jiných cementových směsí.

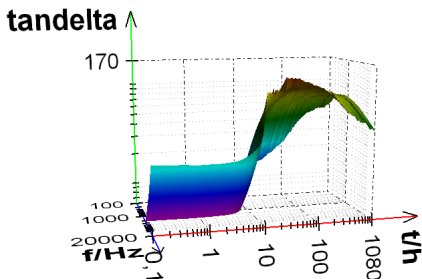
V grafu na obrázku 4 pozorujeme od přibližně páté hodiny hydratace exponenciální nárůst elektrického odporu vzorku. Předpokládá se úzká souvislost s nárůstem pórovitosti, ke kterému dochází přítomností gelových pórů, hydratačních pórů a kapilární pórovitosti. Za využití Fagerlundova empirického vztahu pro stupeň hydratace cementu bude hledán podíl druhů pórů na celkové pórovitosti a její závislost na čase hydratace.

Velmi zajímavými a komplexními jsou spektra ztrátového činitele $\tan \delta$ na frekvenci pro celé období hydratace. Na obrázcích 5 a 6 jsou znázorněna spektra u válcových elektrod.



Obr. 5 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.1, měřeno válcovými elektrodami, pohled 1

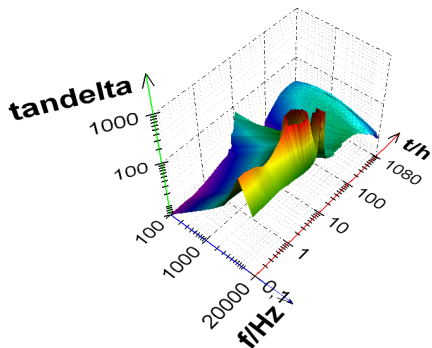
Fig. 5 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.1, cylindrical electrodes measured, face 1



Obr. 6 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.1, měřeno válcovými elektrodami, pohled 2

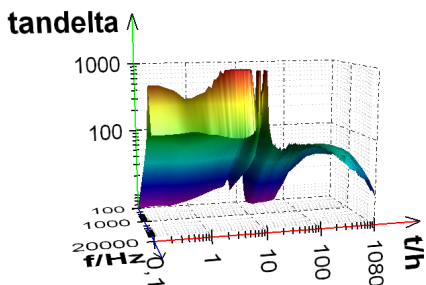
Fig. 6 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.1, cylindrical electrodes measured, face 2

Po desáté hodině se hodnoty zvyšují, to odpovídá nárůstu pevnosti v tlaku, napětí ve vzorku narostlo. Odtud se objevené maximum plochy přesunuje s časem k nižším částem spektra a jeho absolutní hodnota klesá. Přítomnost obloukového tvaru křivky svědčí o dominujících polarizačních ztrátách před vodivostními.



Obr. 7 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.1, měřeno plošnými elektrodami, pohled 1

Fig. 7 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.1, planar electrodes measured, face 1

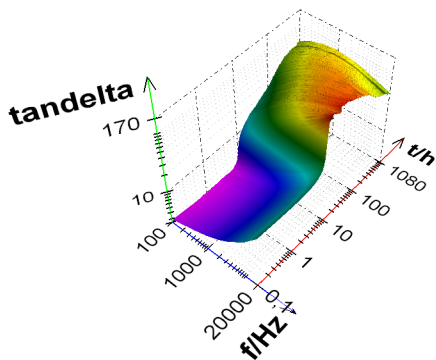


Obr. 8 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.1, měřeno plošnými elektrodami, pohled 2

Fig. 8 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.1, planar electrodes measured, face 2

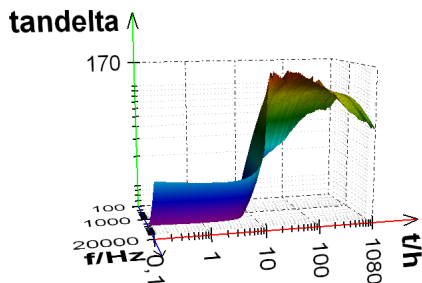
Na obrázcích 7 a 8 vidíme opět spektra ztrátového činitele v plošném grafu pro měření pomocí deskových elektrod, velmi podobného průběhu i hodnotami předchozímu případu. Velmi znepokojivými jsou přítomnosti úzkých extrémů. První se nachází při první fázi tuhnutí pouze u nejvyšších frekvencí elektrického pole, které však pouze ukazují na vliv tvaru elektrod na výsledek měření. Daleko komplikovanější se jeví přítomnost úzkého valu kolem 10 hodiny, který však začíná dříve u nižších frekvencí a končí později u vyšších frekvencí. Koresponduje

s pozorovanou anomálií u závislosti elektrické kapacity na čase ve stejném intervalu tuhnutí, stejně jako s poklesem elektrické vodivosti v uvedeném intervalu.



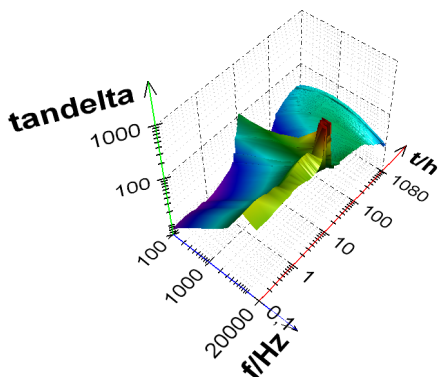
Obr. 9 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.2, měřeno válcovými elektrodami, pohled 1

Fig. 9 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.2, cylindrical electrodes measured, face 1



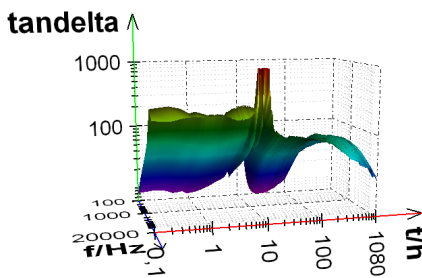
Obr. 10 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.2, měřeno válcovými elektrodami, pohled 2

Fig. 10 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.2, cylindrical electrodes measured, face 2



Obr. 11 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.2, měřeno plošnými elektrodami, pohled 1

Fig. 11 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.2, planar electrodes measured, face 1



Obr. 12 Ztrátový činitel v čase - vzorek č.2, měřeno plošnými elektrodami, pohled 2

Fig. 12 Dielectric loss factor at time dependency - sample no.2, planar electrodes measured, face 2

V grafech na obrázcích 9 a 10 jsou vyjádřena spektra ztrátového činitele měřeného za použití válcových elektrod, pro hydrataci vzorku č.2, který byl v po celý čas experimentu obalen. Spektra mají opět hladkou návaznost, maximální hodnota, které dosáhnou je 166, která je srovnatelná s hodnotou u neobaleného vzorku č.1, která

byla 140. U neobaleného vzorku (č.1) pozorujeme v prvních 10 hodinách hydratace při nejvyšších použitých frekvencích vyšší hodnoty ztrátového činitele a na konci měření (doba $t=1000h$) je vidět rychlejší přesun maxima křivek k nižším frekvencím, než u spekter pro obalený vzorek (v grafu to značí užší oblast jediné barvy).

U obaleného vzorku dochází pouze k autogennímu smršťování, zatímco u neobaleného vzorku se projeví plastické smrštění a smrštění vysycháním. Každé smrštění je důsledkem mimo jiné změn kapilárního tlaku. Lze se domnívat, že vysoké hodnoty ztrátového činitele u neobaleného vzorku, při použití plošných elektrod k realizaci měření, jsou projevem více druhů smršťování a vyššího prnutí, kdežto u obaleného vzorku není dosahováno tak vysokých hodnot ztrátového činitele a prnutí ve vzorku je nižší.

4. Závěr

V průběhu 45 dní byla sledována hydratace a tuhnutí betonu uvedeného složení, pomocí dvou typů elektrod. Získané časové a frekvenční závislosti ukázaly některé rozdíly ve spektrech elektrických veličin závislé na typu elektrod. Během hydratace betonového vzorku nedocházelo v prvních hodinách k výrazným změnám v měřených elektrických veličinách, ke změnám dochází v intervalu 4 až 50 hodin (přibližně). Změna elektrického odporu a kapacity vzorku značí změny napětí ve vzorku, které dosahují vyšší intenzity různě rychle. Odformování vzorku nemělo zásadní vliv na průběh hydratace.

5. Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory projektů GAČR Project No. 104/10/P012 "Impedance spectroscopy of concrete featuring various capillary porosity levels" a 103/09/P263 "Concrete impedance spectroscopy model design and its interpretation". Autoři příspěvku za tuto podporu děkují.

Literatura

- [1] Pytlík P., *Technologie betonu* (Vysoké učení technické v Brně, VUTIUM, Brno, 2000). ISBN 80-214-1647-5
- [2] Kusák I., Luňák M., *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, 2008, ISBN 978-83-926896-0-7
- [3] Kusák, I., Luňák, M., Pazdera, L., *Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu při tuhnutí*, in: NDT Welding Bulletin 2/2008, ročník 18, 22-25, vydáno 10.2008, ISSN 1213-3825
- [4] Luňák M., Kusák I., Pazdera L., Bílek V., *Sledování hydratace betonu v odlišném prostředí metodou impedanční spektroskopie*, in: The E-Journal of Nondestructive Testing, 141-146, 2008 ndt.net, ISSN 1435-4934
- [5] Kusák, I., Luňák, M., *Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles*, příspěvek na konferenci I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist Intertech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [6] Kusák, I., Luňák, M., Matysik, M.; Topolář, L., *Stanovení topného faktoru tepelného čerpadla*, článek v Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [7] Luňák, M., Kusák, I., Pazdera, L., *Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy*, příspěvek na konferenci 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 zdrustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [8] Kusák, I., Luňák, M., *Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu*, příspěvek na konferenci MVK 2009, ISBN 978-80-7204-629-4, CERM, Brno, 2009
- [9] Luňák, M., Kusák, I., *Debye's model of impedance spectroscopy*, příspěvek na konferenci II International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorząd Doktorantów Politechniki Poznanskiej, Poznan, 2009
- [10] Luňák, M., Kusák, I., *Electric And Temperature Properties Of Concrete Setting Measurement Set*, příspěvek na konferenci Defektoskopie 2009 - NDE for Safety, ISBN 978-80-214-3973-3, BETIS, Praha, 2009



LONG-TERM MONITORING OF CONCRETE SETTING BY USING TWO ELECTRODES IMPEDANCE SPECTROSCOPY

KONTINUÁLNÍ SLEDOVÁNÍ TUHNUTÍ BETONU DVOUELEKTRODOVOU IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIÍ

Miroslav LUŇÁK*, Ivo KUSÁK*, Luboš PAZDERA*, Libor TOPOLÁŘ*,
Vlastimil BÍLEK**

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

**ŽPSV a.s. Company, Křížkova 68, 60200 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: lunak@dp.fce.vutbr.cz, kusak@dp.fce.vutbr.cz,
lubos@dp.fce.vutbr.cz, topolar.l@fce.vutbr.cz, bilek@zpsv.cz

Abstract

Behavior of concrete component in the early stages of solidification also gives information about future product qualities of concrete. Common methods include monitoring the volume change components, thermal characteristics and approaches to the study of electrical properties. Nondestructive diagnostics of concrete materials and non-cement-based materials is the subject of research for developed methods of testing building materials. Common standard methods take in durability testing of concrete specimens at 28 days. Electrical parameters are evaluated: in particular, capacity, resistance and loss factor at frequency of alternating electric field.

Key words: *impedance spectroscopy, two electrodes measurement system, loss factor, capacity, resistivity*

Abstrakt

Chování betonového dílce v prvních fázích tuhnutí dává informace také o budoucích kvalitách betonového výrobku. Mezi běžné metody patří sledování objemových změn dílce, teplotních charakteristik a přistupuje se ke zkoumání jeho elektrických vlastností. Nedestruktivní diagnostika betonových materiálů na cementové bázi je předmětem rozvíjených testovacích metod stavebních materiálů. Běžné normové metody zahrnují průběžné testování pevností betonových dílců do doby 28 dní. Do vzájemných souvislostí jsou položeny hodnoty elektrických veličin materiálu v průběhu tuhnutí a možná souvislost s napětím v materiálu. Vyhodnocovanými elektrickými veličinami jsou kapacita, odpor a ztrátový činitel při střídavé frekvenci elektrického pole.

Klíčová slova: *impedanční spektroskopie, dvouelektrodový systém, ztrátový činitel, elektrická kapacita, elektrický odpor*

1. Introduction

The concrete quality depends on the composition and on the environment conditions too. The monitoring of external conditions and mechanical properties during concrete hardening are compared with electric properties measured during hardening, but

comparing are not easy. Mechanical measuring are not realised in sufficient quantity, which can be statistically significant. There will be described only the trend.

2. Work place and Concrete proportion



Obr. 1 Zobrazení pracoviště (betonové vzorky, přístroje a zapuštěné elektrody). Vzorek vpravo označen číslo 1, vzorek vlevo označen číslo 2 a v průběhu experimentu obalen smršťovací fólií

Fig. 1 Display of work place (concrete samples, devices and mbedded electrodes). Sample No. 1 is labeled on the right, left sample is labeled number 2 during the experiment wrapped in shrink foil

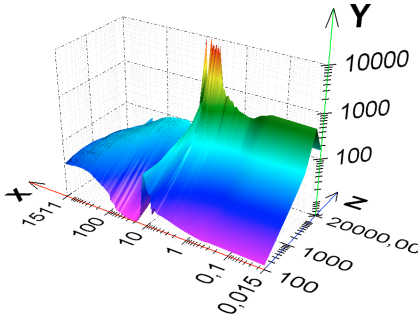
Concrete receipt	1 m ³	Mechanical properties	
w/c	0,33	workability	F4
CEM I 42,5 R Mokrá	420	f _{c1} [MPa]	48,4
Metakaolin Mefisto K05	35	E ₁ [GPa]	29,0
water	150	f _{c2} [MPa]	60,5
Superplastifikátor	7,5	E _{2,rh=95} [GPa]	-
sand 0/4 Kinsky	625	E _{2,rh=60} [GPa]	30,4
stone 4/8 Litice	245	f _{c28} [MPa]	105,1
stone 8/16 Litice	975	E _{28,rh=95} [GPa]	40,5
		E _{28,rh=60} [GPa]	37,3

Tab. 1 Receptura betonu a jeho mechanické vlastnosti

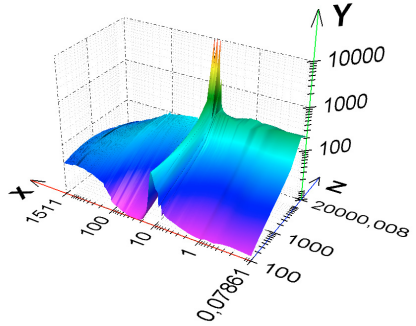
Tab. 1 Recipe of concrete and its mechanical properties

3. Discussion

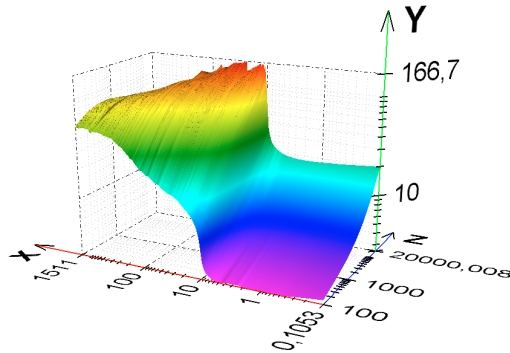
One of important concrete electric properties dependency is dielectric loss factor curve versus electric field frequency range for broad time spectra at concrete hardening.



Obr. 2 Ztrátový činitel (osa Y) v čase (osa x), osa z-frekvenční spektrum) - vzorek č.1, měřeno plošnými elektrodami
 Fig. 2 Dielectric loss factor (Y axis) at time dependency (X-axis), Z-axis-is the frequency range - sample no.1, planar electrodes measured



Obr. 3 Ztrátový činitel (osa Y) v čase (osa x), osa z-frekvenční spektrum - vzorek č.2, měřeno plošnými elektrodami
 Fig.3 Dielectric loss factor (Y-axis) at time dependency (X-axis), Z-axis-is the frequency range - sample no.2, planar electrodes measured



Obr. 4 Ztrátový činitel (osa Y) v čase(osa x),osa z-frekvenční spektrum) - vzorek č.2, měřeno válcovými elektrodami, pohled 1
 Fig. 4 Dielectric loss factor (Y axis) at time dependency(X-axis),Z-axis-is the frequency range - sample no.2, cylindrical electrodes measured

In Figures 2 and 3, we see again the spectrum dissipation factor generalized chart for measurements using planar electrodes, very similar values as the previous case. Very alarming is the presence of narrow extremes. The first is located at the first stage of solidification only at the highest frequency electric field, but only to show the influence of electrode shape on the measurement result. Much more complicated, it appears the presence of a narrow mound about 10 hours, but starts earlier at lower frequencies and ends later at higher frequencies.

In figure 4 there is described dielectric loss factor spectra, obtained by using cylindrical electrodes, for sample no.2 hydration, which was for all experimenting time covered by plastic foil. Spectra is again smooth continuity, the maximum value that reach is 166. The spectra is more continuous than previous spectras, which was more sensitively for un moulding.

4. Conclusion

We tested hydration and hardening of the concrete composition, using two types of electrodes, during 45 days. Obtained time and frequency dependences showed some differences in the spectra of electrical parameters depend on the type of electrodes. Changes of electrical resistance and capacity of the sample indicates the strength changes in the sample to reach higher intensities varied rapidly.

5. Acknowledgements

This paper arose in support of GACR Project No. 103/09/P263 "Concrete impedance spectroscopy model design and its interpretation" and 104/10/P012 "Impedance spectroscopy of concrete featuring various capillary porosity levels" and GACR No. P104/10/0535 and as part of the research project MSM 0021630519.

6. References

- [1] Luňák M., Kusák I., Pazdera L., Bílek V., *Sledování hydratace betonu v odlišném prostředí metodou impedanční spektroskopie*, in: The E-Journal of Nondestructive Testing, 141-146, 2008 ndt.net, ISSN 1435-4934
- [2] Kusák, I., Luňák, M., Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles, příspěvek na konferenci I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist Intertech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [3] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Stanovení topného faktoru tepelného čerpadla*, článek v Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [4] Luňák, M., Kusák, I., Pazdera, L., Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy, příspěvek na konferenci The 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [5] Kusák, I., Luňák, M., Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu, příspěvek na konferenci MVK 2009, ISBN 978-80-7204-629-4, CERM, Brno, 2009
- [6] Luňák, M., Kusák, I., Debye's model of impedance spectroscopy, příspěvek na konferenci II International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorzad Doktorantow Politechniki Poznanskiej, Poznan, 2009
- [7] Luňák, M., Kusák, I., Electric And Temperature Properties Of Concrete Setting Measurement Set, příspěvek na konferenci Defektoskopie 2009 - NDE for Safety, ISBN 978-80-214-3973-3, BETIS, Praha, 2009



MACHINING OPTIMIZATION OF SELECTED PARTS IN RELATION TO NDT REQUIREMENTS

OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ VYBRANÝCH DÍLŮ S OHLEDEM NA POŽADAVKY NDT

Miroslava MALÁ, Jiřina ŠAŠKOVÁ, Václav TREPKA
Precision Castparts CZ s.r.o., Univerzitní 36, 301 00 Plzeň
Contact e-mail: jsaskova@precision-castparts.cz

Abstract

We continuously work on optimization of machining parts in relation to the customer requirements and the consecutive ultrasonic testing. Our project objective was the cost reduction and process efficiency improvement by selection of a most suitable ceramic insert (in terms of its shape, lifetime, price, machining velocity and stock removal) that would be used before ultrasonic testing with respect to the limitations on the surface condition (i.e. roughness) set by ultrasonic testing. From various forging materials, our project concentrated on the Inconel 718 parts that represent the largest amount of our production. We selected a CNGX120716 ceramic insert type and performed several machining test cycles using the above inserts produced by different suppliers. Testing parameters differed in surface speed and amount of stock removal. Resulting surface condition was evaluated using both profilometer (whether it conforms to customer drawing requirements), and UT inspection (whether surface condition enables detection of the searched flaws from depth 2.5mm (0.1") with different parameter settings). Resulting surface was acceptable for flaws larger than 0.5mm. We selected several parts and machined them using the optimized process. We identified several shapes that are not suitable for the machining. The rest of parts successfully passed both machining and ultrasonic inspection processes. Therefore, we demonstrated suitability of selected insert in the machining process that resulted in saving of machining time as well as cost reduction of exchangeable inserts.

Key words: *ultrasonic inspection, surface roughness, technical-economic analysis, inconel 718, CNGX12076*

Abstrakt

Neustále pracujeme na optimalizaci obrábění dílů s ohledem na požadavky zákazníka a na následnou ultrazvukovou kontrolou. V tomto případě se hledaly možnosti úspor a zefektivnění procesu volbou nejvhodnějšího keramického plátku (vzhledem k jeho tvaru, životnosti, ceně, rychlosti obrábění a velikosti úběru) použitého pro obrábění před ultrazvukovou kontrolou vzhledem k omezením, která na stav (drsnotu) povrchu klade prováděná ultrazvuková kontrola. Z různých materiálů obráběných dílů jsme se zaměřili na díly z Inconelu 718, jež tvoří největší podíl naší produkce. Po vybrání břitové destičky typu CNGX120716 byla provedena řada testů obrábění, kde byly použity destičky tohoto typu od různých dodavatelů. Parametry jednotlivých testů se lišily obvodovou rychlostí a velikostí úběru. Drsnosti pro různé hodnoty těchto parametrů se měřily jednak drsnoměrem, zda vyhovují požadavku na výkresu, a jednak se vytvořené povrchy ultrazvukově testovaly, zda stav povrchu umožňuje při různých parametrech nastavení detekovat hledané vady již v hloubce 2,5mm pod povrchem dílu. Pro velikosti hledaných vad nad 0,5mm již vzniklý povrch vyhovoval. Bylo vybráno několik dílů, které byly obrobny navrhovaným plátkem optimalizovaným procesem. Bylo zjištěno, že některé tvary dílů nejsou pro toto obrábění vhodné. Zbylé tvary prošly úspěšně obráběním i ultrazvukovou kontrolou. Tím se potvrdila vhodnost nasazení zvoleného plátku do procesu obrábění. Výsledkem je zkrácení času obrábění vybraných dílů a redukce nákladů na vyměnitelné břitové destičky.

Klíčová slova: *ultrazvuková kontrola, drsnost povrchu, technicko-ekonomická analýza, inconel 718, CNGX12076*

V rámci procesu snižování nákladů jsme testovali použití nových vyměnitelných břitových destiček (VBD) namísto dosud používaných karbidových vyměnitelných břitových destiček. Nové destičky by nám měly umožnit rychlejší obrábění ať už díky většímu úběru materiálu nebo díky větší rychlosti otáčení dílu při obrábění. Přínosem by byla i jejich delší životnost. Hlavními omezujícími faktory byla drsnost výsledného povrchu a nákladnost břitových destiček. Drsnost povrchu musí jednak umožňovat ultrazvukovou kontrolu (nevhodný tvar povrchu po obrobení se projeví rozšířením vstupní echa, což znemožní hledání vad v požadované blízkosti pod vstupním povrchem) a jednak musí naměřená drsnost odpovídat požadavkům na výkresu. Obrábíme díly do leteckých motorů a požadavky na stav povrchu jsou obecně velmi vysoké. Proto jsme pro účely testování nových destiček při různých parametrech obrábění stanovili maximální přijatelnou hodnotu drsnosti $Ra = 1\mu m$.

Obrábíme těžkoobrobitelné materiály, které lze rozdělit do tří skupin: speciální oceli, niklové slitiny a titanové slitiny. Pro každou z těchto skupin jsou vhodné jiné parametry obrábění.

Obrábění titanu je velice nákladná záležitost. Provádí se karbidovými břitovými destičkami, které jsou drahé a jejich spotřeba při obrábění titanu je vysoká. Při obrábění karbidu jsou však řezné parametry o mnoho nižší než při obrábění keramikou, což prodlužuje celkový čas obrábění. V případě obrábění titanu keramikou by se musely vytvořit vhodné podmínky, které by dokázaly zajistit dostatečnou tuhost a chlazení během obrábění. Titan má špatné třecí vlastnosti, zadírá se a obrobiteľnost je horší než u ostatních kovů. Je křehký vlivem dusíku a kyslíku a v podobě třísek má nízký bod vzplanutí. Jeho nízká tepelná vodivost zapříčiňuje nalepování na břit a jeho rychlejší utopování.

Obrábění niklových slitin, např. inconelu, se provádí především keramickými destičkami. Niklové slitiny, jako např. inconel, jsou velice houževnaté, odolné vůči trhlinám, vysokopevnostní, žáruvzdorné a korozivzdorné.

Trvanlivost karbidových a keramických destiček je značně závislá na složení jednotlivých obráběných titanových a niklových slitin. Záleží i na složení, jakosti, velikosti a tvaru břitových destiček. Při programování je vhodné zohlednit vysledovanou trvanlivost požadované destičky pro určitý materiál a způsob obrábění. Je tedy účelné rozdělit třísky do stejně velkých časových intervalů, aby bylo využití destičky maximální. Trvanlivost destiček také ovlivňuje typ stroje, jeho celková tuhost, rozsah otáček, přesnost chodu včetně a způsob upnutí obrobku. Závisí i na tvaru upínaného obrobku, jeho velikosti a celkových proporcích. Důležitým faktorem je i způsob uchycování nástrojů ve stroji, jejich samotná stavba, tuhost a způsob uchycení destiček na nástroji. Při nevhodném způsobu obrábění, špatném zvolení tloušťky třísky nebo řezných parametrů se výrazně zkracuje doba do opotřebení břitové destičky. Při současném působení všech negativních vlivů dojde k prasknutí destičky, což má za následek vytvoření vrypu do obrobku. Pokud je vryp příliš hluboký, pak se obrobek již neobrábí z důvodu překročení povolených tolerancí finálních rozměrů obrobku. Obrobky, ve kterých je vryp, nelze pro tyto účely navařovat. Stávají se tedy šrotem, který musí být přetaven. Ceny obrobků jsou velice vysoké, a proto je potřeba se vzniku vrypů pokud možno vyvarovat a při obrábění titanu a niklových slitin brát v potaz všechny vlivy určující opotřebení destičky.

Vzhledem ke složitosti problematiky není možné provést optimalizaci pro všechny materiály, tvary a rozměry obrobků i fáze procesu obrábění. Museli jsme si tedy zvolit některý z námi obráběných materiálů, základní tvar a materiál vyměnitelných břitových destiček a pak v rámci takto zúženého výběru najít pro dané použití nejlepší druh destiček.

Rozhodli jsme se zaměřit na obrábění dílů z niklových slitin, které tvoří cca 40% naší produkce. Obrábění výkovků do tvaru pro ultrazvukové zkoušení probíhá v několika krocích, obvykle pěti:

1. fáze - obrábění tvrdé kůry výkovku

obecně: Obrábění se provádí pomocí kruhových břitových destiček RNGN, které jsou negativní. Tyto destičky mají oproti jiným tvarům dvě základní výhody, větší pevnost a celkový počet hran (ekonomičnost břitové destičky). Jejich velikost se volí s ohledem na výkon a tuhost stroje, jelikož průřez třísky se s velikostí poloměru zaoblení špičky VBD zvětšuje, a vznikají tak větší síly při obrábění a s tím i nebezpečí vibrací. Praxí vyzorovaná doporučení: Omezit počet vstupních řezů do tvrdé kůry výkovku. Najíždět do již obrobených ploch v případě dalšího obrábění kůry. Tímto se eliminují vznikající rázy při najíždění do řezu nepravidelného tvaru výkovku a rapidně se zvyšuje její trvanlivost a zároveň je VBD ochráněna před možným zničením. Na obrobení kůry se zvláště osvědčila whiskerová keramika, která je zpevněná SiC a má větší odolnost proti vylamování. V poslední době však nové sorty sialonových keramických břitových destiček nahradily drahou whiskerovou keramiku.

2. fáze – obrábění větších dílčích celků obrobku po obrobení kůry

obecně: I pro tuto fázi obrábění je vhodné provádět pomocí kruhových břitových destiček RNGN, které jsou negativní a mají větší pevnost. Jejich velikost se volí stejná jako v předchozí fázi s ohledem na celkový počet nástrojů a na celkové snížení nákladnosti procesu obrábění. Zde je vhodné eliminovat především vstup nástroje do materiálu, při kterém dochází k největšímu opotřebení břitové destičky o otřepy, které vznikají například po předchozím odebrání materiálu především na vnějších rozích. Těmto vlivům je však možno předejít a prodloužit trvanlivost břitové destičky v řezu. Důležité je zohlednit i úpravu konečné dráhy k průměru anebo k čelům obrobku, a to s ohledem na směr obrábění. V místech konečné dráhy narůstá průřez třísky a zároveň dochází k náhlému vyjetí z řezu, což má za následek zvýšené opotřebení břitové destičky. Uvedený problém lze optimalizovat rádiusovými výjezdy nebo hrubováním do kuželu. Pro obrábění v čistém materiálu se rovněž osvědčila keramika sialon.

3. fáze – dohrubování rádiusů po kruhových keramických břitových destičkách RNGN

obecně: Zbýlé rádiusy R 9,525mm je nutno upravit na požadovaný rádius max.R 2,5mm. To je provedeno pomocí karbidu, který má vyšší odolnost proti lomu při obrábění do rohu a to hlavně tam, kde jsou předepsány menší rádiusy.

4. fáze – obrábění přednačisto

obecně: Tato fáze obrábění je spolu s pátou fází nejnáročnější z hlediska technologie. Významným způsobem se podílí na celkovém času obrobení dílu. Existuje mnoho možností jak dosáhnout kvalitního povrchu, ale většina z nich je velmi časově náročná a neekonomická. Obrábění přednačisto významně ovlivňuje obrábění načisto a velice zde záleží na velikosti obráběných dílů. Vzhledem k tomu, že drsnost povrchu po obrobení načisto má být $Ra=1 \mu m$ (předepsáno zákazníkem), je nutné, aby námi zvolený výsledný přírůstek byl pro danou plochu nejlépe konstantní. Toho lze však dosáhnout jen karbidy nebo vhodnou keramickou břitovou destičkou s minimálním odporem a dobrou odolností proti opotřebení VB na hřbetu. Takových břitových destiček není mnoho. Jejich cena je vysoká, většinou mají sníženou houževnatost a odolnost proti lomu.

5. fáze – obrábění načisto

obecně: Je to poslední fáze obrábění a dosahujeme v ní požadovanou integritu povrchu. Významným způsobem se podílí na celkovém času obrobení dílu. Většinou je prováděna karbidy, které jsou mnohem spolehlivější z hlediska integrity povrchu než keramika. Obrábění s nimi je však velice pomalé a s přibývajícím velikostí dílů časové rozdíly dále narůstají.

Dále jsme se tedy zabírali především obráběním přednačisto a načisto. Hledali jsme optimální břitovou destičku, která by umožňovala významněji urychlit fáze 3, 4 a 5, nebo jen některou z nich. Zohledňovat je třeba i cenu destičky a počet jejích hran. Vybraný tvar VBD se podrobí experimentu na zkušebním dílu z materiálu Inconel 718.

Následovala volba materiálu a tvaru destičky. Podmínky výběru byly následující: dostačující pevnost, univerzálnost pro pokrytí fází obrábění 3, 4, 5, rádius maximálně $r_e = 2,5$ mm (viz popis 3. fáze obrábění), pevné upnutí proti vytažení z lůžka nástroje, zejména při dojíždění do rohů.



Obr.1 : Pevnost břitových destiček s ohledem na jejich tvar.

Zdroj: NTK (<http://www.ntkcuttingtools.com/>)

Zvolena byla keramická destička CNGX 120716 s poloměrem zaoblení špičky $r_e = 1,6$ mm.



Obr.2 : Zvolený typ vyměnitelné břitové destičky CNGX120716.

Zdroj: NTK (<http://www.ntkcuttingtools.com/>)

Výrobci u tohoto typu destiček nabízejí více velikostí r_e , ale výběr byl proveden zejména za účelem menšího rizika prasknutí při záběru větší hloubky řezu a_p či při dojíždění do rohu, oproti menším velikostem r_e . Nevýhodou může být větší náchylnost k vibracím při nedostatečně tuhém stroji a malé hloubce řezu a_p , která může způsobit horší zařízení destičky. Vybraná VBD je navíc opatřena úkosovým lůžkem, které zamezuje jejímu vyjmutí z nástroje při dojíždění do rohu. Tato destička je velmi robustní: v poměru délky strany 12 mm dosahuje tloušťky 7 mm. Je proto velmi pevná.

Tento typ destičky se v nabídkách od různých dodavatelů lišil složením (různé druhy keramiky) a provedením řezné hrany. Pro experimenty jsme získali celkem 6 odlišných destiček: CSN100, SX9, WG600, KY1540-E, KY1540, CW3020(=KY4300).

Tabulka 1: Chemické složení (v procentech) a základní vlastnosti slitiny Inconel 718

Ni^d	70,0 min.	Al	0,40 – 1,00	Si	0,50 max.
Cr	14,0 – 17,0	Nb^b	0,70 – 1,20	S	0,01 max.
Fe	5,0 – 9,0	C	0,08 max.	Cu	0,50 max.
Ti	2,25 – 2,75	Mn	1,00 max.	Co^c	1,00 max.
^a plus Co		^b plus Ta		^c jestliže určen	
Typické fyzikální vlastnosti			Typické mechanické vlastnosti (precipitačně vytvrzený)		
Hustota	8 280 kg m ⁻³		Pevnost do lomu (1 000 hod)		
Koeficient tepelné roztažnosti (při 21-93 °C)	12,6 μm m ⁻¹ °C ⁻¹		595 °C		
Teplota tavení	1390 -1430 °C		630 MPa		
Specifické teplo	431 J kg ⁻¹ °C ⁻¹		650 °C		
Tepelná vodivost	12,0 W m ⁻¹ °C ⁻¹		470 MPa		
Curie teplota	-125 °C ⁻¹		705 °C		
Elektrická rezistivita	1,22 μΩ m ⁻¹		815 °C		
			110 MPa		

Zdroj: www.bibus.cz

Pro experimentální obrábění byl zvolen díl z niklové slitiny, konkrétně z materiálu Inconel 718. Následovalo obrábění pokusného dílu destičkami všech šesti druhů. Sledovali jsme míru opotřebení destiček VB_B [mm] a stav povrchu při různých parametrech nastavení. Hloubka řezu a_p byla neměnná $a_p = 0,15$ mm. Tato hodnota je nutná pro poslední fázi předsonického obrábění, aby bylo dosaženo požadované drsnosti povrchu. I rychlost byla pro první sadu experimentů konstantní, $v = 195$ m/min. Posuv f byl postupně nastavován na hodnoty 0,15 mm/ot, 0,25 mm/ot a 0,35 mm/ot.

Opotřebení destiček se měřilo pod mikroskopem, vždy po obrobení stejné plochy. Drsnost výsledného povrchu R_a se měřila drsnoměrem.

Při těchto parametrech bylo opotřebení VB_B nejnižší pro destičky CW3020 a WG-600. Požadavky na drsnost ovšem splnily jen 4 destičky CSN100, SX9, CW3020 a WG600. Dvě sorty destiček tedy byly z dalšího posuzování vyřazeny.

Následovalo posouzení destiček z hlediska ceny a výrobcem deklarovaných vlastností. Pro další pokusy (různé rychlosti a různé hloubky řezu) byla zvolena sialonová destička SX9, která se měla vyznačovat vysokou otěrvzdorností a lomovou houževnatostí.

Povrchy získané při těchto pokusných obráběních destičkou SX9 již byly vyhodnocovány nejen drsnoměrem, ale i ultrazvukově, z hlediska dosažení požadovaného rozlišení blízko povrchu. Pro ultrazvuk nezáleží jen na velikosti drsnosti R_a , ale i na tvaru (profilu) nerovnosti povrchu. V případě nevhodného tvaru nerovnosti povrchu může docházet k tzv. gramofonování, které znemožňuje ultrazvukové zkoušení.

Požadované rozlišení blízko povrchu záleží na požadavku zákazníka pro konkrétní díl. Obvykle se pohybuje v rozmezí 0,1“ - 0,2“ (2,5 - 5 mm). Velikost hledané vady se pohybuje od 1,27 mm po 0,45 mm. Většinou je velikost hledané vady menší než 0,635 mm.

Velikosti hledaných vad byly rozděleny do 4 skupin:

Skupina 1: velikost hledané vady 0,635mm.

Skupina 2: velikost hledané vady 0,566mm.

Skupina 3: velikost hledané vady 0,50mm.

Skupina 4: velikost hledané vady 0,45mm.

Pro všechny 3 skupiny byly vady hledány v hloubce 0,1“ (2,5mm) pod povrchem dílu.

Použité zařízení: imerzní tank, přístroj ScanMaster USC 100 sn. 01080104, zobrazení typu A-sken, sondy TLC IX0519PC sn.W90702, frekvence 5,5MHz, průměr měniče 0,75“, fokus 6“.

Pro skupiny 1, 2 a 3 byl povrch součásti pro ultrazvukovou kontrolu vyhovující. Pro skupinu 4 drsnost povrchu bránila provedení ultrazvukové kontroly od předepsané hloubky zkoušení 2,5 mm.

Z provedeného ultrazvukového testování lze usuzovat, že kvalita povrchu dovoluje při nastavených citlivostech obrábět skupiny 1, 2 a 3. Pro skupinu 4 již kvalita povrchu nedosahovala požadovaných hodnot pro provedení ultrazvukové kontroly, ačkoli hodnota *Ra* naměřená drsnoměrem byla menší než 1µm. Vhodnost použití navrženého způsobu obrábění testovaným plátkem a to především pro skupiny 1, 2 a 3 jsme tedy ještě museli ověřit pro různé tvary dílů ve skutečném procesu obrábění.

Závěr

Bylo vybráno několik dílů, které byly obrobny navrhovaným plátkem optimalizovaným procesem. Bylo zjištěno, že některé tvary dílů či části dílů (zvláště vnitřní průměry) nejsou pro toto obrábění vhodné. Zbylé tvary prošly úspěšně obráběním i ultrazvukovou kontrolou. Tím se potvrdila vhodnost nasazení zvoleného plátku do procesu obrábění. Výsledkem je zkrácení času obrábění vybraných dílů a redukce nákladů na vyměnitelné břitové destičky.



NONDESTRUCTIVE INTEGRITY TESTING OF SANDWICHES MADE OF HURDIS CEILING SLABS

Monika MANYCHOVA

Department of Building Structures, Faculty of Civil Engineering,
Brno University of Technology
Manychova.m@fce.vutbr.cz

Abstract

New methods of nonlinear ultrasonic spectroscopy have been applied to the non-destructive testing. The non-linear ultrasonic spectroscopy methods are based on the wave propagation related non-linear effects and higher harmonic signal generation in the vicinity of defects. Due to the defects being present in the structure, the atom potential energy ceases to be exactly harmonic and, consequently, second and third harmonic frequency components arise. The present paper deals with the application potential of these methods to evaluating the structural integrity of sandwiches made of Hurdis ceiling slabs. Based on extensive measurements, analyses and results verifications for small-sized ceramic products by means of these methods, a methodology has been designed for measuring both separate Hurdis slabs and sandwiches made of these slabs. Two measurement methods have been applied, namely, using a single and two excitation signals. Both methods proved to be highly sensitive to the presence of crack-type defects in the sandwich specimens under test. Based on thus obtained results, we are justified to expect the non-linear ultrasonic spectroscopy, continuously utilizing advanced research developments, to become an important part of diagnosing the condition of building elements and structures.

Key words: *Nonlinear ultrasonic spectroscopy, elastic waves, structure integrity, defect, nonlinear effect*

1. Introduction

Prefabricated ceiling structures made of Hurdis slabs have a long tradition in this country. They are popular because of their easy assembly, in which no heavy-duty hoisting mechanisms are necessary, for example, in small-sized constructed facility, such as family homes. However, breakdowns of ceiling structures made of these slabs, which started occurring in the past decade, have attracted much attention of both professional and general public. The above-mentioned ceiling structure breakdowns used to occur during a period of approximately half a year to six or even more years after the structure completion. Following phenomena are common for all of these Hurdis slab ceiling failures: severing of the slab lower part from the slab rest (together with the plaster which had been applied to the slab from below); the fracture surfaces are passing through the ribs, the destruction onset being abrupt in most cases (following a short-time crackling sounds). No warning visual or acoustic effects, indicating a large-scale failure to be threatening, may necessarily occur prior to the breakdown. Both footing supported and rolled-beam flange supported slabs experience breakdowns. It has turned out that some of the Hurdis slabs, which were built-in into the ceiling structures, had contained cracks prior to being built-in.

The fact that the first symptoms of the ceiling failure may appear quite a long time after the structure completion makes another source of complication as the user of the real estate in question has meanwhile surely lost any knowledge of the ceiling assembly method having been used. In spite of that, it may be seen that even now, in the period of a rush development of new building technologies, the general standard of our knowledge of the ceramics' mechanical and physical-chemical properties, particularly when in combination with other materials, proves to be insufficient in some cases. Given the Czech Republic brick plants' yearly output in HOURDIS slabs amounting to 5 to 6 Mio units, a total of several ten thousand constructed facilities with these ceiling slabs have been erected since the early nineties. The mentioned failures may therefore be expected to recur in the years to come. This is why a search for methods to examine the jeopardized ceiling structures and assess their static reliability is still of importance.

For the time being, following diagnostic methods have been tested and proved to be applicable in the laboratory as well as the jeopardized structure environment: acoustic methods (listening, acoustic emission, ultrasonic methods), visual checks, long-term monitoring of the crack evolution by means of a data logger, miniature movie camera inspection, endoscope/fibroscope inspection, specimen drilling-out, impulse shock and dilatometric methods. The results obtained by the mentioned method application show that only some of the methods are really field-applicable. The simplest method to apply is the tracking ball tapping (the structure response may reveal dangerous defects). A micro-camera or endoscope inspection is very likely to detect a crack (there is a problem of a large number of boreholes in the ceiling structure). Ultrasonic examination being applied after the plaster coat is removed from the wall surface has proved to be quite a reliable method [1].

Another piece of information resulting from the above measurements shows that it is essential to discriminate between the ceiling structure damage types which are related to the concrete or body volume variations and the defects which are induced by other causes. It has turned out that some of the HOURDIS slabs, which were built-in into the ceiling structures, had contained cracks prior to being built-in. These cracks are due to technology faults taking place during the manufacturing process. Defective slabs can be discarded in the course of the output check.

Acoustic methods are based on the generation and propagation of elastic waves in the objects under test. Numerous elastic wave interactions with different interfaces in the bulk are resulting in the wave dispersion, attenuation and non-linear behaviour, which may be employed to pursue the material structure changes and detect structure defects. Recently, a great attention has been paid to the study of dynamical non-linearities, which constitute the basis of new defectoscopic methods.

2. Nonlinear ultrasonic spectroscopy

Nonlinear ultrasonic spectroscopy is based on a non-linear behaviour of common defects and inhomogeneities affecting the elastic wave propagation [2]. It employs both the non-linear effects in the wave propagation process and the higher harmonic signal generation in the vicinity of the defects. Due to the defects being present in the structure, the atom potential energy ceases to be exactly harmonic. Second and third harmonic frequencies arise. Unlike the acoustic emission method, allowing to localize the currently emerging cracks and defects only, the non-linear ultrasonic defectoscopy is all-defect-sensitive, thus constituting a method applicable to the characterization of material quality and reliability. Nonlinear ultrasonic spectroscopy

methods were investigated from their usage point view for structure defects detection in ceramics materials.

3. Experiment part

Based on extensive measurements, analyses and results verifications for small-sized ceramic products by means of these methods, a methodology has been designed for measuring both separate Hurdis slabs and sandwiches made of these slabs [5-7]. The sandwiches (Fig. 1) were made of two types of slabs (with flat and chamfered front faces) showing no visible cracks. The concrete layer thickens amounted to 2 cm, 3cm and 4 cm. Separate slabs destined for fabricating the sandwiches as well as completed sandwiches were tested.



Fig. 1 Sample sandwiches

The sandwiches were measured at two time intervals, namely, 7 days and 28 days. To provide for easy and well reproducible attachment of the sensing and transmitting elements, steel shims were cemented to the specimens. Probes can be pasted to and removed from these shims without damaging the concrete specimen surface. Magnetic interface sensors provided good result reproducibility, too. The measurements aimed at checking the quality of the ceramic ceiling slab to concrete layer junction. Two measurement methods were applied while testing the sandwiches: the first using a single exciting signal and the other using two exciting signals. Both methods, together with the respective measurement setups are described in [3,4]. This is why we are showing here only a photograph of the double-exciting signal measurement setup (Fig. 2).



Fig. 2 Double-ultrasonic signal excitation experiment setup

3.1. Measurement results

Our measurement results are shown in following diagrams. Figures 3 and 4 represent our measurement results for a separate ceiling slab prior to assembling a sandwich. Fig. 3 shows a transfer function versus frequency diagram for an exciting frequency of 23 kHz, as picked up from a slab labelled H1. The frequency spectrum contains – in amplitude descending order – frequency components up to the 6th harmonic. The diagram shows clearly the amplitude decrease with the growing component order.

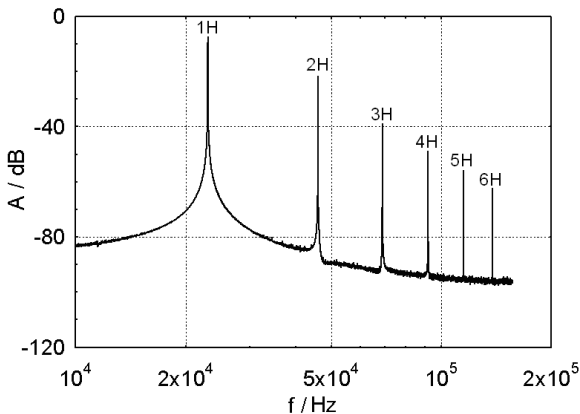


Fig. 3 Frequency spectrum of an intact ceiling slab

The next Fig. 4 shows the results of our measurement of a H1 slab to which two ultrasonic signals $f_1 = 23$ kHz, $f_2 = 19$ kHz have been applied. A difference component of a frequency $f_v = 4$ kHz was looked for.

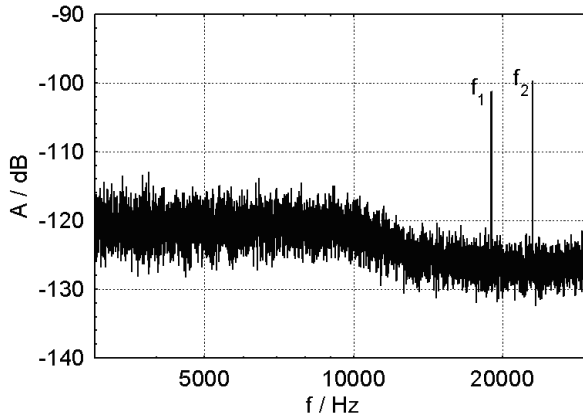


Fig. 4 Frequency spectrum of H1 Hurdis slab

It is clear from the diagram that no inter-modulation of the two ultrasonic signals takes place, which gives evidence of the structure integrity of the slab under test being intact.

Testing of sandwiches manufactured from undamaged slabs is illustrated in Figures 5, 6 showing the results obtained from SH1 sandwich consisting of H1 slab. The transfer function of Fig. 5 corresponds to the exciting signal of a frequency of 23 kHz. Higher harmonic frequencies do not show any progressive drop in amplitudes as was the case of the H1 separate slab (Fig. 3). The odd-numbered harmonic amplitudes (H3, H5) exceed in values those of the even-numbered ones (H2, H4).

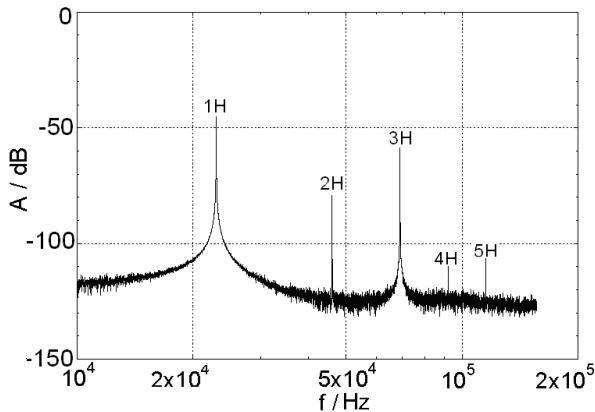


Fig. 5 Frequency spectrum of SH1 sandwich

When the double-exciting-signal method was applied, the exciting signal frequencies were close to each other, namely 19 kHz and 23 kHz. No exciting frequency difference components occurred in the frequency spectrum of the separate slab H1 (Fig. 4). In the case of the SH1 sandwich (Fig.6), inter-modulation of the two exciting frequencies took place in consequence of visible cracks which had arisen in the ceiling slab web. The frequency spectrum (Fig. 6) is dominated by the amplitude of the first difference component ($f_2 - f_1 = 4$ kHz) and its second harmonic (8 kHz).

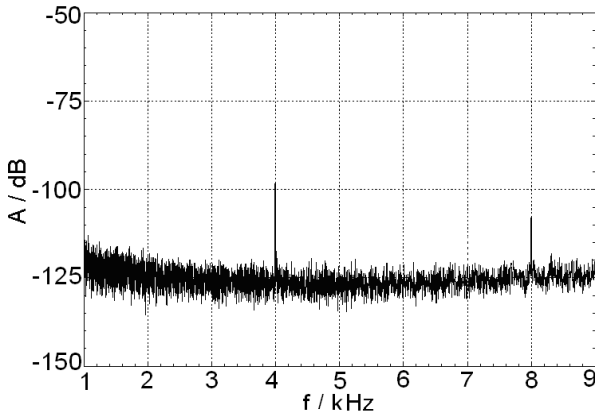


Fig. 6 Frequency spectrum of SH1 sandwich in the case of double ultrasonic signal excitation

4. Conclusion

Single-exciting-signal method:

Separate undamaged ceiling slabs: Higher harmonic amplitudes appear to decrease progressively with the serial number growth. In the transfer functions corresponding to the sandwiches made up from these slabs there appear non-linearities, which are due to the cracks that have arisen in the slab webs. The amplitudes of odd-numbered harmonic frequencies, the third and the fifth, exceed in values those of the even-numbered ones, the second and the fourth.

For the results obtained from the specified specimens to be interpreted correctly, special attention is to be paid to the exciter-to-specimen and specimen-to-sensor acoustic coupling. This is the only way to eliminate poor contact-induced-distortion being attributed to specimen structure defects.

Double-exciting-signal method:

The sandwich measurements have confirmed the existence of inter-modulation of the two exciting frequencies. In our experiment setup using mutually close exciting frequencies, the first difference component was detected immediately, its second harmonic component being highlighted in the frequency spectrum.

Our experiments have proved both of the above mentioned methods to be highly sensitive to the presence of crack-type defects and non-linear phenomena to correlate with these defects. They have confirmed the cracks to have arisen in the ceiling slabs during 7 days after the concrete layers had been fabricated. Structural integrity was damaged in all of thus manufactured sandwiches.

Acknowledgment

The research described in this paper is being solved within framework of the research project of the Ministry of Education of the Czech Republic under contract No. MSM 0021630511.

References

- [1] Ing. Petr Bouška, CSc., „Poruchy stropních konstrukcí s deskami HURDIS“, Habilitační práce, ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 2002.
- [2] MC CALL K.R., „THEORETICAL STUDY OF NONLINEAR ELASTIC WAVE PROPAGATION“, J. GEOPHYSIS. RES. 99, 2591-2600, 1994.
- [3] Převorovský, Z., Koen Van Den Abeele, *Calibration Samples for Use in Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy*. In. Proc. of 34th International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2004, November 3-5, 2004, Špindlerův Mlýn, Czech Republic, pp. 347 – 349.
- [4] Manychova, M., *Measuring Setup for the Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Method*, In. Proc. of 37th International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2007, Prague, Czech Republic, November 7-9, 2007, pp. 147-15.
- [5] Manychova, M., *On the diagnosis of Hurdís ceiling slabs using non-linear ultrasonic spectroscopy methods*, In. Proc. of 38th International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2008, Brno, Czech Republic, November 4-6, 2008, pp. 131-136.
- [6] Korenska, M., Manychova, M., *Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy Used to Detection of Ceramic Structure Damage*, In. Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, Sweden, July 7-10, 2008, pp. 541-544.
- [7] Korenska, M., Manychova, M., *New possibilities of non-destructive testing of ceramic specimen integrity*, 2010, Ceramics-Silikaty, 54[1], pp. 72-77.



NONLINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY METHODS PROPER FOR DEFECTOSCOPY OF CONCRETE PARTS

Michal Matysík*, Iveta Plšková*, Marta Kořenská*

* Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: matysik.m@fce.vutbr.cz

Abstract

Nonlinear ultrasonic spectroscopy methods belong to rank of highly promising methods to identify the structure defects in a wide range of materials. These methods are employing the fact that a crack-induced nonlinearity makes an extremely sensitive material impairment indicator. The paper deals with the research of nonlinear ultrasonic spectroscopy method from the viewpoint of its applicability in civil engineering – study nonlinear interaction between elastic wave and structural defects in concrete materials. The nonlinear effect analysis was carried out for both intact specimens and specimens, which had been exposed to mechanical loading.

Key words: *nonlinear ultrasonic spectroscopy, cracks, concrete, structure defects*

1. INTRODUCTION

On the basis of non-linear effect studies, new diagnostic and defectoscopic methods have been designed, which are based on the elastic wave non-linear spectroscopy (Van den Abeele et al. 2000, Zaitsev et al. 2006). The non-linear acoustic spectroscopy brings new prospects into the acoustic non-destructive testing of material degradation. Poor material homogeneity and, in some cases, shape complexity of some units used in the building industry, are heavily restricting the applicability of "classical" ultrasonic methods. These linear acoustic methods focus on the energy of waves, which are reflected by structural defects, variations of the wave propagation velocity or changes in the wave amplitude. However, none of these "linear" wave characteristics is as sensitive to the structure defects as the specimen non-linear response (Nagy, 1998; Van den Abeele et al. 2001; Van den Abeele et al. 2009). In this way, non-linear methods thus open new horizons in non-destructive ultrasonic testing, providing undreamed-of sensitivities, application speeds and easy interpretation. One of the fields in which a wide application range of non-linear acoustic spectroscopy methods can be expected is civil engineering. It is predicted that these advanced techniques can contribute a great deal to the improvement and refinement of the defectoscopic and testing methods in the building industry practice.

2. NON-LINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY

On the basis of non-linear effect studies, new diagnostic and defectoscopic methods have been designed, which are based on the elastic wave non-linear spectroscopy. Existing linear acoustic methods focus on the energy of waves reflected at structural defects, analyzing the reflected wave energy, wave velocity or amplitude variations. It is to be emphasized, however, that none of these linear wave characteristics is as sensitive to the structural defect occurrence as the non-linear response of the material.

Recently, various papers are being published on the theoretical or experimental verification of different methods in some application areas. One may state that, on the one hand, and, regarding the topic complexity, the requirements for newly developed special instrumentation and a high potential application diversity, the research and development of the respective methods, the required instrumentation and, last but not least, practical applications of these methods, is still in its infancy. On the other hand, most published papers as well as our experience show these methods to be highly promising for both the defectoscopy and the material testing purposes in the near future.

One of the fields in which a wide application range of non-linear acoustic spectroscopy methods may be expected to take place is civil engineering. Poor homogeneity of materials and in some cases also intricate shape of the specimens, restrict heavily the applicability of the classical ultrasonic methods. Precisely these non-linear acoustic defectoscopy methods are less susceptible to the mentioned restrictions and one may expect them to contribute a great deal to further improvement of the defectoscopy and material testing in civil engineering.

2.1 Non-Linear Spectroscopic Methods

Non-resonance methods are used to study suppressed resonance specimens. These methods analyse the effect of non-linearities on acoustic signals propagating through them. These methods can again be split into two groups (Korenska & Manychova, 2008; Hajek & Sikula, 2008, Sikula et al. 2008):

- measurements using a single harmonic ultrasonic signal (a single frequency f_1),
- measurements using multiple harmonic ultrasonic signals (usually, two frequencies f_1, f_2).

We pay attention to single harmonic ultrasonic signal measurement method which was used in experimental part. In this case, where a single exciting frequency f_1 is used (Fig. 1), the non-linearity gives rise to other harmonic signals, whose frequencies f_v obey the Fourier series formulas:

$$f_v = n f_1 \quad | \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (1)$$

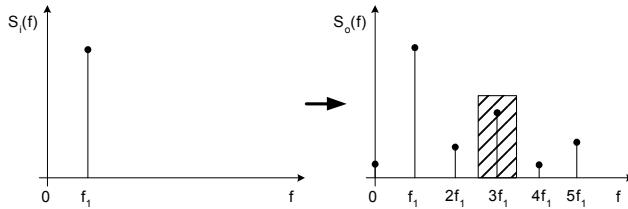


Fig. 1: Frequency spectrum of a non-linear medium response

In general, these frequency component amplitudes are falling when the harmonic order natural number, n , is increasing. If the non-linearity effect is not entirely symmetrical, there can arise low-amplitude second and higher even-numbered harmonic components, whose amplitudes may be much lower than those of the odd-numbered ones. Among these emerging components, the third harmonic is the most distinctive one. Therefore, its amplitude is being evaluated most frequently.

2.2 Measuring Apparatus

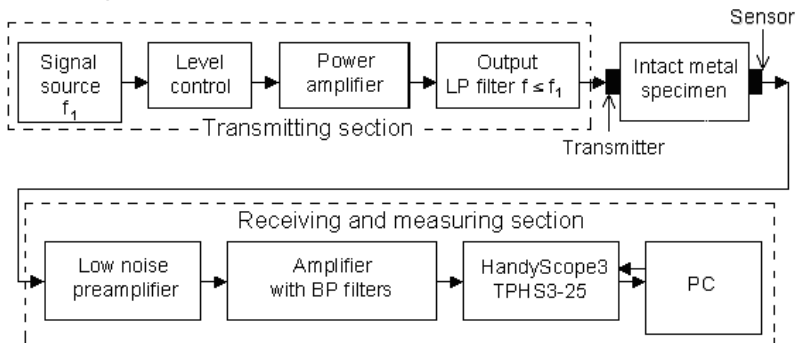


Fig. 2: Block diagram of the measuring apparatus

The transmitting unit consists of four functional blocks: a controlled-output-level harmonic signal generator, a low-distortion 100 W power amplifier, an output low-pass filter to suppress higher harmonic components and ensure high purity of the exciting harmonic signal and a piezo-ceramic transmitter (actuator) to ensure the ultrasonic excitation.

Receiving section consists of piezoceramics sensor, low noise preamplifier with classical or differential input connector, amplifier with band - pass filters. These output signal are used for final evaluating. The starting measures were realized by normal spectral analyser in our case oscilloscope HandyScope3 TPHS3-25.

For the recorded data to be interpreted properly, each of the measuring instruments must meet following criteria (Prevorovsky and Abeele 2004):

- High linearity of all instruments (generators, amplifiers, sensor, transmitter,...).
- High resolution in the frequency domain.
- High dynamic range (90 to 130 dB).

- Highly efficient filtration of detected signals (fundamental frequency suppression).
- Frequency range 10 kHz to 10 MHz.
- Optimized sensor and transmitter location.

A program package to control the measuring process and the data processing and evaluation makes an indispensable tool.

3. Experiment

Concrete specimens of dimensions 100 mm x 100 mm x 400 mm which had been filled with polymer fibres were tested. In the first stage of the experiment, we tried to find out whether the high inhomogeneity of the material gives rise or does not give rise to non-linear phenomena. In subsequent stage were the specimens examined for flexural tensile strength in a two-weigh pressing machine. The load test was terminated as soon as visible cracks appeared. These cracks closed again after the strain had been taken off. In the case of TP7 specimen a visible crack remained after the specimen had been relieved. The transmitter and sensor configuration is shown in Fig. 3.

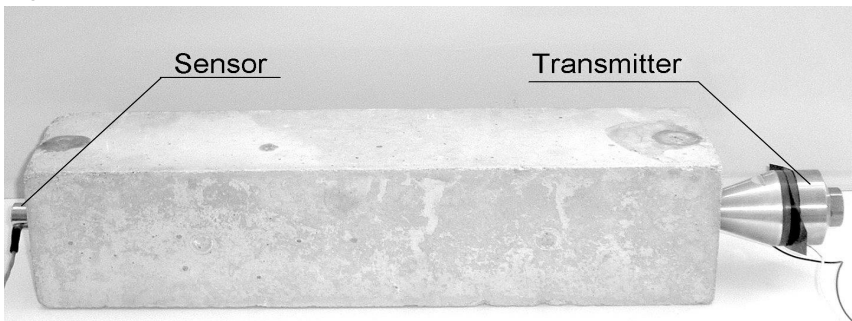


Fig. 3: Location of the exciter and the sensor on the specimen under test

3.1 Measurement Results

Pre-test measurements of TP7 specimen are shown in Fig. 4. The shape of the frequency spectrum corresponds to that of intact specimen and higher harmonic amplitudes are decreasing with their serial number. Fig. 5 shows the frequency spectrum of the same specimen after load test has been carried out in the pressing machine. When compared with Fig. 4, the response function shows the higher harmonic frequencies to have lower amplitudes. The fifth harmonic has disappeared entirely which is probably due to the structure-degradation-induced higher attenuation. Another change consists in emphasizing the second harmonic's amplitude with respect to the first harmonic as well as the third and fourth harmonic.

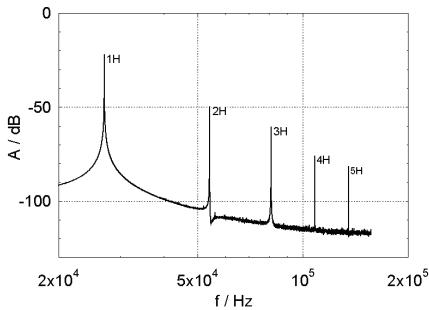


Fig. 4: Pre-test frequency spectrum of TP7 specimen

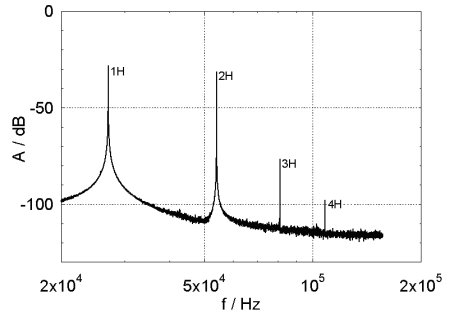


Fig. 5: Frequency spectrum of TP7 specimen after load test

4 Conclusion

This paper presents our first results of concrete specimen structure testing by means of non-linear ultrasonic spectroscopy using a single exciting harmonic frequency.

To interpret properly the measuring results, the transfer function of the whole measuring set-up must be determined and all measuring instruments must comply with high quality standards. It is therefore essential to minimize any harmonic distortion in the signal pick-up and amplification path by eliminating any spurious signals ($3f$ parasitic signal, noise) from the measuring apparatus stages. It is to be noted that a perfect mechanical coupling must be ensured between the exciter and the specimen and, further, between the specimen and the pick-up element during the experiment setup process.

Our measurements show that the effect of a material inhomogeneity is very low in the case of non-linear ultrasonic spectroscopy, its non-linear effect being substantially lower than in the case of common defects.

Furthermore, it has been proved that structure defects, which are due to mechanical load, give rise to non-linear effects.

In conclusion, it is to be emphasized that a perfect mechanical coupling must be ensured between the exciter and the specimen and, further, between the specimen and the pick-up element during the experiment setup process.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by Czech Science Foundation - project GP103/09/P252.

REFERENCES

- Van Den Abeele, K.E., Johnson, P.A. and Sutin, A., 2000. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, 12(1), pp. 17-30. ISSN: 09349847
- Van Den Abeele, K.E., Carmeliet, J., Ten Cate, J.A. and Johnson, P.A., 2000. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, 12(1), pp. 31-42. ISSN: 09349847
- Zaitsev, V., Nazarov, V., Gusev, V. and Castagnede, B., 2006. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection. *NDT and E International*, 39(3), pp. 184-194. ISSN: 09638695
- Nagy, P.B., 1998. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, 36(1-5), pp. 375-381. ISSN: 0041624X
- Van Den Abeele, K.E., Sutin, A., Carmeliet, J. and Johnson, P.A., 2001. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT and E International*, 34(4), pp. 239-248. ISSN: 09638695
- Korenska, M.; Matysik, M. Non-linear Ultrasonic Spectroscopy as an Assessment Tool for the Structure Integrity of Concrete Specimens. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*. 2010. 3(1), p. 17 - 22. ISSN 1802-971X.
- Chen, X.J., Kim, J.-., Kurtis, K.E., Qu, J., Shen, C.W. and Jacobs, L.J., 2008. Characterization of progressive microcracking in Portland cement mortar using nonlinear ultrasonics. *NDT and E International*, 41(2), pp. 112-118. ISSN: 09638695
- Prevorovsky, Z., Van Den Abeele, K.E. 2004, 'Calibration Samples for Use in Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy' Proc. 34th International Conference and NDT Technique Exposition Defektoskopie 2004, November 3-5, Špindlerův Mlýn, Czech Republic, 347 - 349.
- Korenska, M. and Manychova, M., 2008. Nonlinear ultrasonic spectroscopy used to detection of ceramic structure damage. *Nonlinear Acoustics Fundamentals and Applications, Aip Conference Proceedings. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, Sweden, 2008*, pp. 541-544. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448
- Sikula, J., Sedlakova, V., Navarova, H., Tofel, P., Majzner, J. and Hajek, K., 2008. NDT of conducting solids by electro-ultrasonic spectroscopy, 2008, *Nonlinear Acoustics Fundamentals and Applications, Aip Conference Proceedings. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, Sweden, 2008*, pp. 319-322. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448

Hajek, K. and Sikula, J., 2008. A resonance frequency shift in spectral analysis of the impact echo. *Nonlinear Acoustics Fundamentals and Applications, Aip Conference Proceedings. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, Sweden, 2008*, pp. 525-528. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448

Plskova, I.; Matysik, M.; Chobola, Z. Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*. 2010. 3(1). p. 23 - 28. ISSN 1802-971X.

Korenska, M., Pazdera, L., Pospisil, K., Stryk, J. and Vyroubal, P., 2005. Detection of the reinforcement corrosion in prestressed concrete girders. *Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. 8th International Conference of the Slovenian-Society-for-Non-Destructive-Testing on the Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. Portoroz, Slovenia, 2005*. pp. 317-322. ISBN: 9619061055

Plskova, I.; Kucharczykova, B.; Matysik, M.; Chobola, Z. 2009. Non-Destructive Testing of Lightweight Concrete Specimen by Impact-Echo Method. *The e-Journal of Nondestructive Testing, 2009, 14(3)*, p. 1 - 6.

Mazal, P.; Pazdera, L., 2005. Advanced Acoustic Emission Signal treatment in the Area of Mechanical Loading. In *The 8th Int.Conf. of the Slovenian Soc.for NDT "Application of Contemporary NDT in Engineering"*. Portoroz, SSNDT Slovenia. 2005. pp. 283 - 292. ISBN 961-90610-5-5.

Korenska, M.; Pazdera, L.; Pospisil, K., 2006. Detection of the reinforcement corrosion in pre-stressed concrete girders. *International Journal of Microstructure and Materials Properties* . 2006. 2006(1)(3/4). p. 374 - 382. ISSN 1741-8410.

Matysik, M.; Plskova, I.; Korenska, M.; Kucharczykova, B. NDT of Mechanical Damaged Concrete Specimens by Nonlinear Acoustic Spectroscopy Method. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*. 2010. 2(4). p. 166 - 171. ISSN 1802-971X.



APPLICATION NONDESTRUCTIVE TESTING DURING CONCRETE HARDENING AND SETTING VYUŽITÍ METOD NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ PŘI TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ BETONU

Lubos PAZDERA *, Libor TOPOLAR *, Vlastimil BILEK **, Jaroslav SMUTNY *,
Ivo KUSAK *, Miroslav LUNAK *, Marta KORENSKA *, Michal MATYSIK *,
Pavel MAZAL *

* Brno University of Technology, ** ZPSV a.s.
Contact e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz

Abstract

Concrete is possible to term as the most significant building material. Their properties depend mainly on mixture but also on early age process. It is clear that fissuring is mainly during early age. Their following is not easy however some nondestructive testing methods can indicate interesting results. Acoustic Emission Method and Nonlinear Spectroscopy have applied there.

Key words: concrete, acoustic emission, nondestructive testing, ultrasound, hardening

Abstrakt

Beton lze označit za nejvýznamnější stavební materiál. Jeho vlastnosti závisí zejména na složení, ale také na průběhu tuhnutí a tvrdnutí. Je zřejmé, že v raném stádiu také vznikají trhliny. Jejich sledování je komplikované, avšak některé metody nedestruktivního testování mohou ukázat zajímavé výsledky. Metoda akustické emise a nelineární ultrazvukové spektroskopie byly zde použity.

Klíčová slova: beton, akustická emise, nedestruktivní testování, ultrazvuk, tuhnutí

1. Introduction

The setting and hardening process of concrete can be considered as the most critical time period during the life of a concrete structure. To assure high quality and avoid problems in performance throughout the life of the material, it is essential to have reliable information about the early age properties of the concrete. [Popovics, 1971] The properties of concrete are solely determined by the composition of its ingredients and the conditions during the setting and hardening process. [Ozturk et al, 1999]

There are many techniques to determine concrete properties. Therefore their application during early age is very complicated or impossible. [Struble et al, 2000] Sonic or ultrasonic method can be interesting for following concrete structure during lifetime. [Rapoport et al, 2000]

We have applied acoustic emission method, nonlinear (ultra)sonic method and impedance spectroscopy for description concrete setting and hardening.

2. Acoustic Emission

The Acoustic Emission Method is one of the Nondestructive Testing techniques. Contra most such techniques it detects active defects inside and on the material (Fig. 1). When the structure is not loaded the acoustic emission does not exist. [Pazdera et al, 2010] Consequently, it does not detect geometrical inaccuracy. Acoustic emission sensors collect the burst type of signals (hits). There are two basic ways of hit descriptions. Hit description by parameters is easier and does not need so many recorded values. Time recording of hit amplitude contains more information about acoustic emission phenomena, but the number of recorded values is higher then by the parameter's description. [Mazal et al, 2006] The Acoustic Emission Method is very promising method to detect active defects into tested structure. Including modern mathematical methods to the Acoustic Emission Method is acquired as a very useful tool to analyse physical (technical) phenomena of tested loaded structure. [Korenska et al, 2007]

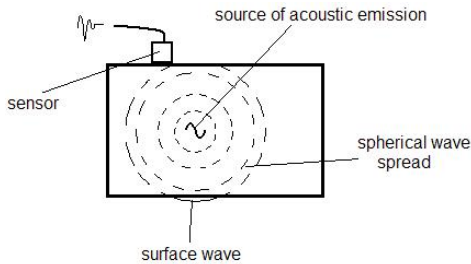


Figure 1 Theoretical spreading of acoustic emission wave

It is necessary to say that acoustic emission signal analysis is not easy. [Smutny J et al, 2000] There are many methods to evaluate acoustic emission signal or hits [Pazdera & Smutny, 1998]

Very popular is analysis by help of Fourier transform $S(f)$

$$S(f) = \int s(t) \cdot \exp(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt \quad (1)$$

where $s(t)$ is hit history, t time, f frequency. [Smutny & Pazdera, 2004]

Wavelet transformation W_ψ is now very popular, too

$$W_\psi(\tau, m) = |m|^{-\frac{1}{2}} \int \phi\left(\frac{t-\tau}{m}\right) \cdot s(t) \cdot dt \quad (2)$$

where τ is time shift and m is scale. [Smutny, 2004]

3. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy

Regarding their assumedly higher sensitivity and more accurate quality and reliability characterization capacity, the nonlinear ultrasonic spectroscopy methods are ranking among the most promising material quality and reliability characterization tools. Detailed studies of dynamic nonlinearity and hysteresis in inhomogeneous media have shown that the occurrence of mesoscopic elements in the material structure gives rise to strongly nonlinear dynamic phenomena accompanying the elastic wave propagation. These nonlinear effects are observed in the course of the degradation process much sooner than any degradation-induced variations of linear parameters (propagation velocity, attenuation, elastic moduli, rigidity etc.). Nonlinear parameters have proved to be very sensitive to the presence of any inhomogeneities and progressing degradation of the material structure. [Korenska et al, 2006].

One of the measurement set up is shown in Fig. 2.

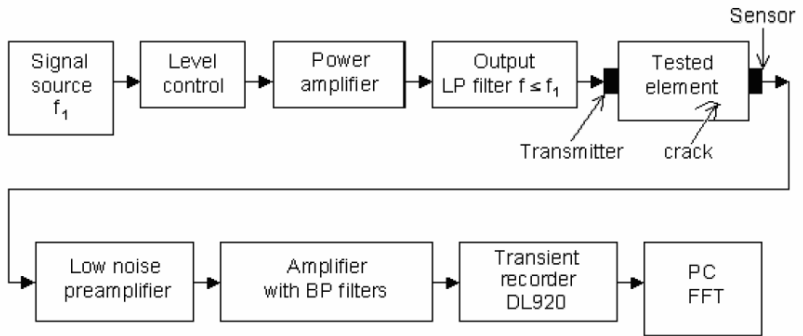


Figure 1 Block diagram of measure experiment of nonlinear spectroscopy [Korenska et al, 2006]

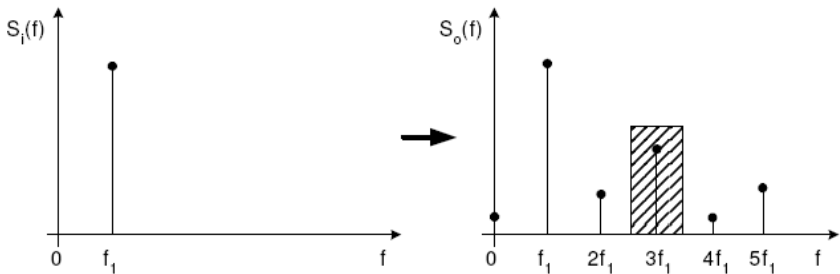


Figure 2 Theory of result at nonlinear spectroscopy [Hajek et al, 2003]

The nonlinearity gives rise to additional signals featuring different frequencies according to Fourier expansion (see Fig. 3). In general, the amplitudes of these additional components (f_n) decrease with the natural number n by [Hajek et al, 2003]

$$f_n = n \cdot f_1 \tag{1}$$

where f_1 is exciting frequency. Nevertheless, among the emerged signals, the third harmonic appears to be most pronounced,

4. Impedance Spectroscopy

Impedance spectroscopy is a nondestructive testing method ranking in the electrical engineering measuring method group. It outputs data providing information on material electric and dielectric properties. Microscopically inhomogeneous materials are frequently used in the building industry. Unfortunately, the impedance spectroscopy results and their characterization on the basis of this method are not unambiguous. [Lunak et al, 2008]

5. Experimental set up

Concrete sample was made from mixture wrote in Tab. 1.

Component	Weight [kg]
Cement	450
Water	225
Plasticizer	4
Sand 0/4	1350

Table 1 Tested mixture

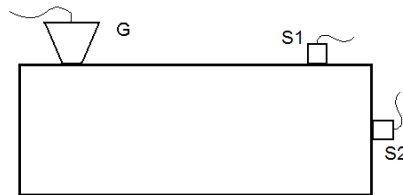


Figure 3 Experimental set up of nonlinear spectroscopy (G – excitor, S – sensor)

Nonlinear spectroscopy was measured with two sensors placed according to Fig. 3. Acoustic emission system put three acoustic emission sensors placed on surface (see Fig. 4).



Figure 4 Placing acoustic emission sensors on sample.

6. Results

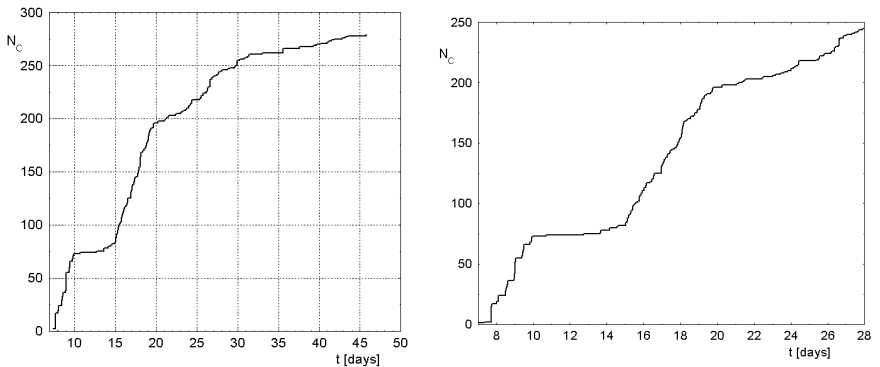


Figure 5 Time history of acoustic emission activity till 46 days and zoom from 7 day to 28 day

Acoustic emission activity of tested samples during 46 days is shown in Fig. 5. First 30 days acoustic emission activity increase fast and then it is not so high. We expect that hardening process is finished after these 30 days. Therefore, it is not any time without creating or growing micocracks during whole experiment. However acoustic emission activity is very small from 10 days to 14 days after making mixture.

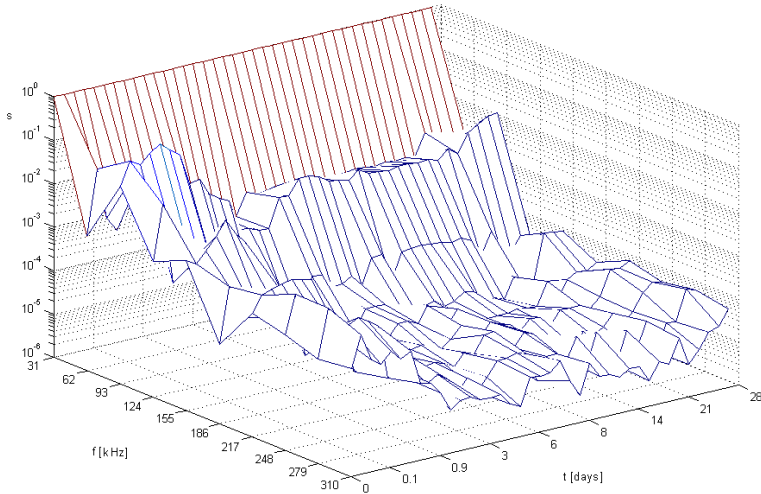


Figure 6 Nonlinear ultrasonic testing sample up to 28 days

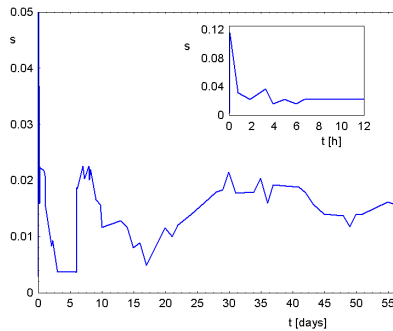


Figure 7 Nonlinear ultrasonic testing sample - 3rd harmonics

Nonlinear ultrasonic method was applied for monitoring the sample structure during first 28 days. 31 kHz frequency exciter was used here. Time t frequency f spectrum s shows interesting changes on 3rd harmonic frequency in Fig. 6. Major structural changes are expected from 8 day to 28 day according to Fig. 7, when spectrum 3rd harmonic contained change of curve course.

According to acoustic emission activity (Fig. 5 right) important change could be around 18 day.

7. Conclusion

Early age is very important time for forming basic concrete structure. Properties can dependent on this time. Acoustic emission, Nonlinear (ultrasonic) spectroscopy or Impedance spectroscopy are suitable tools for monitoring concrete structure over its lifetime.

Nevertheless, evaluations of results from these methods are not so easy. Their application is possible in laboratory quite well, but in production it could be difficult.

Using these methods simultaneously brings better evaluation of micro changes into concrete structure from its making.

Acknowledgement

This research has been supported by project of GACR No. P104/10/0535 and as part of the research project MSM 0021630519 and CIDEAS (1M6840770001- Centre for Integrated DEsign of Advanced Structures).

References

Hajek, K., Sikula J., 2003. Testing of Low-Current Contacts Quality and Reliability by Using Third Harmonic Distortion. Proc. of 45th- IEEE Holm Conference, Washington, September 2003, p. 211-213. ISBN 0-7803-7862-8

Korenska, M., Pazdera, L., Vyroubal, P. (2007) Indication of Partial Discharges by Means of the Acoustic Emission Method, proc. of 4th International Workshop of NDT Experts - NDT in Progress held at European NDT Days in Prague 2007, Prague, Czech Republic, Nov 05-07, 2007, pp. 89-96

Korenska, M., Matysik, M., Pazdera, L., Manychova, M., 2006, Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy of Structural Components, proc. of ECNDT 2006, Berlin, Germany, pps 7

Lunak M., Kusak, I., 2008, Impedance Spectroscopy Measurement of Concrete Hydration by Miscellaneous Medium, InterTech 2008, in Proc. of the 1st International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, Politechnika

Mazal, P., Pazdera, L., Kolar, L. (2006) Basic Acoustic Emission signal treatment in the area of mechanical cyclic loading, *International Journal of Microstructure and Materials Properties* 2006 - Vol. 1, No.3/4 pp. 341 - 352

Ozturk, T., Rapoport, J., Popvics, J.S. and Shah, S.P. (1999). Monitoring the setting and hardening of cement-based materials with ultrasound, *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 83-91.

Pazdera L., Smutny J. (1998) Time-Frequency Analysis of Mechanical Quantities Employing Wavelet Transformation, 36. EAN, Kosice, Acta Mechanica Slovaca, 1998, pp. 227-230, ISSN 1335-2393

Pazdera, L., Topolar, L., Smutny, J., Bílek, V., Korenska, M. (2010) Is it Possible to Applied Acoustic Emission Method during Concrete Hardening?, proc. of EWGAE 2010, Vienna, 8th to 10th September

Popovics, S. (1971). Physical aspects of the setting of Portland cement concrete, *Journal of Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 150-162.

Rapoport, J., Popovics, J.S., Subramaniam, K.V., Shah, S.P. (2000). "The use of ultrasound to monitor the stiffening process of portland cement concrete with admixtures" *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 6, pp. 675-683

Struble, L.J., Zhang, H., Sun, G.-K., and Lei., W.-G. (2000). "Oscillatory shear behavior of Portland cement paste during early hydration," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 2, No. 9, pp. 141-149

Smutny J., Pazdera L. (2000) Analyses of Acoustic Emission Signal by Short Time Fourier Transform with Application on Thin-Walled Ceramic Building Materials, *Proceedings of International Conference DIAGO'2000*, Ostrava, Czech R., February, 2000, pp. 120-126, ISBN 80-7078-749-X

Smutny J , (2004) Measurement and analysis of dynamic and acoustic parameters of rail fastening, *NDT & E INTERNATIONAL*, Vol 37, Iss 2, pp. 119-129

Smutny J, Pazdera L , (2004) New techniques in analysis of dynamic parameters of rail fastening, *INSIGHT*, Vol 46, Iss 10, pp. 612-615

Authors

Lubos Pazdera – Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., pazdera.l@fce.vutbr.cz

Jaroslav Smutny - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Railway Structures and Constructions , Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., smutny.j@fce.vutbr.cz

Libor Topolar - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., topolar.l@fce.vutbr.cz

Vlastimil Bilek – ZPSV a.s. OHL Group, Trebizskeho 207, 687 24 Uherský Ostroh, Czech Rep., bilek@zpsv.cz

Ivo Kusak - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., kusak.i@fce.vutbr.cz

Miroslav Lunak - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., lunak.m@fce.vutbr.cz

Michal Matysik - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., matysik.m@fce.vutbr.cz

Marta Korenska - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., korenska.m@fce.vutbr.cz

Pavel Mazal - Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design, Dept. of Design Theory, Technicka 2896/2, 616 69 Brno Czech Rep., mazal@fme.vutbr.cz



JOINTED TIME FREQUENCY ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS DURING CONCRETE HARDENING

ANALÝZA SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE ČASOVĚ FREKVENČNÍMI SPEKTRY PŘI TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ BETONU

Lubos PAZDERA *, Libor TOPOLAR *, Vlastimil BILEK **, Jaroslav SMUTNY*

* Brno, University of Technology, Faculty of Civil Engineering, ** ZPSV a.s.

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

Abstract

Because concrete is most popular civil engineering material and their properties are changed during life time it is suitable to followed it by help of non destructive techniques. Acoustic Emission Method seems to be very powerful tool for this evaluation. Chosen analyses have been used to assessment of recorded acoustic emission signals.

Key words: concrete, acoustic emission, hardening, time frequency spectra

Abstrakt

Jelikož beton je významným stavebním materiálem a jeho vlastnosti se mění v průběhu jeho životního cyklu, je užitečné je sledovat s pomocí nedestruktivních metod. Metoda akustické emise se jeví být velmi výkonným nástrojem pro hodnocení. Vybrané metody časově frekvenční analýzy byly užity pro vyhodnocení zaznamenaných signálů akustické emise.

Klíčová slova: beton, akustická emise, tuhnutí, časově frekvenční spektra

1. Introduction

Concrete is a construction material composed of cement (commonly Portland cement) and other cementitious materials such as fly ash and slag cement, aggregate (generally a coarse aggregate made of gravels or crushed rocks such as limestone, or granite, plus a fine aggregate such as sand), water, and chemical admixtures. [Kosmatka et al 1988] Concrete is used more than any other man-made material in the world. [Lamborg 2006] The strength and durability of concrete structures are enhanced significantly by proper moist curing of early-age concrete, where improper moist curing conditions can affect significantly the concrete strength development. [Mindess et al 2003]

A sound understanding of the early-age cracking problem is important because it may lead to ingress of moisture and salt, reinforcement corrosion, concrete spalling and, ultimately, to a reduced inservice performance of the concrete structure. [Lachemi et al 1997]

Thus following concrete life time is most important for constructions properties. One of the more promising non destructive evaluation techniques for detecting and monitoring, in real-time, the strain energy release and corresponding stress-wave

propagation produced by actively growing flaws and defects in composite materials is acoustic emission. [El Gueflounia et al 2001]. Acoustic emission is a nondestructive testing technique that is applied frequently to materials like metals or compounds. Due to the complicated structure of the material, its application to concrete is not yet well established. [Bradshaw et al 2002]

Therefore acoustic emission method can help to describe cracks during concrete lifetime.

Two different approaches to record and acoustic emission analyze signals are typically distinguished: the classical and the quantitative or signal-based acoustic emission technique. Classical technique records a set of parameters evaluated acoustic emission events, but the signal itself is not stored. Quantitative acoustic emission technique, as many signals as possible are recorded and stored along with their waveforms converted from analogue-to-digital. [Grosse et al 2002] But analysis this signal is too ambitious on computing power. One solution is the division of the time series into smaller units and the sequential application of Fourier transform techniques. This procedure is called Short Time Fourier Transform or Windowed Fourier Transform [Gabor 1991]

Next possibility of long time acoustic emission testing is recording only hits. Their frequency analysis is jointed with time, but no constant time step of recording hits can be set.

Each hit could be analyzed by Fourier, wavelet, Choi-Williams or other transformation. [Choi et al 1989, Mallat 1998, Zhao et al 2000]

2. Time frequency spectra of acoustic emission hit

Fourier analysis FT is basic frequency analysis appear from [Pazdera et al 2007]

$$FT(f) = \int s(t) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt \quad (1)$$

where $s(t)$ is analysed signal, f is frequency, t is time. Because acoustic emission hits are time limited burst signals recorded in given time, their spectra are easy computed. Then each hit limited length can be transformed into own frequency spectrum. Consequently [Cooley et al 1969]

$$F_k(t_m) = \sum_{n=0}^{N-1} r_n(t_m) \cdot \exp\left(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{n}{N}\right) \text{ for } k = 0, 1, \dots, N-2, N-1 \quad (2)$$

where t_m is time, when the hit was recorded, r_n are N measured hit values with constant time step Δt , and k means k^{th} frequency component of spectra.

Note, that series t_m ($m=1, 2, \dots, M$) is not recorded with constant time differences. Commonly $t_j - t_{j-1} \neq t_{j+1} - t_j$. In this case, it is not possible to use classical Short Time Fourier transform [Giurgiutiu & Yu 2003]

$$STFT(f, t) = \int s(t) \cdot w(t - \tau) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot f) \cdot d\tau \quad (3)$$

because it needs "continuous" signal, not only burst hits as acoustic emission has.

3. Experimental acoustic emission system

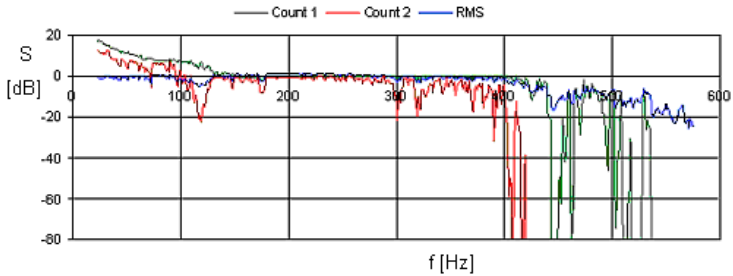


Figure 1 Calibration characteristic of sensor IDK-9

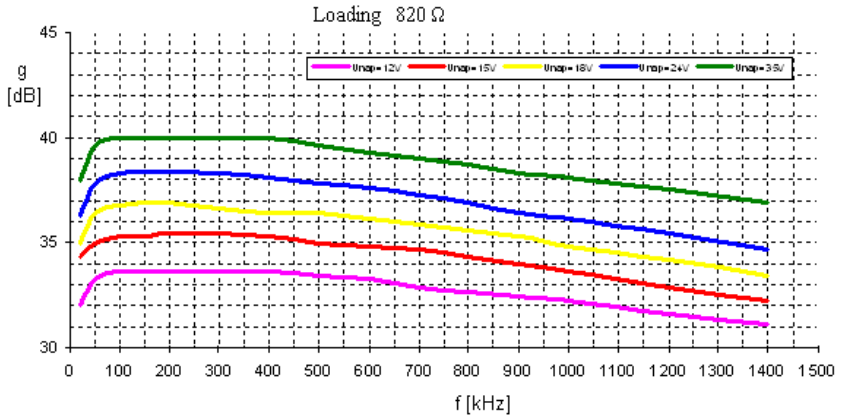


Figure 2 Calibration characteristic of preamplifier

Acoustic emission measuring has been applied by system XEDO. This acoustic emission system is made as modular. One communication card and up to fifteen input cards can be located in a metal box. Communication between cards within a box is realized by hi-speed bus. Each box is connected to control computer via Ethernet. Configuration of all units is automatically recognized after system switching (plug & lay). Time bases of all input units in system are synchronized via Ethernet and hi-speed bus with 1 μ s accuracy. All parameters of input cards can be set from computer and central reset for all boxes can be transmitted. [Chmelik et al 2004]

Acoustic emission parameters are evaluated by unit XEDO-AE. Allows sampling of signal from one sensor (speed up to 8 MHz), enumerates standard acoustic emission parameters, process emission events parameters for possible emission source localization. [Varner & Varner 2008]

Acoustic emission sensors IDK-09 (diameter 9 mm, height 10.5 mm) have glued by sweep wax on surface. Their frequency characteristic is in Fig. 1. [Mazal et al 2005] Preamplifiers with gain 35 dB (see Fig. 2) are produced using hybrid technology - surface mounting and thin film components on ceramic substrate, dimensions 7 mm by 7 mm. Very good is temperature range -20°C to +85°C, too. [Malcharczikova et al 2006]

4. Experimental set up

There was made a mortar sample 100 mm x 100 mm x 400 mm with mixture in Tab. 1.

<i>Composition</i>	<i>Weight [kg]</i>
Ordinary Portland Cement	450
Water	225
Sand 0/4 mm	1350
Plasticizer	4

Table 1 Mortar mixture

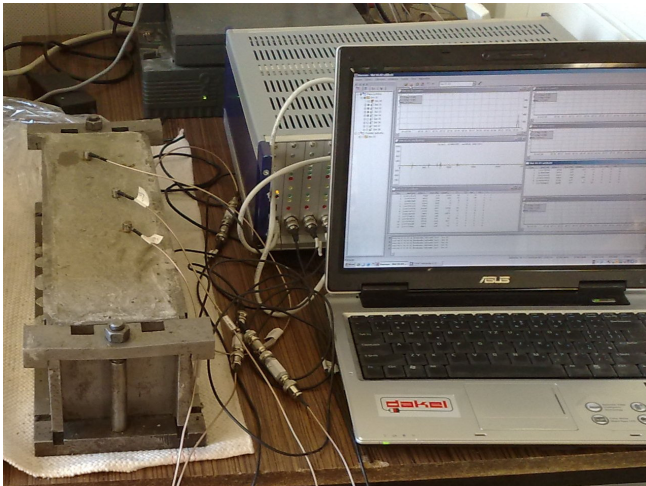


Figure 3 Experimental set up – sensor placing

Three sensors were fixed on sample surface and one out of sample for guarding noise hits. Second day sample was unmoulded (Fig. 4).



Figure 4 Sensor placing after getting out mould.

5. Results

Cumulative number of acoustic counts in Fig. 5 for low N_{cA} and high N_{cB} threshold demonstrate decreasing acoustic emission activity during concrete setting. Similar result is shown in Fig. 6 where events amplitude A decreasing with time and more number of events is in early time.

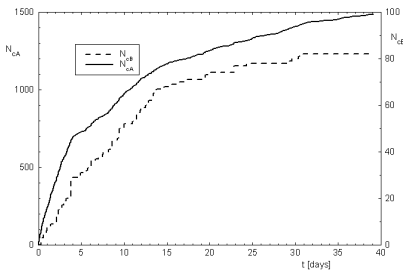


Figure 5 Time history of acoustic emission counts

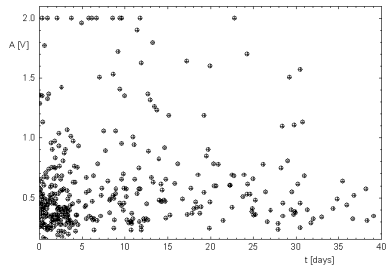


Figure 6 Time history of events amplitudes

Time distribution of frequencies (see Fig. 8) eventually events distribution frequencies (see Fig. 7) contained interest frequency range from 200 kHz to 350 kHz.

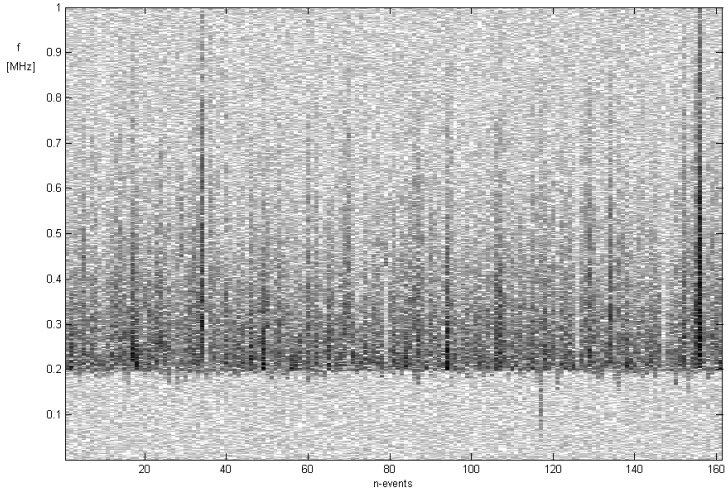


Figure 7 Frequency spectra of events.

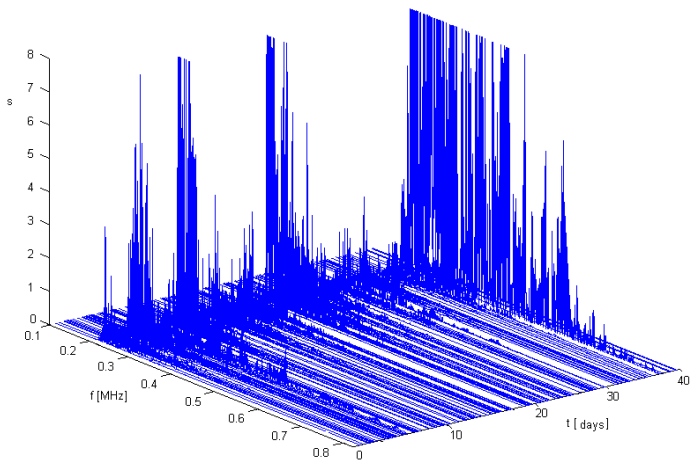


Figure 8 Time / frequency spectra of acoustic emission events

6. Conclusion

Application of acoustic emission method during setting concrete and its analysis by help of time frequency analysis will be presented. These experiments show advantages of using time frequency analysis at acoustic emission method application here.

Acknowledgement

This research has been supported by project of GACR No. P104/10/0535 and as part of the research project MSM 0021630519 and CIDEAS (1M6840770001- Centre for Integrated Design of Advanced Structures).

References

- Bradshaw T., Holford K., Cole P., Davies A, (2002), "Ball bearing calibration of concrete structures using AE", *25th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE 2002*, Prague, Czech Republic, ISBN 80-214-2174-6
- Chmelík, F., Rajkovits, Z., Lendvaia, J. (2004) Acoustic emission measurements on metal foams, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 378, Iss 1-2, pp. 145-150
- Choi, H.I., Williams, W. J. (1989), Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels, *IEEE Transactions on Acoustic Speech and Signal Processing* Vol. 37, No. 6, June 1989.
- Cooley, J., Lewis, P, Welch, P (1969) "The finite Fourier transform". *IEEE Trans. Audio Electroacoustics* 17 (2): 77–85.
- Gueflounia, El, Baboux, J.-C. , Ducret, D., Godin, N., Guy, P., Huguet, S., Jayet, Y., Monnier, T. (2001) "Non-Destructive Evaluation of Damage and Failure of Fibre Reinforced Polymer Composites Using Ultrasonic Waves and Acoustic Emission," *Adv. Eng. Matl.*, 3:8, pp. 601-608
- Gabor, D. (1991) Theory of Communication. *J. Inst. Electr. Eng.* 93, London, III, pp 891-906
- Grosse, Ch. U., Reinhardt, H.W. (2002), Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets, *NDT.net*, September 2002, Vol. 7 No.09
- Giurgitiu, V., Yu, L. (2003) Comparison of Short-time Fourier Transform and Wavelet Transform of Transient and Tone Burst Wave Propagation Signals For Structura, in *proc of 4th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford University, Stanford, CA, September 15-17, Health Monitoring.
- Kosmatka, S.H.; Panarese, W.C. (1988). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, IL, USA: Portland Cement Association. pp. 17, 42, 70, 184. ISBN 0-89312-087-1
- Lachemi, M. and Aitcin, P.-C. (1997) Influence of ambient and fresh concrete temperature on the maximum temperature and thermal gradient in a highperformance concrete structure, *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 2, March-April, pp. 102-110.

Lomborg, B. (2006) *Early Praise for The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*. Cambridge University Press.

Malcharczikova, J., Kurša, M., Beljajev, I. (2006) Impact of Conditions of Directional Crystallisation by Bridgman Method on Physical and Metallurgical Characteristics of Ni3Al, *Acta Metallurgica Slovaca*, 12, 2006, 4 (427 - 435)

Mazal, P., Pazdera, L., Kolar, L. (2005) Advanced Acoustic Emission Signal Treatment in the Area of Mechanical Cyclic Loading, *proc. of the 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing »Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering«*, September 1-3, 2005, Portoroz, Slovenia, pp. 283-292

Mindess, S., Young, J. F., Darwin. D., (2003) *Concrete*. Prentice Hall, NJ

Mallat, S. (1998) *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, San Diego,.

Pazdera, L., Smutny, J., Topolar, L., Bilková, J., Kusak, I., Lunak, M., Martinek, J., (2007) Using Fourier Transform to 1/f noise analysis of electric components, *In proc of Physical and Material Engineering 2007*, International Workshop. Brno, p. 169 - 172.

Varner, D., Varner, M. (2008) Waste wood detection wasp-beetle (*Hylotrupes Bajulus*) by measure of acoustic emission method, *proc of. 38th international conference Defectoscopy*, 4.-6.11.2008, Brno

Zhao, J., Ma, Y., Gao, H., Yang, J.: (2000) Denoising Method of AE Signal by Using Wavelet Transform. *Proc. of 15th World Conf. on NDT*, Rome

Authors

Lubos Pazdera – Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., pazdera.l@fce.vutbr.cz

Jaroslav Smutny - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Railway Structures and Constructions , Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., smutny.j@fce.vutbr.cz

Libor Topolar - Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics, Veveri 331/95, 602 00 Brno, Czech Rep., topolar.l@fce.vutbr.cz

Vlastimil Bilek – ZPSV a.s. OHL Group, Trebizskeho 207, 687 24 Uherský Ostroh, Czech Rep., bilek@zpsv.cz



INDICATION OF INTERNAL AND SURFACE DEFECTS OF CERAMIC TILES BY MEANS OF THE IMPACT ECHO METHOD

INDIKACE VNITŘNÍCH A POVRCHOVÝCH PORUCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ METODOU IMPACT ECHO

Iveta PLŠKOVÁ*, Michal MATYSÍK*, Marta KOŘENSKÁ*, Zdenek CHOBOLA*

* Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: plskova.i@fce.vutbr.cz

Abstract

The paper presents some issues of our experimental study of ceramic cladding element frost resistance, special attention being paid to the application of the impact echo method. Different sets of ceramic tiles made by various manufacturers have been studied. The ceramic tiles under investigation have been subjected to freeze-thaw-cycle-based degradation. To verify the rightness of the impact echo method results, additional physical parameters of the ceramic tiles under test have been measured. It has been demonstrated that impact echo method is a sensitive indicant of the structure condition and can be applied to the ceramic cladding element frost resistance.

Key words: *Impact echo, Freeze-thaw cycles, Ceramic tiles, Frost resistance*

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentální analýzy zaměřené na využití metody impact echo k posouzení mrazuvzdornosti keramických obkladových prvků. Analyzovány byly soubory keramických dlaždic různých výrobců. Testované keramické dlaždice byly podrobeny zmrazovacím cyklům. Pro verifikaci výsledků metody impact echo byly určeny další fyzikální vlastnosti testovaných keramických dlaždic. Bylo ověřeno, že akustická metoda impact echo je citlivým indikátorem stavu struktury a je možno ji aplikovat k posuzování mrazuvzdornosti keramických obkladových prvků.

Klíčová slova: *impact echo, zmrazovací cykly, keramické dlaždice, mrazuvzdornost*

1. Introduction

The analysis was applied to a three sets (A, B, C) of ceramic tiles, form square 33 cm x 33 cm, thickness 0.9 cm (set A), form square 33 cm x 33 cm and thickness 0.8 cm (sets B and C), which had been fabricated in year 2002.

To assess the frost resistance, the ceramic tiles were subject to freezing - thawing tests to ČSN EN ISO 10545-12.

Prior to the tests, the ceramic tiles were immersed into a vessel containing water whose temperature was $t_1 = 5^\circ\text{C}$. After having been pulled out from water, the pecimen was wiped with a wet rag. Immediately after the removal from water, the eramic tiles were placed in a refrigerating chamber. The tiles being frozen, the efrigerating chamber temperature was maintained at $t_2 = -5^\circ\text{C}$ for 15 minutes.

The freezing cycle being completed, the tiles were immersed into water for 1 to 2 hours in order to thaw out. The ceramic tiles were left lying in water till the test continuation.

A check measurement was carried out prior to stress cycle start and, subsequently, after the completion of 50, 100 and 150 cycles.

A metal hammer, which was hinged in a fixture ensuring a constant release level, was used to hit the tile.

The tile response to the exciting impulse was picked up by means of a piezoelectric sensor, whose operating frequencies range from 100 Hz to 50 kHz. The sensor was fitted to the tile surface at a point of coordinates $x = 18$ cm, $y = 16.5$ cm, i.e., in the maximum amplitude region.

The response voltage was fed into the input of a digital oscilloscope and further processed by means of a special signal-analysis software package.

2. Experiment results and discussion

Fig. No. 1 shows a recording of No. 105 specimen (set A) response as picked up at the tile centre prior to the expected low-temperature-induced degradation. Being placed at that point, the sensor picked up the response bending vibration amplitude for the most part. The response impulse duration was 36 milliseconds. The attenuation ratio was found to equal $\lambda = 105 \text{ s}^{-1}$. Fig. 2 shows the power spectral density (in relative units) versus frequency plot for specimen No.105. A dominant frequency $f_0 = 7416$ Hz may be observed. Fig. 3 shows a recording of No. 105 specimen response as picked up at the tile centre after the completion of 150 freezing and thawing cycles. The response impulse duration was 29 milliseconds. The attenuation ratio was found to equal $\lambda = 127 \text{ s}^{-1}$. Fig. 4 shows the power spectral density (in relative units) versus frequency plot for specimen No.105 after the completion of 150 freezing and thawing cycles. A dominant frequency $f_0 = 8180$ Hz may be observed. Fig. 5 illustrates the dominant frequency shift versus degradation test stages for specimen No.105 and higher frequency resolution. 0 cycle is the pre-degradation-test status, 150 cycle, the after-150-degradation-test-cycle status.

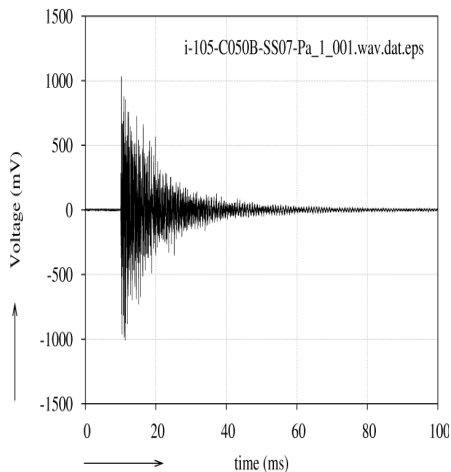


Fig.1 Time-domain response record for a ceramic tile No.105 before degradation.

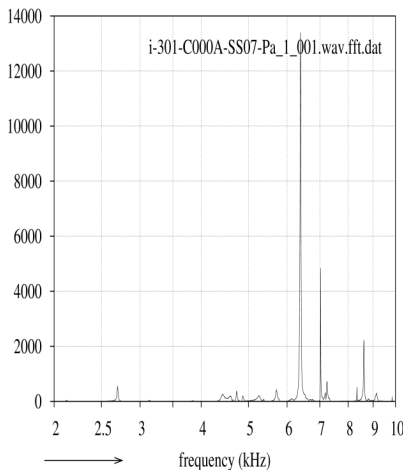


Fig.2 The power spectral density versus frequency plot for a ceramic tile No.105 before degradation.

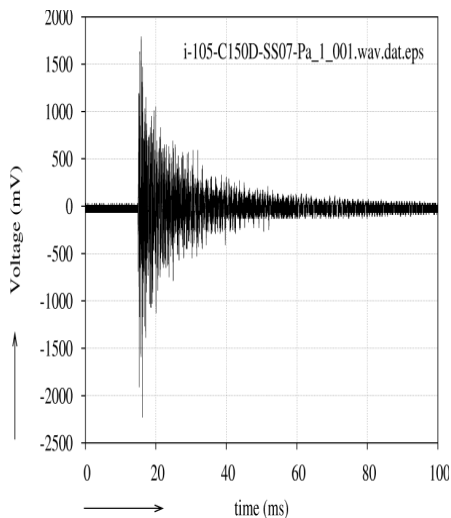


Fig.3 Time-domain response record for a ceramic tile No.105 after the completion of 150 freezing and thawing cycles.

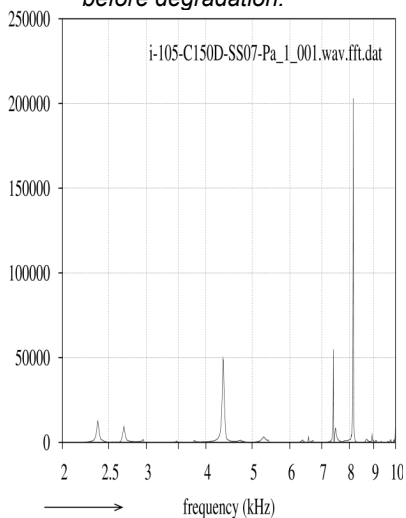


Fig.4 The power spectral density versus frequency plot for a ceramic tile No.105 after the completion of 150 freezing and thawing cycles.

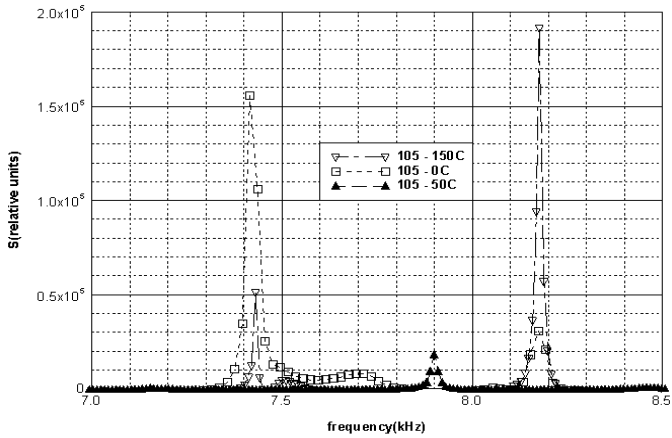


Fig.5 Shift of dominant frequency versus degradation test stages for sample No.105.

Figures 6 through 8 show the dominant frequency occurrence regions and mean values, \oplus , versus the number of freeze-thaw cycles applied. Mean values of complete sets are presented here for each of the tile types (Fig. 6: set A, Fig. 7: set B, Fig. 8: set C).

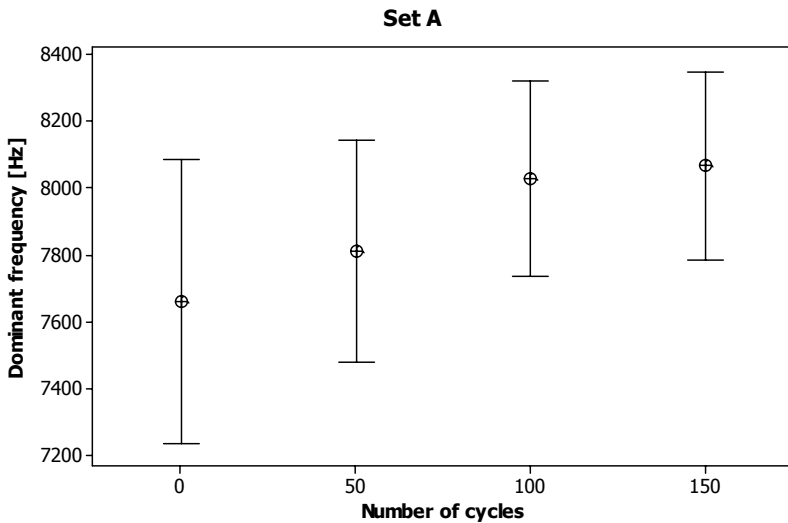


Fig.6 Dominant frequency occurrence regions and mean values, \oplus versus the number of freeze-thaw cycles for set A

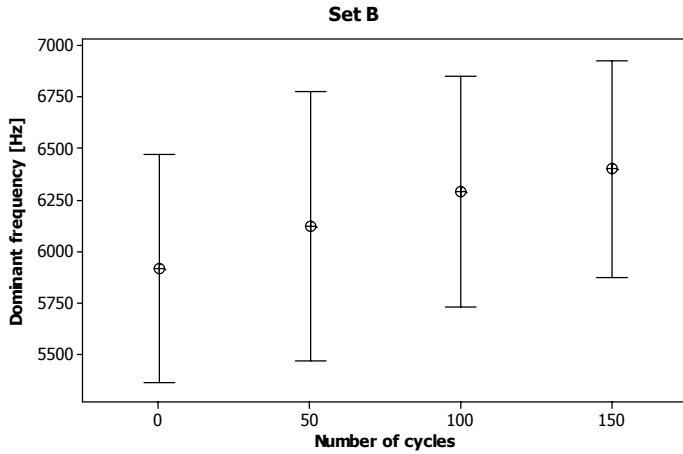


Fig.7 Dominant frequency occurrence regions and mean values, □ versus the number of freeze-thaw cycles for set B

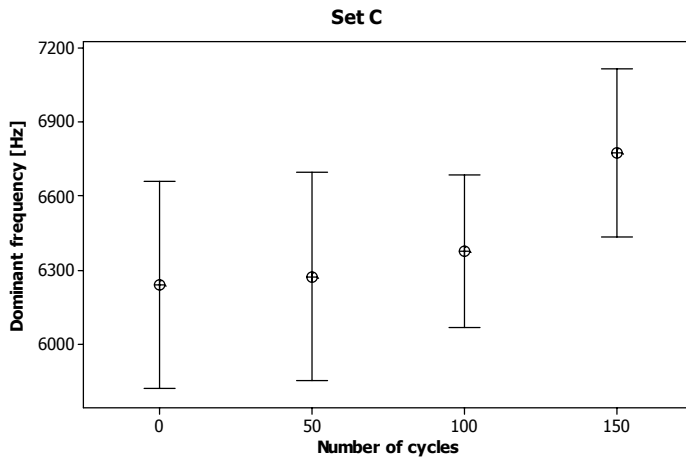


Fig.8 Dominant frequency occurrence regions and mean values, □ versus the number of freeze-thaw cycles for set C

The changes that were observed in the tile may be taken as an indication of certain structure impairment having taken place during the period between the 100 and 150 freezing and thawing cycle completion. The structure impairment appeared to be reflected in a change of the resonance frequency distribution.

With the exception of a single ceramic tile, only insignificant resonance frequency changes took place in the frequency interval from $\Delta = 67$ Hz to 764 Hz, average value $\Delta = 406$ Hz by set A, $\Delta = 49$ Hz to 1057 Hz by set B and $\Delta = 80$ Hz to 799 Hz by set C

in the course of the freezing and thawing cycles. This gives evidence of a very good quality as well as frost resistance of these ceramic tiles types, from which a long service life may therefore be predicted.

3. Conclusion

The analysis was applied to a three sets (A, B, C) of ceramic tiles a set of ceramic tiles, of a plain tile type, which had been fabricated in 2002. To assess the frost resistance, the ceramic tiles were subject to freezing - thawing tests.

With the exception of a ceramic tile, only insignificant resonance frequency changes took place in the course of the freezing and thawing cycles. This gives evidence of ery good quality as well as frost resistance of this ceramic tile type, from which a ong service life may therefore be predicted.

From the results we can also see that the frequency inspection method is a useful non-destructive testing method being applicable to the evaluation of the ceramic tile structure condition and allowing predicting the frost resistance and service life of hese products.

Acknowledgements

This research has been supported by Czech Science Foundation project GP103/09/P247 and by Ministry of Education, Youth and Sports project MSM0021630519.

References

ČSN EN ISO 10545-12 Ceramic tiles- Part 12: Determination of frost resistance

SHU-KEN LIN, YICHING LIN, KENG-TSANG HSU, TSONG YEN, Use of the normalized impact-echo spectrum to monitor the setting process of mortar, NDT & E International, Volume 43, Issue 5, July 2010, Pages 385-393, ISSN 0963-8695.

MIKULKOVÁ, P., KORENSKÁ, M., MARTINEK, J., CHOBOLA, Z., A study of the burnt roofing response vs. pick up location and transmission medium dependence. In: Proceedings of International Workshop Physical and material engineering 2003, Bratislava 2003, pp. 145 – 148.

EPASTO, G; PROVERBIO, E; VENTURI, V.: Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method, MATERIALS AND STRUCTURES, 43 (1-2): 235-245, 2010, ISSN: 1359-5997.

PLŠKOVÁ, I. 2006. Využití frekvenční inspekce pro posouzení mrazuvzdornosti keramické dlažby: disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006. 117 s.

KOŘENSKÁ, M., CHOBOLA, Z., SOKOLÁŘ, R., MIKULKOVÁ, P. and MARTINEK, J.A.N., 2006. Frequency inspection as an assessment tool for the frost resistance of fired roof tiles. Ceramics - Silikáty, 50(3), pp. 185-192. ISSN: 08625468.

PLŠKOVÁ, I.; MATYSÍK, M.; CHOBOLA, Z. Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors. TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES. 2010. 3(1). p. 23 - 28. ISSN 1802-971X.

ERTUGRUL CAM, SADETTIN ORHAN, MURAT LUY, An analysis of cracked beam structure using impact echo method, NDT & E International, Volume 38, Issue 5, July 2005, Pages 368-373, ISSN 0963-8695.

MATYSÍK, M.; PLSKOVA, I.; KORENSKA, M.; KUCHARCZYKOVA, B. NDT of Mechanical Damaged Concrete Specimens by Nonlinear Acoustic Spectroscopy Method. TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES. 2010. 2(4). p. 166 - 171. ISSN 1802-971X.

SERRIDGE M., LICHT T. R., 1987. Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Theory and Application Handbook, Denmark, 1987.



SMALL MECHANISATION IN ULTRASONIC INSPECTION

MALÁ MECHANIZACE PŘI ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM

Miloslav PROCHÁZKA, Roman BENEŠ, Jan JELÍNEK

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: info@tediko.cz

Abstract

Manual ultrasonic inspection has its own specifics. Therefore it is not able to perform inspection which would be efficient enough in some cases. There are places which are not accessible for inspection without additional costs. There are applications which required collecting and recording of the huge amount of data and accurate measuring probe leading, e.g. phased array or TOFD applications. It is not only suitable but essential to use handling equipment in these cases which can be very expensive and sophisticated equipment on one hand but it can be also much more simple and efficient equipment on the other hand. This small mechanisation makes possible to perform the remote inspection, accurate volumetrical, surface and in line testing, it saves measuring probes, very significantly saves time and also additional costs in some cases.

Key words : *ultrasonic inspection, manipulator, phased array, wall thickness measuring, crawler, immersion coupling*

Abstrakt

Ruční zkoušení ultrazvukem má svá specifika, která neumožňují v některých případech provedení dostatečně efektivní kontroly. Jsou místa, která jsou bez vynaložení dodatečných nákladů kontrole nepřístupná. Jsou aplikace, které vyžadují sběr a záznam velkého množství dat a precizní vedení měřicí sondy, jako například u aplikací phased array či TOFD. V těchto případech je nejen vhodné ale často přímo nezbytné používat manipulační prostředky, což na jedné straně mohou být velmi drahá a složitá zařízení ale na druhé straně také i „jednodušší“ efektivní zařízení. Tato malá mechanizace umožňuje vzdálené zkoušení, přesné objemové, plošné i liniové zkoušení, šetří měřicí sondy, významně šetří čas a v některých případech i vedlejší náklady.

Klíčová slova: *zkoušení ultrazvukem, manipulátor, phased array, měření tlouštěk, šplhadlo, imerzní vazba*

1. Úvod

Zkoušení ultrazvukem je i není jednoduchá záležitost. Z nedestruktivních metod patří ultrazvuk určitě k těm složitějším metodám vyvolávajícím v mnoha pracovních nedestruktivního zkoušení pocit méněcennosti vítězství hmoty nad duchem. Proto je určitě podstatně méně „ultrazvukářů“ než „rentgenářů“ a to ve všech kategoriích schopností. Ultrazvuk má, anebo spíše měl, jednu výhodu – nezbyval po něm žádný hmatatelný důkaz. Obrazovku většinou viděl jenom ten jeden konkrétní „defektoskopec“ a co řekl, to platilo. Nikdo to bez další kontroly nemohl zpochybnit, koneckonců šamanům nebývá radno odporovat, což přírodní národy dobře ví. Dnes

je však situace trochu jiná, lze zaznamenat kde co, dokonce lze vyhodnocovat v klidu pracovní, technologie sestoupily z nadoblačných výšin k prostému lidu, a hle – najednou se ukazuje, že chceme-li mít výsledky, které budou korespondovat s použitou technologií, nelze tuto technologii používat tak, jak je či bylo zvykem. Představa, že použijeme nenastartovanou motorovou pilu ke štípání dřeva na špalku místo sekery (tedy budeme pilou s pořádným rozmachem bušit do špalku, co síla dá) je jistě absurdní stejně jako, že zároveň s přefiznutím kmene zaryjeme řetěz do betonu, na kterém jsme si ten kmen chytře položili, až jiskry létají. Přesto tak mnoho věcí běžně děláme a absurdní nám to vůbec nepřijde.

2. Proč mechanizace zkoušení a ještě k tomu malá

Nabízí se hned otázka, co to je malá, jistě tedy existuje i velká. Z našeho pojetí je to podobný rozdíl jako mezi zemědělským kombajnem a zahradní sekačkou. Obě zařízení jezdí, posekají porost, ... mají mnoho znaků podobných. Ale kombajn vám zahrádku poseče na jeden záběr lišty a to včetně stromků a zahradního domku z nejmenovaného Bau.... a zahradní sekačkou to pole budete sekat hodně, hodně dlouho, a podobně jako v pohádce – sekali a sekali a pokud se jim nerozbila sekačka, tak sekají dodnes.

V přednášce „Příklady některých aplikací metody Phased Array“, prezentované na konferenci před rokem, byly diskutovány způsoby měření touto metodou. Nezbyvá než zopakovat, že pokud je naším zájmem pořizovat záznam, který budeme moci analyzovat až po měření a to záznam ploch, linií atd., potom nevystačíme s ručním vedením ultrazvukové sondy bez jakýchkoliv pomocných prostředků umožňujících plynulé a nepřetržité vedení sondy. Samozřejmě nemluvíme o záznamu jednotlivých statických obrázků, jak umí většina dnes prodávaných přístrojů.

Avšak kromě výše uvedené metody se mechanizace či automatizace hodí či je vhodná i při měření TOFD nebo dokonce pořizování B-Scanů. Můžeme ale klidně mluvit i o již prezentovaných kontrolách kolejnic, plechů atd.

Další aplikací je měření v nepřístupných místech, myšleno místech, kam je možné se dostat pouze postavením lešení, horolezeckými technikami apod. Jednou z možností, ale velmi nepravděpodobnou je naučit se létat jako kolibřík. Příkladem takovéto aplikace je tedy např. měření ultrazvukem pomocí dálkově ovládaných šplhačů.

Takže, co myslíme malou mechanizací. Mechanizované, poloautomatizované či automatizované zkoušení je samozřejmě používáno, ale většinou se jedná o velké, složité a především nákladné systémy. Většinou jsou to systémy účelové (např. pro kontroly nádob jaderných reaktorů, trubek parogenerátorů, svarových spojů produktovodů atd.) nebo sice částečně univerzální ale víceméně jen pro určitou skupinu úloh (produkty prodávané výrobcí zařízení). V mnoha případech je však potřeba jiné, v podstatě účelové, řešení. Ovšem činnost, která se má provádět, je např. jednorázová, časově omezená, není na ní vyhrazený takový finanční objem, aby bylo pokryto nákladné zařízení atd.

Možností řešení je buď zařízení od některé z renomovaných firem, tzn. zařízení s polohovadly a enkodéry nebo postavení zařízení vlastního, účelového, ale zároveň i efektivního. To má tu výhodu, že takovéto zařízení je šité přímo na míru a většinou tedy splňuje kladené nároky a lze ho přizpůsobovat situaci. Zakoupený účelový manipulátor bude většinou těžké přizpůsobit jiné úloze – je to přeci jen zásah do zařízení, s kterým se nepočítalo při jeho konstrukci, případná úprava původních dílů vede ke ztrátě užité hodnoty.

3. Rychlost nebo smysluplná data při manuálním zkoušení

Rychlost zkoušení a přitom pořizování dat, která jsou použitelná pro další zpracování, jsou dvě na sobě velmi závislé věci – s vyšší rychlostí zkoušení se zvyšují i nároky na vedení sond(y).

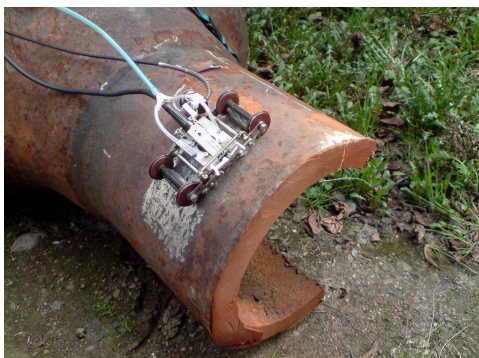
Dva zcela jednoduché příklady z obou konců spektra zkoušení :

- 1) „obyčejné“ měření B-Scanů – zkuste si, jak dlouho a jakou dráhu jste schopni stejnoměrně, rovně táhnout sondu, kterou držíte v prstech, bez toho, aby se vám kývala, aby měla stálou, natož konstantní vazbu, kolikrát za sebou jste to schopni zopakovat, o práci za nižších teplot nemluvě
- 2) sondy Phased Array jsou často velké ve srovnání s obyčejnými sondami pro ultrazvuk, mají mnoho měničů, které všechny potřebují mít vazbu, kabely jsou masivní a relativně tuhé. Delší ruční měření představuje docela pěknou fyzickou zátěž, nemluvě o měření za nižších teplot a ve vynucených polohách. O zajištění kvalitní nepřetržité vazby nemluvě. Pokud chcete navíc využít výhod skládání jednotlivých skenů pomocí softwarové volby a ušetřit čas při zpracování výsledků, 100 % ruční práci je lépe ponechat stranou....

Z výše uvedeného vyplývá, že jestliže není snímání dat jednoduché při malých rozsazích měření, tak jistě nebude jednodušší při velkých rozsazích, větších rychlostech.

4. Základní příklady možného použití

Dále uvedené aplikace ukazují praktické příklady zkoušení. Na následujícím obrázku je ukázáno relativně velmi jednoduché řešení vedení sondy se zajištěním nepřetržité vazby.



Obr. 1 Jednoduchý ruční manipulátorek primárně používaný pro ruční pořizování B a C- skenů

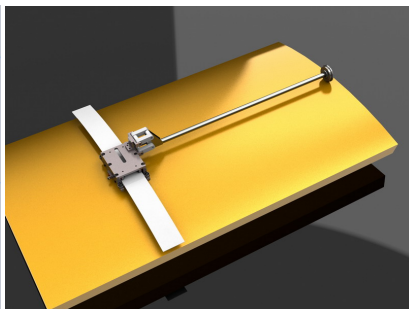
Fig. 1 Simple manual UT manipulator used primary for B and C-Scans

Tento v podstatě primitivní manipulátorek umožňuje použití dvojité sondy, úhlových sond i sond Phased Array, zajišťuje konstantní imerzní vazbu, částečně chrání sondu proti poškození otěrem, udržuje směr a navíc také díky magnetům „drží“ na feromagnetických materiálech.

Pro návrh a tvorbu složitějších zařízení je vhodné používat konstrukční software umožňující 3D modelování. Většina podobného softwaru umožňuje jak zhotovení přesné dokumentace tak i modelování činnosti. Výhodou je velmi rychlá simulace a výrazná redukce způsobu konstrukce metodou „pokus-omyl“. Na následujících obrázcích je ukázka možnosti konstrukce jednoramenného manipulátoru.

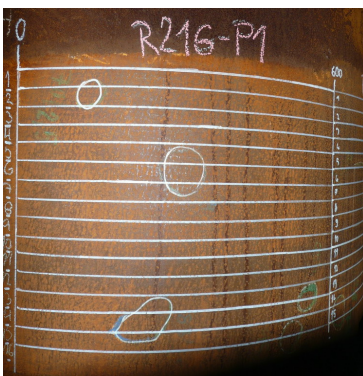


Obr. 2 SW konstrukční model
Fig. 2 SW constructional model



Obr.3 SW prostorový 3D model
Fig.3 SW spatial 3-dimensional model

Pro skenování větších ploch je vhodné používat zařízení umožňující vedení sond(y) ve dvou na sebe kolmých osách. Nemusí to být zrovna přímo dvouosý manipulátor osazený enkodery, lze využít různých rámových konstrukcí apod. Podobně samozřejmě to je i s kontrolou např. sice jen jednoho pruhu zato však ve větší délce.



Obr. 4 Příklad kontrolované plochy rozdělené na jednotlivé skeny
Fig. 4 Example of inspected area divided into individual scans

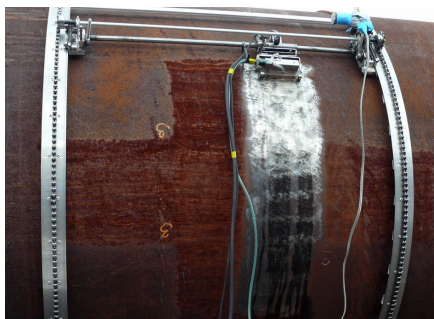
Výše uvedený obrázek byl již použit v článku, který se týkal aplikací Phased Array, je však vysoce názorný, protože ukazuje, kolikrát je nutné opakovat stejným způsobem měření. Měřit ručně podobnou plochu – tady 16 pruhů – a udržovat celou dobu konstantní přítlak, rychlost, směr je velmi obtížné. V případě, že dojde ke ztrátě vazby, nebo se se sondou zajede mimo vyznačenou dráhu či rychlost příliš kolísá, je nutné měření opakovat. Pro takovéto měření také není příliš vhodná vazba natřeným

médiiem, dochází totiž k jeho hnutí sondou, zasychání. Proto je k vytvoření stabilní vazby vhodnější používání obyčejné vody.

Oba dva výše uvedené způsoby řešení skenování v jejich praktické realizaci jsou ukázány na následujících obrázcích. Je nutné poznamenat, že se v žádném případě nejedná o tak jednoduchou záležitost, jak to vypadá. Kontrolovaná zařízení jsou různá, každé má své specifikum a proto je nutné téměř neustále různé komponenty přizpůsobovat, případně vyrábět nové, odpovídající úloze. Zcela univerzální zařízení ve skutečnosti neexistuje. Ani zařízení dodávaná na trhu nejsou ve skutečnosti zcela univerzální. Vždy jsou maximálně pro určitou skupinu úloh a jinak musí být přizpůsobena – tedy dokoupeny další komponenty či vyrobeny na zakázku. Naše skutečnost je taková, že pokud chceme „pokrýt“ zadání, téměř vždy je nutné něco změnit, doplnit, předělat.



Obr. 5 Skenovací rám
Fig. 5 Scanning frame



Obr. 6 Motorizovaný X-Y skener
Fig. 6 Mechanized X-Y scanner

Výše prezentované příklady ukazují zařízení, která zajišťují především následující funkce :

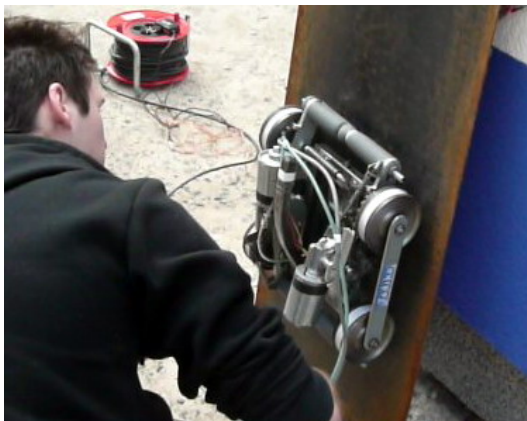
- definují zkoušenou plochu (oblast) a to v jedné či ve dvou osách a pozici sondy či sond
- zajišťují definovaný pohyb měřicí sondy – tzn. většinou přímočarý posuv sondy po dané dráze, případně zvolenou rychlostí
- zajišťují rovnoměrnost pohybu a tedy i rovnoměrné snímání dat
- zajišťují přítlak sondy k povrchu, dodržování konstantní vzdálenosti, zároveň i částečně chrání měřicí sondu před poškozením či přílišným opotřebením
- zajišťují přísun média pro akustickou vazbu

Kromě toho také urychlují samotné provádění práce, podstatně zvyšují reprodukovatelnost (opakovatelnost) měření, snižují vliv obsluhy (např. vliv jednotlivých inspektorů, kteří se při práci střídají, na data pořizovaná při měření tím, jak rychle, pravidelně, stejnoměrně atd. pohybují sondou).

Kromě zatím uváděného je ale ještě další oblast zkoušení, kde použití mechanizace otevírá nové možnosti. Jedná se o kontrolu v místech, kam se není možné jednoduše dostat. Přístup k těmto místům je obtížný z důvodů právě chybějícího přímého přístupu (není u země, chybí lešení, lávky atd.), kvůli riskantnímu prostředí, nebo také kvůli prostorově omezeným možnostem apod.

Zajištění přístupu k těmto místům je většinou nákladná záležitost - je nutné postavit lešení, někdy nebezpečná záležitost – možnost pádu z výšky, prostředí, kde by mohlo dojít k výskytu pro člověka nebezpečných látek. A přesto je nutné takováto místa kontrolovat, provádět diagnostiku a vyjadřovat se k jejich stavu, životnosti atd. Typickým příkladem může být zkoušení potrubí ve výškách, zkoušení nádob, zkoušení nádrží atd. Tedy „remote/vzdálené“ zkoušení.

Na následujícím obrázku je ukázka šplhače/crawleru umožňujícího měření tlouštěk stěn ve výškách větších než 10 m nad zemí.



*Obr. 7 Šplhač „v akci“
Fig. 7 Crawler „in-action“*

Všechny prostředky malé mechanizace mají dvě společné věci – je třeba je udržet na zkoušeném materiálu a je třeba zajistit akustickou vazbu. Způsoby řešení jsou různé. V případě různých rámu je běžné mechanické uchycení (viz obrázky výše), případně použití magnetů. Použití magnetů v různé formě je u pohyblivých částečně autonomních zařízení nutností – samozřejmě ale jen v případě zkoušení magnetických materiálů, u austenitu to například logicky nepůjde. Dopravu vody na místo lze řešit také různým způsobem, je ale nutné mít na paměti, do jaké výšky potřebujeme vodu dostat.

5. Závěr

Tento článek si nekladl za svůj cíl ukázat na nějaké převratné novinky ve zkoušení ultrazvukem. Jeho smyslem bylo ukázat na některé aspekty zkoušení ultrazvukem jiným způsobem než ručně. Každý způsob zkoušení, každá úloha chce „svoje“. Měření, která zde byla ukázána, vyžadují odlišný přístup než ruční zkoušení ultrazvukem. Bez použití této „malé mechanizace“ by zkoušení buď nebylo vůbec možné nebo by nedosahovalo potřebných výsledků. Právě metody Phased Array a TOFD vyžadují více než často tento přístup. Zkušenosti ze zkoušení jsou po překonání počátečních problémů (které jsou ostatně vždy při zahájení jakéhokoliv vývoje) jednoznačně pozitivní. Zkrátil se čas kontroly i hodnocení, zlepšila se kvalita výsledků, snížila namáhavost pro obsluhu a také bylo možné kontrolovat místa, která dříve nebyla jednoduše kontrolovatelná.



EFFECT OF DRILLINGS AS ARTIFICIAL DEFECTS ON DYNAMIC SHEAR MODULUS OF WOOD

Mehran ROOHNIA*, Ajang TAJDINI*, Negin MANOUCHEHRI*

* Islamic Azad University-Karaj Branch-IRAN

Contact e-mail: mehran.roohnia@kiaiu.ac.ir

Abstract

*Dynamic shear moduli in plane with LR and LT surfaces of 22 rectangular clear samples at nominal dimensions of 20*20*360 mm R*T*L of Beech wood (Fagus Orientalis) were evaluated in "free flexural vibration of a free-free bar" method with and without presence of drilled holes on tangential surface. The drilling was induced exactly at the middle of the bar, on the node of the 2nd mode of vibration. Stepwise hole enlarging from zero to three, five, eight and ten millimeters, visible on two opposite tangential surfaces were used. After measuring the dimensions and calculating the density (ρ) of the specimens, for both radial and tangential impacts of hammer in which the beam was vibrated in LT and LR plane, respectively, two shear moduli (G_{LR} and G_{LT}) were evaluated according to Timoshenko beam theory, considering the three initial modes of vibration. When the bar was excited from its tangential surface by a percussion (vibrated in LR plane), stepwise drilling, raised the estimated value for shear modulus in LR plane (G_{LR}). However in LT vibrations the G_{LT} remained statistically constant. It is clear that the shear moduli as material property are not affected by artificial manipulation but the responses of the bars would be affected. The results have been discussed due to neutral axis related to the hole localization. This finding suggest that in future approaches, the vibration in LR plane, considering the shear moduli changes, maybe used as indicator for recognition of a hidden hole, perpendicular to the growth rings.*

Key words: Beech; Dynamic; Shear; Timoshenko; Vibration

1. Introduction

The most important mechanical parameters of any materials are the modulus of elasticity and the shear modulus. In an orthotropic material, different values of shear modulus depending on the plane of surface exist. E.g. the case of wood, this parameter varies in each orthotropic plane of LT, LR and RT corresponding to radial, tangential and cross section, respectively. Several hypotheses related to the elastic symmetry of wood were developed (Bucur 2003). It is noted that triclinic symmetry is the most complex which allows the determination of 21 constants (Bucur 2003).

Vibration techniques have been applied in some non-destructive evaluation applications to determine the shear modulus (Bodig 1982, Brancheriau 2002, Cho 2007 and Divos 2005). There are certain advantages of using the vibration approach

to determine modulus over the static methods. The time for a vibration test is shorter than that of alternative static test (Chui 1989). Flexural free-free beam vibration technique has been widely used for estimating shear modulus of wood and modern instrumentation enables this method to be applied easily (Cho 2007).

Static and dynamic shear modulus determinations are compared by several investigators (Perstorper 1994; Divos 2005; Liang 2007; Nzokou et al. 2006; Cho 2007; Yang et al. 2002) who found good correlations between them.

A beam may be vibrated parallel to LR and LT planes resembling the flexural, transverse vibration and using related theories, both longitudinal modulus and the shear modulus can be reached from modal frequencies, both, almost equal to each other (Roohnia 2010). In flexural vibration test, equations of modulus of elasticity evaluation are applied to clear sound woods. However, when a defect reduces the homogeneity, this equality may be diminished.

The impact of defects in wood was frequently investigated in recent years. Caddemi (2006) detected the cracks in elastic beams by static measurements. Beal (2000) tried the subsurface sensing of wood and wood-based materials. This method has been defined as a technique to acquire properties of the materials in a non-invasive manner and therefore will be considered similar to nondestructive evaluations. Brancheriau (2002) in a theoretical review examined the natural vibration analysis of clear wooden beams. In another research, Brancheriau (2003) highlighted the possibility of developing a high performance grading process based on the analysis of acoustic vibrations in the frequency domain. The uniqueness of the introduced method was the direct use of the spectrum as predictive variables to estimate modulus of elasticity and modulus of rupture. Divos (2001) presented an investigation concerning the suitability of a special amplitude-technique for wood. The study include the examination of the acoustic coupling between the wood and the signal generator, the damping of the signal in wood, the effect of sloping grain and the equipment's capacity in detecting artificial defects (sawn notches). The results revealed that a uniform wave-front develops at a distance of 60 cm from the signal source and its amplitude decays exponentially with distance. The amplitude is a considerably more sensitive defect indicator, than propagation velocity. Meinlschmidt (2005) used a thermo-graphic camera in detection of defects in wood and wood-based materials. Vatul'yan (2004) described a method for determining the type and size of a defect at the boundary of two elastic bodies. The proposed method was based on the difference in the character of the stressed deformed state inside a body in the near vicinity of a defect depending on the type of the defect and its presence. The method relied on the solution of a number of direct boundary-value problems (by the method of finite elements) and inverse problems (by the method of boundary integral equations). Roohnia et al. (2010) studied the effects of end longitudinal cracks on elastic parameters of poplar wooden rectangular bars. Their case study revealed that if longitudinal specific modulus of elasticity evaluated from both LR and LT flexural vibrations were almost equal and G_{LR} was slightly larger than G_{LT} , the user could be confident enough to consider the specimen without any severe longitudinal cracks. Continuing the above mentioned researches, carried out on wood defects recognition using nondestructive tests, the effect of the drilled hole as the artificial defect on the longitudinal modulus of elasticity evaluations, accessible from two flexural vibrations in plane with LR and LT surfaces has been subjected in this approach.

2. Materials and Methods

Fagus Orientalis timbers used in this research were selected from two commercial logs. Following ISO 3129 international standard (1975), 30 rectangular and visually clear bars were obtained. The specimens were cut to their final nominal dimensions of 20*20*360 mm, R*T*L, and kept in a conditioning chamber at 21°C and 65 percents relative humidity for two weeks until their moisture content was stabilized. At the center point of the length, a hole with a diameter of three millimeters was drilled on the tangential surface in radial direction and its diameter was enlarged step by step to 5, 8 and 10 millimeters. All applied artificial drilled holes were visible with a similar appearance on opposite tangential surfaces (Fig. 1).



Fig.1 Drilling a hole on the tangential surface in radial direction (dimensions are exaggerated)

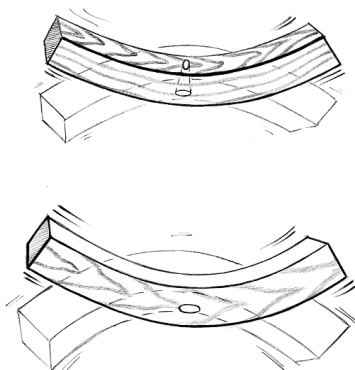


Fig.2 Hole and its dynamic behavior during LR (above) and LT (below) Vibrations

Free flexural vibration on free-free bars, rested on soft thin elastic rubber, was generated for all specimens before and after presence of artificial holes, taking into account the mass reduction of the bars due to the drill dust. Individual impacts either on radial or tangential surface excited the bar to vibrate in LT and LR planes, respectively (Fig. 2). The impacts and the recording microphone device were located over the two opposite free ends. Vibrations were recorded as audio files at project rate of 44100 Hz. Every selected and saved acquisition sound file contained 14000 to 18000 points depending on the attenuation through the time that was less than

a second. After reading the audio files at the same project rates, the three initial modes of vibration were obtained from magnitude of Fourier Transform spectrum in MATLAB v.7.1 (Fig. 3). Two shear moduli, G_{LT} and G_{LR} , values were evaluated through Timoshenko beam theory (Bordonne 1989, Brancheriau 2003 and Roohnia 2010) and ensuring the specimen clarity, trends of Timoshenko beam theory with the highest correlation coefficients were accepted and selected before presence of drilled holes.

The scatter plots of shear modulus values out of LR and LT flexural vibrations were developed and the correlation coefficients of their proper trend line were calculated. Then the observed correlations were certified through statistical methods of Pearson bivariate correlation test for the significance of correlation, analysis of variances test for the effect of stepwise drilling and widening a hole on the obtained shear modulus values followed by Duncan test for categorizing the values to the homogeneous subsets.

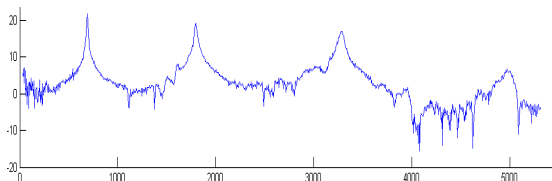


Fig. 3 Three initial modes of vibration shown in magnitude of a Fourier Transform. Y axis corresponding to amplitude in dB and X axis the frequency in Hz

3. Results and analyses

Free flexural vibration on a free-free bar was performed to evaluate the shear modulus values in 30 clear sound samples. Based on Timoshenko theory, considering the most efficient evaluations using three initial modal frequencies, 22 samples out of 30 were accepted as the clearest and the most homogeneous ones and taken into the account for drilling artificial holes and further experiments.

Stepwise drilling didn't present any significant effect on the efficiency of the applications of Timoshenko beam theory until the end of the third step of enlarging the holes (5 mm). After the fourth (8 mm) and the fifth step (10 mm) the related correlation coefficients both in LR and LT vibrations reduced significantly but similar manner. Though, these evaluations in defected beams were not as strong as that of clear specimens, nevertheless, the comparison between results of LR and LT vibrations, even after the fourth step, was admitted to remain valid.

Table 1. ANOVA for effect of hole enlarging on the radial and tangential shear moduli

		df	F	Sig.
GLT (Pa)	Between Groups	4	0.844	0.500
	Within Groups	105		
	Total	109		
GLR (Pa)	Between Groups	4	5.054	0.001
	Within Groups	105		
	Total	109		

Table 2. Duncan GLR (Pa)

Drilling step	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1	22	890448977	
2	22	903260966	
3	22	977135753	
4	22	1138341545	1138341545
5	22		1381173859

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
 a Uses Harmonic Mean Sample Size = 22.000.

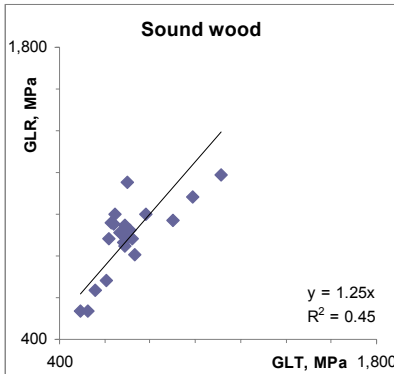


Fig. 5 Shear moduli values of clear sound specimens

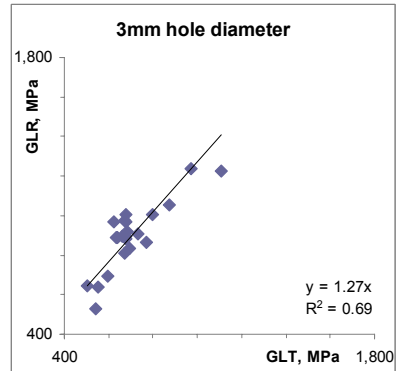


Fig. 6 Shear moduli of specimens containing a 3mm wide drilled hole on their tangential surface

Figure 5 shows the correlation of the shear moduli values obtained in LR and LT vibration tests. At larger holes, the shear moduli values out of LR vibration raised step by step while that of LT vibration test remained almost constant (figures 6 to 9). The observed effect of stepwise widening of drilled holes on LR vibration to evaluate the shear modulus was certified in analyses of variances followed by Duncan multiple comparison statistical tests. There was no clear and significant effect on obtained results of LT vibration (tables 1 and 2).

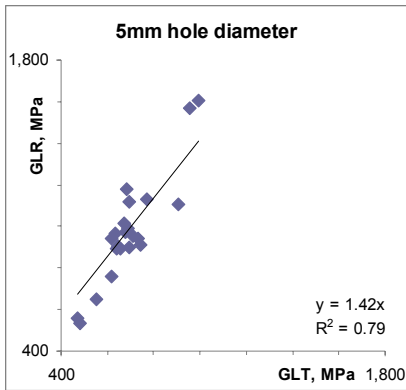


Fig. 7 Shear moduli values of specimens containing a 5mm wide drilled hole on their tangential surface

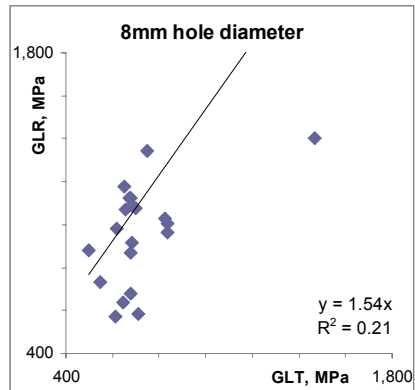


Fig. 8 Shear moduli values of specimens containing a 8mm wide drilled hole on their tangential surface

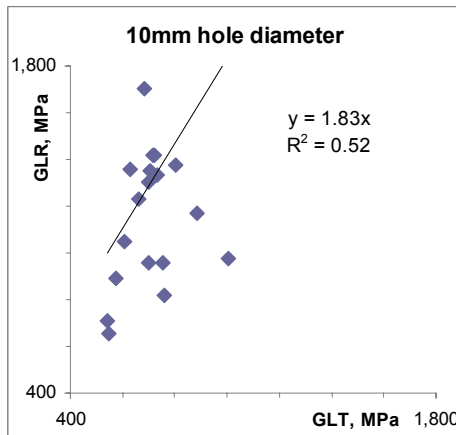


Fig. 9 Shear moduli values of specimens containing a 10mm wide drilled hole on their tangential surface

4. Conclusion and discussion

The current approach was followed to find out the effect of drilling on evaluation of shear modulus. Shear modulus is a material property that the property itself does not change after artificial manipulations of the bar but in this study this property has been specifically defined as the response of a bar, although the response of the bar would be affected. At the first look it seems that the mass loss in the drilled beams must affect the calculations not the response of the bar, but this assumption is rejected. The mass reduction must affect both the LR and LT vibrations, whereas only the LR vibration was changed. Meanwhile the mass reduction was not

statistically significant. So the main effect would be definitely brought from the artificial holes.

Stepwise hole enlarging affects the LR vibration in evaluation of the shear modulus, while that of LT vibration remains constant. It is clear and simply justifiable. The reason is found in the concept of neutral axis of bending. When the beam vibrates transversely, temporarily the bending occurs. There is no bending stress on the neutral axis so there would not be any important effect from this axis to the flexural vibration properties. As the bar is vibrated in LT plane, the artificial drilled hole mostly lies on the neutral axis. However it is predicted that in greater diameters of holes, even the LT vibration may be affected. Overhand, in LR vibration the drilled hole elongated across the height of the bended bar. It means that some parts of the defined artificial defect are located in some distances from the neutral axis that can influence the bending stress and flexural vibration properties.

It was verified that there is a difference between two series of evaluations of shear modulus through LT and LR vibrations in clear beams. So the introduced differences might be an indicator of defect. The greater differences between shear modulus evaluations of a proper bar may indicate the greater defect, i.e. hole.

5. Acknowledgements

We thank Islamic Azad University, Karaj Branch-Iran for supporting this study.

References:

- Beall F** (2000) Subsurface Sensing of Properties and Defects in Wood and Wood Products, Subsurface Sensing Technologies and Applications Vol. 1, No. 2, pp. 181-204
- Bodig J Jayne BA** (1982) Mechanics of wood and wood composite. New York: Van Nostrand Reihold.
- Bordonné PA** (1989) Module dynamique et frottement intérieur dans le bois: Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles Thèse de doctorat de l'INP de Lorraine soutenue à Nancy. 154 p.
- Brancheriau L, Bailleres H** (2002) Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review, Wood Science and Technology, 36 pp. 347-365
- Brancheriau L, Bailleres H** (2003) Use of the Partial Least Squares Method with Acoustic Vibration Spectra as a New Grading Technique for Structural Timber, Holzforchung 57 pp. 644-652
- Bucur V** (2003) Elastic symmetry for wood mechanical characterization, Proceeding of the WCU2003 september 7-10, Prais, France pp. 1011-1014
- Caddemi S, Morassi A** (2006) Crack detection in elastic beams by static measurements, International Journal of Solids and Structures, 44 - pp. 5301-5315
- Cho C** (2007) Comparison of Three Methods for Determining Young's Modulus of Wood, Taiwan journal of forest science, 22(3): pp. 297-306
- Chui YH** (1989) Vibration testing of wood and wooden structures-practical difficulties and possible sources of error. In: Pellerin RF, McDonald KA, editors. Seventh international symposium on nondestructive testing of wood. 27~29 September 1989; Washington State University, Pullman, WA. Forest Product Soc. pp 173-88.
- Divos F, Daniel I and Bejo L** (2001) Defect Detection in Timber by Stress Wave Time and Amplitude, NDT.net, Vol. 6 No. 03
- Divos F, Tanaka T** (2005) Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood, Acta Silv. Lign. Hung., Vol. 1 pp. 105-110

- Liang S, Fu F** (2007) Comparative study on three dynamic modulus of elasticity and static modulus of elasticity for Lodgepole pine lumber, *Journal of Forestry Research*, 18(4): pp. 309-312
- Meinlschmidt P** (2005) Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials, 14th International Symposium of Nondestructive testing of Wood, Honnover, Germany (May 2nd - 4th 2005)
- Nzokou P, Freed J, Kamdem DP** (2006) Relationship between non destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64: pp. 90-93
- Perstorper M** (1994) Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories. In: Pellerin RF, McDonald KA, editors. 9th international symposium on nondestructive testing of wood. 22~24 September 1993; Washington State University, Pullman, WA. *Forest Product Soc* pp. 45-54.
- Roohnia M, Yavari A, Tajdini A** (2010) Elastic Parameters of Poplar Wood with End-Cracks, *Annals of Forest Science*, 67:409p1-409p6
- Vatul'yan AO, Solov'ey AN** (2004) Determination of the Size of a Defect in a Compound Elastic Body, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 40, No. 5 pp. 298-304
- Wood** - Sampling Methods and General Requirements for Physical and Mechanical Tests – 1975 – 11 – 01 - International Standard ISO 3129
- Yang J, Ilic J, Wardlaw T** (2002) Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood, *Australian Forestry*, Vol. 66, No. 3 pp. 193-196



METAL MAGNETIC MEMORY TESTING OF WELDED JOINTS OF FERRITIC AND AUSTENITIC STEELS

Maciej ROSKOSZ

The Silesian University of Technology, 44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18, Poland
maciej.roskosz@polsl.pl

Abstract

The method of the metal magnetic memory testing is a passive method of non-destructive testing based on the residual magnetic field (RMF) of a component. It allows the localization of stress concentration zones in the objects under examination. The defects in welded joints are places of stress concentration. Also, due to the geometric notch effect and thermal deformations after welding, the welded joint is a stress concentrator. Therefore, not all indications obtained in the method of the MMM testing are defects in the common, standard meaning. Additionally, in the weld seams of austenitic steels, the non-uniformity of delta ferrite in the joint results in changes in the RMF distribution and gives rise to indications. The paper presents the ways of examination and assessment of welded joints by means of the method of the MMM testing. The presented research methodology is the outcome of a synthesis of own experience and the provisions of standards ISO 24497-1, 2, 3: 2007. The results obtained in the MMM testing were compared to the results of the radiographic testing (RT). It was found that the MMM testing allowed the detection of imperfections, including defects, in welded joints at the production stage. Knowing the potential of the method of the MMM testing it seems well justified that it should be used in the examination of welded joints at the operation stage. These joints, after non-destructive testing at the production stage, are not free from defects. The defects, together with imperfections at the micro-level, concentrate stresses from working loads. Wear processes and the development of micro- and macro-cracks proceed in them the fastest. By finding the stress concentration zones, the areas of potential cracks can be found. The development of reliable procedures of examination and assessment of welded joints with the use of the method of the metal magnetic memory testing still needs a lot of research.

Key words: metal magnetic memory; welded joints

1. Introduction

The method of metal magnetic memory testing is a passive magnetic method of non-destructive testing which makes use of the strength of the residual magnetic field (RMF) of the component as a diagnostic signal [1, 2]. The physical basis of the method consists in: the magnetomechanical effect [3, 4, 5], the effect of the leakage of external magnetic fields caused by discontinuity or structural non-uniformity of the material, and the processes of mutual interaction of magnetic fields with dislocations and their accumulation. The method allows the localization of stress concentration zones in the component [1, 2]. The introduction of standards ISO 24497-1, 2, 3: 2007 [6] concerning the method of the MMM testing became a great stimulus for its development and promotion. It confirmed and strengthened its presence in the field of the methods of non-destructive testing by propagating the basic notions used in it and by describing its potential and limitations.

The presented methodology for testing welded joints is the outcome of a synthesis of own experience and the provisions of these standards.

The defects in welded joints are potential stress concentrators. But stress concentration in a welded joint does not have to be the result of only the occurrence of defects. Looking more broadly at the problem of stress concentration, the welded joint, due to the notch effect and thermal deformations after welding, is a stress concentrator itself. Therefore, not all indications obtained in the MMM testing are defects in the common, standard meaning. Some of the indications of the method of the MMM testing of welded joints can result from the occurrence of a non-uniform distribution of stress after welding [7].

On the other hand, a question arises whether all defects of welded joints which can be detected by means of standard methods of non-destructive testing yield indications in the MMM testing. To answer this question, research based on the comparison of the results of the RT method to those obtained in the method of the MMM testing was undertaken. The study was conducted on weld seams of both ferritic and austenitic steels. The programme of the MMM testing comprised the testing of weld seams from the side of the face and back of the weld at the production stage and after static loads applied to selected joints.

2. Methodology of MMM testing of welded joints

2.1. Testing conditions

Welded joints do not require, compared to other methods of non-destructive testing, any preparation of the surface to be examined. At the production stage, it is required that the surface should be cleaned after welding. At the operation stage, the removal of loose deposits from the surface of the joint is required. The impact of the thickness of the corroded layer or other coatings of the joint on the examination results should be taken into consideration, and sensitivity tests of the detection of indications should be conducted. A substantial limitation on the application and reliability of the indications of the method are the sources of external magnetic fields such as magnetization during magneto-powder testing, or the passage of current in the vicinity of the examined component during welding.

2.2. Testing procedure

The testing is conducted through scanning the surface of the welded joint both along and perpendicularly to the axis of the weld seam so as to embrace both the weld seam and the heat effect zone.

2.3. Assessment of indications

As an immediate result of the testing, the values of the RMF components measured on the surface of the welded joint are obtained. In order to quantify the level of concentration of residual stress, the gradient of the RMF components, referred to as K_{in} , is determined. The area of maximum concentration of stress corresponds to the maximum value of the gradient of the RMF components – the maximum value of coefficient $K_{max,in}$. Additionally, the average values of the RMF components – $K_{med\ in}$ – are determined. The ratio of the maximum value of the gradient to its average value is determined by what is, according to standard PN-ISO 24497-1, referred to as magnetic index m . According to standard ISO 24497-3, it is assumed that m_{lim} is contained within the range from 1.05 to 3 and more, depending on the quality of the welded joint. If coefficient m exceeds the boundary value m_{lim} , what we have to do with is the stress concentration zone. The determined stress concentration zones have to be put to standard non-destructive and/or metallographic testing.

3. Testing results

The presented testing results are representative of the whole research that was conducted. Radiographic testing of welded joints was made according to standard EN 1435. The assessment was carried out according to the provisions of standard EN ISO 5817. The measurements of the RMF were made with a scanning increment of 1mm along lines parallel to the axis of the weld seam and separated from each other by a constant value (for individual joints). The area under examination included both the weld seam and the heat effect zone.

The magnetometer TSC-1M-4 with the measuring sensor TSC-2M supplied by Energodiagnostika Co. Ltd. Moscow was used for the measurements. The instrument was calibrated in the magnetic field of the Earth, whose value was assumed as 40A/m. The measurements gave the values of three RMF components:

- $H_{t,x}$ – tangential component measured in the direction perpendicular to the axis of the weld seam,
- $H_{t,y}$ – tangential component measured in the direction parallel to the axis of the weld seam,
- H_n – normal component.

For the purposes related to the assessment of the joint, they were used to determine the values of the gradients of the RMF components. Dividing the local values of gradients by the average value for a joint, the values of what is referred to as magnetic index – m for each point were obtained. The areas of the largest values of the index are stress concentration zones (SCZ's), i.e. the indications of the testing method. For editorial reasons, the paper presents only selected magnetograms (distributions of magnetic index m for individual RMF components) which allow a justification of the drawn conclusions.

3.1. Welded joint A [8]

Ferritic steel S235JR, one-sided MIG welding, testing at the production stage.

The indications of the method of the MMM testing occur in the vicinity of defects, but the largest values of the relative derivative m were obtained in defect-free areas according to the RT method.

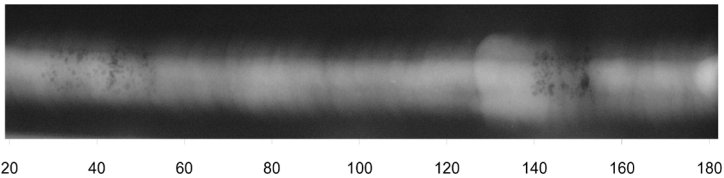


Fig. 1. Radiogram of joint A, welding incompatibility $30 \div 60$ mm – bubble cluster (2013); $140 \div 160$ mm – bubble cluster (2013).

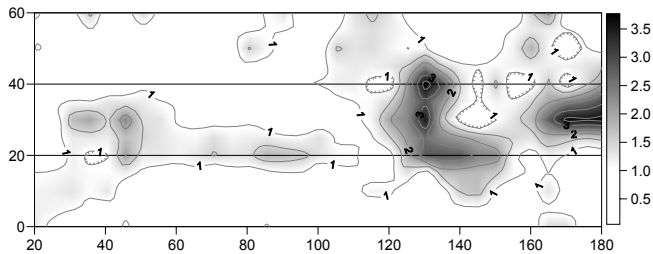


Fig. 2. Magnetogram $m - H_{t,y}$ of joint A, indications: 30 ÷ 50 mm – SCZ coincides with the location of the occurrence of the defects of the weld seam; 120 ÷ 150 mm – SCZ partly coincides with the location of the occurrence of the defects of the weld seam, the area of the largest values of m are probably the place of arc reignition, which may also suggest the occurrence of imperfections 517 or 601 according to standard EN ISO 5817; 160 ÷ 180 mm – SCZ.

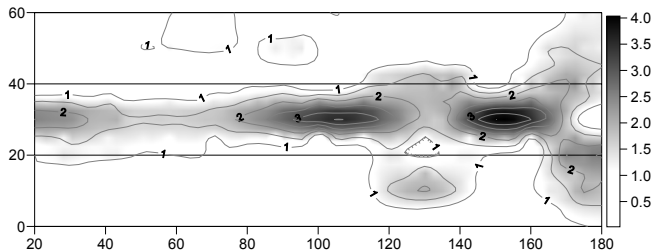


Fig. 3. Magnetogram $m - H_{n,z}$ of joint A, indications: 90 ÷ 120 mm – SCZ, 140 ÷ 170 mm – SCZ coincides with the location of the occurrence of the defects of the weld seam.

3.2. Welded joint B

Ferritic steel S235JR, one-sided MIG welding, testing at the production stage and after static load. Despite the defect found by means of the RT method (Fig. 4) no indications were obtained in the MMM testing at the stage of production (Fig. 5). After static load was applied to the joint, which induced stresses of 100 MPa, indications occurred – Fig. 6.

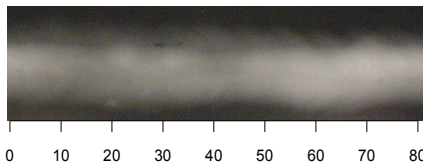


Fig. 4. Radiogram of joint B, welding incompatibility 35 ÷ 35 mm – lack of side fusion (4011).

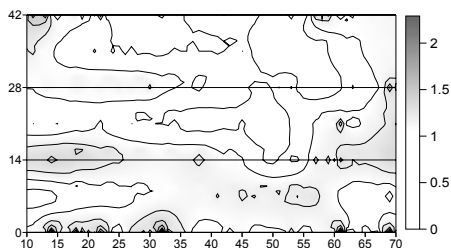


Fig. 5. Magnetogram $m - H_{n,z}$ of joint B at the production stage, no indications.

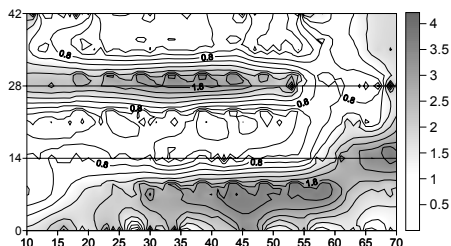


Fig. 6. Magnetogram $m - H_{n,z}$ of joint B after the load of 50 MPa, indications: 20 ÷ 50 mm – upper part of the radiogram – SCZ, which coincides with the location of the occurrence of the defects of the weld seam; 30 ÷ 70 mm – SCZ.

3.3. Welded joint P8

Austenitic steel X15CrNiSi20-12 with a thickness of 6 mm, two-sided TIG welding, testing at the production stage.

The analysis of the Schaeffler and Delong diagrams shows that the weld seam in steel X15CrNiSi20-12 welded with Thermanit C Si (W 25 20 Mn) should not contain delta ferrite. However, in real conditions of weld solidification, because of fast heat dissipation and related to it fast cooling of melted metal and limited diffusion conditions, a tiny amount of ferrite can be present in the structure [9]. In the test samples both in the parent material and in the weld seam, as well as in the heat effect zone, a distinct presence of delta ferrite was found. The structure of the parent material contains austenite grains elongated in the direction of plastic working with narrow strips of delta ferrite distributed mainly in the form of a grid on the boundaries of austenite grains. The tested weld seams have an austenitic structure with the presence of a varied amount of delta ferrite which occurs mainly as interdendritic areas. The heat effect zone (HEZ) is characterized by transitory structures in which delta ferrite also appears locally in a lamellar configuration (Fig.2) [9].

Magnetogram $m - H_{l,x}$ (Fig. 9) gives a clear indication (SCZ) in the place of the defect occurrence. In the magnetograms of the other components the defect gave no indications. There are indications in them, with values even higher than in magnetogram $m - H_{l,x}$, which do not coincide with the location of the defect.



Fig. 7. Structure of the cross section of the joint with visible HEZ. The austenitic structure of the parent material with areas of ferrite elongated in the direction of plastic working which passes into the HEZ and a weld seam with areas of interdendritic and partially lamellar ferrite, etched with ferric chloride, magnification: 200x

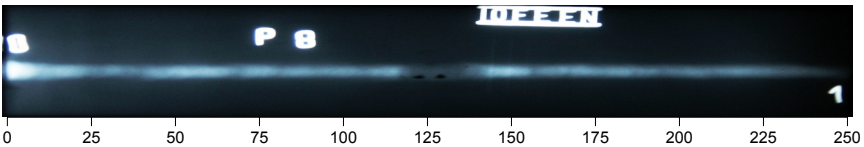


Fig. 8. Radiogram of sample P8, welding incompatibility: 115 ÷ 135, single bubbles (2011) and a root concavity (515).

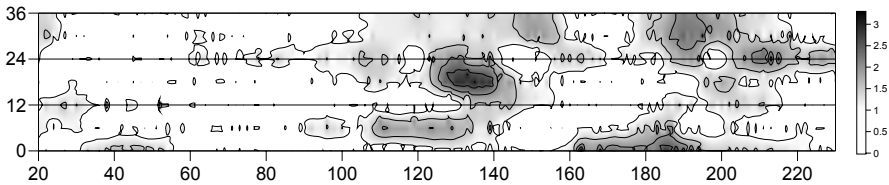


Fig. 9. Magnetogram $m - H_{tx}$ of joint P8, indications: 1250 ÷ 145 mm – SCZ coincides with the location of the occurrence of the defects of the weld seam.

3.4. Welded joint P12

Austenitic steel X15CrNiSi20-12 with a thickness of 6 mm, two-sided TIG welding, testing at the production stage.

An indication in the defect area occurs in magnetogram $m - H_{ty}$ (Fig. 12). In magnetogram $m - H_{tx}$ one half of the length of the joint is characterized by large values of the magnetic index while in the other half the values are distinctly smaller. Metallographic testing of the structure was conducted in two sections of this joint. In the 50 mm section a significant amount of largely elongated delta ferrite was found in an interdendritic configuration (Fig 13.). This indicates a considerable overheating of the weld metal during welding and a relatively high cooling rate of the material after welding. The area of the weld seam of the 150 mm section (Fig. 14) shows an austenitic structure with narrow areas of interdendritic ferrite characterized by smaller elongation than for the 50 mm section, and the share of ferrite in the weld seam is smaller, too [9].

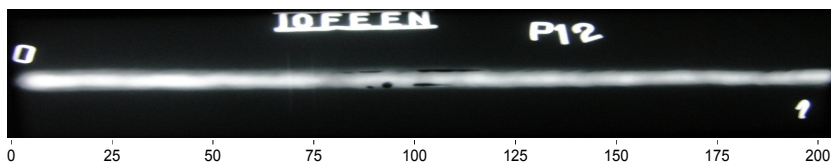


Fig. 10. Radiogram of sample P12, welding incompatibility: 80 ÷ 90 mm – single bubble (2011), 80 ÷ 115 mm – lack of side fusion (4011).

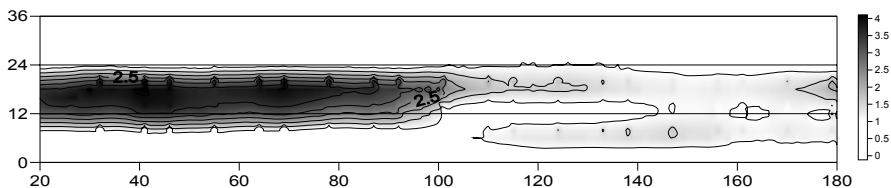


Fig. 11. Magnetogram $m - H_{Lx}$ of joint P12, indications: 20 ÷ 110 mm – SCZ in the area of the weld seam coincides partly with the location of the occurrence of defects

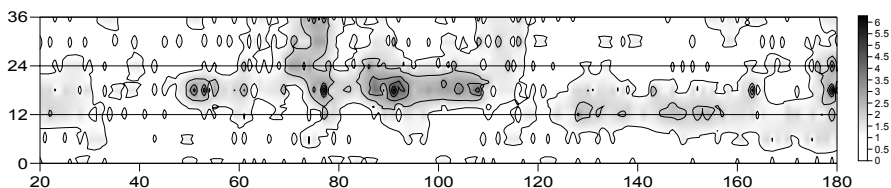


Fig. 12. Magnetogram $m - H_{Ly}$ of joint P12, indications: 50 ÷ 120 mm – indication in the area of the weld seam coincides with the location of the occurrence of defects



Fig. 13. Joint P12 – 50 mm section – structure of the weld seam.

Austenitic structure with a significant amount of interdendritic ferrite, etched with ferric chloride, magnification: 200x



Fig. 14. Joint P12 – 150 mm section – structure of the weld seam.

Austenitic structure with narrow areas of interdendritic ferrite, etched with ferric chloride, magnification: 200x

4. Discussion

4.1. Ambiguity and lack of indications of existing defects of the weld seam in the method of the MMM testing.

The imperfections of the weld seams visible in the radiograms did not always give unequivocal and clear indications in the method of the MMM testing. It was not established which of the RMF components was best suited as a diagnostic signal. For the welded joints under examination, a clear indication of a defect, if there was any, usually occurred in the image of only one component; for other components the indications were none or barely visible. The problem is additionally complicated by the fact that, for different joints, they were different components. It is also difficult to define the values of magnetic index m_{lim} for individual RMF components. It is puzzling that the same defects, located at the same depth in the joint, in some cases give indications (both when measured from the face and back of the weld) while in others they do not, cf. joint A. It is probably decided by the level of postweld stresses at the location of defect occurrence. The test was made on fragments of steel plates which could deform freely after welding. For this reason postweld stresses occurring in them were smaller than those in rigidly fixed joints of welded structures. This may be the reason for the ambiguity and lack of indications.

4.2. Indications of the method of the MMM testing in places where defects were not found by means of the RT method

Many indications were obtained in places where defects were not found by means of the RT method. The reasons for this were partly explained in the introduction to this paper. The indication in the method of the MMM testing, i.e. the stress concentration zone, can be a result of a non-uniform distribution of stresses due to postweld thermal deformations [7, 10]. In the search for volumetric geometrical defects of the weld seam such indications are erroneous. But the information is very valuable if an assessment of the quality of postweld thermal treatment of the weld seam was to be made. A comparison of the magnetic images of the weld seam before and after thermal treatment can be the basis for the assessment of its efficiency. Another reason for obtaining phantom indications is the fact that neither the face nor the back of the weld seam forms a uniform smooth surface. The irregularities occurring in them, and affecting the sensor lift-off, cause further disturbances in the diagnostic signal of the method [11]. This results in rapid local changes in the measured values of the RMF components, and – consequently – in the formation of areas with a large RMF gradient in the obtained image of magnetization. The reasons for the appearance of additional indications which are not defect-related, for weld seams of austenitic steels, were discussed in Point 4.4.

4.3. Due to working load the probability of defect detection in weld seams by means of the method of the MMM testing is higher.

Welded joints, after non-destructive testing at the production stage, are not free from imperfections. They can have acceptable defects and those which were not detected. These defects, together with imperfections at the micro-level, concentrate stresses from working loads [1, 2]. In stress concentration zones, wear processes and the development of micro- and macro-cracks, proceed the fastest. By finding stress concentration zones, the areas of potential or existing cracks can be found. An example of stress concentration in the defect area are the results obtained for joint B – Point 3.2. At the production stage, no indications of lack of fusion were found by means of the method of the MMM testing. After static load was applied to the joint, an indication was obtained in the place of the defect occurrence.

4.4. Weld seams of austenitic steels – more problems but also more potential for the application of the method of the MMM testing

Austenitic weldable steels are often materials which ensure a formation of a certain amount of delta ferrite in the weld seam – usually 5-10% – which prevents cracks and improves the mechanical properties of the material. On the other hand, the presence of delta ferrite adversely affects creep strength. Delta ferrite is formed as single areas on the grain boundaries, but when heating exceeds 1340°C, a certain amount of it also occurs inside austenite grains. With a very fast solidification of the weld seam, ferrite can also occur in the form of a grid blocked in interdendritic areas. The amount of delta ferrite in the weld seam depends also on the phenomenon of the liquid material of the weld metal mixing with the liquid metal of the components being welded. With higher contents of ferrite above 4%, it usually takes the shape of a continuous grid on the boundaries of austenite grains. Weld seams working at temperatures of 600 – 850°C cannot contain a higher content of delta ferrite because in these conditions a formation of a very brittle sigma phase occurs in it together with formations of carbides and austenite. This kind of phase can also appear as a result of the stress-relieving thermal treatment, and even as a consequence of the heat effect in multilayer welding [7].

The presence of delta ferrite in a weld seam of the austenitic steel allows the application of the method of the MMM testing. The values of the strength of the RMF for austenitic steel weld seams are much lower than those for weld seams of ferritic steels. Therefore external disturbances (sources of the magnetic field, closely located ferromagnetic objects) can easily and substantially distort the measurement results. The magnetic image of the joint is decided by the amount and distribution of delta ferrite. The higher the amount of it, and the more uniform its distribution in the weld seam, the higher the probability that disturbances caused by the occurrence of defects will be seen in the image of the RMF. If the distribution of delta ferrite happens to be non-uniform, the distribution of the RMF is more often an image of this non-uniformity rather than the result of the occurrence of defects. This is clearly visible in the presented P12 joint – Point 3.4.

5. Conclusion

The paper presents selected results of the MMM testing of weld seams which were compared to the results obtained by means of the RT method. Welded joints in austenitic and ferritic steels were examined. The main aim of the research was to define the effectiveness of the application of the method of the MMM testing as a defect detection method. The obtained results show that at the present stage of development the method of the MMM testing does not guarantee the same effectiveness of defect detection as the RT method used as the reference method. This applies particularly to the testing of weld seams at the production stage. In the detection of defects of weld seams already in service, the method of the MMM testing works much better. The imperfections which occur in weld seams, by concentrating stresses from working loads, create favourable conditions for the development of cracks. At the same time, due to the magnetomechanical effect [3, 4, 5] they result in indications of the method of the MMM testing. By finding stress concentration zones, the areas of potential or existing cracks can be found. It was found that the method of the MMM testing, apart from being applied to defect detection in weld seams, could be used to assess the level of residual stress, the quality of the thermal treatment after welding and to define the amount of delta ferrite in weld seams of austenitic steel. The analysis of the changes in the RMF can also be used to assess the residual lifetime of weld seams [12, 13, 14]. Each of these applications requires an analysis of signals (the RMF components) with a view to developing criteria. The best way to develop such criteria is a combination of the

results of experimental research and the results of the modelling of the RMF distributions [7, 15].

Acknowledgements

The results presented in this paper were obtained from research work co-financed by the Polish National Centre of Research and Development in 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 CO₂ capture.

References

- [1] Dubow A.A.: Principal Features of Metal Magnetic Memory Method and Inspection Tools as Compared to Known Magnetic NDT Methods. WCNDT 2004, Montreal Canada, <http://www.ndt.net/article/wcndt2004/papers/359.ntm>
- [2] Deputat J.: Basics of the Metal Magnetic Memory Method [in Polish] *Dozór Techniczny* 5/2002 pp. 97-105.
- [3] Jiles D. C., Theory of the Magnetomechanical Effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28 (1995) 1537-1546.
- [4] Lu Li, David C. Jiles: Modified Law of Approach for the Magnetomechanical Model: Application of the Rayleigh Law to Stress, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, September 2003
- [5] H. Hauser, Y. Melikhov, and D. C. Jiles: Examination of the Equivalence of Ferromagnetic Hysteresis Models Describing the Dependence of Magnetization on Magnetic Field and Stress, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 4, April 2009
- [6] ISO 24497-1, 2, 3 Non-destructive testing -- Metal magnetic memory -- Part 1: Vocabulary, Part 2: General requirements, Part 3: Inspection of welded joints
- [7] Li Luming, Huang Songling, Wang Xiaofeng, Shi Keren, Wu Su Magnetic Field Abnormality Caused by Welding Residual Stress, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 261 (2003) 385–391
- [8] Roskosz M., Bonik A.: Metal Magnetic Memory Testing of Welded Joints [in Polish], *Materials of the 38th National Conference on Non-destructive Testing*, Poznań – Licheń 2009
- [9] M. Roskosz, S. Griner, D. Staniek, A. Bonik: Metal Magnetic Memory Testing of Welded Joints of Austenitic Steels [in Polish], *Materials of the 39th National Conference on Non-destructive Testing*, Szczyrk 2010
- [10] R.H. Leggatt, Residual Stresses in Welded Structures, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85 (2008) 144–151
- [11] Z.D. Wang, K.Yao, B.Deng, K.Q.Ding: Theoretical Studies of Metal Magnetic Memory Technique on Magnetic Flux Leakage Signals, *NDT&E International* 43 (2010) 354–359
- [12] R. Nagendran, M.P. Janawadkar, M. Pattabiraman, D.K. Baisnab, R. Baskaran, L.S. Vaidhyathanan, Y. Hariharan, Baldev Raj, A. Nagesha, M. Valsan, K. Bhanu Sankara Rao: Development of SQUID-based Non-destructive Evaluation System for Detecting Fatigue Induced Transformation of δ -ferrite to Non-magnetic Phases, *NDT&E International* 40 (2007) 215–219
- [13] Roskosz M. Gawrilenko P, Analysis of Changes in Residual Magnetic Field in Loaded Notched Samples, *NDT&E International* 41 (2008) 570-576
- [14] R. Becker, G. Dobmann, M. Kröning, H. Reiter, E. Schneider: Integration of NDT into Lifetime Management. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 73 (1997) 11–17
- [15] Z.D. Wang, K.Yao, B.Deng, K.Q.Ding: Quantitative Study of Metal Magnetic Memory Signal versus Local Stress Concentration. *NDT&E International* 43 (2010) 513–518



ANALYSIS OF THE METHODOLOGY OF THE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL STATE OF A COMPONENT IN THE METHOD OF METAL MAGNETIC MEMORY TESTING

Maciej ROSKOSZ, Michał BIENIEK

The Silesian University of Technology, , 44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18, Poland
maciej.roskosz@polsl.pl

Abstract

The method of metal magnetic memory (MMM) testing is a passive magnetic method which makes use of the residual magnetic field (RMF) of the element under examination. According to standards ISO 24497 - 1, 2, 3 : 2007 the assessment of the level of stress concentration is carried out with the use of the values of the RMF component gradients. For the assessment of the state of the component material, the maximum value of the gradient is referred to the average value in the area under examination. The assessment results from examination and it decides about its quality. The aim of the research was to examine the uniqueness of the determination of the stress concentration level and the material state in the method of metal magnetic memory testing. An attempt was also made to analyze the dependencies used in the assessment of the level of stress concentration and the state of the material. The impact of the mechanical load of the sample, of the value of the external magnetic field or of the location of the sample in the magnetic field of the Earth on the values of the RMF component gradients was examined and analyzed. The results of the research made it possible to formulate the following conclusions. The maximum values of gradients occur in the areas of stress concentration. The load and the values of the external magnetic field affect the maximum values of gradients, but the area of their occurrence remains unchanged. Quantifying the level of stress concentration, the value of stress, or the assessment of the state of the material at the present stage of the development of the method of MMM testing is a disputable and doubt-raising issue. Metal magnetic memory testing is a non-destructive testing method with a great potential to use, especially in cases where non-standard methods of non-destructive testing do not give satisfactory results. In each case, however, its application for a specific component calls for the development of a research methodology which takes into consideration the load state of the component during the examination, the values of the external magnetic field at the place where the examination is being carried out, as well as the location of the component.

Key words: Metal magnetic memory, residual stress, lifetime

1. Introduction

The method of metal magnetic memory testing (MMM) is a passive magnetic method which makes use of the residual magnetic field (RMF) of the component under examination [1, 2]. It is applied mainly when standard non-destructive testing methods, due to various reasons (e.g. the geometry of the component, the state of the surface, the costs), do not give satisfactory results [3].

In the year 2007 the international standards concerning the metal magnetic memory (MMM) method were issued [4]. Standard ISO 24497-1 introduces a system of concepts used in the method; Standard ISO 24497-2 describes the general requirements for the method to be applied, and Standard ISO 24497-3 – the testing of welded joints with the use of MMM

testing. According to these standards, the assessment of the level of stress concentration is carried out with the use of the values of the gradients of the components of the residual magnetic field (RMF). For the assessment of the state of the component material, the maximum value of the gradient is referred to the average value in the area under examination. The assessment results from examination and it decides about its quality.

2. Objective and details of research

The aim of the research was to examine the uniqueness of the determination of the stress concentration level and of the material state in the metal magnetic memory testing as stipulated by standards ISO 24497-1, 2, and 3, and by reference literature [5, 6, and 7]. An attempt was also made to analyze the dependences used in the assessment of the level of stress concentration and the state of the material. This objective was realized through examination and analysis of the effect of:

- the mechanical load of the sample,
- the value of the outer magnetic field or the location of the sample in the magnetic field of the Earth,

on the gradients of the components of the RMF. The maximum values of the gradients at the place of change in the section of the sample (the area of stress concentration) and average values for the sample were analyzed. The samples were flat steels with a locally decreased section. The measurements were made along the measurement line – Fig. 1. The places of section change are areas of the notch effect, where the largest values of the gradients of the RMF components should occur.

On the samples, for each load level, 4 measurements were made:

- "load" – measurement in the testing machine under load,
- "machine" – measurement in the testing machine after unloading,
- "perpendicular" – measurement in the magnetic field of the Earth, perpendicular location of the sample,
- "horizon" – measurement in the magnetic field of the Earth, horizontal location of the sample.

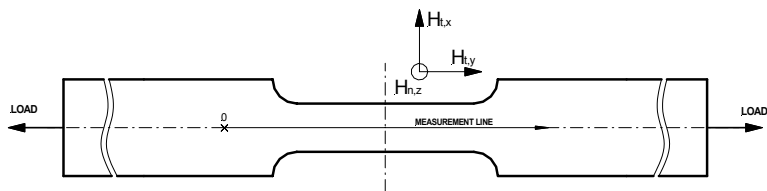


Fig. 1. Experimental sample

3. Research results and discussion

The gradients of the changes in the RMF components were determined through a segmental approximation of the measurement results with third-degree spline functions. In further consideration absolute values of the gradients occur.

Figures 2-4 present the values of the maximum gradients of individual components in the area of the notch effect depending on the stresses in the smaller section of the sample.

The points denote average values of 6 measurements; the height of the error bars is equal to standard deviation. Additionally, the dependences were approximated with a polynomial.

Within the range of elastic strain the values of the gradients vary slightly. A distinct rise in the value is visible after the yield point is exceeded. The maximum values of the gradients obtained from the measurements under load occur near the ultimate strength. However, the maximum values of gradients, measured after unloading, occur for a specific level of plastic strain.

3.1. Assessment of stress concentration

3.1.1. MMM testing methodology

1. According to standard ISO 24497-2, the gradient of the RMF components is used in the method of MMM testing to quantify the level of concentration of residual stress. But this "quantitative" assessment comes down to the statement that the area of maximum concentration of stress corresponds to the maximum value of the gradient of the RMF components.
2. The way to determine the values of stress in the area of stress concentration is presented in [5]. The maximum stress in the area can be determined from dependence

$$\sigma_{\max} \cong \sqrt{\frac{K_{\max}}{K_{\text{ave}}}} \times \sigma_m \quad (1)$$

where: K_{\max} – the maximum value of the gradient of the RMF components in the area of stress concentration.

K_{ave} – the average value of the gradient of the RMF components in the area under examination,

σ_m – according to [5], this is the ultimate strength R_m ; according to [6], this is the average stress in the area under examination.

3.1.2. Discussion

Ref. 1. Indeed, the maximum values of gradients occur in the areas of stress concentration – the areas of the notch effect [9, 10, and 11]. The impact of the load and of the value of the outer magnetic field or the location of the sample in the magnetic field of the Earth on the values of the gradients is significant. However, the area of the occurrence of the maximum values does not change.

Ref. 2. No analytical derivation of Dependence (1) was found in the reference literature. It is probably a dependence obtained on the grounds of research results, but there is no literature to justify it clearly enough.

In [9], no effect of a different number of form factor α_k of the notch on the maximum values of the RMF gradients was found. This is the reason why Dependence (1) and the obtained stress value should be treated as just approximated. More doubts concern the problem of what kind of stress can be determined from Dependence (1) – whether it is the maximum residual stress (according to [4]) or the maximum working stress (according to [5]), and what stress values should be assumed as σ_m . It is also unclear the gradient values of which RMF components should be taken into consideration.

The values of K_{\max}/K_{ave} for individual components are presented in Fig. 5-7. For components $H_{S,X}$ and $H_{N,Z}$, the dependence of K_{\max}/K_{ave} is a constant function, which means according to Dependence (1) that the maximum stress in the notch area, in the whole range of the changes in stresses, is a constant multiple of stress. The course of dependence K_{\max}/K_{ave} for

component $H_{s,Y}$, which is characterized by a rise in the value after the yield point is exceeded, justifies the statement that value K_{max}/K_{ave} for component $H_{T,Y}$ is related to residual stresses and dislocation density.

By using for the analyses relative values understood as the local value referred to the average value, the impact of outer magnetic fields or the load is removed. In addition, the influence of the distance of the sensor from the surface of the component and of other systematic measurement errors is diminished.

3.2. Assessment of the state of the material

3.2.1. MMM testing methodology

1. The ratio of the maximum value of gradient K_{max} to average value K_{ave} is determined by what is referred to according to standard ISO 24497-1 as magnetic index m of the deformation capability of the material.

$$m = \frac{K_{max}}{K_{ave}} \tag{2}$$

2. The ratio between maximum, boundary value of the RMF gradient – K_{gr} , which corresponds to ultimate strength R_m , and average value $K_{ave,Re}$, which corresponds to yield stress R_e , defines the boundary value m_{lim} of that index. In [5] there is a dependence which relates m_{lim} with the values of yield stress R_e and R_m .

$$m_{lim} = \frac{K_{gr}}{K_{ave,Re}} \cong \left(\frac{R_m}{R_e} \right)^2 \tag{3}$$

3. If coefficient m exceeds boundary value m_{lim} , the state of the material is forecast in the period before its destruction.

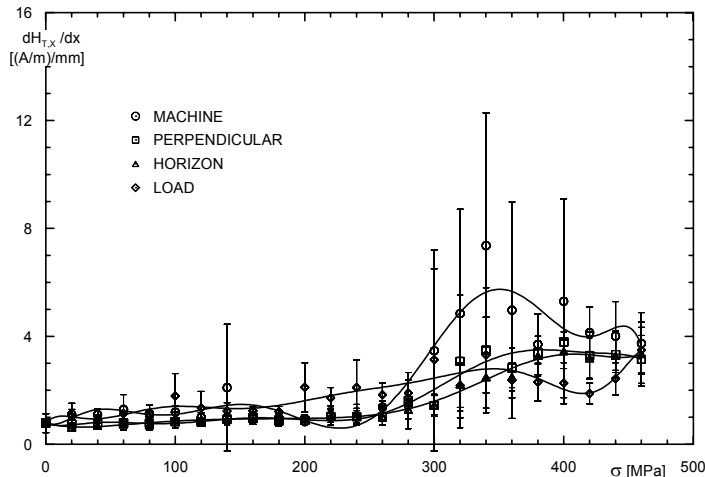


Fig. 2. Dependence between stress and maximum gradients of tangential component perpendicular to load direction $H_{T,x}$

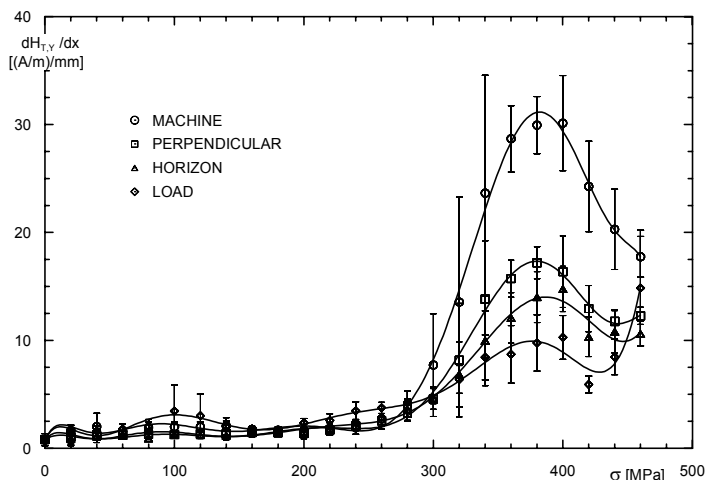


Fig. 3. Dependence between stress and maximum gradients of tangential component perpendicular to load direction $H_{T,Y}$

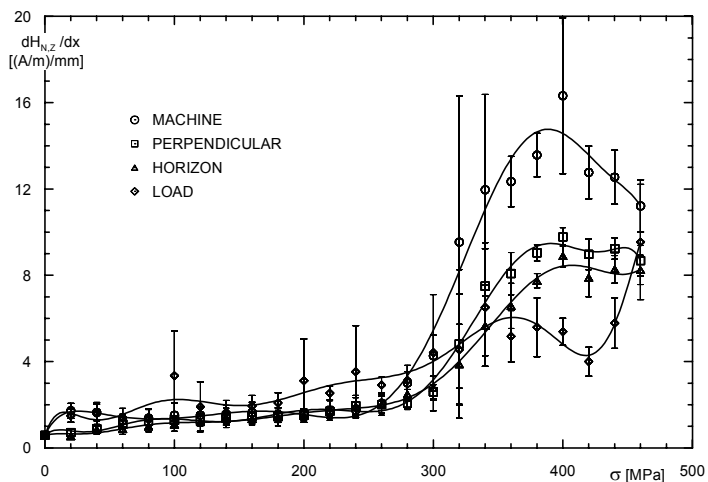


Fig. 4. Dependence between stress and maximum gradients of normal component $H_{N,Z}$

4. [8] presents the dependence to determine boundary time of operation T_{lim} of a component which until testing was operated for time T .

$$T_{lim} = \sqrt{\frac{m_{lim}}{m}} \times T \quad (4)$$

3.2.2. Discussion

Ref. 1. It turns out from an analysis, that for the samples under examination the notion of magnetic index m of the deformation capability of the material makes sense only in the case of component $H_{T,Y}$ – Fig. 5. For the other components its value is practically constant in the course of loading the sample until its destruction.

Ref. 2. During the test, value K_{gr} was not measured at the point of neck formation. But it can be assumed, as cracks take place in the neck – a narrowing, that it is at least equal to the maximum values in the area of the notch effect, where cracks do not occur. Table 1 presents computational data and calculation results for "horizon" measurements.

Table 1. Calculations of boundary value m_{lim} of the index of the deformation capability of the material.

	$H_{T,X}$	$H_{T,Y}$	$H_{N,Z}$		
K_{max}	3.5	13.0	8.0	R_c	280
$K_{ave,Re}$	0.2	0.4	0.6	R_m	480
m_{lim}	17.5	32.5	13.3	m_{lim}	2.94

For each RMF component a different value of m_{lim} was obtained. Value m_{lim} determined on the grounds of material properties is by an order of magnitude smaller than those established on the grounds of the values of the RMF components. The only way to account for this is to state that either a mistake was made in the research or the methodology of the method is not fully understood, or the methodology itself is wrong.

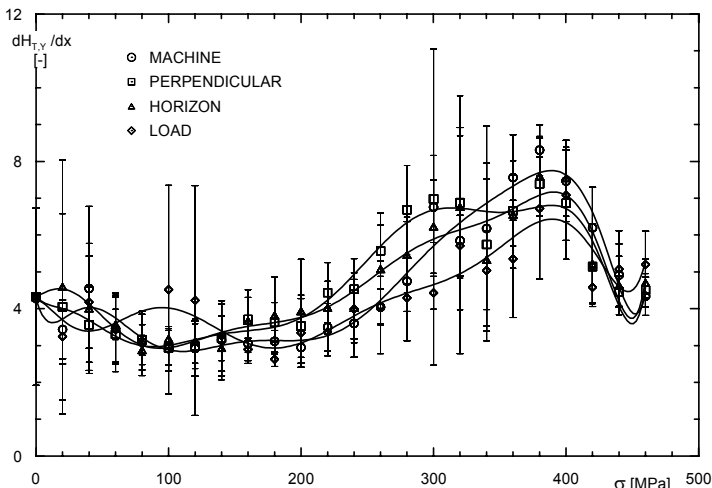


Fig. 5. Dependence between stress and relative gradients K_{max}/K_{ave} of tangential component $H_{T,Y}$

Assuming that at any point the value of the measured magnetic field is a resultant of the effect of magnetization of the whole component, it can be said that it is difficult to define criterion

factors for the material. It may be possible, however, for a component with a given geometry, made of a specific material, and with specific values of the outer magnetic field.

Ref. 3, 4. It could make sense in the case of a correctly determined value m_{lim} , but on the grounds of the presented examination results it is difficult to conclude.

4. Summary

- The maximum values of gradients occur in the areas of stress concentration. The load and the values of the external magnetic field affect the maximum values of gradients, but the area of their occurrence remains unchanged.
- Quantifying the level of stress concentration or the value of stress at the present stage of the development of the method of MMM testing is a disputable and doubt-raising issue.
- The assessment of the state of the material is also doubt-raising. The notion of magnetic index m of the deformation capability of the material makes sense only in the case of one RMF component.
- The values of criterion factor m_{lim} determined on the grounds of material properties and those established on the grounds of the values of the RMF components differ by an order of magnitude.
- It is difficult, if not impossible, to define criterion factors for a specific material. It is probably possible for a component with a given geometry, made of a specific material, and with specific values of the outer magnetic field.
- The method of metal magnetic memory testing is a non-destructive testing method with a great potential. In each case, however, its application for a specific component calls for the development of a research methodology which takes into consideration the load state of the component during the examination, the values of the external magnetic field at the place where the examination is being carried out, as well as the location of the component. Taking into consideration the elements mentioned above it is possible to determine, for particular components, the criterion factors.

Acknowledgements

The results presented in this paper were obtained from research work co-financed by the Polish National Centre of Research and Development in 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 CO2 capture.

References

- [1] Deputat J.: Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu. Dozór Techniczny 5/2002 pp. 97-105.
- [2] Dubow A.A.: Principal Features of Metal Magnetic Memory Method and Inspection Tools as Compared to Known Magnetic NDT Methods. WCNDT 2004, Montreal Canada, <http://www.ndt.net/article/wcndt2004/papers/359.ntm>
- [3] Roskosz M: Possibilities of the Application of the Metal Magnetic Memory Method to the Analysis of Gear Durability. 9th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT Berlin 2006, Abstracts Part 2, P 85
- [4] PN-ISO 24497-1, 2, ,3 Badania nieniszczące -- Magnetyczna pamięć metalu -- Część 1: Słownictwo, Część 2: Wymagania ogólne, Część 3: Kontrola złączy spawanych

- [5] Własow W.T., Dubov A.A.: Ocena poziomu naprężeń w strefach ich koncentracji według metody magnetycznej pamięci metalu. XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 2008
- [6] Dubov A.A., Kołokolnikov S.M.: Wyniki badań stanu naprężeń i deformacji fragmentów warstw naprawianych w miejscach typowych uszkodzeń gazociągu z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu. Materiały 4 Międzynarodowej Konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu”, Moskwa 2007 (in Russian), pp. 100-113
- [7] Dubov A.A., Kołokolnikov S.M.: Metoda Magnetycznej Pamięci Metalu – Podręcznik, Tisso, Moskwa 2006
- [8] Dubov A.A.: Sposób określenia stanu granicznego metalu i oceny rezerwu oprzyrządowania na podstawie magnetycznych parametrów diagnostycznych Materiały 3 Międzynarodowej Konferencji „Diagnostyka oprzyrządowania i konstrukcji z wykorzystaniem metody magnetycznej pamięci metalu”, Moskwa 2003 (in Russian), pp. 69-74
- [9] Roskosz M. Palacz A.: Analiza gradientu własnego pola magnetycznego ferromagnetyków pod kątem oceny stanu wyczerpania, 38 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań – Licheń 2009
- [10] Roskosz M. Gawrilenko P, Analysis of Changes in Residual Magnetic Field in Loaded Notched Samples, NDT&E International 41 (2008) 570-576
- [11] Roskosz M.: Соотношение между напряжением и напряженностью собственного магнитного поля ферромагнетиков, Пятая международная научно-техническая конференция "Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла", Москва 2009 pp. 53-61



SURVEY OF VIBRATIONS GENERATED IN COURSE OF GEOTECHNICAL WORKS

Jaroslav RYBAK*, Krzysztof SCHABOWICZ**

*Institute of Geotechnics and Hydrotechnics, **Institute of Civil Engineering
Wrocław University of Technology

ABSTRACT

Measurement techniques are developing to enable the monitoring of the vibrations transferred to the surroundings in course of geotechnical works, thus making it possible to carry out those works in a safer manner. With the new available techniques, when the amplitudes of vibrations go beyond the levels defined as safe in the code of practice, or when the vibrations become exceedingly perceptible by the humans, it is possible to correct the technology of the works' execution.

A separate problem is posed when dealing with historic buildings, which may potentially come within the impact of vibrations. Intensive construction works carried out in the neighbourhood of not infrequently old and valuable structures may threaten the historic housing, hence their safety aspect should be thoroughly considered. That concern for the existing buildings of historical value stimulated the development also of the new research area, namely the impact of deep foundations on the structure of the existing buildings.

The research conducted at the Department of Civil Engineering at Wrocław University of Technology aim at defining the influence of ongoing geotechnical works on the surroundings, as well as at preparing the guidelines on the selection and calibration of the technology. The experience gained so far is sufficient to offer services for geotechnical companies. Those services are supposed to both: help with the calibration of the technology, as well as to protect the contractors from unjustified claims from the neighbours of the construction site. At the same time, the stored database of the surveys may, after being systematized, play a significant role in the non-destructive diagnostic testing of buildings.

This work presents selected aspects of the active designing, using the investigation of the impact of vibrations that occur during the soil improvement and piling works, on adjacent engineering structures.

1. INTRODUCTION

Measurement techniques are developing to enable the monitoring of the vibrations transferred to the surroundings in course of geotechnical works, thus making it possible to carry out those works in a safer manner [4], [5]. With the new available techniques, when the amplitudes of vibrations go beyond the levels defined as safe in the code of practice, or when the vibrations become exceedingly perceptible by the humans, it is possible to correct the technology of the works' execution.

A separate problem is posed when dealing with historic buildings, which may potentially come within the impact of vibrations [6]. Intensive construction works carried out in the neighbourhood of not infrequently old and valuable structures may threaten the historic housing, hence their safety aspect should be thoroughly considered. That concern for the

existing buildings of historical value stimulated the development also of the new research area, namely the impact of deep foundations on the structure of the existing buildings. Inappropriate selection of technology for particular development conditions may lead to such problems as cracking of the adjacent structures or their settlement for unknown reasons. That negative impact can be reduced or even avoided when the vibration is investigated before (in order to get the picture of the so called „environment background”) and at the time when the construction works are initiated. Then, in carrying out construction works, the range of permissible vibration velocities and frequencies should be taken into account. As the old proverb says, necessity is the mother of invention; and so, on the market appeared a lot of firms offering a wide array of geotechnical technologies.

The research conducted at the Department of Civil Engineering at Wroclaw University of Technology aim at defining the influence of ongoing geotechnical works on the surroundings, as well as at preparing the guidelines on the selection and calibration of the technology. The experience gained so far is sufficient to offer services for geotechnical companies. Those services are supposed to both: help with the calibration of the technology, as well as to protect the contractors from unjustified claims from the neighbours of the construction site. At the same time, the stored database of the surveys may, after being systematized, play a significant role in the non-destructive diagnostic testing of buildings.

This work presents selected aspects of the active designing, using the investigation of the impact of vibrations that occur during the soil improvement and piling works, on adjacent engineering structures.

2. LEGAL BASIS FOR VIBRATION IMPACT ASSESSMENT

Social thresholds of the acceptable vibrations are definitely lower than the technical ones and depend mainly on the duration of the investment’s execution works. Residents become anxious if only the “glasses rattle in the cupboard”, whereas vibrations of such frequency do not pose threat of any kind for the building’s structure. Much more dangerous are the vibrations that are not sensed by humans, and which cause the structural or finish elements to resonate.

In order to select an appropriate foundation technology, from the point of view of both, technology and economy, one has to possess not only technical knowledge, but also the ability to assess the correctness of the foundation works execution. Frequently the decedents have very little knowledge on monitoring and works supervision methods, which results in the choice of the cheapest, but not always best of them. A separate problem is lack of consciousness of the real dangers on the part of the residents living in direct neighbourhood of the investment. A properly organized information campaign costs money, and it should be taken into account as an economic element of the planned budget.

From the point of view of technology, it may be assumed that the vibrations are a function of frequencies, velocity and acceleration amplitudes, as well as of the time in which the interactions are registered. Largest amplitudes may be observed when the source of vibrations is near the monitored structure, and the working frequency is approximating the structure’s natural vibration. That is when in the structural parts of the building resonance may occur. The simplest solution is to move the source of vibration away from the responsive structure; however, such solution is not always possible.

The basis for the result analysis and the assessment of safe vibration levels is typically constituted by the following codes of practice: DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen” [2], Eurocode 3. Part 5 [3] and (in Poland) PN-85/B-

02170 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki” (“The Assessment of Harmful Impact Transmitted from the Subsoil to Buildings”) [1]. These documents define the allowable short-term and long-term dynamic impact on cubature buildings with considerable weight, their equipment (machines and appliances) and residents. In accordance with the graph from DIN 4150 presented below, 3 categories may be distinguished:

- category L1: especially responsive structures that may be divided into two further categories of the structures under conservator’s protection and the objects equipped with electronic or mechanical appliances
- category L2: residential houses
- category L3: industrial facilities and similar

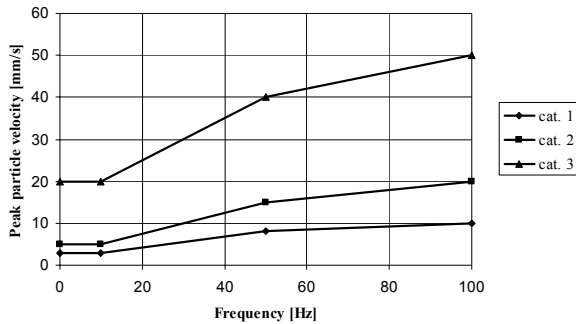


Fig. 1. Scales for the assessment of vibration impact on the basis of velocity amplitudes (DIN [2])

Tab. 1. Scales for the assessment of the impact of vibrations on the basis of velocity amplitudes [3]

Type of property	Peak particle velocity [mm/s]	
	Continuous vibration	Transient vibrations
Ruins, buildings of architectural merit	2	4
Residential	5	10
Light commercial	10	20
Heavy industrial	15	30
Buried services	25	40

The above table (in line with EC3 [3]) presents the allowable values of continuous and transient vibration velocity (peak particle velocity) in relation to different building structures. The aim of the investigation is to compare the level of dynamic impact of on-going works (connected with vibrating and/or driving sheet piles, piling or ground improvement) with the values defined as safe for a given structure in the DIN or EC3 codes of practice. Some examples will be shown below.

3. BRIDGE FOUNDATION IN THE TOWN OF KOŽLE [10]

In the investment described below, the object of investigation was the influence of foundation works consisting in a dynamic ground replacement (Fig 5). The examination was carried out on August 2009. The monitored structures were: a building made in traditional technology (Fig 3.) and the foundation of a bridge abutment under construction. The VIBRA sensors (from the Dutch *Profound* company) - were located as presented in the photographs below (Fig 2. and Fig 4.).



Fig 2. Sensor on the residential house.



Fig 3. Monitored residential house.



Fig 4. Sensor on the bridge abutment.



Fig 5. Dynamic soil replacement.

The investigation did not reveal any symptoms of sensible negative impact of the vibrations on neighbouring structures. The maximum level of vibrations (peak particle velocity) observed and recorded on both structures, at the final stage of each of the stone

columns formation, varied between 0.9 and 1.5 mm/s and did not exceed the limit of 5.0 mm/s defined by the code of practice [4.] as safe for structures. In the authors' opinion the reason behind those results was the considerable distance between the monitored structures and the source of vibrations.

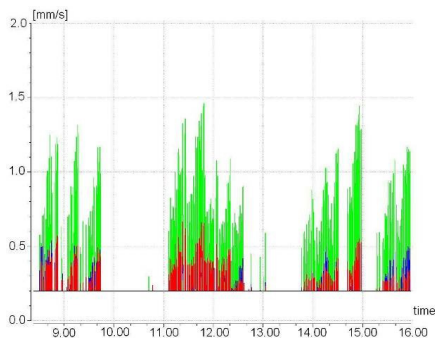


Fig 6. Time–Velocity graph (residential house).

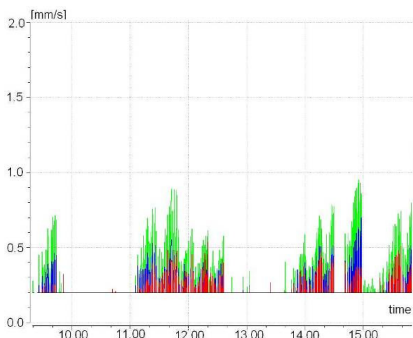


Fig 7. Time–Velocity graph (bridge abutment).

Regardless of the influence on the existing structures, it was considered if the construction works (cementation of the bridge abutment) could be continued in the conditions of dynamic impact occurring in the surroundings. If there was the risk of damages, the geotechnical works were expected to stop, or the technology could be changed into vibro-replacement in the direct neighbourhood of the abutment. The measured level of vibration velocity was, however, considered not harmful.

4. BRIDGE FOUNDATION IN THE TOWN OF ZAMBROW [10]

In the investment described below, the object of investigation was the influence of pile driving (Fig 8) on the technical condition of a residential house in the vicinity of the pile works. When the test piles were being driven (for the sake of load tests), the background was measured and recorded; the same was done in the case of the vibrations generated with different heights of the drop of the pile driver's hammer. The goal of the analysis of the vibrations was to select such pile driving parameters so that – keeping the driving efficiency – the dynamic impact on the surroundings would be reduced to minimum. The measurement of the vibrations was supplemented with the measurement of the noise generated by the pile works in the zone of residential housing. The examination was carried out in July 2010. The structure was a building made in traditional technology. The sensors were located as presented below (Fig 9.).



Fig 8. Pile driving at the construction site in Zambrów, Poland

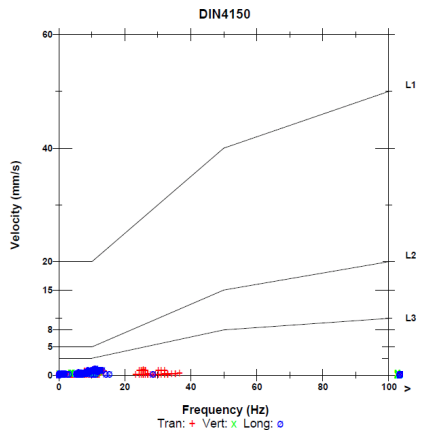
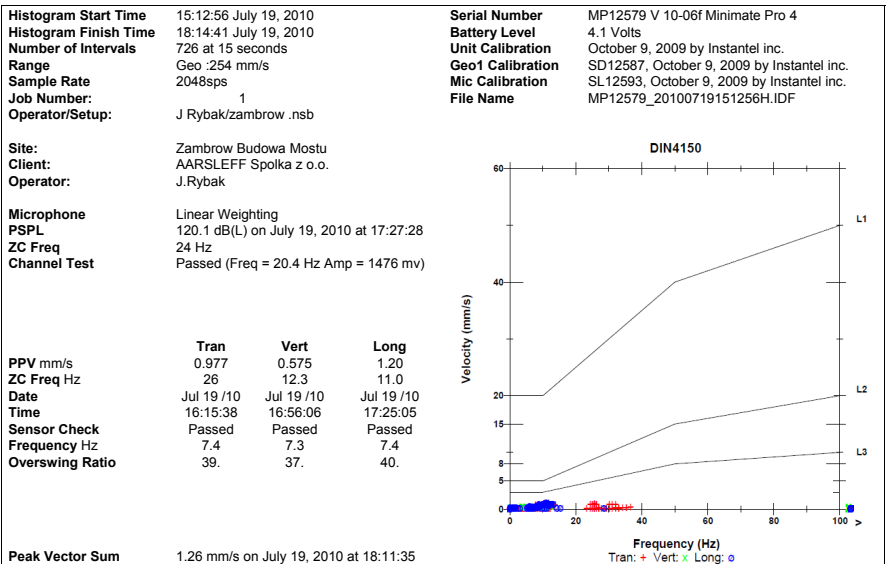


Fig 9. Sensor on the residential house.



Fig 10. Sensor on the residential house

Sample results of the continuous observation of particle velocity in function of time, as well as the values of the particle velocity in function of frequency, at the test post on the building, have been presented on the test report below (Fig. 11). The diagrams show the increments of the peak particle velocity at the prospective test post for further static load tests, in course of the driving of 5 pre-cast concrete piles.



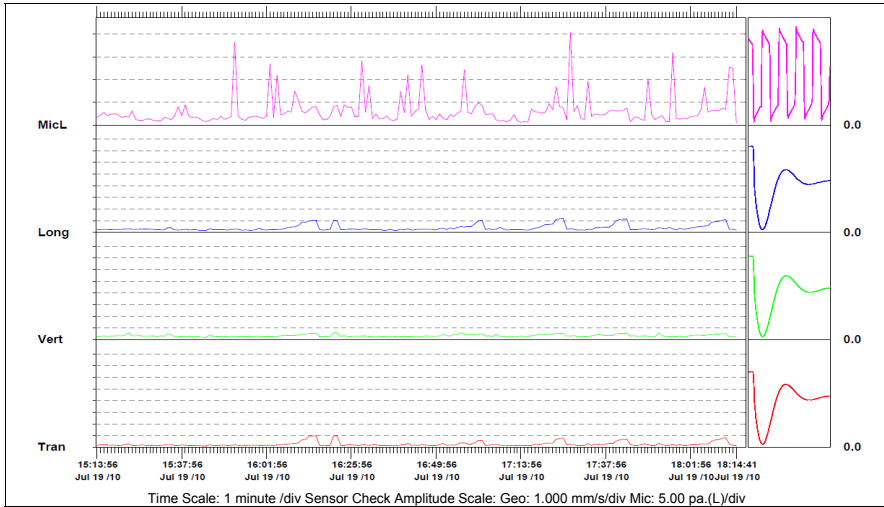


Fig 11. Observation report (noise and vibration) – the piles in the 2B bridge support.

The measurements carried out before the geotechnical works were initiated and during the breaks (background measurements) made it possible to observe what was the impact (vibrations and noise) of the on-going construction works on the surroundings. The works generated the vibrations with the velocity at ranging from 0.30-0.40 mm/s. Temporarily (machines passing by, unloading of the materials) the peak particle velocities reach and exceed 1.00 mm/s (an isolated impulse reached about 1.99 mm/s). Peak particle velocities recorded at 15-second intervals during a 6-hour measurement and recording of vibrations have been shown in Table 2.

Tab. 2. Peak particle velocities (velocity amplitudes) in accordance with DIN, recorded during the survey.

Time	Activity	Drop height [cm]	Peak particle velocities [mm/s]
11:56-13:52	Background measurement		0.30-0.40 (continuous) 1.99 (impulse)
13:55-14:20	Pile no. 75 in the 1B abutment	10-60	1.35
14:20-14:55	Pile no. 30 in the 1A abutment	10-60	1.93 (sustained)
15:13-16:25	Pile no. 29 in the 2A abutment	10-60	1.25
16:25-18:15	Piles in the 2B abutment	10-80	1.26

The on-going pile works caused significant inconvenience due to noise intensity and perceptible long-lasting vibrations. The recorded level of the observed vibrations did not, however, exceed the values which the DIN code of practice describes as safe for a building structure (including even historic buildings). No negative impact of the vibrations on the technical condition of the building was observed.

The recorded peak particle velocities amounted to 1.10-130 mm/s. Only in the case of the building situated at the shortest distance from the pile no. 30 in the 1A abutment, when the hammer dropped from the height of 60 cm, the peak particle velocities reached 2.00 mm/s. Such value is technically acceptable, but it caused a great inconvenience for the people residing in the house. Therefore, the decision was made to limit the drop height to 40 cm while driving piles under the 1A bridge abutment.

In the effect of the conducted survey, no technical contraindications for further pile works were found. Bearing in mind that no significant impact had been observed during the whole day of the works it was possible to give up further survey (continuous observation of the level of vibrations in course of future pile driving, provided that the hammer's mass and drop height were kept at the comparable level as during test pile driving (6-7 t from the height of 60 cm, with the exception of the 1A abutment). However, it was recommended to continue the survey, due to the risk of a slightly larger propagation of vibrations in the subsoil thickening with the progress of the pile works.

5. FINAL REMARKS

The above presented case studies showed the situations in which only after the technology was selected and the works – begun, the investigation was carried out in order to determine whether the technology may be further applied or whether it should be switched to some other one. This standstill and costs of potential technology changes result from the passive attitude on the part of investors and contractors, while – with a small cost of the survey, both might be saved: time and money.

Modern impact hammers make it possible to change hammer drop height for some part or the whole of the works. Such policy was applied during the installation of piles at the construction site in Zambrów and made it possible to reduce considerably the amplitudes of vibrations observed on the adjacent structures. However, it must be remembered that the “switching” of the hammer may limit the efficiency of pile driving and prolong the time of works or even limit pile-drivability reduce pile capacity.

The analysis of vibrations of the background that permanently influences the monitored structures makes it possible to determine precisely the permissible frequency of vibrations and thus to take into account lower efficiency of works in calculating overall costs. Although the monitoring programs may be in practice diversified, complex and perfectly adjusted to even very demanding construction technologies, the difficulty lies in the assessment of the proportions between the real needs, the proper monitoring scope and the financial resources of the investor, who, in the end, pays for such investigation. It is however worth emphasizing that the costs of such examination are much lower than the potential damages that may be thus avoided.

REFERENCES

- [1] PN-85/B-02170 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki. Komentarz do normy PN-85/B-02170 opracowany w COBPBO 1990. (in Polish)
- [2] DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen”.
- [3] ENV 1993-5 Eurocode 3: Design of steel structures – part 5. Piling. January 1998.
- [4] ATTEWELL, P.B., SELBY, A.R., AND O'DONNELL, L., (1992). “Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data,” *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 41-59
- [5] HILLER, D.M. & HOPE, V.S. (1998). “Groundborne vibration generated by mechanized construction activity.” *Proc., Inst. Civil Engineers* (131) 223-232
- [6] PIECZYŃSKA J., RYBAK J.: (2009), Prospects for active design expansion owing to investigation of vibrations caused by geotechnical works. *Wiadomości Konserwatorskie*. No 26, pp. 481-491.
- [7] Vibration testing report U-series no. 411, Wrocław University of Technology (in Polish).
- [8] Vibration testing report U-series no. 454, Wrocław University of Technology (in Polish).



ACOUSTIC WAVE VELOCITY TESTS IN NEWLY CONSTRUCTED CONCRETE PILES

Jaroslav RYBAK*, Krzysztof SCHABOWICZ**

*Institute of Geotechnics and Hydrotechnics, **Institute of Civil Engineering
Wroclaw University of Technology

ABSTRACT

This paper presents the research carried out by the Institute of Geotechnics and Hydrotechnics at Wroclaw University of Technology, in cooperation with the Institute of Civil Engineering, aim at preparing a database that would be helpful for non-destructive tests, when the acoustic wave velocity needs to be defined for different classes of concrete and for different time elapsed from the initial pile cementation (from 5th to 28th day).

Standard procedures of pile length and continuity tests require that the pile head should be appropriately prepared and that the pile should attain certain level of strength. However, the pressure exerted frequently by the contractors results in bringing the tests forward. That, in turn, necessitates each single time the calibration of the acoustic wave velocity for a pile made of a given concrete type. The survey presented in this work form a basis for the estimation, in the field conditions, of the acoustic wave velocity in the B25 concrete at the stage of setting between the 5th and the 12th day after cementation.

The tests carried out made it possible to determine empirical relations between the acoustic wave velocity and the time elapsed from cementation in the piles under survey, whose composition was similar. The obtained results prove that even minor differences in the composition of concrete types may be the reason behind making a considerable mistake in the non-destructive assessment of the piles under test, when one uses correlation curves determined for some other, „similar” concrete types. Hence, it is recommended to determine accurate correlation dependencies for each of the concrete types, and, if possible, for each piling technology.

1. INTRODUCTION

Owing to the development of testing technologies that permit to control the quality of concrete and ferro-concrete elements, it is possible to check in detail such elements as concrete columns formed in the ground and the foundation piles, which cannot be accessed otherwise than from the pile head. Such techniques as PIT, SIT or Impulse Response provide non-destructive diagnostic testing of the above-mentioned concrete elements' length and continuity (including potential narrowing). There is extensive literature that presents theoretical basis of the methods and a broad spectrum of their application [1-7,10,12-14]. It may be stated, however, that it is the compatibility of the conditions at the construction site with the applied theoretical model that decide whether the control test may be carried out correctly. Another problem to be dealt with is the necessity to prepare the pile head for testing (it should be levelled, smoothed, cleaned and dried) and the pile quality tests should be carried out before the next stage of the foundation works (the pile head needs to remain accessible for the tests). For that reason, in order to speed up foundation works, the acoustic tests are often made before the process of concrete setting in the newly formed pile finishes, and thus the acoustic wave velocity needs to be estimated in the above described concrete.

It should be stressed that analogical problems with the testing time refer to static and dynamic tests of pile load capacity, where the risk of a faulty estimation of the load capacity is additionally linked with the changing conditions of the soil properties around the pile.

The research carried out by the Institute of Geotechnics and Hydrotechnics at Wrocław University of Technology, in cooperation with the Institute of Civil Engineering, aim at preparing a database that would be helpful for non-destructive tests, when the acoustic wave velocity needs to be defined for different classes of concrete and for different time elapsed from the initial pile cementation (from 5th to 28th day).

2. DESCRIPTION OF PILE TESTS

Field tests of the length and continuity of the IR concrete columns with the diameter of 630 mm (the CFA concrete piles) were carried out at the construction site of a large retail-service establishment in the South of Poland. Altogether 131 columns were tested; the columns were made of the B25 class concrete and were located in the subsoil where the designed structure was to be erected.

In the dynamic tests the Low-Strain method (a low-energy method) was used to examine the length and continuity of concrete piles and columns. It is a control test ordered by the contractor, in order to check if the execution is consistent with the design as well as to get some insight into the foundation works quality.



Fig 1. The equipment.

For the measurements, in accordance with [17, 18], the equipment and software from the PDI (Pile Dynamics Inc.) company were used (Fig 1.). The measuring unit consists of a digital device that records the electric signal from the acceleration sensor (accelerometer).

The examination of a column's continuity is based on the analysis of the velocity of wave propagation and its reflection in a continuous medium. When the wave reaches the pile's end, narrowing or fracture, it is reflected and returns to the surface of the pile head. That process is recorded by the receiver. Afterwards, the test results are obtained by means of a computer programme. The only problem that occurs during the interpretation of the test results is the selection of the assumed wave velocity for a pile. It is assumed that the velocity of a wave propagation in reinforced concrete piles amounts to about 4000 m/s (3960 m/s in accordance

with [18]) when the concrete has reached its full strength. Depending on the thickness of the concrete, it is possible to assume, for example, $c_L = 4044$ m/s for $\gamma=24$ kN/m³ and $c_L = 4340$ m/s for $\gamma=25$ kN/m³. It may be concluded from the author's experience that the wave velocity in pre-cast concrete piles, made of the B50 concrete, amounts to circa $c_L = 4550$ m/s before they are driven. The velocity of the **IR piles (concrete columns)** with the diameter $\phi 630$ mm before the 14th day after they were cemented may be much lower and it typically ranges from 3200 to 3600 m/s, due to the unfinished concrete setting time and suitably for the liquid state as well as slightly larger porosity of the concrete.

The tests were accelerated because of the current stage of the construction works progress (bare and levelled pile heads, ready for the subsequent earthworks). The tests were, therefore, carried out before the time required for the pile's concrete to set and reach its complete strength. In the interpretation of the results (after the analysis of the obtained signals and reports from the automatic recording of the pile formation process), the velocity of the wave in the concrete was assumed at a level depending on the column's age (5-12 days) and it varied from 3200-3600 n/s. For each of the examined columns, 1 series of signal recording was carried out (6 hammer blows). The accelerometer was attached to the previously prepared pile head of each column under survey.

The signal was recorded on the „flash” memory card and then transferred to a computer for further processing. The signals selected for processing were the ones that guaranteed „gentle” course of the acoustic wave in time, i.e. without abrupt refractions caused, for example, by hitting the chipped concrete or a grain sticking out of the aggregate.

3. OBTAINED RESULTS

The selection of columns to be analysed was random, as all the accessible ones were tested. This work shows the results of the analysis of the recorded acoustic wave velocity in function of time. In the investigation, on the basis of the conducted analysis of the records from the piling reports, wave velocity was assumed to range from 3200 to 3600 m/s. For each pile under test, the signal was amplified tenfold in the lower part of the pile, which made it possible to unify the criteria of the assessment of all of the piles under survey. The analysis, however, demanded that the assumed wave velocity should be diversified, and thus for the 6-day-old piles the assumed wave velocity was 3300 m/s, and for the 10-day-old piles – 3500 m/s. The tests results for selected piles has been shown on diagrams below (Fig. 2 and 3).

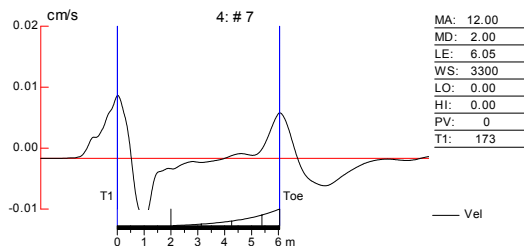


Fig 2. The diagram of the acoustic wave velocity for pile no. 284 (6 days elapsed since cementation)

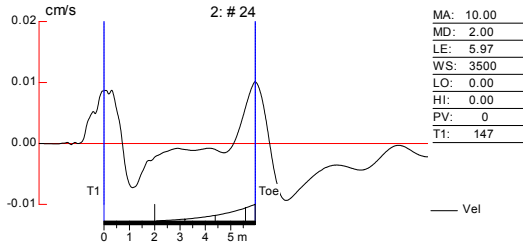


Fig 3. The diagram of the acoustic wave velocity for pile no. 286 (10 days elapsed since cementation)

The examination of the IR concrete columns showed the lengths approximate to the ones given in the piling reports. The inconsistencies, which were random (when the tests revealed slightly larger or smaller lengths than the ones declared by the contractor), might have resulted from the accuracy of the estimation of wave velocity in the concrete and from the level to which the pile head had been crushed. The columns, however, did not exhibit any discontinuities or significant narrowing.

4. ANALYSIS OF TEST RESULTS

In order to estimate the changes in the wave velocity in time such velocities of the elastic waves were searched for which the test result would precisely match the declared pile length in accordance with the piling report. The 131 thus obtained result pairs of the dependence of acoustic wave velocity and time was shown in Fig 4. That dependence has been described by means of the equation 1:

$$c_L = 2974.1 + 51.1 \cdot t \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

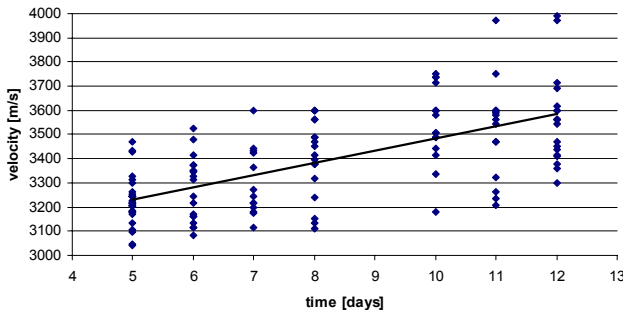


Fig. 4. The diagram of the dependence of the acoustic wave velocity in function of time

The reason behind the choice of the linear approximation was the simplicity of the solution. The use of the logarithmic or multinomial function did not improve the approximation significantly. It should be noticed that the estimated velocities are characterised by dispersion, which might have resulted, among others, from:

- heterogeneity of the material
- forming of the piles in different time (several day's span)
- varying level of the pile head's crushing
- inaccuracies of the information in the piling reports.

On the basis of the conducted field tests a trend may be observed that shows the increment of the acoustic wave velocity with the increase of time in the process of concrete setting. This fact was also noticed in course of laboratory tests carried out on 12 concrete types, the results of which have been shown in [19]. The tests prove that the acoustic wave velocity changes most significantly until the 15 day after the cementation. A sample diagram for three basic concrete types are shown in Figure 5.

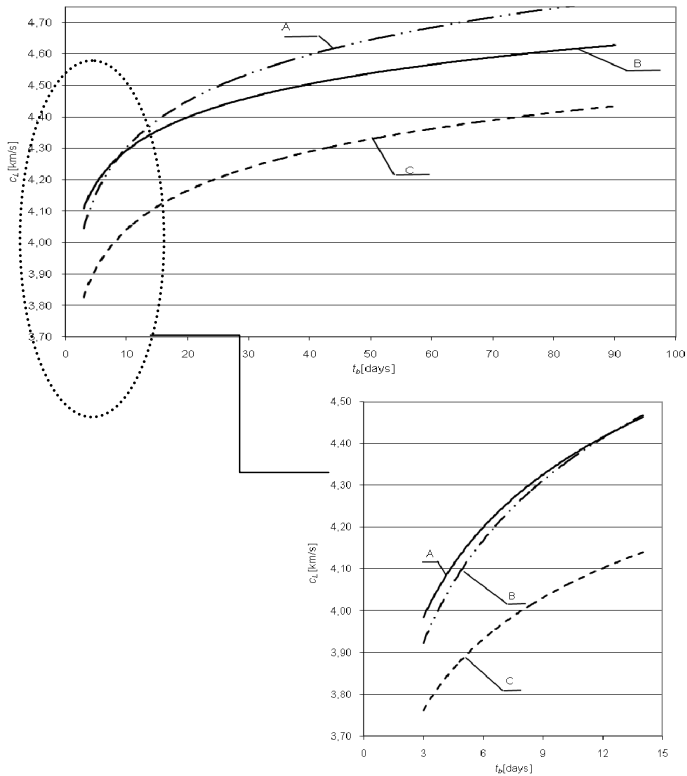


Fig. 5. The alteration of the acoustic wave c_L in function of time.

It is noteworthy that the above-presented laboratory tests gave results that differed significantly (larger wave velocity values) from the field test observations. A simple transfer of laboratory test results onto the field tests may be, therefore, the source of inaccuracies and mistakes. That confirms the authors' intuition that the parameters for the field tests should be

estimated on the basis of the observations from previously made tests for a possibly large sample of:

- concrete classes,
- piling technology,
- time elapsed from cementation.

When observing the distribution of the acoustic wave velocity determined for separate results, it may be noticed that the range of the fluctuation is not large and it does not exceed 10% of the average value. Figure 6 presents the values of the acoustic wave velocity for the piles tested on the 5th and 12th day after cementation. Relatively numerous data populations from the time span under survey (5-12 days) were selected for the presentation.

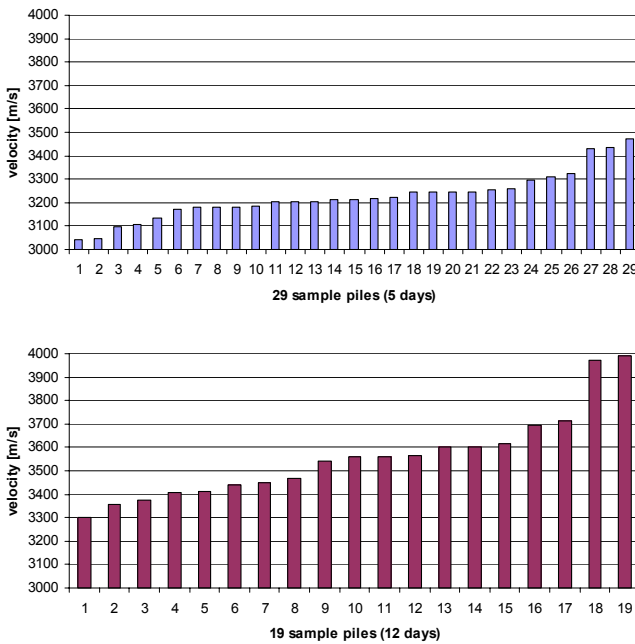


Fig. 6. Determined wave velocities for: a) 29 piles tested on the 5th day after cementation, b) 19 piles tested on the 12th day after cementation

The observed distribution of determined velocities in the subsequent days after cementation are approximate to normal distribution (although such thesis would probably have to be confirmed on a larger statistic sample).

In Fig. 7, presenting the histograms of wave velocities for 5 and 12-day-old piles (the amount of piles for which the wave velocity was calculated in the intervals of 100 m/s within the range of 3000-4000 m/s), also the similarity to normal distribution may be found.

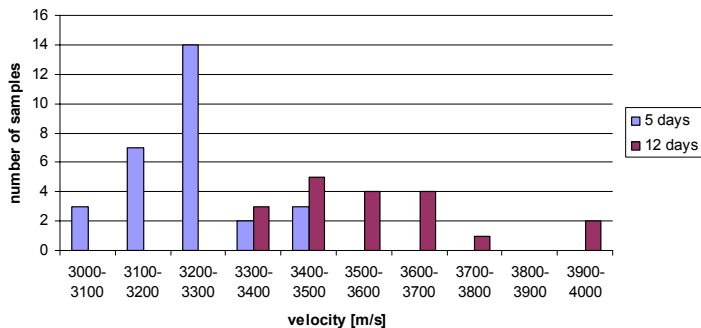


Fig. 7. Histogram of wave velocities for the piles tested on the 5th and the 12th day after cementation.

If we treat the acoustic wave velocity in the piles on subsequent days as a random variable, then it is possible to calculate average values, standard deviations and coefficients of variation – the latter giving a meaningful description of the estimation's accuracy. Table 1 presents the juxtaposition of the acoustic wave velocities for varying time elapsed from the pile cementation on the subsequent days after the pile formation. It seems noteworthy that the dispersion of the results (coefficient of variation) for the piles in the range from the 5th to 12th day after cementation is not large and it amounts to about 5%. Therefore, if the pile length is estimated when taking into account the varying wave velocity there is no risk of a significant mistake.

Table 1. Juxtaposition of the acoustic wave velocities for varying time elapsed from the pile's cementation

Time	Population	Mean value	Standard deviation	Coefficient of variation
[days]	[pcs]	[m/s]	[m/s]	[%]
5	29	3226.45	100.25	3.1%
6	19	3275.79	129.08	3.9%
7	13	3298.54	136.38	4.1%
8	19	3405.79	153.24	4.5%
10	16	3542.63	151.74	4.3%
11	16	3523.06	191.16	5.4%
12	19	3559.58	181.31	5.1%

5. CONCLUSIONS

Standard procedures of pile length and continuity tests require that the pile head should be appropriately prepared and that the pile should attain certain level of strength. However, the pressure exerted frequently by the contractors results in bringing the tests forward. That, in turn, necessitates each single time the calibration of the acoustic wave velocity for a pile made of a given concrete type. The survey presented in this work form a basis for the

estimation, in the field conditions, of the acoustic wave velocity in the B25 concrete at the stage of setting between the 5th and the 12th day after cementation.

The tests carried out made it possible to determine empirical relations between the acoustic wave velocity and the time elapsed from cementation in the piles under survey, whose composition was similar. The obtained results prove that even minor differences in the composition of concrete types may be the reason behind making a considerable mistake in the non-destructive assessment of the piles under test, when one uses correlation curves determined for some other, „similar” concrete types. Hence, it is recommended to determine accurate correlation dependencies for each of the concrete types, and, if possible, for each piling technology.

REFERENCES

1. BRZOZOWSKI T., BLOCKUS M.: „Badania dynamiczne pali.” Seminarium: Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych. Gdańsk, 25.06.2004.
2. CIEŚLAK w., GWIZDAŁA K. Dynamiczne badania jakości wykonywania fundamentów palowych: charakterystyka i badania modelowe. XXIII K.N.-T. Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2007.
3. DAVIS A. G, DUNN C.S.: From theory to field experience with nondestructive vibration testing of piles. Proc. Inst. Civ. Engrs. Part 2, Vol. 57, paper 7764. 1974
4. DAVIS AG, HERTLEIN BH.: Nondestructive testing of concrete pavement slabs and floors with the transient dynamic response method. Proc Int Conf Struct Faults Repair (Lond) 1987.
5. GERMANN INSTRUMENTS. Kopenhaga, Dania, 2006
6. GWIZDAŁA K.: Kontrola nośności i jakości pali fundamentowych. Geoinżynieria i Tunelowanie 01/2004
7. GWIZDAŁA K.: Projektowanie pali fundamentowych. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła - Ustroń, 01 ÷ 04 marca 2005r.
8. HERTLEIN BH, Davis AG.: Locating concrete consolidation problems using the nondestructive impulse response test. American Concrete Institute Fall Convention, Los Angeles. October 25, 1998
9. Jamróży Z., Beton i jego technologie, PWN, Warszawa 2000.
10. MODL A., RYBAK J.: Badania ciągłości pali prefabrykowanych. Górnictwo i Geoinżynieria. 2009, R. 33, z. 1, s. 443-451
11. Neville A.M., Property of concrete. Polski Cement, Krakow, 2000.
12. RIPPEL R.: Próbné obciążenia i badania głębokich fundamentów. Geoinżynieria i Tunelowanie 02/2004 (02)
13. RYBAK J., SADOWSKI Ł., SCHABOWICZ K.: Wykorzystanie metody Impulse Response s'Mash do badania pali żelbetowych. W: Badania nieniszczące w diagnostyce technicznej : 37 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Sobieszewo, [21-23 października] 2008.
14. RYBAK J., SADOWSKI Ł., SCHABOWICZ K.: Non-destructive impulse Response S'Mash Method for concrete pile testing. e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics: <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/195.pdf>
15. Instrukcja stosowania metody ultradźwiękowej do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji, ITB, Warszawa 1977.
16. PN-EN 12504-4:2005 Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity.
17. PIT COLLECTOR. User's Manual. October 2005. Pile Dynamics, Inc.
18. PIT-W Manual. Software for PDI's Pile Integrity Tester. Version 2003. Pile Dynamics, Inc.
19. SCHABOWICZ K., Empirical relations for nondestructively determined strength of concrete on different days of its maturing, Defektoskopie, Pilsno, 2010.



EMPIRICAL RELATIONS FOR NONDESTRUCTIVELY DETERMINED STRENGTH OF CONCRETE ON DIFFERENT DAYS OF ITS MATURING

Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Abstract

This paper presents empirical relations between compressive strength and the parameters measured by the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method for several concretes with similar composition on different days of its maturing. It is shown that even slight differences in the composition of such concretes may be the cause of significant errors in nondestructive strength estimations when an empirical relation determined for another "similar" concrete is used. Therefore it is recommended to determine exact correlations for each of such concretes. The results can be particularly useful for all kinds of nondestructive tests used in engineering practice.

Key words: concrete, nondestructive methods, ultrasonic method, sclerometric method, pull-out

1. Introduction

The compressive strength of concrete can be checked and estimated by nondestructive methods in laboratory conditions and in concrete structures in situ. For this purpose one needs to know the correlations between compressive strength and the parameters measured by the particular nondestructive methods. In the case of many nondestructive methods, particularly acoustic methods, it is essential to determine the ultrasonic wave velocity in concretes (being in different stages of maturing) which have not reached their full compressive strength yet. This applies, for example, to the nondestructive testing of different concrete elements and structures, such as floors, walls and foundation piles when there is a need to determine the temporary strength of concrete which has not reached the specified ultimate parameters yet.

Exact empirical relations between compressive strength and the parameters measured by the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method for several concretes with similar composition are determined in this paper. It is shown that even slight differences in the composition of such concretes may be the cause of significant errors in nondestructive strength estimations when an empirical relation determined for another "similar" concrete is used.

2. Data set

A data set for twelve concretes, denoted with letters from A to L, was created from laboratory test results.

The basic data on the tested concretes are shown in table 1, from which it appears that the compressive strength of the concretes varies widely: from 24 to 105 MPa.

The set is made up of twelve subsets of parameters determined using 150x150x150 mm samples of concretes A-L after 3, 7, 14, 28 and 90 days of curing, by the ultrasonic method, the sclerometric method and the semi-nondestructive pull-out method (in the literature classified as nondestructive). The above methods were selected since they have been legitimized by standards and are most often recommended for estimating the compressive strength of concrete [1, 5-11]. The parameters are: longitudinal ultrasonic wave velocity c_L , rebound number L , imbedded in concrete steel anchor pull-out force N and nondestructively determined concrete compressive strength f_c .

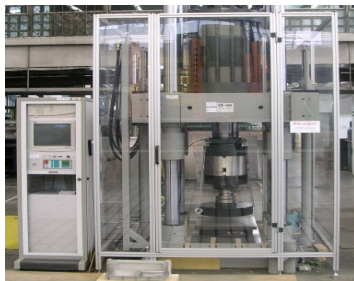
The test results were statistically processed. The minimum required number of samples were checked. Ten samples for each test period were used. Nondestructive tests were carried out in five measuring points on each sample. In total, 250 test results were obtained for each concrete. Calculations showed that the adopted number of samples was quite sufficient for assumed tolerance $\vartheta=0.05$ and significance level $\alpha=0.05$.

Table 1. Basic data on concretes A-L [2-4].

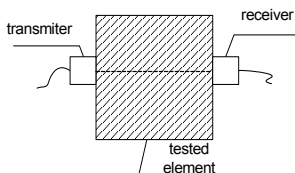
Type of concrete	Symbol of concrete	Concrete mix compositions [kg/m ³]						Type of aggregate Max. grading	W/C	Compressive strength f_{cm} [MPa]
		cement (class)	water	aggregate	superplasticizer	fly ash	silica fumes			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ordinary	A	375 (35)	150	1931	0	0	0	rounded 20 mm	0,400	24
	B	450 (35)	150	2092	0	0	0	rounded 20 mm	0,333	32
	C	400 (40)	160	2048	0	0	0	crushed basalt 16 mm	0,400	45
with fly ash	D	264 (32,5)	174	1823	1,32	0	0	rounded 16 mm	0,660	25
	E	264 (32,5)	182	1713	1,32	80	0	rounded 16 mm	0,660	27
	F	264 (32,5)	177	1798	1,32	20	0	rounded 16 mm	0,660	28
self-compacting	G	343 (42,5)	241	1585	6,67	113	0	rounded 2 mm	0,528	28
	H	325 (42,5)	195	1643	3,25	109	0	rounded 8 mm	0,449	31
	I	335 (42,5)	164	1645	3,15	143	0	rounded 16 mm	0,343	35
high-performance concrete	J	450 (42,5)	180	2029	0	0	0	crushed basalt 16 mm	0,400	71
	K	450 (42,5)	146	2084	9,00	0	0	crushed basalt 16 mm	0,324	85
	L	450 (42,5)	140	2069	13,50	0	31,50	crushed basalt 16 mm	0,291	105

Figure 1 shows the strength tester and the NDT equipment used and the idea how the parameters are measured by the particular nondestructive methods. A fragment of the data set created for concrete 1 is shown in table 2. The increase in compressive strength over time for concretes J, K and L is illustrated in fig. 2.

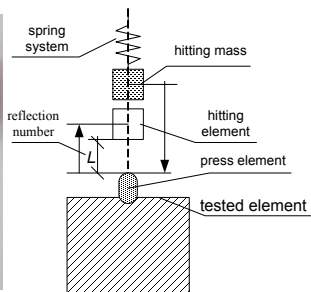
a)



b)



c)



d)

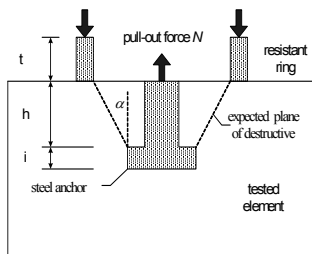


Fig. 1. Testing equipment and idea of measurement: a) strength tester, b) ultrasonic device for measuring longitudinal ultrasonic wave velocity c_L , c) Schmidt sclerometer for measuring rebound number L , d) device for measuring embedded in concrete steel anchor pull-out force N .

Table 2. Experimental test results for concrete L.

No.	Concrete age t_b [days]	Density ρ [kg/m ³]	Ultrasonic wave velocity c_L [km/s]	Rebound number L [-]	Pull-out force N [kN]	Compressive strength f_c [MPa]
1	2	3	4	5	6	7
1	3	2,488	4,060	38,0	48,8	59,10
2	3	2,490	4,155	36,0	50,2	60,30
3	3	2,516	4,133	39,0	49,1	63,60
...
51	7	2,519	4,217	39,0	62,0	68,60
52	7	2,538	4,247	41,0	65,2	72,90
53	7	2,536	4,295	39,0	64,7	71,30
...
101	14	2,539	4,255	43,0	64,5	73,30
102	14	2,520	4,225	43,0	63,3	70,00
103	14	2,530	4,231	42,0	63,6	71,30
...
151	28	2,543	4,322	46,0	76,0	86,50
152	28	2,545	4,322	45,0	78,1	87,20
153	28	2,560	4,356	45,0	79,6	88,40
...
248	90	2,580	4,370	50,0	90,7	99,90
249	90	2,589	4,348	52,0	91,7	100,20
250	90	2,591	4,376	51,0	93,4	101,90

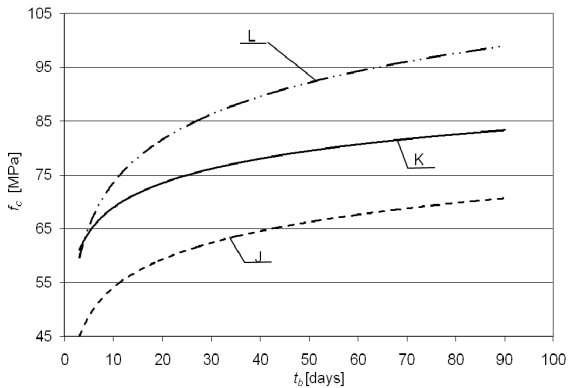


Fig. 2. Increase in strength over time for concretes J, K and L.

3. Empirical relations

In order to accurately determine the empirical relations between the compressive strength of the concretes and the parameters measured by the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method, calibration was performed in accordance with the principles and requirements contained in [5, 6]. The calibration results for concretes A-C and J-L are shown in table 3 and figure 3.

Figure 4 shows changes in nondestructively determined parameter values over time for respectively: longitudinal ultrasonic wave velocity c_L , rebound number L , embedded in concrete steel anchor pull-out force N for concretes J, K and L, determined by respectively the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method.

Table 3. Empirical relations for estimating compressive strength of concretes tested by respectively ultrasonic method, sclerometric method and pull-out method.

Concrete symbol	Empirical relation	Accuracy parameters		
		coefficient of variation v_{f_c}	coefficient of determination R^2	coefficient of correlation $\eta_{y/x}$
1	2	3	4	5
A	$f_c = 2 * 10^{-6} c_L^{10,728}$ $f_c = 0,0004 L^{3,1306}$	$v_{f_c} = 6,4$	$R^2 = 0,757$ $R^2 = 0,873$	$\eta_{c/f_c} = 0,870$ $\eta_{L/f_c} = 0,934$
B	$f_c = 0,0042 c_L^{5,7103}$ $f_c = 0,026 L^{1,9337}$	$v_{f_c} = 2,7$	$R^2 = 0,817$ $R^2 = 0,843$	$\eta_{c/f_c} = 0,904$ $\eta_{L/f_c} = 0,918$
C	$f_c = 7 * 10^{-5} c_L^{8,2783}$ $f_c = 0,0014 L^{2,8212}$	$v_{f_c} = 7,8$	$R^2 = 0,803$ $R^2 = 0,824$	$\eta_{c/f_c} = 0,896$ $\eta_{L/f_c} = 0,908$
.
.
.
J	$f_c = 0,0178 c_L^{5,5707}$ $f_c = 0,0724 L^{1,827}$ $f_c = 2,3606 N^{0,8443}$	$v_{f_c} = 1,8$	$R^2 = 0,926$ $R^2 = 0,966$ $R^2 = 0,953$	$\eta_{c/f_c} = 0,962$ $\eta_{L/f_c} = 0,983$ $\eta_{N/f_c} = 0,976$
K	$f_c = 0,0034 c_L^{6,7644}$ $f_c = 0,517 L^{1,3027}$ $f_c = 3,5902 N^{0,7176}$	$v_{f_c} = 1,3$	$R^2 = 0,926$ $R^2 = 0,957$ $R^2 = 0,972$	$\eta_{c/f_c} = 0,962$ $\eta_{L/f_c} = 0,978$ $\eta_{N/f_c} = 0,986$
L	$f_c = 0,0011 c_L^{7,7145}$ $f_c = 0,0701 L^{1,8584}$ $f_c = 2,296 N^{0,833}$	$v_{f_c} = 1,4$	$R^2 = 0,930$ $R^2 = 0,953$ $R^2 = 0,972$	$\eta_{c/f_c} = 0,964$ $\eta_{L/f_c} = 0,976$ $\eta_{N/f_c} = 0,986$

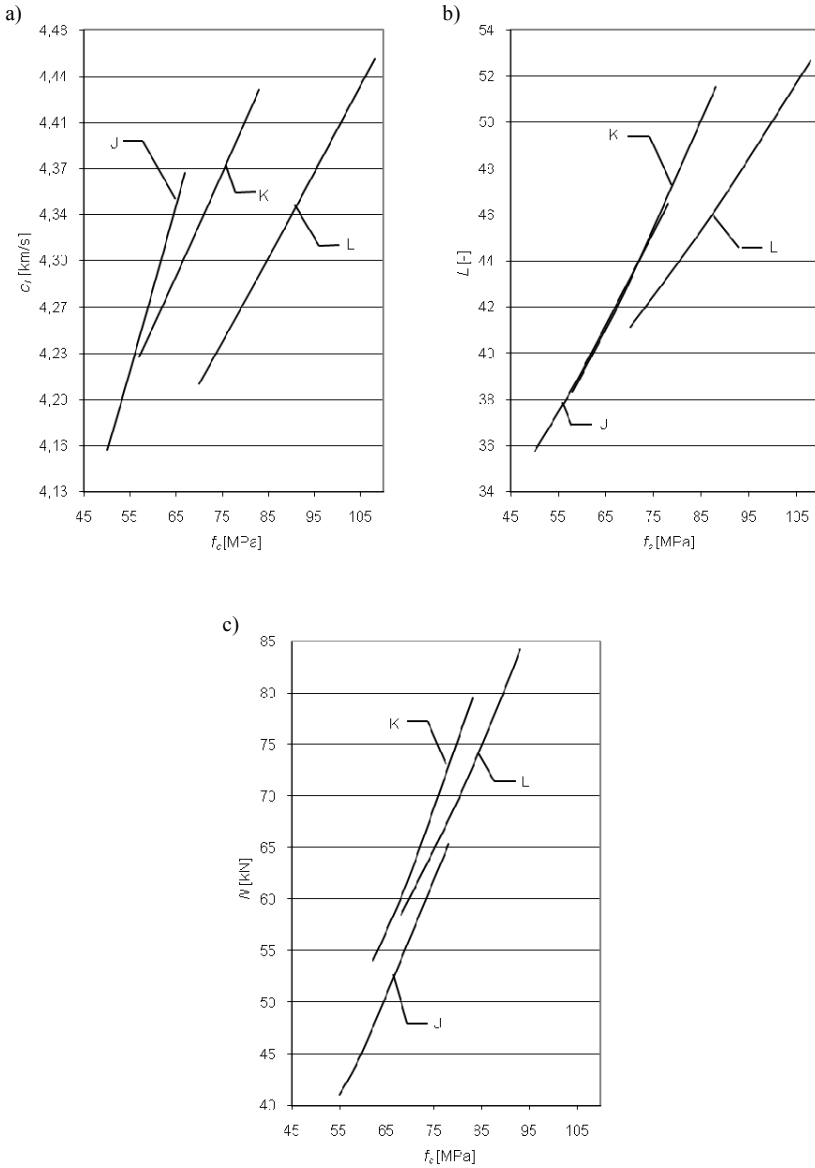


Fig. 3. Empirical relations for estimating compressive strength of concretes J, K and L tested by: a) ultrasonic method, b) sclerometric method, c) pull-out method.

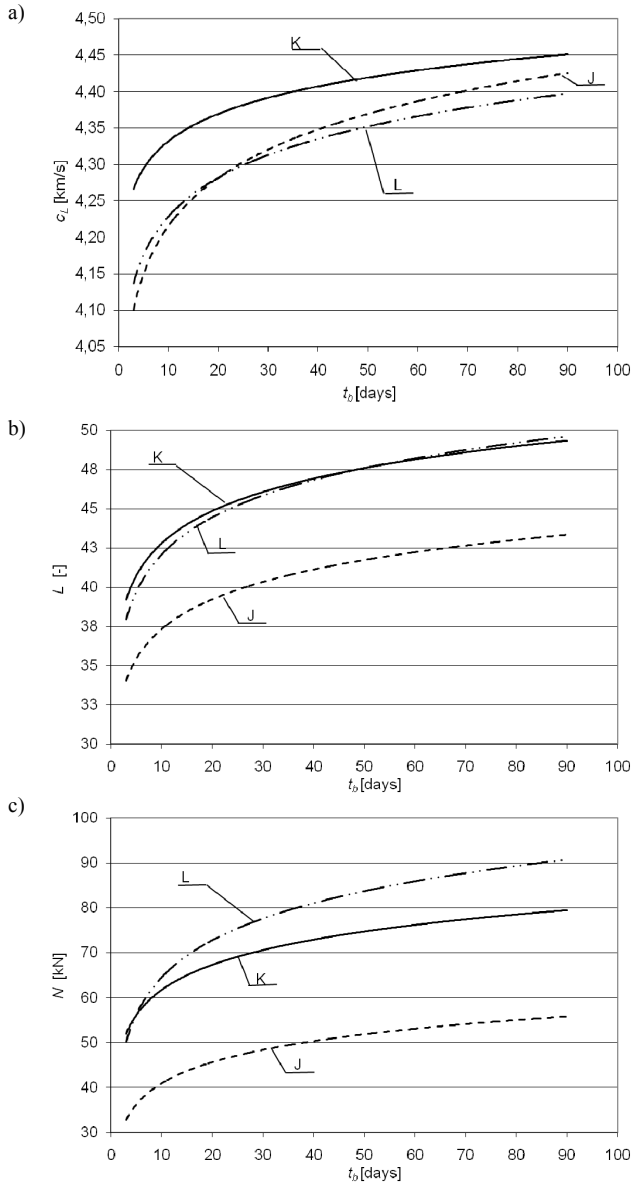


Fig. 4. Longitudinal ultrasonic wave velocity c_L , rebound number L and embedded in concrete steel anchor pull-out force N versus time, determined by: a) ultrasonic method, b) sclerometric method and c) pull-out method for concretes J, K and L.

4. Conclusion

As a result of the investigations empirical relations between the compressive strength of the twelve tested concretes with similar compositions and the parameters determined by the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method have been established. The obtained results show that even slight differences between the compositions of the concretes may lead to significant errors in nondestructive strength estimations when one uses correlation curves determined for other "similar" concretes. Therefore it is recommended to determine exact correlations for each of such concretes.

Also longitudinal ultrasonic wave velocity c_L , rebound number L , embedded in concrete steel anchor pull-out force N versus time, determined by respectively the ultrasonic method, the sclerometric method and the pull-out method in nondestructive laboratory tests have been presented. The results can be particularly useful for all kinds of nondestructive tests used in engineering practice. The aim of such tests is usually to determine the characteristics of concrete which has not reached its full compressive strength yet. Typically floors, formworked monolithic walls (when one needs to find out if the formwork can be already removed) and foundation piles (whose current mechanical parameters, e.g. strength, cross-sectional homogeneity and length, need to be nondestructively determined before the pile can be subjected to loading) are tested in this way.

REFERENCES

1. ASTM C 900-87, Standard test method for pullout strength of hardened concrete. American Society for Testing and Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103, USA.
2. Gorzelańczyk T., Hoła J., Assessment of the failure of compressed self-compacting concretes by acoustic methods (in Polish), 34th National Conference on Nondestructive Tests, Zakopane, 2005.
3. Hoła J., Gorzelańczyk T., Schabowicz K., "The empirical dependences of the self-compacting concrete strength estimated by nondestructive techniques". 32 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Międzyzdroje, 2003.
4. Hoła J., Kapelko A., Schabowicz K., "Nondestructive assessment of the strength of self-compacting concrete". 4th International Conference Techsta, Prague, 2004, pp. 38.
5. Manual for the use of the ultrasonic method in the nondestructive control of the quality of concrete in structures (in Polish), ITB, Warsaw, 1977.
6. Manual for the use of Schmidt hammers in the nondestructive control of the quality of concrete in structures (in Polish), ITB, Warsaw, 1977.
7. Jamróży Z., Concrete and its technologies (in Polish), PWN, Warsaw, 2000.
8. Neville A.M., Property of concrete. Polski Cement, Krakow, 2000.
9. PN-EN 12504-2:2002 Testing concrete in structures Part 2. Non-destructive testing. Determination of rebound number.
10. PN-EN 12504-3:2006 Testing concrete in structures Part 3: Determination of pull-out force.
11. PN-EN 12504-4:2005 Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity.



ULTRASONIC ANGLE BEAM TRANSDUCERS WITH STABIL PROPERTIES IN LARGE TEMPERATURE RANGE

ÚHLOVÉ DVOJITÉ ULTRAZVUKOVÉ SONDY SE STABILNÍMI VLASTNOSTMI V ŠIROKÉM ROZSAHU TEPLOT

Syasko V., Sevastyanov V.
NDT1 Kraft s.r.o., Praha

Abstrakt

Referát je věnován otázkám vývoje a použití termostabilních úhlových piezoelektrických sond s úhlem vstupu 70° v připojitelných a mobilních prostředcích souvisele ultrazvukové kontroly železničních kolejí.

Ve velké části evropského území se ultrazvuková kontrola provádí v různých sezónně-klimatických podmínkách, přičemž teplota vzduchu, předmětu kontroly i sond se může měnit v širokém rozmezí dokonce během jednoho pracovního dne. Tak například mechanizovaná a automatizovaná ultrazvuková kontrola kolejí se provádí jak v zimě, při teplotě do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Skandinávské země a Rusko), tak i v létě, kdy se koleje na slunci zahřívají až do $+60$ i více stupňů Celsia.

Je známo, že změna teploty tradiční úhlové (prizmatické) sondy (dále PES) je prováděna změnou úhlu vstupu svazku α do kontrolovaného objektu (v důsledku změny rychlosti podélné vlny v materiálu optického hranolu) a citlivosti (v důsledku změny koeficientu tlumení podélné vlny v materiálu optického hranolu). K analogickým jevům dochází také v kontrolovaném objektu, nicméně jsou zanedbatelně malé ve srovnání s jevy v optickém hranolu sondy.

Výpočet podle Snellova zákona například ukazuje, že pro PES s nominálním úhlem vstupu 70° změna rychlosti zvuku v optickém hranolu z plexiskla vede ke změně úhlu vstupu v rozmezí $65^{\circ} \dots 75^{\circ}$ v rozsahu teplot $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

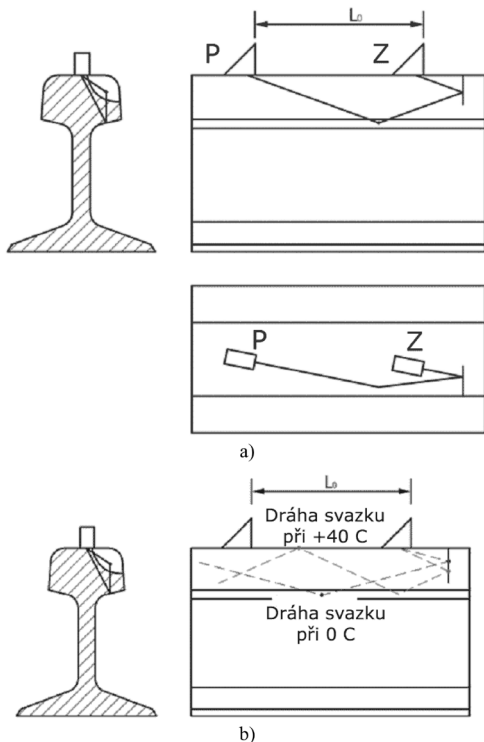
Co to může způsobit? Například při kontrole kolejí na trati je nezbytné odhalovat nebezpečné vady – vertikálně orientované příčné trhliny v hlavě kolejnice. Pro tuto kontrolu se mimo jiné používá zrcadlová metoda, jejíž schéma je uvedeno na obr. 1.

PES s frekvencí 2,5 MHz s nominálním úhlem vstupu 70° jsou umístěny v předem vypočítaném úseku L_0 . Nominálního úhlu vstupu se dosahuje při teplotě $t = 20^\circ\text{C}$. Při tom se v případě výskytu vady fixuje zrcadlově odražený signál, tak jak je uvedeno na obr. 1.a. Pokud se v důsledku změny teploty změnil úhel vstupu PES, dochází k narušení schématu kontroly, jak je uvedeno na obr. 1.b. Při výskytu vady zrcadlově odražený signál nedosahuje přijímací PES a dochází k vynechání vady.

Celkově se klade důraz na dva způsoby řešení:

- použití souboru tradičních PES, z nichž každá zajišťuje požadovaný úhel vstupu v úzkém rozsahu teplot (tj. PES pro chladné, normální a parné pracovní podmínky);

- vývoj PES na základě optických hranolů z nového materiálu, zajišťujícího termostabilitu úhlu vstupu paprsku a výrazně vyšší odolnost vůči opotřebení ve srovnání s plexisklem (PES s optickým hranolem z plexiskla je nezbytné měnit každých 200-300 km zkontrolovaných kolejí železniční trati).



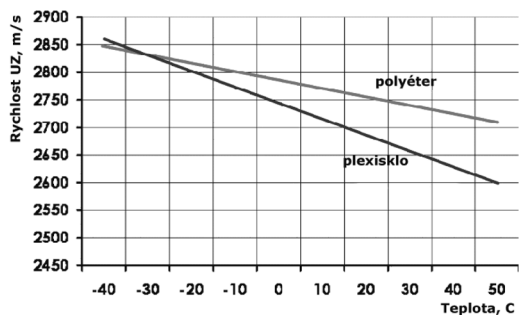
Obr. 1. Schéma vyhledávání trhlin v hlavě kolejnice:
a) zjištění vady při dodržení zadaného úhlu vstupu, $t = 20^\circ\text{C}$;
b) vynechání vady při porušení úhlu vstupu, $t = 0^\circ\text{C}$
a $t = 40^\circ\text{C}$

Druhá varianta vyžaduje použití speciálních materiálů optického hranolu, pro něž je možné zformulovat následující požadavky:

- stálost mechanických vlastností materiálu v rozsahu $-50^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C}$ (minimálně);
- nízká závislost rychlosti zvuku na teplotě;
- nízká závislost koeficientu tlumení zvukových vln na teplotě;
- nízký koeficient teplotní roztažnosti, blízký koeficientu pro piezokeramickou destičku;
- nízká hodnota koeficientu tření proti oceli.

Zformulovali jsme požadavky a vybrali jsme odpovídající materiál, představující sklem vyztuženou polyéterovou plastickou hmotu (dále polyéter). Provedená zkoumání prokázala, že pro výrobu optických hranolů úhlových PES s termostabilními vlastnostmi se více hodí tyče vyrobené metodou extruze.

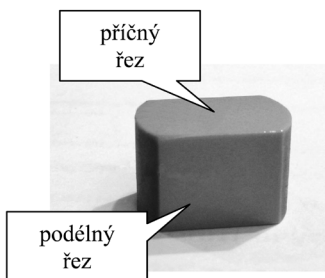
Zkoumali jsme závislost rychlosti zvuku v plexiskle a polyéteru na teplotě okolního prostředí, kontrolovaného předmětu a samotné sondy (obr. 2). U polyéteru dochází k menší změně rychlosti zvuku v daném rozsahu teplot.



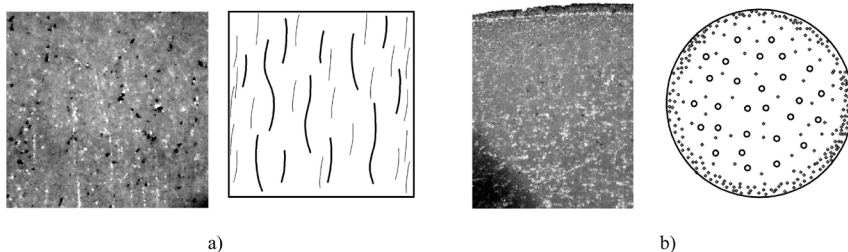
Obr. 2. Závislost rychlosti šíření ultrazvukových vln na teplotě prostředí u plexiskla a polyéteri

Studovali jsme mikrostrukturu polyéteri, jež má, jak je zobrazeno níže, principální význam pro jeho vlastnosti. K tomu byly vyrobeny vzorky materiálu, představující fragmenty extrudované tyče. Jeden ze vzorků je zobrazen na obr. 3. Vzorek má podélné a příčné broušené řezy.

Mikrostruktura materiálu byla zkoumána pomocí elektronového mikroskopu s šestisetnásobným zvětšením. Mikrostruktura řezů polyéteri a jejich schematické znázornění jsou uvedeny na obr. 4.



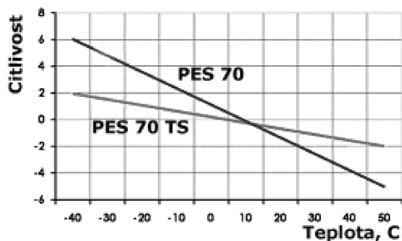
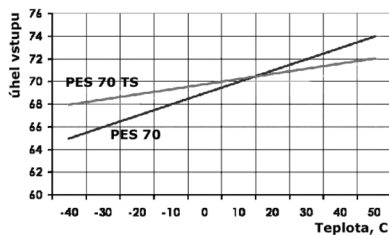
Obr. 3. Vzorek polyéteri



Obr. 4. Mikrofotografie řezů polyéteri a „vysvětlující“ schematické náčrty: a) podélného řezu; b) příčného řezu

U podélného řezu tyče jsou jasně viditelné nitě sklovlákna, probíhající ve směru extruze (obr. 4.a).

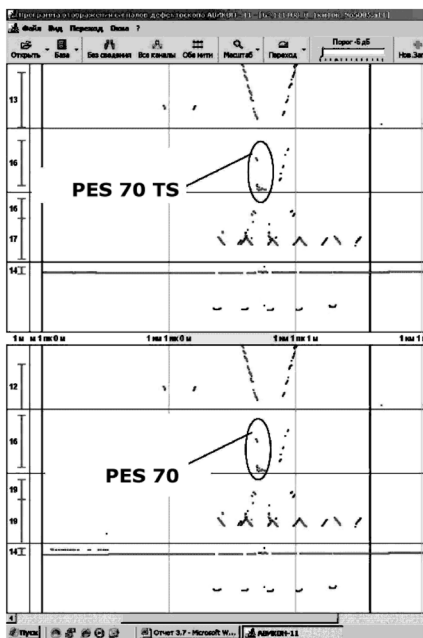
Na příčném řezu tyče (obr. 4.b) jsou vidět světlé body – čelní řezy sklovláken. Silnější vlákna se soustřeďují v jádru tyče a množství tenčích vláken je vytěšňováno k její stěně, což je vidět na fotografii jako světlá vrstva poblíž stěny. Tlumení zvuku je v této vrstvě podstatně vyšší než ve středové části tyče.



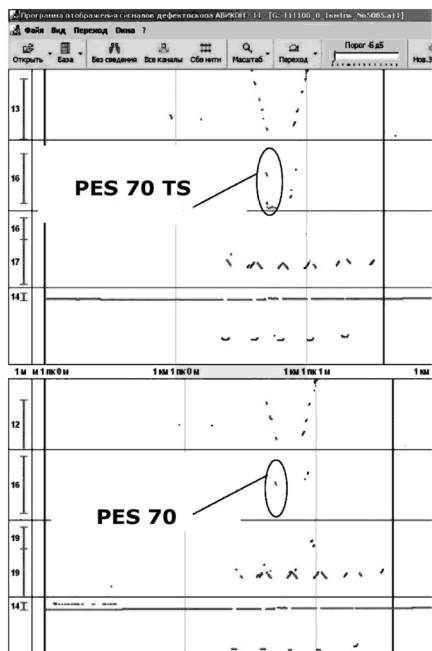
Obr. 7. Závislost vlastností PES na teplotě: a) úhlu vstupu; b) citlivosti

Jako příklad jsou na obr. 8 uvedeny defektogramy svarového spoje obsahujícího přirozený neprovar. Uvedené defektogramy jsou získány koncem září. Ráno, kdy teplota kolejniče a PES činila +5 °C, byla vada spolehlivě zjištěna jak tradiční, tak i nově vyvinutou PES (defektogramy na obr. 8.a). Ovšem při slunečném počasí v poledne, kdy se vzduch ohříval do +17 °C a kolejniče a PES do +27 °C, se u tradiční PES zvětšoval úhel vstupu, což vedlo k vynechání vady. Sonda s optickým hranolem z polyéteru rovněž spolehlivě odhalila vadu (defektogramy na obr. 8.b).

Během funkčních zkoušek, při nichž v jednom kanálu defektoskopu byly instalovány tradiční PES 70 a v druhém PES 70TS, byla potvrzena ještě jedna vlastnost – významně lepší odolnost vůči opotřebení. Po použití sond na 200 km kolejové trati, průměrné opotřebení činilo 1,5 mm u PES s optickými hranoly z plexiskla a 0,2 mm u PES 70TS. Zkoušky ukázaly, že sondy umožňují zkontrolovat více než 1300 km trati do opotřebení piezoelementu.



a)



b)

Obr. 8. Defektogramy svarového spoje kolejnic: a) ráno, +5 °C; b) poledne, +27 °C

Díky blízkým koeficientům teplotní roztažnosti optického hranolu, piezoelementu a licího izolantu sondy dobře snášejí poklesy teplot a mohou být použity ihned po přechodu z teplé místnosti do mrazivého prostředí.

Závěr

Vyvinuté s termostabilními vlastnostmi PES 70TS zaručeně odhalují vady stanovené metodikou kontroly v rozsahu teplot $-40\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$ a mají následující přednosti ve srovnání s optickými hranoly z plexiskla:

- změna pulzního koeficientu sondy činí $\pm 2\text{ dB}$;
- odchylka úhlu vstupu od nominální hodnoty maximálně $\pm 2^\circ$;
- o 10 dB menší hladina reverberačních ech v optickém hranolu PES;
- 5x větší doba provozu z hlediska opotřebení.

Výrobní cena PES 70TS je vyšší než výrobní cena PES o 50 % při současném zajištění podstatně delší doby použití a garantované spolehlivosti kontroly.

Uvedené faktory dovolují doporučit PES 70TS k použití v připojitelných a mobilních prostředcích souvislé kontroly kolejí v rozsahu teplot okolního prostředí od -40 °C do $+50\text{ °C}$



INFLUENCE OF PARAMETERS OF PARTICLE IMPACT ON SHAPE OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL VLIV PARAMETRŮ NÁRAZU ČÁSTICE NA TVAR SPEKTRA SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE

Miroslav UHER, Petr BENEŠ

Vysoké učení technické v Brně, FEKT-ÚAMT

Contact e-mails: xuherm02@stud.feec.vutbr.cz, benesp@feec.vutbr.cz

Abstract

One of the possible methods for generation of AE signal for non-destructive testing is an application of striking particles on device under test. Impacting particles generate an impulse AE, which is spreading by material of device. The state of the material is evaluated by sensing of AE signal at different locations on verified subject. For defectoscopic analysis it is useful to have the opportunity to influence the generated signal. The theory of impact implies that changes of the signal may be achieved by changing the parameters of impact (particle size and velocity, specific mass of the materials, elastic modulus and Poisson's constant of materials). The paper is therefore aimed at assessing the practical research of the influence of the impact parameters on the frequency spectrum of AE signal. Furthermore, comparison to theoretical knowledge was performed. The research was focused on the study of composition of the mixture created from particles of two different granularities. It also deals with the predictability of the shape of the spectrum AE signal and finding appropriate statistical parameters of AE, which are associated with parameters of impact and which can be used for this prediction. The present results show that it is possible to successfully determinate set of statistical parameters, linked to the impact parameters.

Key words: *acoustic emission, frequency spectrum, theory of impact, particle size.*

Abstrakt

Jednou z možných metod generování signálu akustické emise určeného pro defektoskopické metody je působení dopadajících částic na zkoumaný předmět. Částice při svém dopadu generují impulsní AE, která se šíří materiálem. Snímáním signálu AE na různých místech je vyhodnocován stav materiálu zkoumaného předmětu. Pro defektoskopickou analýzu je vhodné mít možnost generovaný signál ovlivňovat. Teoreticky je podloženo, že změny signálu lze dosáhnout pomocí změny parametrů nárazu (velikost částic a jejich rychlost, hustota materiálů, modul pružnosti a Poissonova konstanta materiálů). Článek je proto zaměřen na zhodnocení praktického výzkumu vlivu parametrů nárazu na frekvenční spektrum signálu AE a jeho srovnáním s teoretickými poznatky, přičemž hlavní pozornost byla věnována studiu odlišení směsi částic o dvou různých zrnitostech. Zabývá se také možnostmi predikce tvaru spektra AE a jeho cílem je nalézt vhodné statistické parametry spektra AE, které jsou s parametry nárazu spjaty a mohou být pro tuto predikci využity. Z dosavadních výsledků vyplývá, že je možné tyto statistické parametry provázané s parametry nárazu částice úspěšně stanovit.

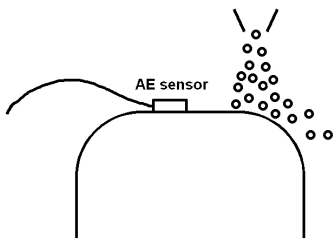
Klíčová slova: *akustická emise, frekvenční spektrum, teorie rázu, velikost částic.*

1. Úvod

Signál akustické emise pro defektoskopickou analýzu v praxi vzniká obvykle při mechanickém namáhání zkoumaného materiálu. Méně obvyklým způsobem je generování signálu s využitím rázu dopadajících částic na testovaný materiál. Během každého rázu částice dochází k deformaci povrchu částice a zkoumaného materiálu, při kterém se generuje impulsní akustická emise. Počáteční podmínky, se kterými tělesa do rázu vstupují, můžeme s jistotou dávkou abstrakce nazvat parametry nárazu. Tyto parametry pak definovaným způsobem určují nejenom vlastnosti rázu ale rovněž průběh generovaného signálu AE. Pro potřeby defektoskopické analýzy je vhodné znát teoretický vztah mezi parametry rázu a generovaným signálem, tato znalost totiž umožňuje opačný přístup: tedy přizpůsobení parametrů nárazu požadovanému tvaru signálu AE. Pokud v uvažovaném případě na zkoumaný materiál dopadají částice náhodně, lze signál AE popsat dostupnými statistickými parametry. Předložený článek se tedy věnuje zkoumání problematiky vlivu parametrů nárazu částic na signál AE a ověření vlivu zvolených parametrů na statistické parametry signálu AE.

2. Teorie rázu v literatuře

Ráz tělesa a jeho vliv na signál AE je známý a na jeho principu je například založeno mnoho měřících metod využívajících AE. Při použití v defektoskopii zkoumané těleso slouží jako umělá překážka padajícím částicím, na které tyto částice narážejí. Situaci ukazuje Obr. 1. Jak již bylo řečeno, rázy částic generují akustickou emisi, kterou snímáme. Vznik akustické emise lze vhodně popsat pomocí Hertzovy teorie rázu [4]. Hertzova teorie v limitním případě definuje vztahy pro dobu trvání rázu T a maximální velikost síly během rázu F_{max} . pro náraz sférického tělesa na rovinou desku. Tyto dvě veličiny mají zásadní vliv na tvar signálu akustické emise, F_{max} je spjata s velikostí generovaného signálu, T pak s časovým průběhem signálu AE. Aproximační vztahy ve vhodném tvaru (1) až (4) získané z Hertzovy teorie vyjadřuje Beneš a Zehnula [1]. Uvedené vztahy vyjadřují závislost na parametrech nárazu, které definuje Hertzova teorie. Každý z těchto parametrů se pak podílí na ovlivnění tvaru signálu AE.



Obr. 1 Vznik AE dopadem částic.

Fig 1 AE generation by colliding particles.

$$T \approx (\alpha_1 + \alpha_2)^{0,4} \rho^{0,4} v^{-0,2} r \quad (1)$$

$$F_{max} \approx (\alpha_1 + \alpha_2)^{-0,4} \rho^{0,6} v^{1,2} r^2 \quad (2)$$

kde:

T je doba trvání rázu,

F_{max} je maximální hodnota síly při rázu,

ρ je hustota materiálu sférického tělesa

v je rychlost narážejícího tělesa a

r je poloměr sférického tělesa.

$$\alpha_1 = \frac{1 - \mu_1}{G_1} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - \mu_2}{G_2} \quad (4)$$

kde:

μ_1 a μ_2 jsou Poissonovy konstanty materiálů částice a nárazové desky a G_1 a G_2 jsou moduly pružnosti obou materiálů částice a desky ve smyku.

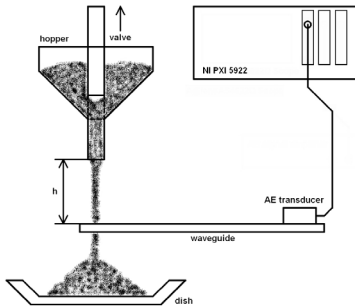
V literatuře se samostatně tato problematika nevyskytuje. Z hlediska studia vlivu nárazu na signál AE však studovanou problematiku nalézáme u autorů, kteří se věnují průtoku pevných částic. Většina autorů, kteří se zabývali měřením parametrů průtoku pevných částic pomocí signálu AE, se však omezilo pouze na měření střední hodnoty velikosti částic. Cao a kol. [3] analyzoval signál AE pomocí vlnkové transformace a mimo střední velikost částic zjišťoval ve své studii také energii AE a hmotnostní průtok částic. Měřením střední velikosti částic ve fluidní vrstvě se ve své práci věnuje Hou a kol [5], mj. se zabývá také predikcí nežádoucích shluků. Měření střední hodnoty průměru částic se velmi často objevuje při granulacích procesech, které se nejčastěji užívají ve farmaceutickém průmyslu. Na velikosti vytvořených granulí totiž závisí množství účinné látky obsažené ve vyrobených granulích. Akustická emise se zde vhodně uplatňuje při hledání tzv. koncového bodu granulace, tedy bodu, kdy vzniká největší množství granulí o požadovaných vlastnostech (velikost částic, obsah vlhkosti apod.). V této oblasti bylo provedeno již několik studií a metoda AE je v této oblasti nasazována i do praxe. Analýze průměrné velikosti granulí a predikci obsahu vlhkosti granulí se ve svých pracích věnují Matero a kol. [6] a Tsujimoto a kol. [7]. Konečně Briens a kol. [2] se ve své práci zabývá nalezením koncového bodu granulace v úzké souvislosti s velikostí částic a studuje vliv umístění senzoru AE.

Cílem tohoto článku je experimentální ověření vlivu parametrů nárazu na signál AE. V článku budou prezentovány výsledky prvních provedených měření v této oblasti, ve kterých byly sledovány parametry velikost částic a jejich rychlost.

3. Experimentální pracoviště

Schéma měřicího systému pro prováděné experimenty je zachyceno na Obr. 2, jeho reálná podoba pak na Obr. 3. Měřicí aparatura se skládala ze zásobníku, umístěného nad záchytnou nádobou. Zásobník byl ovládán ventilem. Jako měřený materiál byly využity keramzitové granule, používané ve stavebnictví. Mezi zásobníkem a nádobou byla pak vložena překážka tak, aby na ni dopadaly protékající pevné částice. Jako překážka byl použit duralový úhelník, který sloužil zároveň jako vlnovod pro přenos ultrazvukových vln AE ke snímači AE. Jako snímač AE byl použit piezoelektrický snímač AURA SV 416. Signál ze snímače byl bez dalších úprav přiveden přímo na vstup měřicí karty NI PXI 5922. Tato karta obsahuje 24bitový vysokorychlostní A/D převodník. Naměřený signál byl zpracováván pomocí NI LabVIEW 8.5. Pro zpracování dat byla sestavena vhodná měřicí aplikace. Tato aplikace umožnila přímý výpočet výkonového spektra z naměřených dat pomocí FFT. Aplikace zároveň prováděla záznam vypočítaného spektra na pevný disk počítače. Ze záznamu spektra byly pro následující analýzu vypočítány průměrné hodnoty spektrálních čar. Průměr byl získán ze souboru 1000 po sobě jdoucích

spekter, které byly získány v době, kdy na překážku dopadaly granule. Signál AE byl na měřicí kartě měřen při zvoleném rozsahu 10 V. Pro výpočet výkonového spektra pomocí FFT bylo použito 1024 vzorků se zvolenou Hanningovou oknovací funkcí. Záznamová rychlost karty byla nastavena 256 kS/s.



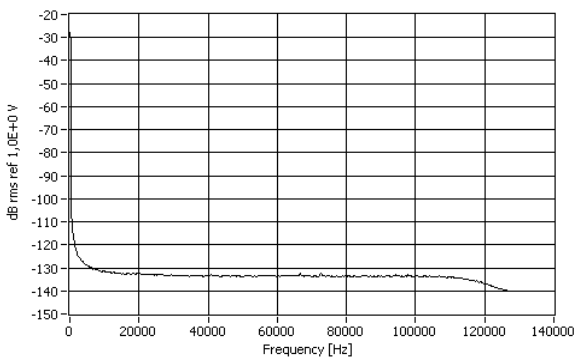
Obr. 2 Schéma pracoviště.
Fig 1 Scheme of workplace.



Obr. 3 Reálné uspořádání pracoviště.
Fig 3 Real arrangement of workplace.

4. Výsledky a diskuse

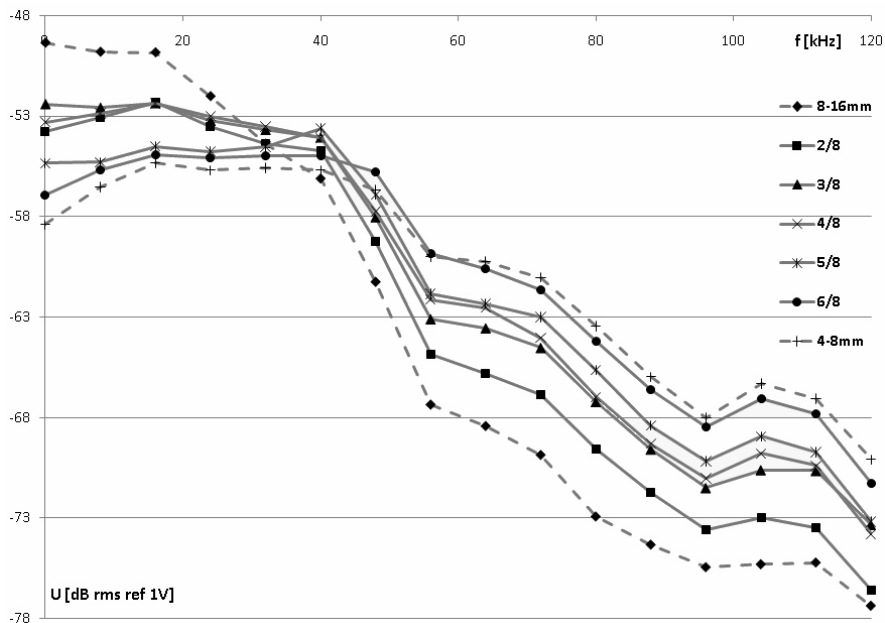
Před vlastními experimenty byl proměřen vlastní šum piezoelektrického snímače AE AURA SV 416 a byla provedena zkušební měření s keramzitovými granulemi. Pomocí těchto měření bylo určeno vhodné frekvenční pásmo, ve kterém je změna amplitud spektra nejvýraznější a má je proto smysl analyzovat. Toto pásmo bylo určeno jako 0-128 kHz, čemuž odpovídá zvolený počet vzorků a vzorkovací frekvence. Naměřené výkonové spektrum šumu snímače je uvedeno v grafu na Obr. 4.



Obr. 4 Výkonové spektrum použitého snímače AE ve zvoleném frekvenčním pásmu.
Fig 4 Power spectrum of noise of used AE transducer in selected frequency range.

První částí provedených měření bylo experimentální ověření vlivu parametru velikosti částic. Z uvedené Hertzovy teorie rázu vyplývá, že doba rázu částic T a maximální síla působící během rázu F_{max} ovlivňuje velikost amplitudy spektrálních čar. Mělo by tedy platit, že menší částice by měly vykazovat nižší amplitudy spektrálních čar na nižších frekvencích, kdežto na vyšších frekvencích by měly mít spektrální čáry vyšší amplitudy. Naopak u větších granulí by mělo platit, že vyšší amplitudy spektrálních čar by se měly nacházet na nižších frekvencích, zatímco na frekvencích vyšších by pak měly mít spektrální čáry nižší amplitudu.

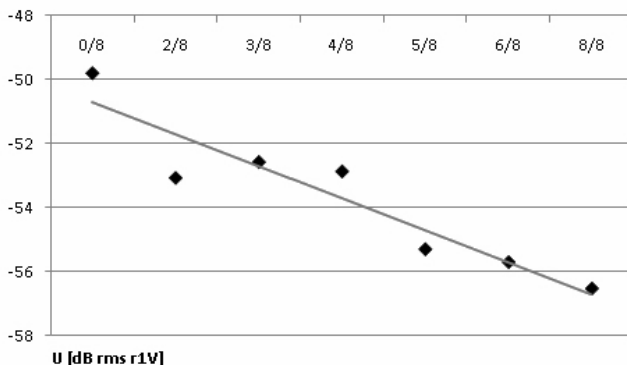
Pro zjištění platnosti výše uvedeného předpokladu byl zvolen následující experiment. K dispozici byly dvě frakce keramzitových granulí s velikostí částic 4-8mm a 8-16mm. Obě frakce byly pomocí měřicí aparatury sypány ze stejné výšky (15 cm) a byla změřena výkonová spektra takto vzniklého signálu AE. V další fázi bylo vytvořeno pět hmotnostních směsí těchto frakcí. Tyto směsi byly míchány v poměru malé granule/celková hmotnost jako směsi 2/8, 3/8, 4/8, 5/8 a 6/8. Pro uvedené směsi byla rovněž naměřena výkonová spektra (výška, ze které částice dopadaly, byla opět 15 cm). Pro základní statistické zpracování signálu a průkaznější porovnání získaných spekter mezi sebou bylo zvoleno zpracování naměřených amplitud v pásmech frekvencí se stejným krokem. Krok jednotlivých frekvenčních intervalů byl zvolen 8 kHz, v těchto frekvenčních pásmech byly vypočítány průměrné hodnoty amplitud spekter a tyto hodnoty byly zakresleny do grafu uvedeného na Obr. 5.



Obr. 5 Analyzovaná data pro vytvořené směsi frakcí částic (malé částice/celky).

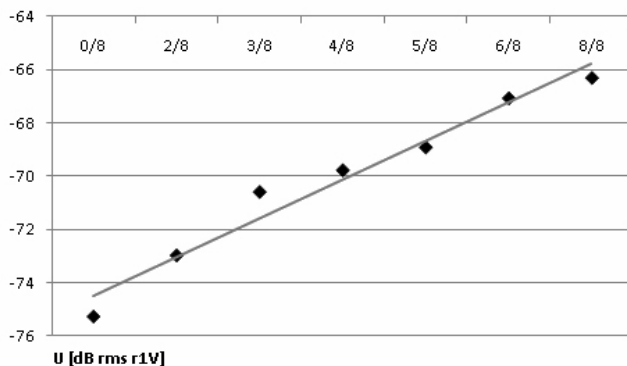
Fig 5 Analyzed data for mixtures (the fractions expressed part of smaller particles).

Z grafu uvedeného na Obr. 5 je vidět, že analyzovaná spektra získaná pro obě frakce granulí (jsou v grafu vyznačeny jako limitní křivky přerušovanou čarou) a jejich hmotnostní směsi velmi dobře odpovídají teoretickým předpokladům. Směsi částic s vyšším obsahem menších částic mají větší amplitudy na vyšších frekvencích a směsi s převahou větších částic mají maxima amplitud spektrálních čar umístěna na nižších frekvencích, které odpovídají delší době rázu. Přehledně jsou velikosti amplitud výkonových spekter uvedeny v grafech na Obr. 6 (pro nižší frekvence v pásmu 8-16 kHz) a na Obr. 7 (pro vyšší frekvence v pásmu 104-112 kHz). Z těchto grafů lze jasně vidět, že drobnou odchylku od teoretického průběhu amplitud můžeme pozorovat pouze u směsi 2/8 (pro menší granule) na nižších frekvencích.



Obr. 6 Průměrné amplitudy spektrálních čar jednotlivých směsí, pásmo 8-16 kHz.

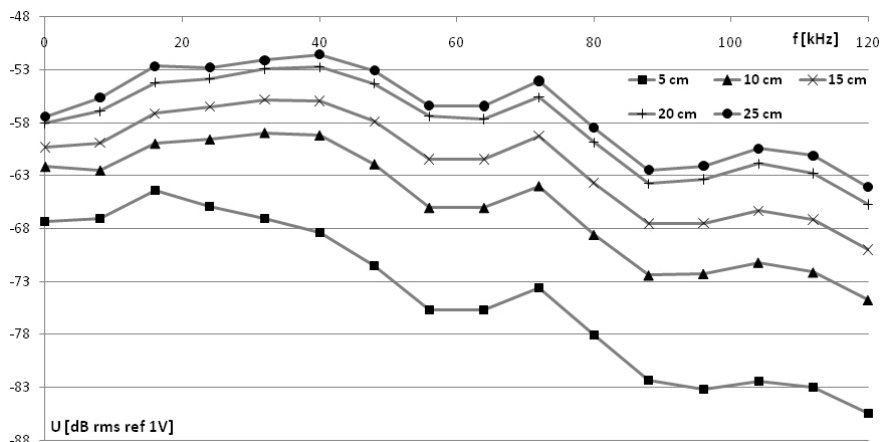
Fig 6 Average amplitudes of spectral lines of mixtures in frequency range 8-16 kHz.



Obr. 7 Průměrné amplitudy spektrálních čar jednotlivých směsí, pásmo 102-114 kHz.

Fig 7 Average amplitudes of spectral lines of mixtures in range 102-114 kHz.

Ve druhé části provedených měření byla experimentálně ověřena závislost tvaru spektra na rychlosti dopadajících částic. Pro experiment byla zvolena pouze jedna frakce keramzitových granulí o velikosti částic 4-5 mm. Změna rychlosti dopadajících částic byla realizována v tomto měření velmi triviálně pomocí změny výšky, ze které částice na hliníkový úhelník dopadaly. Výška se během experimentu měnila po konstantním kroku 5 cm. Samotné měření se pak nelišilo od měření vlivu velikosti částic, výpočet spekter probíhal se stejnými parametry a stejná byla také následná analýza průměrováním amplitud spekter ve zvolených frekvenčních krocích. Získaná analyzovaná data jsou zobrazena v grafu na Obr. 8.



Obr. 8 Analyzovaná data pro částice 4-5 mm s různou rychlostí (výškou dopadu).

Fig 8 Analyzed data for particles (fraction 4-5 mm) with different velocities (the change of impacting particles velocities was made by the change of height).

Z uvedeného grafu na Obr. 8 vyplývá, že změna rychlosti částic má vliv na celou křivku spektra v analyzované oblasti. Při změně parametru rychlosti tedy zjevně nedochází ke změnám amplitud spektrálních čar rozdílně v určitých pásmech, jako tomu bylo v případě parametru velikosti částic, ani nedochází ke křížení mezi jednotlivými spektry. Se zvyšující se rychlostí částic dochází pouze k posunu celého spektra směrem k vyšším amplitudám spektrálních čar. Příčinu těchto skutečností lze hledat v teoretické závislosti parametrů měřeného signálu AE na vstupních parametrech, které se mění. Vrátime-li se ke vztahům (1) a (2), vidíme, že změna maxima síly během rázu F_{max} se mění v závislosti na rychlosti s mocninou $v^{1,2}$, kdežto doba rázu se mění se změnou rychlosti mnohem méně a navíc opačným směrem s mocninou $v^{0,2}$. Posun amplitud spektrálních čar se proto na frekvenční ose v uvedené analýze téměř neprojevuje, zatímco změna amplitudy spektrálních čar je výrazná. Naproti tomu ve spektrech získaných pro směsi částic s různými velikostmi se jasně projevuje vliv velkých vah r^1 pro dobu rázu a r^2 pro velikost amplitudy síly během rázu.

5. Závěr

Článek shrnuje provedené experimenty a následnou analýzu signálu AE při ověřování vlivu parametrů nárazu na tvar spektra tohoto signálu. Z prvních provedených měření vyplývá, že tvar spektra je možné pro potřeby defektoskopické analýzy ovlivňovat. Praktické výsledky potvrzují předpoklady získané z Hertzovy teorie rázu. Prakticky byl proměřen vliv velikosti částic a jejich rychlosti na tvar spektra signálu AE. Bylo potvrzeno, že změnou velikosti částic lze ovlivňovat pomyslnou směrnicí sklonu naměřeného výkonového spektra signálu. Při měření vlivu změny rychlosti částic bylo ověřeno, že se tato změna projeví nejvíce v posunu tvaru výkonového spektra v ose amplitud spektrálních čar. Zjištěné poznatky mohou sloužit k vhodnému nastavení velikosti a rychlosti dopadajících částic na zkoumaný objekt pro získání generovaného signálu AE o vhodných parametrech, například pro přizpůsobení generovaného signálu zvolenému snímači AE. Rovněž bylo ověřeno, že pomocí vhodné statistické analýzy signálu je možné spektra kvantitativně srovnávat z hlediska vstupních parametrů a je možné částečně zpětně predikovat, jaké bude rozložení těchto parametrů na základě znalosti vstupních parametrů nárazu. Studium této problematiky na našem pracovišti dále pokračuje hledáním vztahů mezi statistickými parametry spektra a parametry nárazu dopadajících částic.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky (Výzkumný záměr MSM0021630529 Inteligentní systémy v automatizaci), Grantové agentury ČR (102/09/H081 SYNERGIE – Mobilní senzorické systémy a sítě) a Vysokého učení technického v Brně. Bez podpory výše uvedených institucí by prezentovaný výzkum nebyl možný.

Použitá literatura

- [1] BENEŠ, P., ZEHNULA, K. New design of two-phase flowmeters. *Elsevier: Sensors and Actuators A: Physical*. November 2000, Volume 48, s. 220-225. ISSN: 0924-4247.
- [2] BRIENS, L., DANIHER, D., TALLEVI, A. Monitoring high-shear granulation using sound and vibration measurements. *Elsevier: International Journal of Pharmaceutics*. February 2007, Volume 331, s. 54-60. ISSN: 0378-5173.
- [3] CAO, Y., WANG, J., YANG, Y. Multi-scale analysis of acoustic emissions and measurement of particle mass flowrate in pipeline. *Journal of Chemical Industry and Engineering*. June 2007, Volume 58, No. 6, s. 1404-1410. ISSN: 0438-1157.
- [4] GOLDSMITH, W. *Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids*. London: Edward Arnold Publishers, 1960. 396 s. ISBN: 0-486-42004-3.
- [5] HOU, R., HUNT, A., WILLIAMS, R. A. Acoustic monitoring of pipeline flows: particulate slurries. *Elsevier: Powder Technology*. November 1999, Volume 106, s. 30-36. ISSN: 0032-5910.
- [6] MATERO, S., et al. The feasibility of using acoustic emissions for monitoring of fluidized bed granulation. *Elsevier: Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. December 2008, Volume 97, s. 75-81. ISSN: 0169-7439.
- [7] TSUJIMOTO, H., et al. Monitoring particle fluidization in fluidized bed granulator with an acoustic emission sensor. *Elsevier: Powder Technology*. November 2000, Volume 113, s. 88-96. ISSN: 0032-5910.



MONITORING OF ACOUSTIC EMISSION IN DESTILA MICRO-BREWERY

MONITOROVÁNÍ AKUSTICKÉ EMISE V MIKROPIVOVARU DESTILA

Varner D.¹, Černý M.²

^{1,2} Department of Engineering and Automobile Transport, Faculty of Agronomy,
Mendel University, Brno, Czech Republic, e-mail: info@davar.cz

Abstract

The acoustic emission (AE) method has been used to monitor fermentation process in Destila micro-brewery. In the pilot phase of the research, 3 piezoelectric sensors have been placed on the outside of the cylindroconical fermentation tank assembly and acoustic signals have been measured continuously for the entire fermentation period. The sensors' purpose was to "hear" carbon dioxide bubbles emerging inside of the fermentation tank and to pass signals to the AE analyzer/laptop PC for further processing. As the fermentation tank is made from Cr/Ni stainless steel, several issues have been registered including sound wave propagation modes within the tank body.

Keywords: beer, fermentation, tank, cylindroconical fermenter, acoustic emission

Abstrakt

Kvašení mladiny v mikropivovaru Destila bylo sledováno pomocí akustické emise (AE). V pilotní fázi výzkumu byly na cylindrokonický kvasný tank upevněny 3 piezoelektrické snímače AE a signály AE byly měřeny po celou dobu kvašení. Úkolem snímačů bylo zachytit tvorbu a vývoj bublinek CO₂ vznikajících při kvasných procesech v mladině. Tím by bylo možné charakterizovat intenzitu kvašení v tanku. Při měření byly zjištěny problémy s přenosem akustického signálu, pravděpodobně i díky složení materiálu tanku, kterým je chromniklová nerezavějící ocel.

Klíčová slova: pivo, kvašení, tank, cylindrokonický kvasný tank, akustická emise

Introduction

Beer fermentation has been monitored using acoustic emission (AE) method that is able to „hear“ small acoustic impulses or noise inside of objects or vessels. The aim of the experiment was to determine whether AE can reliably distinguish fermentation process properties for various beer types. As the temperature of the tank content has been monitored on a continuous basis by an automated system, the AE was expected to provide another parameter of the process.

The technique is unique for its simple concept. No immerse devices are required, no special environment specifications need to be taken into account. If sufficient results are available, automatic fermentation-control devices might be developed including AE monitoring sensors. Similar systems could be used to control vine fermentation process in the future.

Beer Fermentation Basics

Fermentation is the process by which fermentable carbohydrates are converted by yeast into alcohol, carbon dioxide, and numerous other byproducts. It is these byproducts that have a considerable effect on the taste, aroma, and other properties that characterize the style of beer. [1]

Cylindroconical fermenters are the most commonly used fermentation systems used today to produce both lagers and ales. As the name implies, the enclosed vessels are vertical cylinders with a conical base and, normally, a dished top. This design allows for easy yeast collection and CIP cleaning. They range in size between 100 and 7,000 hl, have from a 1:5 to a 3:1 ratio of height to diameter, and work under pressures of from 1 to 1.3 bars above atmospheric pressure. In fermentation vessels with a ratio greater than 3:1, there is a tendency for increased production of higher alcohols at the expense of esters. Vessel geometry plays an important role in fermentation. As the height-to-diameter ratio increases, so does the mixing of yeast and wort, as well as the fermentation rate. [1]

Acoustic Emission Method

Acoustic emissions are the stress waves produced by the sudden internal stress redistribution of the materials caused by the changes in the internal structure. Possible causes of the internal-structure changes are crack initiation and growth, crack opening and closure, dislocation movement, twinning, and phase transformation in monolithic materials and fiber breakage and fiber-matrix debonding in composites. Most of the sources of AEs are damage-related; thus, the detection and monitoring of these emissions are commonly used to predict material failure. In technical diagnostics, AE method has been used to monitor rotational part status (friction and cavitation of bearings/gears), detection of micro-cracks, pressure vessel defects, tubing system defects, aircraft structure evaluation/testing, and bridge status diagnostics. AE technique has proven useful in fatigue testing and destruction experiments. Major advantages of AE include continuous monitoring of the object, time savings, and forecast abilities of the concept. On the other hand, AE wave source is not always obvious, as the emitted energy may result from several phenomena inside of the part. Further variable factors include shape of the object, surface area, material structure, and homogeneity level. [2]

Destila Micro-Brewery

In Mendel University, there is a Destila micro-brewery in the food production laboratory of the Department of Agriculture, Food and Environmental Engineering. The Destila system serves for model and/or analysis purposes. It allows for amount modifications of malt, hops, yeasts, and other ingredients. The temperature can be streamlined within the actual brewing process as well. The variable configuration features make the micro-brewery an ideal ground for various research projects. Figure 1 shows the fermentation section of the micro-brewery.

The Destila micro-brewery consists of the following main components: mash tun, cooling system, open fermentation tank, storage tank, cylindroconical fermenter, filtration/racking tank, and accessory (electric, boiler, cooling system, and filtration).

In this experiment, beer fermentation process in cylindroconical fermenter tank has been subject to AE monitoring. This device allows for combined and streamlined fermentation process as opposed to primary fermentation in open fermentation tank and secondary fermentation in storage tank. The cylindroconical fermenter is made from Cr/Ni stainless steel.



Figure 1: Fermentation part of Destila micro-brewery facility. The cylindroconical fermenter is in the foreground. Photo by D. Varner

Experimental Setup

Three piezoelectric sensors have been glued to the tank body and accessory (SENSOR1, SENSOR2, and SENSOR3). Each sensor featured a different position with relation to the hopped wort inside the tank. The objective of sensor positioning was to establish the closest possible acoustic contact with the actual hopped wort in the tank vessel. However, this has become quite complicated as the body of fermenter features a two-layer welded structure. Reason for this is a convenient glycol-based cooling system that helps to maintain standard conditions for the fermentation process. The concept of sensor engagement was to capture development of carbon dioxide bubbles inside the tank and occasionally register their destruction on the surface of the hopped wort in a way of sound wave.

SENSOR1 has been placed on the bolt head of the temperature gauge fixture. This position is on the side of the fermenter. As the bolt head is directly attached to the gauge rod immersed in the tank contents, SENSOR1 was supposed to get closest possible contact with the hopped wort (see Figure 2).



Figure 2: Position of SENSOR1 on the temperature gauge. Photo by D. Varner

SENSOR2 has been placed on bottom side of the carbon dioxide outlet valve assembly (see Figure 3). This part of the device serves as a secondary source of fermentation intensity level. A gauge shows pressure of carbon dioxide in the tank above the hopped wort level. Obviously, the more bubbles emerge from the piping, the more intensive the internal process is. Placing SENSOR2 in the outlet body of the valve was the only way of visual relationship between signal and actual fermentation intensity. Thus, this sensor was initially meant just for support purpose. The actual AE was probably caused by mechanical motion of internal valve components rather than by actual hopped wort fermentation processes.



Figure 3: Position of SENSOR2 on the bottom of the carbon dioxide outlet valve assembly. Photo by D. Varner

SENSOR3 has been glued to the top of the tank. This position has been chosen due to direct contact with the inside atmosphere of the tank. As opposed to side walls, the top wall of the tank is a single sheet metal plate. As a result, SENSOR3 was expected to easily register the bubbles above the hopped wort level.

The signals from all three sensors was pre-amplified and later processed by the Dakel XEDO AE analyzer. An Ethernet-connected laptop PC with Dakel DaeMon software was used for continuous viewing and storage of the AE data. The data from AE monitoring has been evaluated using Dakel DaeShow software to provide visual representation and statistics. The AE was monitored continuously for the entire fermentation period (see Duration section below).

Additional Parameters of the Brewing Procedure

Temperature – In the beginning of the fermentation, the temperature hopped wort was 7 degrees Celsius. During the first 24 hours of fermentation, the temperature increased to 10 degrees Celsius. Then the control system performed an automatic cooling-based reduction of 1 degree Celsius per day. Thus, at the end of the experiment, the hopped had temperature of approximately 2 degrees Celsius.

Hopped Wort Composition – In this particular brew, the following ingredients have been used: malt 18kg (Czech sort 9kg, Bavarian sort 9kg), Premium granulated hop (100g), water.

Duration – The fermentation lasted from afternoon of April 21st 2010 till morning of April 30th 2010. For all this time, the AE system was active and data was recorded on the laptop PC.

Presumptions of Acoustic Emission Existence

In general, the fermentation itself was supposed to represent a noise-type signal environment. However, AE events might have been registered as well, mainly in connection with destruction of individual carbon dioxide bubbles.

Results and Discussion

Despite expectations, the results of AE monitoring have not produced satisfactory results. The individual sensors provided ambiguous and hard-to-read data that did not correspond to the common fermentation theory (ascending trend, intensive activity, descending trend in the end of the fermentation).

SENSOR1 – produced flat RMS curve with very rare AE events (supposedly bursts of the bubbles). No trends have been visible in the graphs.

SENSOR2 – produced some usable results featuring steep rise of AE events and correlating RMS. However, while RMS shows descending trend towards the end of experiment, the AE events for some reason keep on higher count level. As SENSOR2 measured secondary activity of valve components, this data DO NOT represent actual fermentation-related carbon dioxide development. On the other hand, the quantity of CO₂ bubbles going through the valve might proportionally correspond to the fermentation process intensity. A chart with cumulative AE event count versus RMS trend is shown in Figure 4. The extreme rise of RMS at the very end of experiment timeline has been caused by the brewery personnel. Clearly, they have been touching the tank and performing some rich-sound-emitting activities, such as pumping or rinsing.

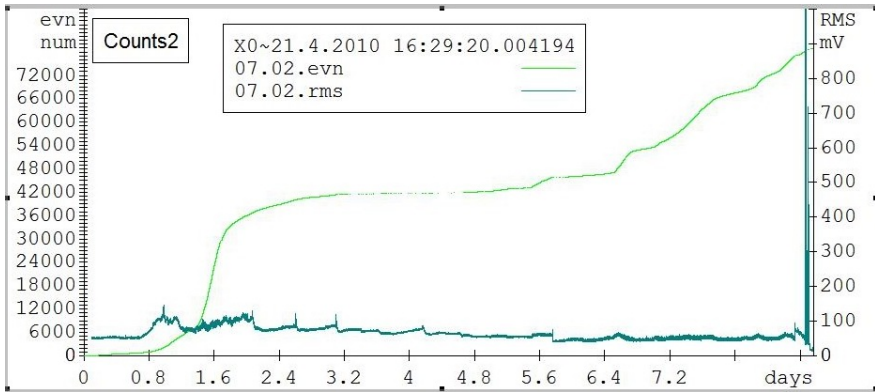


Figure 4: Data acquired from of SENSOR2. Note the green curve of cumulative AE event count and blue curve of signal RMS values. Plot generated by the Dake! DaeShow software.

As far as the PSD function of SENSOR2 data is concerned, typical spectral distribution in the signal is shown in Figure 5. However, as stated above, this is not a relevant process-related data plot, but rather a secondary process property (probably a mechanical motion of the valve mechanism).

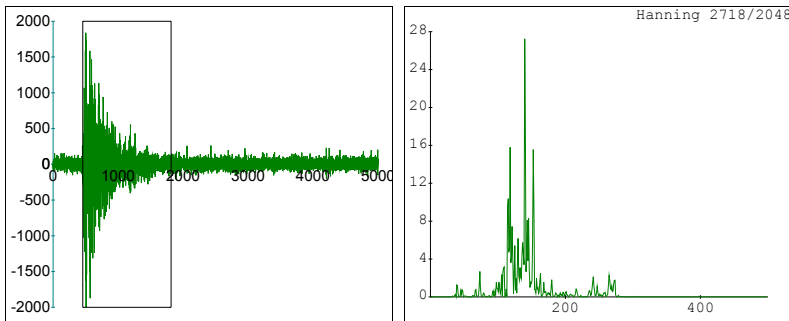


Figure 5: PSD data acquired from of SENSOR2. Plots generated by the Dake! DaeShow software.

SENSOR3 – produced flat RMS curve with very rare AE events. No trends have been visible in the charts. Recorded data has been similar to SENSOR1 data set.

Conclusions

Acoustic emission method has been used in a micro-brewery facility to observe possibility of AE being able to monitor the process of hopped wort fermentation. Three sensors have been used, but no satisfactory results have been obtained. The only reasonable AE data come from secondary process (carbon dioxide outlet valve). Possible reasons for the failure might be as follows:

- Lack of knowledge concerning AE behavior in Cr-Ni steel and signal attenuation.
- Complex layout of the fermenter making proper positioning of AE sensors complicated.
- Unavailable data concerning the inside conditions in the fermenter.

For future research, we strongly recommend performing a detailed study of fermenter structure and extensive calibration/verification of the sensors' functionality.

References

[1] Beer Fermentation [online]. 2010 , 08.02 [quot. 2010-09-26]. Available from WWW: http://www.beer-brewing.com/beer-brewing/beer_chapters/ch13_beer_fermentation.htm >.

[2] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. Technická diagnostika. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN

[3] BÉLA, Kiss; HORVÁTH, Imre. Pivovarský slovník : německo-anglicko-maďarsko-český . Reedice VÚPS. Praha : Luxpress, 1994. 265 s. ISBN 80-7130-033-0.

Acknowledgements

Authors would like to thank the Dakel ZD Rpeťy Company for ongoing AE equipment support.



AUTOMATED ULTRASONIC TESTING OF WWER RPV

AUTOMATIZOVANÉ ZKOUŠENÍ TNR TYPU VVER ULTRAZVUKEM

Jan VÍT, Zdeněk SKÁLA, Lukáš STAINER

ŠKODA JS a.s.

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

Abstract

The importance of automated non-destructive testing of WWER reactor pressure vessels (RPVs) is growing again at the present time. Main reasons are the power increase of operated nuclear power plant (NPP) units, prolongation of intervals between inspections, shortening of outages and intended operation of NPP units for longer time than was initially postulated by the design (long term operation – LTO). Ultrasonic testing is absolutely dominant among other volumetric NDT methods of RPV testing. The paper gives an overview of present status and compares possibilities of application of mostly used automated ultrasonic testing techniques, namely pulse echo, TOFD diffraction and phased array probes.

Keywords: *ultrasonic testing, WWER reactor pressure vessel, pulse echo technique, time of flight diffraction (TOFD) technique, phased array technique*

Abstrakt

Význam automatizovaného nedestruktivního zkoušení tlakových nádob reaktorů (TNR) typu VVER v současné době opět narůstá. Hlavními důvody jsou zvyšování výkonu provozovaných bloků jaderných elektráren (JE), prodlužování intervalů provozních prohlídek, zkracování odstávek a zamýšlený provoz bloků JE po dobu delší, než původně předpokládal projekt (LTO). Zcela dominantní místo při zkoušení TNR zaujímá mezi objemovými metodami NDT zkoušení ultrazvukem. Příspěvek mapuje současný stav a porovnává možnosti aplikací nejpoužívanějších technik automatizovaného ultrazvukového zkoušení; a to odrazové, difrakční TOFD a techniky mozaikových PA sond.

Klíčová slova: *ultrazvukové zkoušení, tlaková nádoba reaktoru typu VVER, odrazová technika, difrakční technika TOFD, technika mozaikových PA sond*

1. ÚVOD

Význam automatizovaného nedestruktivního zkoušení tlakových nádob reaktorů (TNR) typu VVER v současné době opět narůstá. Hlavními důvody jsou zvyšování výkonu provozovaných bloků jaderných elektráren (JE), prodlužování intervalů provozních prohlídek, zkracování délky plánovaných odstávek a zamýšlený provoz bloků JE po dobu delší, než původně předpokládal projekt (LTO).

2. KVALIFIKACE PROVOZNÍCH PROHLÍDEK

Dne 01.07.1997 vstoupil v České republice v platnost zákon č. 18/1997 Sb. „Atomový zákon“, který každému držiteli povolení k provozu jaderného zařízení ukládá povinnost sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany v rozsahu stanoveným prováděcími předpisy. Takovými veličinami a skutečnostmi jsou rovněž výsledky nedestruktivních zkoušek, které jsou jedním ze vstupních údajů pro hodnocení životnosti (integrity) komponent a systémů. Vyplynula proto potřeba zavést v České republice evropskou praxi v oblasti kvalifikace provozních prohlídek vybraných bezpečnostně významných komponent.

Pokud držitel povolení (JE) postupuje v souladu s „Metodikou kvalifikace provozních prohlídek hlavních komponent primárních okruhů jaderných elektráren typu VVER“ [1], potom SÚJB považuje příslušnou část bezpečnostní dokumentace za vyhovující a požadavky právních předpisů za splněné.

Při kvalifikovaném zkoušení metodami (technikami) NDT jsou při provozních (předprovozních) kontrolách TNR typu VVER v současnosti obecně definovány čtyři následující cíle:

- **Detekce.**
Zjištění přítomnosti necelistvostí a určení jejich základních parametrů podle použité metody (techniky) NDT.
- **Lokalizace.**
Určení polohy (souřadnice) necelistvosti.
- **Klasifikace.**
Stanovení typu, tvaru a orientace necelistvosti.
- **Sizing.**
Stanovení pravděpodobných (skutečných) rozměrů necelistvosti, včetně jejího ligamentu, tj. nejkratší vzdálenosti mezi okrajem necelistvosti a povrchem TNR.

První dva cíle jsou zcela běžné při nedestruktivním zkoušení, zbývající dva lze považovat za určitý „nadstandard“ vyplývající z požadavků kvalifikací provozních prohlídek.

Nejdůležitějším pravděpodobným (skutečným) rozměrem necelistvostí je jejich výška, tj. rozměr ve směru tloušťky stěny TNR. Není-li pro její stanovení použita difrakční technika TOFD, technika mozaikových PA sond nebo metoda vířivých proudů (pouze pro povrchové necelistvosti), určuje se z výsledků zkoušení

ultrazvukem odrazovou technikou nebo tzv. kvalifikovaným odhadem (nutná znalost technologie výroby a typu necelistvosti).

V případě, že pro stanovení pravděpodobných (skutečných) rozměrů necelistvostí bude použita metoda (technika) NDT, jejíž citlivost neumožňuje určit tyto rozměry, pak lze za pravděpodobné (skutečné) rozměry necelistvostí považovat minimální rozměry, které je daná metoda (technika) NDT schopná určit.

Pro další postup se necelistvosti schematizují buď jako rovinné plochy orientované rovnoběžně (**laminární** necelistvosti) nebo kolmo ke zkušebnímu povrchu TNR (**planární** necelistvosti).

Stanovené schematizované rozměry necelistvostí se porovnávají s kritérii přípustnosti, které obsahují tabulky v příloze XI dokumentu A.S.I. sekce IV [2]. Necelistvosti, přípustné podle tohoto dokumentu, se označují jako „**vyhovující**“, ostatní jsou zařazeny do kategorie „**k posouzení**“. Zde jsou zařazeny i necelistvosti, pro které žádná kritéria zatím neexistují.

Hodnocení přípustnosti necelistvostí „k posouzení“ se provádí porovnáním s výsledky již dříve provedených posouzení nebo vypracováním tzv. posouzení významnosti indikací necelistvostí, které mimo jiné obsahuje všechny potřebné výpočty. Celý postup musí být v souladu s pravidly schválenými SÚJB.

V současné době stále neexistuje závazný metodický postup pro určování pravděpodobných (skutečných) rozměrů necelistvostí. Každý z dodavatelů provozních (předprovozních) kontrol TNR používá vlastní způsob, který bývá v ČR prověřen kvalifikacemi podle metodiky SÚJB [1], návodu IAEA [3] a novelizované metodiky ENIQ [4].

3. ODRAZOVÁ TECHNIKA

Množství zaznamenávaných dat z jednotlivých zkoušených oblastí (skenu) už není limitováno prostředky pro jejich ukládání, přenos a zálohování. Dříve byly zásadním omezením kapacitní možnosti disket (FDD), ZIP mechanik či magneto-optických disků (MOD). Dnes se využívají zejména externí (přenosné) USB disky a Flash disky; do úvahy připadají i CD-RW nebo DVD-RW.

Velikost souborů ovlivňuje způsob záznamu ultrazvukových dat, respektive citlivost zkoušení. Obvykle si můžeme vybrat ze tří možností:

- Záznam všech ultrazvukových signálů (ech) v předem nastaveném časovém rozsahu (bráně) při překročení pevně stanovené úrovně, která se liší od registrační úrovně poklesem např. o – 12 dB.
- Záznam všech ech, které přesahují zvolenou úroveň šumů v zadané bráně.
- Záznam kompletního A-zobrazení všech ultrazvukových signálů (ech).

Každý z uvedených způsobů má své výhody i nevýhody. Na našem pracovišti používáme v současnosti prostřední variantu s interní podmínkou, aby velikost standardních datových souborů nepřesáhla cca 250 MB. Tato velikost je dána pouze

požadavkem na možnost zpracování dat a vyhodnocování výsledků na běžných osobních PC (např. notebookách Latitude řady D 510).

Odrazová technika umožňuje s dostatečnou přesností určovat pravděpodobnou (skutečnou) délku či šířku necelistvostí. Při určování pravděpodobné výšky necelistvostí (TWE) tato technika v řadě případů nesplňuje kritéria pro kvalifikaci provozních prohlídek.

Na Obrázku 1 jsou znázorněna neupravená data z prozvučování kvalifikačního bloku KB 140 z povrchu ochranného austenitického návaru dvojitou úhlovou sondou typu 70°SEL (jmenovitá frekvence 2,0 MHz) ve směru, který odpovídá obvodovému směru u TNR typu VVER. Umělé realistické necelistvosti typu podnávarových trhlin jsou detekovány zcela jednoznačně. Na první pohled jsou zřetelné různé délky těchto indikací necelistvostí a velmi problematické odlišení jejich výšky (TWE).

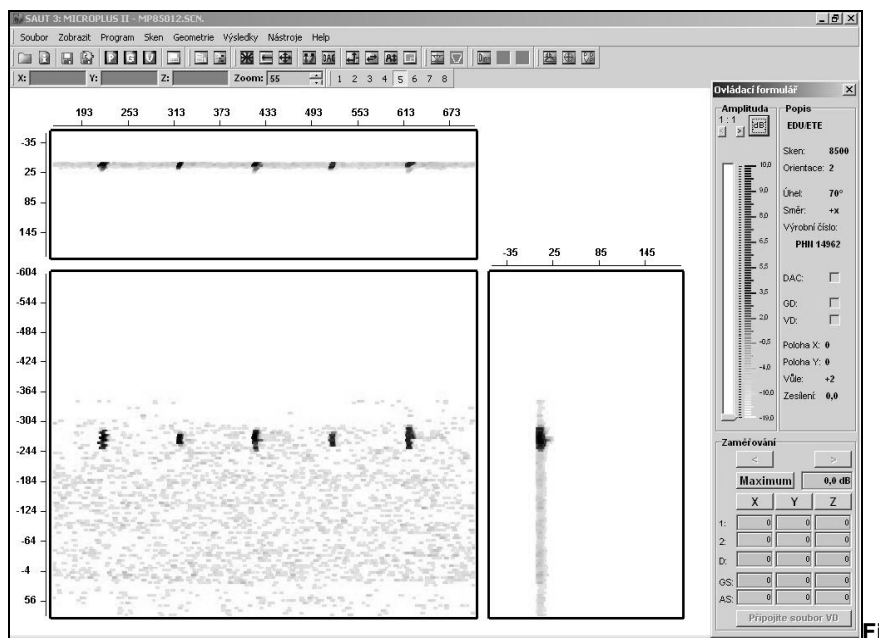


Fig. 1: Pulse echo technique
Obr. 1: Odrazová technika

4. DIFRAKČNÍ TECHNIKA TOFD

Difrakční technika TOFD přináší zcela nové možnosti ultrazukového zkoušení. Umožňuje spolehlivě detekovat necelistvosti kolmé ke zkušebnímu povrchu válcové části TNR a určovat jejich pravděpodobné rozměry. Jsou-li detekovány oba okraje necelistvostí, potom lze její výšku určit teoreticky s přesností $\pm \lambda / 2$, kde λ je vlnová délka podélné ultrazukové vlny. U válcové části TNR typu VVER tato hodnota

obvykle činí řádově cca ± 1 mm. Výsledky dosud ukončených technických kvalifikací ve společnosti ŠKODA JS a.s. průkazně potvrzují, že dosažitelná přesnost určování pravděpodobných rozměrů (výšky) necelistvostí je ± 2 mm na kvalifikačních blocích (KB 140 a KB 190) s umělými realistickými defekty (podélné a příčné kořenové trhliny, studené spoje, podélné trhliny pod návarem a podnávarové trhliny).

Difrakční technice TOFD je věnována v současné době značná pozornost, o čemž svědčí následující normy, které se objevily v loňském roce.

- ČSN EN 583-6: 2009 [5]
- ČSN EN 15617: 2009 [6]

Na Obrázku 2 je příklad detekce tří umělých realistických necelistvostí typu podélné trhliny pod návarem při neparalelním způsobu skenování sondami s jmenovitým úhlem lomu 60° a s jmenovitou frekvencí 5,0 MHz.

Po povrchu kvalifikačního bloku KB 140 se v tomto případě nešířila laterální vlna (LaW), ale podélná vlna na rozhraní ochranného austenického návaru a základního materiálu (IW), proto jsou podélné trhliny pod návarem zobrazeny jako povrchové necelistvosti. Výrazně je detekován vždy jejich spodní okraj, horní okraje splývají s rozhraním ochranného austenického návaru a základního materiálu.

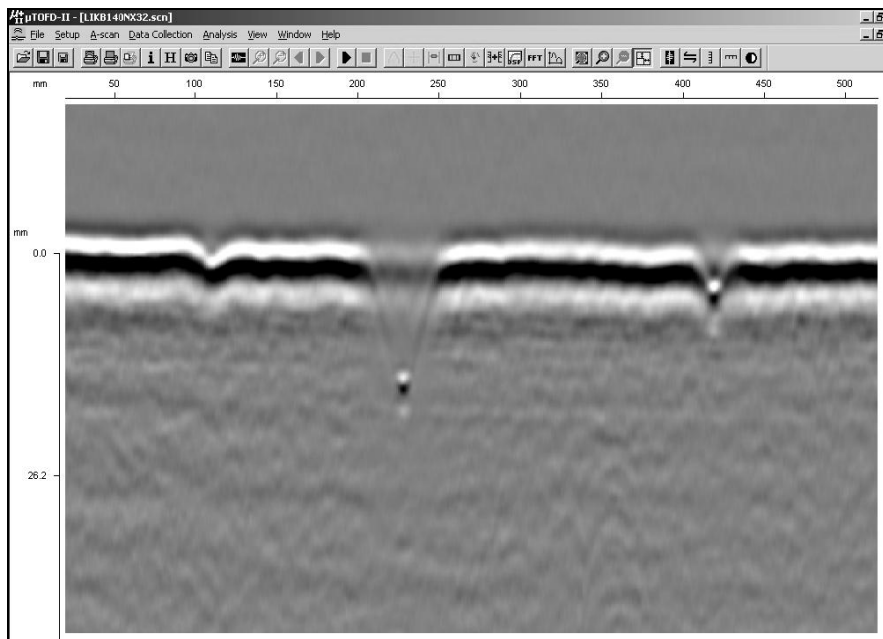


Fig. 2: TOFD technique
Obr. 2: Difrakční technika TOFD

5. TECHNIKA MOZAIKOVÝCH PA SOND

Válcová část TNR typu VVER se obvykle zkouší technikou mozaikových PA sond v režimu tzv. „**Multiple Group**“. PA sonda je nadefinována (využita) jako několik virtuálních sond, které mohou být různých typů a různých jmenovitých úhlů. Tím jsou vždy jednou mozaikovou PA sondou nahrazeny všechny konvenční ultrazvukové sondy pro zkoušení odrazovou technikou v jednom směru prozvučování. Součástí mozaikové PA sondy může být i měnič pro zkoušení odrazovou technikou. Příkladem je typ GSK150ET1,5V15C70EL1,5, kterou vyrábí firma AREVA intelligenceNTD. Sondy se používají například při provozních kontrolách válcové části a dna TNR typu VVER 440 i VVER 1000 na Rovenské JE (Ukrajina). Jedná se o mozaikovou PA sondu (15 elementů) s vertikální změnou úhlu prozvučování (příčné vlny) kombinovanou s konvenčním měničem pro vybuzení podélné vlny s jmenovitým úhlem lomu 70°L a s jmenovitou frekvencí 1,5 MHz.

Sektorové skenování (S-skeny) se v tomto případě používá pouze při analýze nebo určování pravděpodobných (skutečných) rozměrů vybraných indikací necelistvosti.

Technika mozaikových PA sond dává velice dobré výsledky při určování pravděpodobné (skutečné) výšky necelistvosti v případech; jsou-li detekovány oba okraje necelistvosti, potom přesnost určování rozměrů ve směru tloušťky stěny je zcela srovnatelná s difrakční technikou TOFD. Pokud je detekován pouze jeden okraj necelistvosti, je nutné použít pro určení rozměru necelistvosti ve směru tloušťky obdobných postupů jako u odrazové techniky.

Pro správné vyhodnocování výsledků je nezbytné používat podpůrné programy, které umějí vykreslit profil svarového spoje nebo geometrii zkoušené části nebo oblasti. Obvykle se využívají standardní kreslicí programy – např. Auto CAD.

ASME Code, Section V, Article 4, Edition 2007 [7], včetně nejnovějších dodatků (Addenda z roku 2009), řeší problematiku zkoušení technikou mozaikových PA sond zcela okrajově. Tato skutečnost je překvapující ve srovnání s pozorností, která je zde věnována difrakční technice TOFD.

Dosud vlastně neexistuje žádná norma, která by řešila problematiku zkoušení technikou mozaikových PA sond.

Na Obrázku 3 je výsledek ručního ověřování umělé realistické necelistvosti, která simuluje podélnou trhlinu v kořeni svarového spoje kvalifikačního bloku KB 140. Zkoušení bylo provedeno z povrchu ochranného austenitického návaru mozaikovou PA sondou typu 2.25-L-16-12x12-A1-P-2.5-OM (16 elementů, jmenovitá frekvence 2,25 MHz, rozsah úhlů 45°T ÷ 70°T) a ultrazvukovým přístrojem OMNISCAN MX (Olympus). Za naměření dat a jejich nezištné poskytnutí autoři děkují kolegovi Ing. Janu KOLÁŘOVI z ČEZ-ETE.

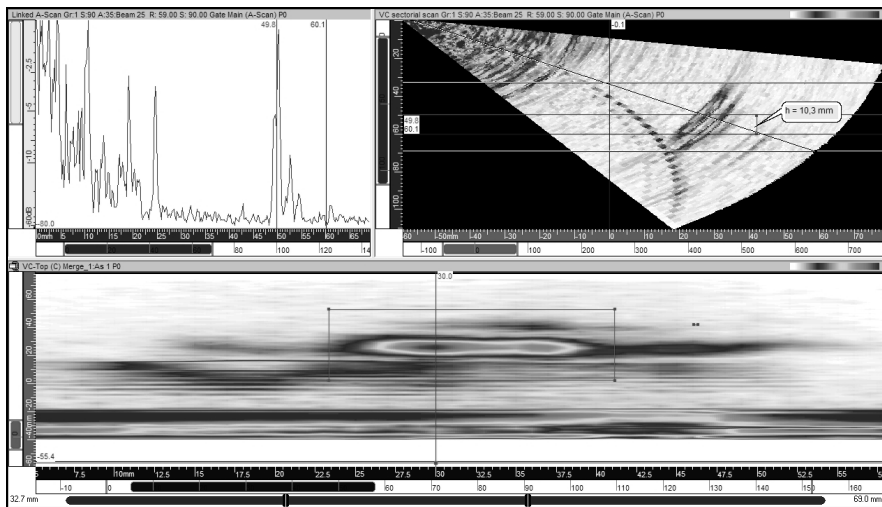


Fig. 3: Phased array technique
Obr. 3: Technika mozaikových PA sond

6. ZÁVĚR

Zkušenosti z kvalifikací provozních prohlídek TNR typu VVER potvrzují skutečnost, že požadavky na určování pravděpodobných (skutečných) rozměrů necelistvostí nelze ve všech případech splnit při zkoušení ultrazvukem pouze odrazovou technikou. Výhodné a někdy i zcela nezbytné je kombinovat odrazovou techniku se zkoušením difrakční technikou TOFD nebo technikou mozaikových PA sond. Při vhodné kombinaci zkušebních technik lze v maximální míře využít jejich předností a naopak minimalizovat jejich nevýhody.

Autoři se omlouvají za poměrně malé a černobílé obrázky. Při prezentaci budou na konferenci předvedeny barevně a v dostatečné velikosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Metodika kvalifikace provozních prohlídek hlavních komponent primárních okruhů JE typu VVER, SÚJB, Praha, prosinec 1998.
- [2] A.S.I. sekce IV: Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, NTD ASI, Praha a Brno, květen 2004.
- [3] IAEA-EBP-WWER-11: Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER nuclear power plants, IAEA, Vienna, březen 1998.

- [4] EUR 22906 EN: European methodology for qualification of non-destructive testing (Third issue), ENIQ Report No. 31, Luxembourg, 2007.
- [5] ČSN EN 583-6: Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem
Část 6: Difrakční technika měření doby průchodu jako metoda pro zjišťování a měření velikosti vad, ÚNMZ, Praha, červenec 2009.
- [6] ČSN EN 15617: Nedestruktivní zkoušení svarů – Difrakční technika měření doby průchodu – Dovolené úrovně, ÚNMZ, Praha, srpen 2009.
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Non-destructive Examination ASME, New York, červenec 2007.

ABSTRACTS AND PAPERS AFTER DEADLINE

ABSTRAKTY A PŘÍSPĚVKY DODANÉ PO TERMÍNU



NEW APPROACH TO THE INDUSTRIAL SAFETY ENSURING

Valentin PETROV, Aleksander PETROV
OOO "ORK", Saint-Petersburg, Russia, <http://orkspsb.ru>
E-mail: valentin.petrov@orkspsb.ru, avpetrov@orkspsb.ru

Abstract

Industrial safety is the state of security of human and society's vital interests from failure of hazardous industrial objects. Thus, notion about fracture of loaded materials is the physical basis of the industrial safety. There are two main approaches to this notion.

Mechanical approach is traditional. It considers fracture as force act which comes after the tensile stress is exceeded. Implementation of this approach leads to non-destructive testing (NDT). At this problems with definition of dangerous defect and service life prolongation arise. Manufacture stops are needed and hydraulic (pneumatic) tests are carried out.

It was shown in 1950s that notion about force fracture is wrong. New approach has appeared – kinetic theory which considers fracture at stresses lower than the tensile stress as time process of the thermally activated disintegration of meta-stable state. Meta-stable state of the solid body is caused by the loading. In this aspect industrial safety is in the determination of the remaining life as function of the force-temperature influence, defects, corrosion, etc.

Fracture process in kinetic theory contains two stages: delocalized accumulation of stable micro-damages and macro-crack growth. The shift of stages (macro-crack formation) is chosen as the limit state for the determination of the remaining life. In spite of the survivability of the constructional materials exploitation of the industrial objects with growing macro-cracks should be stopped in purpose of the industrial safety ensuring.

Criteria of macro-crack formation have been established – concentration criterion which allows to perform long-term prognosis and P-criterion which allows to determine the moment of growing macro-crack formation.

We use acoustic emission (AE) method for the registration of damages, but other methods are also allowable.

These criterions have been verified in laboratory conditions on specimens with welding joints during cyclic bend and tubular specimens during statically loading with inner pressure at high temperatures.

We have developed method for the service life prolongation of hazardous industrial objects on the basis of the given above principles. We have been applying it for boiler, gas and chemical equipment in Russia for more than 15 years.

Keywords: *industrial safety, fracture, accident, acoustic emission, macro-crack, remaining life.*

1. Introduction

Industrial safety is the state of security of human and society's vital interests from accidents. Accident is the fracture of constructions and (or) technical devices (vessels, pipelines, boilers, cranes, etc.) [1]. Hence it follows, that the notion about fracture (loss of strength) of materials is the key for the industrial safety ensuring.

Humanity had to resolve the problem of strength during whole history of its existence. No one construction should break down during its exploitation. However, in spite of all efforts the science about strength is behind other disciplines, which seem at first sight to be more difficult and effective. The internal structure of atoms and stars seems to be more clear nowadays than the processes, taking place in the loaded solid body and leading to its fracture.

Frequent accidents on pipelines, for example, starting from gas mains and up to endless fractures of municipal heating mains, show the unsatisfactory state of the used notions for the industrial safety ensuring. Accidents lead to people death and cause huge social, ecological and economical damage.

There two main existing notions about the fracture: force (mechanical approach) and thermo-kinetic (kinetic conception of strength). We will compare these two notions.

2. Mechanical approach

Since Leonardo da Vinci (≈ 1500) and Galileo (≈ 1638) and till nowadays fracture is considered as an instantaneous event caused by the critical force (called the tensile strength σ^*), which overcame the material resistance (cohesion of atomic bonds). Such notion seems to be evident for us from the childhood: we interpret fracture (of the cap, glass, etc) as a result of impact, excess of the tensile strength.

It was proved in 1950's by academician S.N.Zhurkov in Leningrad Physical-Technical Institution that the notion about force fracture is wrong and the thermo-kinetic nature of fracture was established.

3. Thermo-kinetic nature of fracture

The energy of thermal atomic oscillations (phonons) and its fluctuations plays the defining role in the solid bodies fracture. Critical thermal fluctuations absorb excess phonons (born by the loading) and evolve into the stable breaks of the material continuity – germ of cracks - defects.

The waiting time of critical fluctuations and damages accumulation destroys, but not the force.

The fracture can take place at every stress σ depending on the loading time τ and temperature T:

$$\sigma = \frac{U_0 - kT \ln \frac{\tau}{\tau_0}}{\gamma}$$

The initial strength value can decrease considerably after the long time of exploitation, especially for composites and rocks.

Existing system of the industrial safety is based on the force approach and needs to be reviewed from the modern positions of the thermo-kinetic approach.

4. Existing system of the industrial safety ensuring.

It is based on the force notion about fracture and stands on “three pillars”:

4.1. Safety margin, allowable stress.

The stresses $\sigma < \frac{\sigma_u}{n} \equiv [\sigma]$ are allowed. The value $n > 1$ is called safety margin and $[\sigma]$ – allowable stress. Stresses, which are lower than the allowable, are considered to be safe, not able to cause the fracture. The values of the safety margin are regulated by the normative documents. So, for steel vessels $n = 2,4$.

The allowable stress determines the minimal value of the wall thickness for the vessel with inner diameter D and operating pressure P : $S_p = \frac{DP}{2[\sigma] - P}$.

4.2. Non-destructive testing (defects detection).

Huge attention is paid to defects detection in the object material by various physical methods. New branch of scientific-technical investigations has arisen - non-destructive testing. It is considered, that defects decrease the safety margin. However, the influence of the detected defects on the possibility for exploitation prolongation is defined only by the normative documents without sufficient substantiation.

4.3. Overloading tests.

The overloading test (hydraulic, pneumatic, etc) for strength is obligatory for all industrial objects. The object is “overloaded” by pressure $P_{test} = 1,25[\sigma]$.

The logic of the overloading test consists in the following: if the object stood the pressure $P_{test} > [\sigma]$, than the operating pressure $P \leq [\sigma] < \sigma_u$ is safe.

5. Estimation of the existing system of the industrial safety ensuring.

1. The more the safety margin the higher the safety. The more the safety margin the more the wall thickness and the higher energy and material inputs, that is not economically. How to choose an optimum?
2. Where is the border between the allowable and dangerous defects? When the exploitation can be prolonged and when the repair or the replacement of the object should be done?

3. Carrying out of the overloading test (in chemical, gas industry, etc) often causes considerable losses by the manufacture stop, emptying, degassing, etc. Cases of the fracture during overloading test or soon after it are known. As a result the overloading test is not carried out usually. Is it possible to exclude the overloading test from the object testing?

4. How often the industrial safety expertise should be carried out? What is the object remaining life? Own life-time of the loaded material is not taken into consideration. Time limitations are put through the external influences: corrosion-erosion wear, cyclic loadings, which role is overstated.

There are no argumentative answers on these fundamental questions in the force approach to the fracture notion that shows the inadequacy of the existing system of the industrial safety ensuring. Its elements are uneconomical, energy-intensive, unfeasible and unreliable.

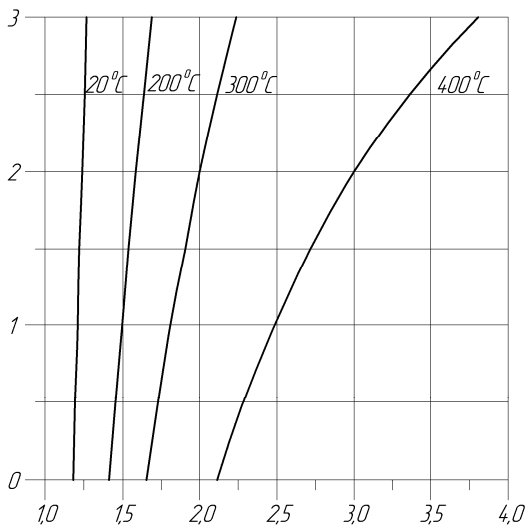
The modernization of the industrial safety ensuring system should consist in the refusal from the force approach and consideration of the thermo-kinetic nature of the fracture.

6. Modernization elements of the industrial safety ensuring system

1. Dependence of the remaining life from the safety margin

Force approach supposes indestructibility at the safety margin $n > 1$. Thermo-kinetic nature of the fracture limits the life-time of the loaded material at every safety margin value, leading to the notion of the remaining life τ . This is own time of life (without corrosion-erosion influences).

The dependence $\tau(n)$ for carbon steels established by us is given at fig. 1.



As it can be seen, the remaining life for vessels is almost infinite at normative value $n = 2,4$ and room temperature, but at the temperature $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ the remaining life is just 10 years. Thus, the safety margin choice is dictated by the temperature and the exploitation period.

2. Allowable damages and dangerous cracks

According to the new conception, loading increases free energy of the body $F = H - TS$, which decreases during the heat usage (thermal activation) by plastic deformation (increase of the entropy S) and the generation of the continuity breaks (decrease of the energy H in the form of acoustic, thermal and electromagnetic emissions). The loaded body doesn't resist to the fracture, it aims to break down and to drop the load. The continuity breaks are stable due to the generation mechanism and heterogeneous structure of the bodies. The accumulation of the continuity breaks is divided on two stages.

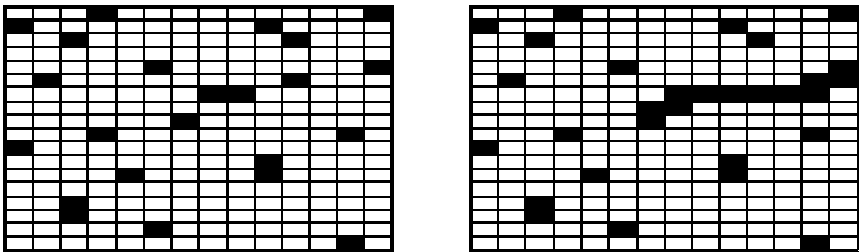


Fig. 2. Two-stage model of stable continuity breaks accumulation.

Damages appear chaotically on the first stage. As a result of it spontaneous clustering leading to the growing clusters of damages formation (second stage) takes place. Generation of damages on the first stage is allowable. The transition to the second stage is dangerous.

Registration of acoustic emission at damaging is informative during the exploitation without overloading tests.

K- and P- criteria for the stages shift are established.

7. References

1. Federal law No. 116-FZ of July 21, 1997 on industrial safety of hazardous industrial objects (with the Amendments and Additions of August 7, 2000).



APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD IN THE AREA OF ARBORICULTURE AND WOODWORKING

VYUŽITÍ METODY AKUSTICKÉ EMISE V OBLASTI PĚSTOVÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

Pavel MAZAL*, Michal ČERNÝ**, Filip HORT*, František VLAŠIČ*

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

**Mendlova univerzita Brno

Abstract

Cultivation and processing of wood represent a significant branch of industry. One great advantage of this sector is the recoverability of sources of raw materials. In this paper we present a brief overview of works devoted to the problems of application of acoustic emissions method in the area of plant cultivation and processing of wood. There are also some examples of the results achieved in joint experiments implemented at Brno University of Technology and Mendel University in Brno

Key words: *acoustic emission, wood, plants*

Abstrakt

Pěstování a zpracování dřeva tvoří významné průmyslové odvětví. Velkou výhodou tohoto odvětví je obnovitelnost zdrojů surovin. V příspěvku je podán stručný přehled prací, které se věnovaly problematice aplikace metody akustické emise v oblasti pěstování rostlin a zpracování dřeva. Jsou zde prezentovány ukázky výsledků dosažených při společných experimentech realizovaných pracovišti VUT FSI v Brně a Mendlovy univerzity Brno.

Klíčová slova: *akustické emise, dřevo, stromy*

1. Úvod

Dřevní hmota je jedním z nejdůležitějších materiálů, které lidská populace využívá prakticky po celou dobu své existence. Zdrojem tohoto materiálu je stále především les. Funkce lesa je však pro člověka vysoce interdisciplinární a do popředí našeho zájmu se dostávají i jeho další funkce. Nenahraditelná je například krajinná funkce lesa. V souvislosti se záplavami v posledních letech se stále více vyzdvihuje funkce vodohospodářská. Připomenout je nutné zdravotní funkce lesa (vazba na biologii, zdravotědu) a to, že centrem zájmu člověka, tedy spotřebitele je dřevo a výrobky ze dřeva. Jako domácí, stále se obnovující energetický zdroj a surovina, která má mnohostranné využití, již není dřevo chápáno pouze jako obyčejná surovina, ale stává se surovinou strategickou. Jako látka je dřevo oblastí výzkumu pro fyziky (vlastnosti dřeva), přičemž geografie může zdůraznit prostorové rozdíly v rozšíření lesů i vzhledem ke kvalitě dřeva (fyziky zajímá např. tvrdost, hmotnost, opracovatelnost apod.). Dřevo má široké uplatnění ve výrobě umělých hmot – např. celulóza (vazba na chemii). Vazbu na historii lze nalézt ve vývoji užití dřevěných výrobků až po současné nahrazování dřeva umělými hmotami, pozorování změn v jeho těžbě, ve využívání moderní techniky a například v případech odlesňování krajiny. Vazbu

na biologii lze sledovat u základní myšlenky lesa jako prostředí pro život člověka a různé druhy zvířat. Spojitost s ochranou životního prostředí lze najít i při sledování nebezpečí lesních požárů, drancování lesa, jejich neúměrného kácení ve světě apod.

2. Diagnostika stavu lesního porostu a dřeva

Je samozřejmé, že význam lesa se odráží i v pozornosti, kterou mu věnují výzkumníci z mnoha oborů. Stav lesa závisí na řadě parametrů, jakými jsou např. půdní poměry, hydrogeologické a klimatické poměry, znečištění prostředí, případně i struktura a stav živočichů v něm žijících atd.

Podobně jako v klasické NDT diagnostice je i v této oblasti základem vizuální hodnocení, avšak tímto způsobem mnohdy není možné spolehlivě posoudit některé z defektů, natož stanovit jejich vliv na hodnocenou rostlinu. V minulých dekáдах se dostalo do popředí fyzikální hodnocení stavu nosných částí kmene a kořenového systému. Využití diagnostických přístrojů je nejnovějším krokem při posuzování míry rizika, kterým je existence defektních stromů na hodnocené ploše. Příkladem sofistikovanějšího studia kvality dřevin jsou mechanické testy, které přímo zkouší defektní části kmene či odebrané vzorky dřevní části, hodnocením pomocí Presslerova nebozazu (přírůstoměru), nebo fraktometru, který je založen na principu měření pevnostních parametrů dřeva z radiálních a tangenciálních vývrtů. Tímto způsobem lze změnit pevnost dřeva v tlaku kolmo na směr vláken radiálně a tangenciálně, ohybovou pevnost (radiální) a smykovou pevnost. Do oblasti mechanických zkoušek lze zařadit i penetrometry, které měří výsledky penetrace elastické jehly, definované směrem průniku, vlhkostí a mechanickými vlastnostmi dřeva.

Další oblastí hodnocení dřevin jsou přístroje založené na principu rychlosti šíření zvuku, které zjišťují stav dřevního válce uvnitř kmene pomocí vyhodnocení rychlosti šíření zvukových vln dřevem. Zvukové vlny se šíří nejkratší cestou přes intaktní buněčné stěny dřeva. Je tak odhalena existence dutin, trhlin nebo přítomnost dřeva infikovaného dřevokaznými houbami, které nutí zvukové vlny tato místa „obcházet“, což je následně možné zjistit srovnáním naměřených rychlostí šíření s rychlostmi referenčními.

K ověření vlastností dřevní hmoty jsou využívány samozřejmě další fyzikální i elektrické metody, např. metody elektrofyziologie. Měřící zařízení ukáže v podobě elektrické veličiny koncentraci iontů ve zkoumané části pletiva. Vyjádření tzv. vitality dřevin je založeno na objevu fytoelektrických proudů, které vznikají mezi rostoucími stromy a jejich životním prostředím. Tyto fytoelektrické proudy souvisí se zdravotním stavem sledovaného organismu a vytváří tak spolehlivý znak vitality stromů. Fytoelektrické proudy se měří mezi uzemněným a rostoucími stromy pomocí zemnicí a snímací sondy a elektrického měřicího přístroje. Zemnicí sonda se umísťuje do vlhké půdy. Snímací sonda se zavádí vpichem do pletiva v přizemní části rostoucího stromu.

Poměrně novou metodou, která umožňuje posouzení uvedených postupů, je metoda verifikace vitality stromů metodou výpočetní tomografie. Ta je založena na měření absorpce paprsků gama v úzké vrstvě příčného řezu kmenem rostoucího stromu, kde jsou rozhodujícími činiteli hustota dřeva a rozložení vlhkostního obsahu. Tomografické zobrazení vyšší vlhkosti v širší bělové vrstvě je znakem zdravého stromu, je-li však tomograficky zobrazena snížená vlhkost a zúžená běla, svědčí to o narušeném vodním transportu, resp. o ovlivnění transpiračního proudu. Pro stanovení aktuálního objemu tohoto tzv. sap flow jsou aplikovány techniky základních fyzikálních metodik z oblasti elektrických zákonů, nukleárních poznatků nebo právě z oblasti tomografie či magnetické rezonance, průniku radioaktivních izotopů či magnetohydrodynamického efektu. Za prioritní však v současné době lze považovat metodu, která je založena na termodynamickém chování sledovaného objektu. Z metod, u kterých je

aplikován termodynamický princip, lze uvést příklady jako: metoda tepelného pulsu, disipační metoda, metoda tepelné bilance kmene nebo metoda deformace tepelného pole v kmeni.

Projev intenzity transpiračního toku (proudu) a jeho závislost na uvedených evaporačních podmínkách, které zřejmě způsobují kolísání právě velikosti a dynamiky průtoku v kapilárách xylému, je základní myšlenkou aplikace měření jeho akustické odezvy z pohledu akustické emise (AE). S ohledem na velikost diskontinuity tlakových poměrů v xylému lze s ohledem na citlivost piezoelektrických sond předpokládat možnost sledování transpiračního toku bělou. Těžištěm uváděné metodiky měření toku metodou AE je určení již uvedené diskontinuity transpiračního proudění, příp. zjištění razantnosti přerušujícího se objemu toku, nebo jeho znovunastolení, tj. obnovení průtoku. Četnost emisních událostí na vybraných hladinách a energetická hodnota signálů, resp. tvar signálů a jejich frekvenční struktura, to je příští vývoj v oblasti aplikace AE v této oblasti, jež v sobě obsahuje zvládnutí metodiky snímání, určení neaktivnějších frekvenčních oblastí jednotlivých událostí a jejich detailní matematickou analýzu. Všechny tyto oblasti jsou mimořádně náročné s ohledem na již uvedenou interdisciplinárnost problematiky měření, která v sobě zahrnuje oblast akustickou, elektrickou i biologickou, navíc s úzkou vazbou na meteorologické podmínky.

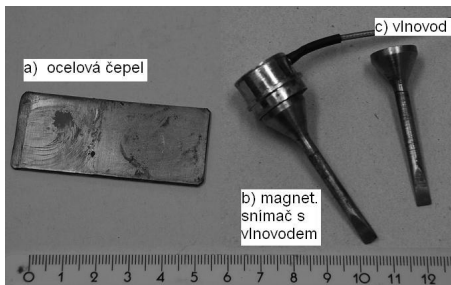
Metoda akustické emise se mimo uvedenou oblast hodnocení růstových parametrů dřevin, využívá zejména pro oblast využití dřeva jako konstrukčního materiálu. Mimo práce citované v našem příspěvku na loňské konferenci Defektoskopie [1] byly v roce 2010 publikovány nové výsledky postupů hodnotících mechanické parametry. Zde se jedná o období postupů již standardně používaných v oblasti kovových, případně kompozitních materiálů. V této souvislosti jsou dále propracovávány postupy, které také na základě šíření vln hodnotí kvalitu (příp. napadení) dřeva [2]. S hodnocením kvality materiálu velmi úzce souvisí využití metody AE pro sledování procesu sušení dřeva [3]. Poměrně netradiční bylo využití metody AE pro popis a hodnocení procesu výroby tepelně upraveného dřeva tzv. thermowood [4].

3. Metodika experimentů

Ve spolupráci s Ústavem lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie Mendlovy univerzity v Brně, kde se kolektiv odborníků pod vedením prof. Čermáka zabývá měřením hodnoty transpiračního proudu metodou deformace tepelného pole, bylo provedeno měření změny signálu akustické emise v průběhu několika dnů. V tomto případě byly objektem měření borovice Douglaska a lípa srdčitá. Výsledky získané zmíněnými postupy by po vzájemném porovnání a detailní analýze měly sloužit k rozvoji obou metod, prohloubení obou měřících metodik a jejich vyšší objektivnosti a verifikovatelnosti. Měření navazovala na předchozí experimenty na borovici, topolu a javoru. První ukázky výsledků byly prezentovány již na loňské konferenci NDE for Safety/Defektoskopie 2009 v Praze [1]. Cílem letošních experimentů bylo především ověření možnosti změny technologie snímání signálu AE.

V předchozích experimentech byly do kmene stromu zaraženy tenké čepele z nerezového plechu, na něž byly umístěny snímače AE – viz obr. 1 a obr. 3. V současné etapě jsme se pokusili tyto čepele nahradit, dle našeho názoru méně invazivními, ocelovými vlnovody o průměru 4 mm, s břitem na konci, které byly opět zaraženy do hloubky cca 2 cm do kmene stromu. Na rozšířené části vlnovodu byl umístěn piezoelektrický snímač AE s magnetickým upínáním (obr. 1). S ohledem na možnosti výroby byly použity vlnovody s kónickou úpravou přechodu [6]. Výhodnější tvar rotačního hyperboloidu by do měření vstoupil případně až po verifikaci nových výsledků a jejich porovnání s původními výsledky, které byly získány pomocí vlnovodů ve tvaru čepele i s výsledky získanými z měření metodou deformace tepelného pole. Pro výrobu vlnovodů (obrázek) byla použita feritická nerezavějící

ocel, u které lze využít magnetické snímací sondy pro dokonalejší dosednutí sondy na čelo jemně broušeného vlnovodu (Ra 0,4).



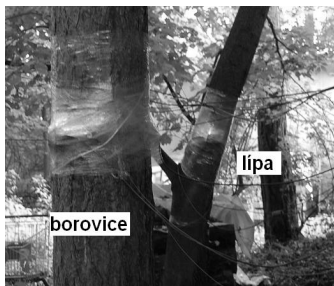
Obr. 1 Vzhled ocelové čepel a magnetického snímače se snímatelným vlnovodem



Obr. 2 Snímací a záznamové zařízení použité při experimentech



Obr. 3 Ukázka připevnění snímačů AE při zkouškách na lípě



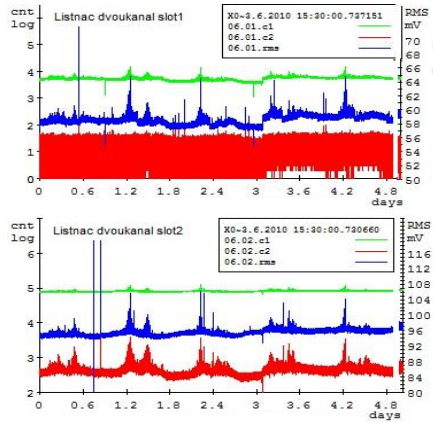
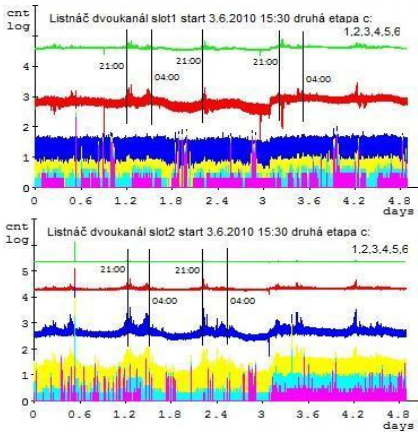
Obr. 4 Uspořádání experimentů na borovici a lípě.

Vlastní metodika měření byla v podstatě shodná s měřením z předchozího roku [1]. Do borovice i lípy byly zaraženy ocelové čepel i válcové vlnovody. Následně byly připevněny piezoelektrické snímače AE – na čepelích standardní pomocí mechanických úchytů a na válcových vlnovodech snímače magnetické. Snímání signálu probíhalo souběžně na analyzátoch Dakel Xedo – obr. 2. Vzhledem k dostupnému počtu snímacích kanálů byly dvě dvojice snímačů upevněny na lípě a kontrolní dvojice na borovici.

4. Příklady experimentálních výsledků

V průběhu několika cca týdenních měření byly získány rozsáhlé datové soubory – v jarním i letním období, při různých klimatických podmínkách, za bouřek i v relativně suchém období. Soubory se stále ještě zpracovávají, nicméně příklady výsledků jsou uvedeny na obr. 5 a 6.

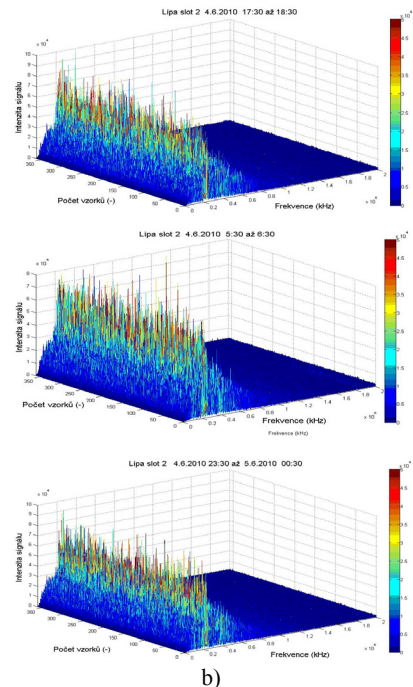
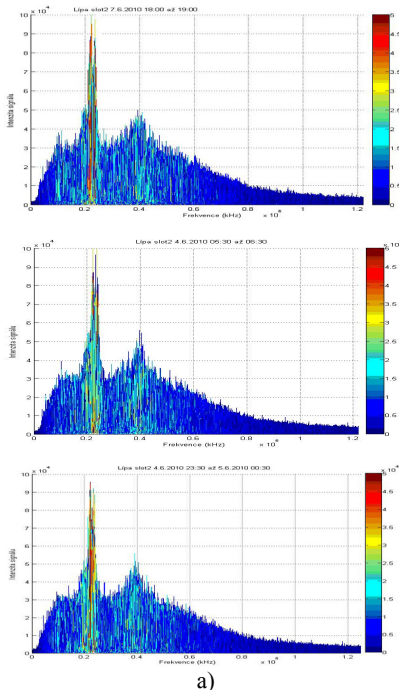
Na obr. 5 jsou ukázky záznamů změn signálu AE v průběhu cca 5ti denní zkoušky na lípě srdčité z období 3. - 8. června 2010. Záznamy jednak potvrzují určitou periodicitu v intenzitě signálu AE s maximy ve večerních a ranních hodinách. Zejména se však potvrdilo, že záznamy získané na válcových vlnovodech (dolní záznam – slot 2) jsou plně srovnatelné se záznamy z ocelových čepelí (horní záznam – slot 1). Záznamy a) jsou výsledkem vícehladinové analýzy (cca 6 hladin), záznamy b) pak klasické analýzy dvojhladinové se zobrazením RMS. Na obrázku 6 je příklad pokročilejšího zpracování signálu AE – rozložení frekvencí v rámci hodinových měření realizovaných v různých denních dobách.



a)

b)

Obr. 5. Srovnání záznamů signálu AE v průběhu cca 5ti denní zkoušky na lípě srdčité. Nahoře je signál snímán pomocí standardních snímačů na ocelové čepeli. Dole jsou záznamy snímačů na vlnovodech. Záznamy a) jsou výsledkem vícehladinové analýzy (cca 6 hladin), záznamy b) pak klasické analýzy dvojhladinové se zobrazením RMS.



a)

b)

Obr. 6 a) příklady záznamů frekvence vs. intenzita signálu z hodinových měření na lípě v různých denních obdobích (cca v 18 hodin, 6 hodin a ve 24 hodin), b) totéž jako obr. a) ve 3D zobrazení – časové vyjádření frekvenčního spektra.

5. Závěr

V tomto příspěvku je popsána část záznamů snímání signálu AE, jejichž změny by mohly odpovídat proměnám životních projevů některých dřevin v průběhu denního cyklu. Představené hodnoty, získané na lípě srdčité, plně odpovídají již dříve prezentovaným výsledkům, naměřeným na borovici douglasce, javoru a topolu. I v tomto případě docházelo k periodickým změnám snímaného signálu akustické emise s maximy ve večerních a časných ranních hodinách. Zde se přímo nabízí souvislost s přerušováním a opětovným zahajováním toku živin kmenem stromu tzv. sap flow. Svoji roli samozřejmě mohou hrát i teplotní změny a tím dilatace dřevní hmoty, případně vítr apod. V některých záznamech byly zaznamenány přímé vlivy aktuálních povětrnostních podmínek – např. bouřky.

Hlavním cílem měření však bylo další propracování technologie a parametrů snímání signálu s pomocí tenkých válcových vlnovodů, které představují menší zásah do kmene stromů oproti dříve používaným čepelím. Možnost využití této technologie snímání byla potvrzena a výsledky mají naprosto shodný charakter.

V nynější etapě budou naměřené výsledky dále analyzovány a korelovány s měřeními prof. Čermáka s cílem nalezení příčiny periodických změn signálu AE, příp. na potvrzení vlivu velikosti transpiračního proudu a jeho závislosti na teplotě a radiačních podmínkách. Získané výsledky měření budou dále objasňovány z hlediska klimatologického, hydrologického i materiálového. Aplikací výsledků všech typů měření lze využít pro optimalizaci porostní struktury, zhodnocení vitality a funkční stability porostů z hlediska nových, ale zcela zásadních návrhů v životně důležitých procesech.

Poděkování: práce představené v tomto příspěvku vznikly díky pochopení prof. Čermáka a jeho spolupracovníků z Ústavu lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie Mendlovy univerzity v Brně a v rámci projektu MPO TIP č. *FRR-T11/371 „Integrated system of monitoring of selected machine parts”*.

Literatura

- 1) MAZAL, P.; ČERNÝ, M.; HORT, F.; VLAŠIČ, F.: Odezva transpiračního proudu v signálu AE. In *NDE for safety / Defektoskopie 2009*. 2009. Praha, Česká spol. pro NDT. 2009. p. 275 - 282. ISBN 978-80-214-3973-3.
- 2) TIITTA, M., TOMPPONEN, L., VAN DER BEEK, J., LAPPALAINEN, R.: Acoustic and electromagnetic methods for wood. In: *29th Europ. Conference on AE Testing*, Vienna, 2010, EWGAE, CD edition, ISBN 978-3-200-01956-0.
- 3) KAWAMOTO, S., KIGUCHI, M., KATAOKA, Y., MATSUNAGA, M., KOBAYASHI, M., ROSNER, S., OKUMURA, S.: Propagation of Acoustic Emission and Acousto-ultrasonic Waves in Wood Materials. In: *29th Europ. Conference on AE Testing*, Vienna, 2010, EWGAE, CD edition, ISBN 978-3-200-01956-0.
- 4) ROSNER, S., KAWAMOTO, S.: Acoustic emission of conifer sapwood becomes weaker after each dehydration-rewetting cycle. In: *29th Europ. Conference on AE Testing*, Vienna, 2010, EWGAE, CD edition, ISBN 978-3-200-01956-0.
- 5) VAN DER BEEK, J., TIITTA, M.: Monitoring the Thermowood process by means of Acoustic Emission technology. In: *29th Europ. Conference on AE Testing*, Vienna, 2010, EWGAE, CD edition, ISBN 978-3-200-01956-0.
- 6) ČERNÝ, M.; MAZAL, P.; FILÍPEK, J.: Vliv délky a tvaru vlnovodů na snímání akustického signálu. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2008. 56(1). p. 43 - 53. ISSN 1211-8516.



GENERALIZED PHI-DIVERGENCES AND EM-ALGORITHM IN ACOUSTIC EMISSION

ZOBECNĚNÉ PHI-DIVERGENČE A EM-ALGORITMUS V AKUSTICKÉ EMISI

Václav KŮS, Jan Tláškal

Department of Mathematics, FNSPE CTU in Prague

Contact e-mail: vaclav.kus@fjfi.cvut.cz

Abstract: We deal with a simple method of construction of ϕ -divergences using a normalization of convex or concave functions. First we mention the well-known divergences (Kullback, Hellinger, χ^2 , Power, ...) and then we introduce several of its modifications. As an example, we present generalized LeCam and Hellinger divergences. These new families of divergences open new research possibilities in the area of statistical treatment of acoustic emission sources. Further, we deal with the classification of acoustic emission signals by means of distribution mixtures (DM). The acoustic signals are separated by means of suitable parameters obtained directly from the signals and from the normed frequency spectra. The very ϕ -divergence distance measure is employed as the additional signal spectrum attribute. We are concerned with the efficient set of classification parameters and we test the proposed classification method for the case of laboratory data and also for the experimental design of steel material 16530.

Key words: ϕ -divergences, EM-algorithm, signal classification, real data processing

1. Standard ϕ -divergences

Let $(\mathcal{X}, \mathcal{A})$ be a measurable space and let \mathcal{P} be the set of all probability measures on $(\mathcal{X}, \mathcal{A})$. If $P \in \mathcal{P}$ is dominated by a σ -finite measure μ on $(\mathcal{X}, \mathcal{A})$, $p = dP/d\mu$ denotes the Radon-Nikodym derivative of P with respect to μ .

Definition 1. Let μ be a σ -finite measure on $(\mathcal{X}, \mathcal{A})$. Let $P, Q \in \mathcal{P}$, $\{P, Q\} \ll \mu$, $p = dP/d\mu$ and $q = dQ/d\mu$. ϕ -Divergence of P and Q is a function $D_\phi : \mathcal{P} \times \mathcal{P} \rightarrow [0, \infty]$ defined by

$$D_\phi(P, Q) = \int_{\mathcal{X}} q \phi\left(\frac{p}{q}\right) d\mu,$$

where $\phi : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$, $\phi(1) = 0$, $\phi(t)$ is convex on $(0, \infty)$ and strictly convex at $t = 1$. We put $q \phi(p/q) = q \phi(0)$ if $p = 0$ and $q \phi(p/q) = p \phi(\infty)/\infty$ if $q = 0$, where $\phi(0) := \lim_{t \rightarrow 0^+} \phi(t)$ and $\phi(\infty)/\infty := \lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t)/t$ with the convention " $0 \cdot \infty = 0$ ". Generating functions ϕ with the properties stated in this definition are called ϕ -divergence functions or simply ϕ -functions.

It is known that D_ϕ are all reflexive (i.e. $D_\phi(P, P) = 0$), $\phi(0) + \phi(\infty)/\infty > 0$ and the range of $D_\phi(P, Q)$ is

$$0 \leq D_\phi(P, Q) \leq \phi(0) + \phi(\infty)/\infty, \quad P, Q \in \mathcal{P},$$

where the upper bound is achieved if P, Q are two singular measures. The value of $D_\phi(P, Q)$ does not depend on the choice of dominating measure μ , we can take e.g. $\mu = (P + Q)/2$. Further, $D_\phi(P, Q)$ are all invariant with respect to the linear transform of the form $\tilde{\phi}(t) = \phi(t) - \phi'_+(1)(t - 1)$, $t \in (0, \infty)$, where $\phi'_+(1)$ denotes derivatives of ϕ at $t = 1$ from the right. Thus every ϕ -function has its nonnegative version $\tilde{\phi}$ with the same ϕ -divergence and $\phi'_+(1) = 0$. The widely used examples of ϕ -divergences are summarized in the following Table 1.

	$\phi(t)$	$\tilde{\phi}(t)$	$D_\phi(P, Q)$
Kullback (I)	$-\ln t$	$-\ln t + t - 1$	$I(Q, P) = \int q \ln \frac{q}{p} d\mu$
Shannon (I)	$t \ln t$	$t \ln t - t + 1$	$I(P, Q) = \int p \ln \frac{p}{q} d\mu$
Variation (V)	$ t - 1 $	$2 - 2t, \quad t < 1$ $0, \quad t \geq 1$	$V(P, Q) = \int p - q d\mu$
Pearson (χ^2)	$t^2 - 1$	$(t - 1)^2$	$\chi^2(P, Q) = \int \frac{(p-q)^2}{q} d\mu$
Neyman (χ^2)	$(1 - t)/t$	$(t - 1)^2/t$	$\chi^2(Q, P) = \int \frac{(p-q)^2}{p} d\mu$
Le Cam (LC^2)	$2 \frac{1-t}{1+t}$	$\frac{(t-1)^2}{t+1}$	$LC^2(P, Q) = \int \frac{(p-q)^2}{p+q} d\mu$
Hellinger (H^2)	$2(1 - \sqrt{t})$	$(\sqrt{t} - 1)^2$	$H^2(P, Q) = \int (\sqrt{p} - \sqrt{q})^2 d\mu$
Vajda (χ^a)	—	$ t - 1 ^a$	$\chi^a(P, Q) = \int q^{1-a} p - q ^a d\mu$
Matusita (M_a)	—	$ t^a - 1 ^{1/a}$	$M_a(P, Q) = \int p^a - q^a ^{1/a} d\mu$
Power (I_a)	$\frac{t^a - 1}{a(a-1)}$	$\frac{t^a - a(t-1) - 1}{a(a-1)}$	$I_a(P, Q) = \frac{1}{a(a-1)} (\int p^a q^{1-a} d\mu - 1)$

Table 1: Standard examples of ϕ -divergences

Note that, in the case of I_a -divergence, it holds $I_{\frac{1}{2}}(P, Q) = 2M_{\frac{1}{2}}(P, Q) = 2H^2(P, Q)$, $I_2(P, Q) = \chi^2(P, Q)/2$, $I_{-1}(P, Q) = \chi^2(Q, P)/2$ and the limits of I_a at $a = 1$ and $a = 0$ provided us with the Shannon information divergence $I_0(P, Q) = I(P, Q)$ and the reversed Kullback-Leibler divergence $I_1(P, Q) = I(Q, P)$. For advanced theory of ϕ -divergences see Vajda (1989).

2. Generalized ϕ -divergences with examples

A divergence function ϕ is said to be *fully normalized* if $\phi(t)$ is twice differentiable at $t = 1$, $\phi'(1) = 0$ (i.e. ϕ is nonnegative), and $\phi''(1) = 1$. Now, let $\psi : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be a convex or concave function on $(0, \infty)$, with the property of being twice differentiable at $t = 1$ with $\psi''(1) \neq 0$. Then

$$\bar{\phi}(t) = \frac{\psi(t) - \psi(1) - \psi'(1)(t-1)}{\psi''(1)}, \quad t \in (0, \infty), \quad (1)$$

is a fully normalized divergence function. Table 2 illustrates how some divergences in Table 1 arise from very simple ψ -functions via construction (1).

	Kullback (I)	Pearson (χ^2)	Neyman (χ^2)	Le Cam (LC^2)
$\psi(t)$	$\ln t$	t^2	$\frac{1}{t}$	$\frac{1}{1+t}$
$\bar{\phi}(t)$	$-\ln t + t - 1$	$(t-1)^2/2$	$\frac{(t-1)^2}{2t}$	$\frac{(t-1)^2}{t+1}$
	Hellinger (H^2)	Power (I_a)	Tuned (D_a)	
$\psi(t)$	\sqrt{t}	$t^a, a \neq 0, 1$	$t^{(a+1)/2}, a \neq \pm 1$	
$\bar{\phi}(t)$	$2(\sqrt{t} - 1)^2$	$\frac{t^a - a(t-1) - 1}{a(a-1)}$	$4 \frac{t^{\frac{a+1}{2}} - (a+1)(t-1)/2 - 1}{(a+1)(a-1)}$	

Table 2: ψ -functions for standard ϕ -divergences

Example 1 (Generalized Le Cam divergence). Motivated by Le Cam distance LC^2 (see Table 2) we introduce *generalized Le Cam divergence* $LC_\beta(P, Q)$ by means of strictly convex ψ -function

$$\psi_b(t) = \frac{1}{b+t}, \quad t \in (0, \infty), \quad a \geq 0.$$

Applying construction (1) we get

$$\bar{\phi}_b(t) = \frac{b+1}{2} \frac{(1-t)^2}{b+t}, \quad t > 0, \quad b \geq 0.$$

Corresponding divergences $D_{\bar{\phi}_b}(P, Q)$ are closely related to the so-called blended divergences which can be found in the recent literature. Indeed, if we denote $\beta = 1/(b+1) \in [0, 1]$, then we obtain

$$\bar{\phi}_\beta(t) = \frac{1}{2} \frac{(t-1)^2}{(1-\beta) + \beta t}, \quad t > 0, \quad \beta \in [0, 1],$$

and

$$LC_\beta(P, Q) := D_{\bar{\phi}_\beta}(P, Q) = \frac{1}{2} \int \frac{(p-q)^2}{\beta p + (1-\beta)q} d\mu, \quad P, Q \in \mathcal{P}.$$

The special cases are Pearson's $\chi^2(P, Q)/2$ for $\beta = 0$ ($b \rightarrow \infty$), Neyman's $\chi^2(Q, P)/2$ for $\beta = 1$ ($b = 0$), and LeCam's distance $LC^2(P, Q)$ for $\beta = 1/2$ ($b = 1$). Further, $\bar{\phi}_\beta(t)$ is strictly convex on $(0, \infty)$ for all $\beta \in [0, 1]$. Consequently, $LC_\beta(P, Q)$ are unbounded divergences for the limit values $\beta = 0$ and $\beta = 1$, but they are bounded for all $\beta \in (0, 1)$.

Lindsay (1994) found exactly the same divergences by the modification of weights inside the integral expression of Pearson's χ^2 -divergence. Due to this connection, the parameter β of this type is called *blending parameter*.

It is easy to verify that $\bar{\phi}_\beta^*(t) = \bar{\phi}_{1-\beta}(t)$, $\beta \in [0, 1]$, so that $LC_\beta(P, Q)$ satisfies the skew symmetry about $\beta = 1/2$, $LC_\beta(P, Q) = LC_{1-\beta}(Q, P)$, $P, Q \in \mathcal{P}$. This provides the only one symmetric divergence $LC_{\frac{1}{2}}(P, Q) = LC^2(P, Q)$ in the class of generalized LeCam divergences.

Example 2 (Generalized Hellinger divergence). The presented method of construction (1) can be combined with standard transformation techniques preserving convexity of transformed functions. Let start, for all $b \geq 0$, with the ψ -function

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1 - t^{2a}}{b + t^a}, \quad b \geq 0, \quad a \neq 0, 1.$$

We employ the convex transformation $f(y) = y^2$ to obtain $\psi_{a,b}^2(t)$. Since $\psi_{a,b}$ is not nonnegative on $(0, \infty)$ then the transformation $f(y) = y^2$ need not preserve convexity nor concavity and it have to be treated separately. Let us consider only the special case for $a = 1/2$. Then the function

$$\phi_b(t) := \psi_{\frac{1}{2},b}^2(t) = \left(\frac{1-t}{b + \sqrt{t}} \right)^2, \quad t \in (0, \infty),$$

is convex for all $b \geq 0$ and construction (1) provides us with the fully normalized divergence function $\bar{\phi}_b(t) = (b+1)^2 \phi_b(t)/2$. The blending parameter $\beta = 1/(1+b) \in [0, 1]$ leads to

$$\bar{\phi}_\beta(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{1-t}{1-\beta + \beta\sqrt{t}} \right)^2, \quad t \in (0, \infty), \quad \beta \in [0, 1],$$

with the corresponding *generalized Hellinger divergence*

$$H_\beta(P, Q) = \frac{1}{2} \int \frac{(p-q)^2}{(\beta\sqrt{p} + (1-\beta)\sqrt{q})^2} d\mu, \quad P, Q \in \mathcal{P}.$$

The particular cases are Pearson's $\chi^2(P, Q)/2$ for $\beta = 0$ ($b \rightarrow \infty$), Neyman's $\chi^2(Q, P)/2$ for $\beta = 1$ ($b = 0$), and Hellinger's $2H^2(P, Q)$ for $\beta = 1/2$ ($b = 1$). The function $\bar{\phi}_\beta(t)$ is strictly convex on $(0, \infty)$ for all $\beta \in [0, 1]$ and all the blended divergences $H_\beta(P, Q)$ for $\beta \in (0, 1)$ are bounded. Similarly as in Example 1, $\bar{\phi}_\beta^*(t) = \bar{\phi}_{1-\beta}(t)$, $\beta \in [0, 1]$. Consequently, the skew symmetry about $\beta = 1/2$ takes place, $H_\beta(P, Q) = H_{1-\beta}(Q, P)$, $P, Q \in \mathcal{P}$, which provides the only symmetric divergence $H_{\frac{1}{2}}(P, Q) = 2H^2(P, Q)$ in this class.

3. Clustering via the distribution mixtures

We denote the *distribution mixture* to be any convex combination

$$p(x|\Theta) = \sum_{j=1}^M \alpha_j p_j(x|\theta_j), \quad \sum_{j=1}^M \alpha_j = 1, \quad \alpha_j \geq 0,$$

where $p_j(x|\theta_j)$ are probability density functions on \mathbb{R}^D , α_j are the weight factors, $x \in \mathbb{R}^D$, and M is number of the components. Further, we consider only mixtures of the normal densities in the present paper, thus $\theta_j \in \mathbb{R}^s$ stands for the vector of mean and covariance matrix of the j -th mixture component. Now, let $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ be a sequence of i.i.d. observations of a random variable X under the density $p(x|\Theta)$. We expect M data clusters according to the components of the mixture. We detect to which component of the mixture the observation x_i belongs through the vector t_i

$$(t_i)_k = \alpha_k p_k(x_i|\theta_k) / \sum_{m=1}^M \alpha_m p_m(x_i|\theta_m), \quad k \in (1, \dots, M).$$

The k -th component of t_i evaluates the probability of x_i belonging to the k -th component of the mixture. If we prefer only a scalar indicator, we define t_i simply by

$$t_i = \arg \max_{k \in M} \alpha_k p_k(x_i|\theta_k).$$

The best normal mixture fit will be done through the maximum likelihood principle. More rigorously, the experimentally measured characteristics of the signals are considered to be an independently drawn sequence $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ from the density $p(x|\Theta)$, $\Theta = (\alpha_1, \dots, \alpha_{M-1}, \theta_1, \dots, \theta_M)$. The best estimate $\Theta^* \in \Delta$ of the real valued vector parameter governing the distribution of the data is yielded by maximizing the *log-likelihood function* $l(\Theta|\mathbf{x}) = \ln p(\mathbf{x}|\Theta)$ with respect to all possible choices of the argument Θ

$$l(\Theta|\mathbf{x}) = \ln p(\mathbf{x}|\Theta) \stackrel{iid}{=} \ln \prod_{i=1}^N p(x_i|\Theta) = \sum_{i=1}^N \ln \sum_{j=1}^M \alpha_j p_j(x_i|\theta_j).$$

The maximum likelihood method within the distribution mixture may bear some specific issues:

- *The mixture is not identifiable.* The identifiability property means that for every distinct $\Theta_1, \Theta_2 \in \Delta$, $p(x|\Theta_1) \neq p(x|\Theta_2)$ a.s. Since the identifiability property does not hold for the distribution mixture in general, the sequence of ML estimators does not have to be consistent. Some identifiability problems can be resolved easily, e.g. the component permutation invariance can be solved by component sorting. In [4], McLachlan presents example of the estimator which is stuck within a connected subset of Δ , where the Fisher's information matrix is singular.
- *The loglikelihood function is not bounded* even for the simplest mixture since every observation x_i leads to a singularity of the loglikelihood function. This seemingly

unwelcome behavior of the mixture implies that one component fits to a single observation, i.e. that one component becomes the delta function. These overfitted solutions are called “spurious clusters” and they are disregarded because they inevitably reject any other data set besides \mathbf{x} .

- *The analytical work with the loglikelihood function proves to be difficult.* Fortunately, there exists a simple iterative algorithm which provides the local maximizers of the likelihood function called the *Expectation Maximization algorithm*.

4. EM algorithm

Now we introduce the missing information principle. Let the random variable $Z = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$ be given, where X be an observable random variable connected to the own experiment and Y be an unobservable random variable that provides the information from which mixture component the observed X was drawn. We refer Z to be the complete data with the observed data X and the missing data Y . Let $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ be i.i.d. random sequence drawn from X , which was observed, and sequence $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_N)$ from Y which is missing. We denote $\mathbf{z} = ((x_1, y_1)^T, \dots, (x_N, y_N)^T)$, the complete data. Further, we denote the conditional expectation of the complete data loglikelihood function as

$$q(\Theta, \Phi) = E[l_c(\Theta|\mathbf{z})|\mathbf{x}, \Phi].$$

The k-th iteration of the EM algorithm consists of two steps, the Expectation and the Maximization step:

E-step: Calculate $q(\Theta, \Theta^k)$.

M-step: Maximize $q(\Theta, \Theta^k)$ with respect to the first argument Θ ,

$$\Theta^{k+1} = \arg \max_{\Theta \in \Delta} q(\Theta, \Theta^k).$$

The iteration steps of the EM algorithm are repeated until specific convergence rule is fulfilled. It can be proved [6] that the iteration of the EM algorithm either increases the value of the loglikelihood function $l(\Theta^k|\mathbf{x})$ or Θ^k is already a stationary point $\hat{\Theta}$ of $l(\Theta|\mathbf{x})$, albeit it does not have to be a local minimum. The advantage of the EM algorithm is that for a few distributions, among which belongs the mixture of normal components, the iteration steps of the EM algorithm can be solved analytically. The formula calculating Θ^{k+1} was derived in the closed form and can be found in [5]. We now list the most important properties of the EM algorithm:

1. EM algorithm always converges to a stationary point $\hat{\Theta}$ of the loglikelihood $l(\Theta|\mathbf{x})$.
2. EM algorithm naturally suppresses superfluous components by forcing their weights close to zero.
3. The local maximum found by the iterative EM algorithm strongly depends on the initial point Θ^0 , since the EM algorithm cannot escape away from once reached stationary point. We usually initialize the EM algorithm either randomly or through some traditional cluster analysis solution while running the EM algorithm several times repeatedly.

4. We stop the iterations once $l(\Theta^{k+1}|\mathbf{x})/l(\Theta^k|\mathbf{x}) - 1$ descends under certain $\varepsilon > 0$.

The derivation of the closed form solution of EM algorithm requires the number of components of the mixture M to be known. There exists a variety of methods dealing with estimation of the optimal number of components of the mixture. In the following experiments, we used the normal mixture ICL criterion [7].

5. Experiments and results

The practical results are the main focus of this section, where we combine both the main approaches described above, i.e. the generalized ϕ -divergences and the distribution mixture method. Consequently, we verify this proposed acoustic signal classification method on both laboratory and experimental data sets. The advantage of the combined method is that it is able to assess the number of clusters of the signals and simultaneously it is robust in the sense that it ignores sparse outliers that would distort either the standard statistical estimates or classical nonstatistical approach.

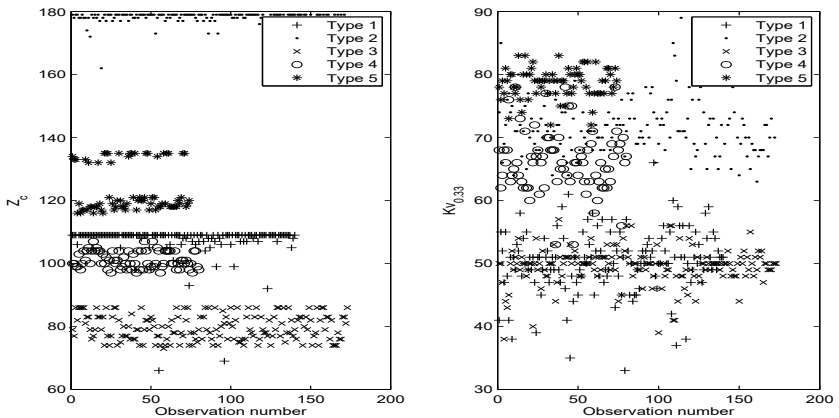


Figure 1: *Parameter separation by means of Z_c and $Q_{0.33}$.*

All processing laboratory measured acoustic signals were detected through the piezoceramic sensors attached to the thin metal plate of sizes $1,8m \times 0,6m \times 3mm$. Emitted signals were measured and stored on a computer by means of measuring device DAKELXEDO in 12-bit accuracy and 4 MHz sampling rate. The resolution 12-bit means that the measuring sampling apparatus was able to distinguish the voltage in the interval $[-2048mV, 2048mV]$. The acoustic emissions coming from the sensors are continuously monitored. We generated several versions of acoustic sources in the central part of experimental plate.

We perform our cluster analysis with certain parameters computed also from the normalized signal spectrums X_f found through discrete Fourier transform. The spectrum is normalized to one in order to obtain the estimate of spectral density of the signal

$\{X_t\}_{t=0}^{T-1}$, where T stands for digital length of the emission event (in our case $T = 6144$). The normed spectrum is given by $\tilde{S}(f) = |X_f| / \sum_{f=0}^{T-1} |X_f|$. We compute several parameters from the normed spectrums and signals and then we use these parameters in the methods of classification mentioned above. We designed the following **classification parameters or attributes** $W_\alpha, Q_\beta, Z_c, D_\phi$:

$$W_\alpha = \arg \min_{l \in [0, T-1]} \sum_{f=0}^{T-1} |l - f| \left| |X_f| - |\bar{X}_f| \right|^\alpha, \quad \alpha \in [1, \infty),$$

$$Q_\beta = \min \{ F \in [0, T-1] : \sum_{f=0}^F |X_f| \geq \beta \}, \quad \beta \in (0, 1),$$

$$Z_c = \sum_{t=\tilde{t}}^{T-1} \delta(x_t), \quad \delta(x_t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(x_t x_{t+1}) = -1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad c \in (0, 1),$$

$$D_\phi = \sum_{f=0}^{T-1} \tilde{S}(f) \phi \left(\tilde{S}^{refer}(f) / \tilde{S}(f) \right),$$

where $|\bar{X}_f|$ denotes the arithmetic mean $|\bar{X}_f| = \sum_{f=0}^{T-1} |X_f| / T$,

$$J_\gamma = \{ j \in [0, T-1] : |X_j| \geq \gamma \max_{f \in [0, T-1]} |X_f| \}, \quad \gamma \in (0, 1),$$

and \tilde{S}^{refer} is a normed reference spectrum, $\tilde{S}^{refer}(f) = \sum_{i=1}^m |\tilde{S}^i(f)| / m$. Here m denotes the number of observations from one sort of acoustic emission signals, $\tilde{S}^i(f)$ are individual realizations of the normed spectrum $\tilde{S}(f)$.

In this paper we work with the specific classification parameters: W_2 (denoted as W), $Q_{0.33}$, $Z_{\frac{1}{20}}$ (denoted as Z_c), D_ϕ discrete form of the generalized Hellinger divergence of the Example 2 with blending parameter $\beta = 0.5$ (denoted as H_D).

Laboratory data. We measured five types of acoustic emission signals in a laboratory environment. The signals were excited approximately in the central part of metal plate and then digitalized via the Dakel-Xedo acoustic measurement system. Then the above mentioned spectral attributes were computed for each signal. The separation by means of proposed attributes can be seen in Figure 1. Here, in the case of our laboratory data set, the newly introduced parameter Z_c separates the signal clusters very well, five distinct sets of Z_c values are apparently present. The other signal attributes separate the clusters to some extent, but some signal types remained overlapped. To be able to perform a tradeoff analysis of the classification success rate and the model complexity, we applied the normal mixture independently on different sets of classification attributes. We present interesting results in the table below:

Parameters	$Q_{0.33}, W$	$Z_c, Q_{0.33}$	$Z_c, Q_{0.33}, H_D$
Success rate	49%	83%	85%

Experiment 16530. Experiment 16530 consisted of destructive testing of the steel plate material No.16530 which was exposed to strong pressure of a very hard ball. The experiment proceeds till the destruction of the steel material emerged, i.e. the ball passed through the plate so that the material was no longer disposable for any reasonable applications in the industry. Very similar overstrain processes can be found in our real life, when repeated load of pressure is caused by any sharp and hard object ending in a complete damage of the industrial device under consideration. The main task of acoustic emission is to distinguish the level of material degradation and prevent us against the critical accident or emergency affair in transportation, chemical or energetic industry.

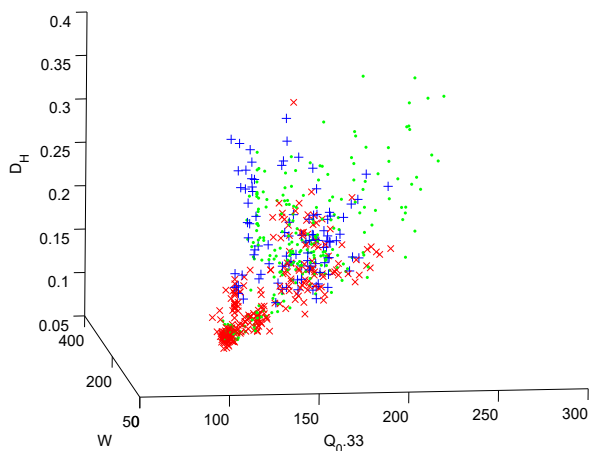


Figure 2: *EM-algorithm based on attributes W , $Q_{0,33}$ and H_D for experimental data set.*

In this experiment 16530 we tried to separate detected signals of the first period of the experiment when the steel material has not been too damaged yet, from the last period of the experiment, when the plate was close to destruction just before the failure. We had at disposal overall 587 acoustic signals, which were divided into three groups:

- **initial phase** (without apparent damage) – the first 100 signals considered,
- **middle phase** of the experiment – the signals from 101 to 350,
- **terminal phase** (extensively damaged steel) – the signals from 351 to 587.

We used the EM algorithm classification method combined with the generalized Hellinger ϕ -divergence D_H to obtain the reliable separation of the initial, middle and terminal stage of the 16530 experiment. The results are shown in Figures 2 and 3 for two different sets of classification attributes. The successes were the following: the method is able to distinguish between all the **three phases** of experiment in **63 percents**. Moreover, if we seek for the separation of the only **initial** (safe) period **against** the **terminal** (critical

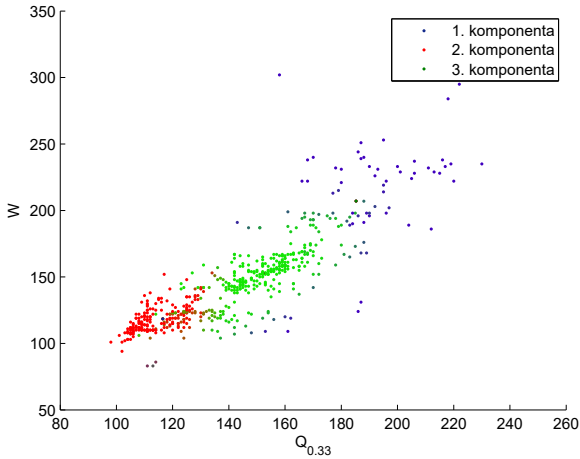


Figure 3: *EM-algorithm clustering parameters W , $Q_{0.33}$ for the experimental data set.*

dangerous) period, we achieve about **81 percents** of successful signal separation, which is quite satisfactory result in general. In addition to that promising percentage separation, we yield these results without any signal preprocessing and without any expert based purification of the data set. We only proceed to restrict ourselves to middle part of the signals detected, it means we worked with the cutout part of the signal ranged from 500 to 500+1536 digitally sampled values for each acoustic signal. By our observations, the successful separation was achieved mainly due to the classification attribute $Q_{0.33}$ which was quite powerful in detection of the overall mass concentration changes in frequency domain of the signals depending on the level of destruction of 16530 material.

References

- [1] Lindsay B.G. (1994) Efficiency versus robustness. The case for minimum Hellinger distance and other methods. *Annals of Statistics*, vol. 22, pp. 1081–1114.
- [2] Vajda I. (1989) *Theory of Statistical Inference and Information*. Kluwer, Boston.
- [3] G. McLachlan, D. Peel. *Finite Mixture Models*. J. Wiley, New York 2000.
- [4] G. McLachlan, T. Krishnan. *The EM algorithm and Extensions*. J. Wiley, New York 1997.
- [5] Jan Tláškal. *Statistical Classification Methods in Accoustic Emission*. Diploma thesis (MSc) at FNSPE CTU in Prague, 2009.
- [6] A.P. Dempster, N.M. Laird, D.B. Rubin. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*, **B 39**, 1-38, 1995.
- [7] C. Biernacki, G. Celeux, G. Covaert. Assessing a mixture model for clustering with the integrated classification likelihood. *Technical Report No 3521*. Rhône-Alpes: INRIA, 1998.



AE SOURCE LOCATION BY NEURAL NETWORKS INDEPENDENT ON MATERIAL AND SCALE CHANGES

LOKALIZACE ZDROJŮ AE NEURONOVÝMI SÍTĚMI NEZÁVISLE NA ZMĚNÁCH MATERIÁLU A MĚŘITKA

Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Department

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

Abstract

The localization of acoustic emission (AE) sources by procedures using artificial neural networks (ANN) represents today highly effective alternative approach to classical triangulation algorithms. Nevertheless, the application possibilities of ANN are limited due to several reasons. The main problems are in the collecting sufficiently extensive training and testing data sets together with the non portability of particular trained network to any other object. Recently, the ANN based AE source location method has been improved by using so-called signal arrival time profiles to overcome both limitations. This way of signal arrival time characterization enables ANN training on numerical models and allows the application of learned ANN on real structures of various scales and materials. In this paper, the method is upgraded and localization results are illustrated on experimental data obtained during pen-tests on a model roof I-beam and an aircraft structure part. General application possibilities of the method variations for different sensor configurations are also discussed.

Key words: *acoustic emission, arrival time profiles, source localization, artificial neural networks.*

Abstrakt

Lokalizace zdrojů akustické emise (AE) procedurami využívajícími umělé neuronové sítě (ANN) je vysoce efektivní alternativou ke klasickým triangulačním algoritmům. Možnosti aplikace ANN však mohou být z různých důvodů omezené. Mezi hlavní problémy patří především sběr dostatečného množství reprezentativních tréninkových dat a nepřenositelnost konkrétní naučené sítě na jiné úlohy. Jako řešení obou problémů se v poslední době osvědčila metoda na bázi ANN, využívající tzv. časové profily. Tento způsob charakterizace časů příchodů signálů k jednotlivým snímačům umožňuje učení ANN na numerických modelech s následnou aplikací na reálné konstrukce různých měřítek a materiálů. V příspěvku je tato metoda dále zdokonalena a demonstrována na experimentálních datech, získaných při pen-testech na modelovém střešním nosníku a součásti letecké konstrukce. Diskutovány jsou rovněž obecné možnosti aplikace jednotlivých variant metody pro různé konfigurace snímačů.

Klíčová slova: *akustická emise, časové profily, lokalizace zdrojů, umělé neuronové sítě.*

1. Úvod

Pro charakterizaci mechanismu poškození materiálových konstrukcí na základě analýzy signálů akustické emise (AE) je v první řadě nezbytné co nejpřesněji určit polohu emisního zdroje. Nejčastěji aplikovaný triangulační algoritmus vychází při analytickém výpočtu souřadnic zdroje AE z časových diferencí příchodů signálů k jednotlivým snímačům a rychlosti šíření elastické vlny [1]. Analytické vzorce jsou však známy jen pro případ isotropních desek. Algoritmus rovněž předpokládá geometrickou spojitost oblasti lokalizace. Možnosti jeho praktického uplatnění jsou tak v mnoha případech velmi omezené, zejména při testování složitějších součástí.

Problém lze řešit matematickým modelem šíření napěťových vln. Pro reálné potřeby lokalizace zdrojů AE je tento postup ale příliš komplexní a výpočetně velmi náročný. Budeme-li předpokládat, že nejrychlejší typ vlny se v konstrukci šíří po geometricky nejkratších cestách, je možné výpočet redukovat na hledání nejpřímější trasy mezi snímačem AE a místem emisního zdroje, např. pomocí geodetických křivek [2]. I tato metoda je však v praxi poměrně komplikovaná. Předpokládá rozdělení materiálu na části, jejichž tvar lze parametricky popsat. Vyžaduje řešení soustav diferenciálních rovnic a znalost rychlosti šíření elastické vlny. Hranice mezi sousedními částmi tělesa jsou pouze diskretizovány tzv. uzlovými body, které zprostředkovávají průchod vlny. Výsledky této metody lze interpretovat jako tabulku typických časových diferencí, odpovídajících dostatečnému počtu zvolených lokalizací emisních zdrojů. Reálné časové diference jsou pak s těmito „tabulkovými“ hodnotami srovnávány a hledány nejlépe vyhovující, přesněji řečeno nejbližší podle vhodné zvolené míry.

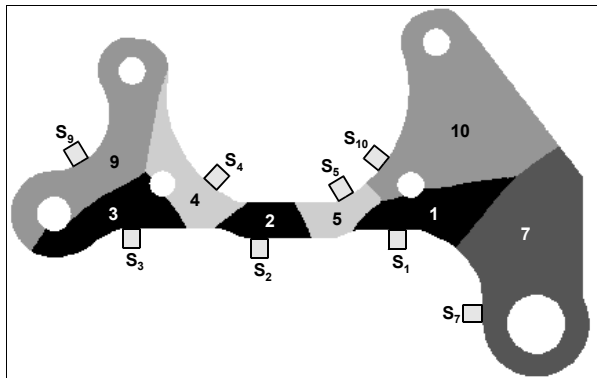
Nově zavedený přístup k lokalizaci zdrojů AE pomocí časových profilů [3] umožňuje podstatné zjednodušení výše uvedené metodologie. Využívá interpolační schopnosti umělých neuronových sítí ve vícerozměrných parametrických prostorech. Výhodným předzpracováním naměřených časů příchodu signálu k jednotlivým snímačům zaručuje navíc univerzálnost konkrétní naučené neuronové sítě, tj. nezávislost na změně materiálu a měřítka. Novou metodu lze ilustrativně uvažovat jako převod výše zmiňovaných tabulek typických časových diferencí na hodnoty zobecněných časových profilů, pomocí kterých jsou neuronové sítě následně učeny. 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 pouze pomocí geodetických křivek. V případě jednoduchých tvarů materiálu postačí eukleidovská vzdálenost zdroj-snímač.

Pro složitější tělesa (2D nebo 3D) byla navržena nová metoda, inspirovaná Huygensovým principem šíření vln. Aproximuje geodetickou vzdálenost v diskrétně zadaných tělesech, tj. 2D nebo 3D rastrových obrázcích. Obchází tak nutnost parametrického popisu složitých konstrukcí, které lze pro potřeby 2D lokalizace jednoduše zadat pomocí digitální fotografie. Nejkratší vzdálenost je aproximována lomenou čarou, která svými vrcholy i rovnými úseky prochází jednotlivými „pixly“ reprezentujícími diskretizaci materiál, přičemž maximální vzdálenost mezi vrcholy je omezena předem danou hodnotou, představující řád (úroveň) metody. V základních úrovních postup připomíná známé algoritmy plánování cest na mřížce jako např. záplavové vyplňování potenciálového pole nebo Dijkstrův algoritmus pro hledání

nejkratší cesty v grafu. Navrženou metodou lze postihnout rovněž anizotropii materiálu. Spolu s expertním algoritmem odhadu začátku signálu [4], časovými profily [3] a umělými neuronovými sítěmi tak představuje efektivní aparát umožňující velmi přesnou lokalizaci zdrojů AE.

2. Profily časů příchodu signálu

Využití informace o časech příchodů signálů k jednotlivým snímačům pomocí časových profilů je inspirováno předběžnou expertní analýzou polohy emisního zdroje, při níž je sledovaná konstrukce rozdělena na zóny podle prvního příchodu signálu k jednotlivým snímačům. Na obr.1 jsou různými odstíny šedi vybarveny zóny na ukázkové složitější konstrukci. Zóny odpovídající lokalizacím emisních zdrojů, jejichž signály detekuje příslušný senzor jako první. Jinými slovy, v oblasti označené jako N leží body, které jsou nejbližší ke snímači S_N .



Obr.1 Ilustrativní rozdělení složité konstrukce na zóny podle prvního příchodu signálu AE k jednotlivým snímačům

Fig.1 Illustrative splitting of a complex structure into zones by first AE signal arrival to each sensor

Z obr.1 je patrné, že sama informace o prvním příchodu signálu poskytuje dobré východisko pro další zpřesnění lokalizace emisního zdroje, zvláště v případech malých vzdáleností mezi senzory. Každou zónu „prvního příchodu“ lze dále dělit na podoblasti podle specifické chronologie detekce elastické vlny zbylými snímači. Tímto způsobem mohou být zdroje AE zběžně lokalizovány pomocí tabulky všech možných posloupností příchodů signálu AE k jednotlivým senzorům.

Pro přesnější postižení chronologie detekce signálů byly v [3] zavedeny tzv. časové profily. Předpokládejme konfiguraci N snímačů AE umístěných na rovinném tělese. Označme T_i dobu šíření elastické vlny od zdroje ke snímači S_i . Časový profil (ATP - Arrival Time Profile) je vektor s následovně definovanými složkami p_i :

$$p_i = \frac{NT_i - \sum_{j=1}^N T_j}{\sum_{k=1}^N \left| T_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \right|} \quad (1)$$

Je zřejmé, že pomocí běžných analyzátorů AE není možné tyto časové intervaly T_i určit bez znalosti polohy emisního zdroje. K dispozici jsou pouze časy příchodů signálu k jednotlivým snímačům. Nicméně, označíme-li t_s čas inicializace zdroje AE, je snadné upravit původní vzorec (1) pomocí vztahu $T_i = t_i - t_s$:

$$p_i = \frac{N(t_i - t_s) - \sum_{j=1}^N (t_j - t_s)}{\sum_{k=1}^N \left| t_k - t_s - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_j - t_s) \right|} = \frac{N t_i - \sum_{j=1}^N t_j}{\sum_{k=1}^N \left| t_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j \right|} \quad (2)$$

Označme dále d_i vzdálenost mezi zdrojem AE a snímačem S_i . Dosazením vztahu $T_i = d_i/v$ do (1) lze dále odvodit:

$$p_i = \frac{N \frac{d_i}{v} - \sum_{j=1}^N \frac{d_j}{v}}{\sum_{k=1}^N \left| \frac{d_k}{v} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{d_j}{v} \right|} = \frac{N d_i - \sum_{j=1}^N d_j}{\sum_{k=1}^N \left| d_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j \right|} \quad (3)$$

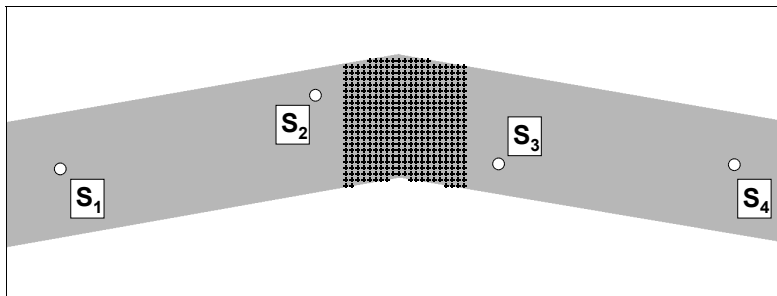
Je tedy zřejmé, že časové profily lze počítat z časů příchodů t_i nebo vzdáleností d_i podle příslušných modifikací definičního vzorce (1). Ze vztahu (3) navíc plyne nezávislost na změně rychlosti v elastické vlny. Obdobně se vykrátí jakýkoliv násobek vzdáleností d_i , tedy změna měřítka tělesa stejného tvaru. Ve smyslu této „univerzality“ mohou být neuronové sítě učeny např. numericky generovanými daty, odvozenými ze vzdáleností naměřených na proporcionálním modelu uvažované konstrukce nebo její fotografii s využitím algoritmu na hledání nejkratších cest. Ve fázi vybavování, kdy jsou na vstupy sítě předkládána neznámá data, je možné zpracovávat časové profily počítané již ze skutečných časů příchodů.

Výše uvedené vlastnosti časových profilů značně rozšiřují aplikační možnosti neuronových sítí. V první řadě řeší problémy při získávání dostatečného počtu tréninkových a testovacích dat, což může být jinak v praxi velmi náročné a v mnohých případech i nemožné. Zejména z důvodu vysokých hladin šumu nebo velkých měřících chyb mohou být experimentálně získaná učící data nejednoznačná a tudíž nepoužitelná. V takových případech nelze zaručit dostatečně jemné pokrytí vstupního prostoru vhodnými tréninkovými daty. Problém nepřenositelnosti konkrétní naučené sítě na jinou úlohu je časovými profily rovněž vyřešen díky jejich nezávislosti na změně rychlosti elastické vlny v materiálu nebo měřítka tělesa.

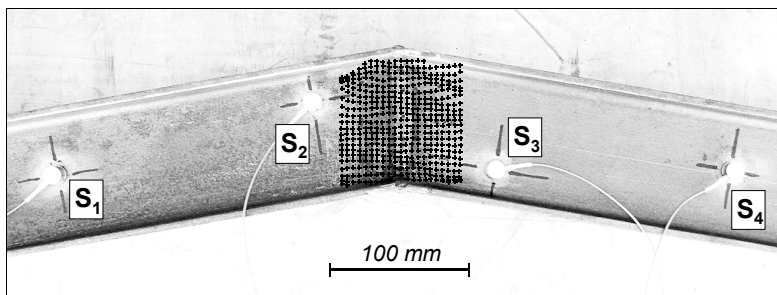
3. Lokalizace pen-testů na střešním nosníku

Aspekty lokalizační metody na základě časových profilů a neuronových sítí ilustrujeme následujícím experimentem. Úkolem je určení polohy tří sad pen-testů na modelovém střešním nosníku, svařeném ze dvou dílů 100mm I-profilů. Pro danou konfiguraci čtyř snímačů (viz obr.2) je třeba vypočítat tréninková data, na nichž se neuronová síť naučí lokalizovat emisní události z oblasti kolem svaru. Tvar tělesa definuje původní digitální fotografie nosníku převedená do dvou barev, kdy šedá znamená materiál a bílá barva představuje prostředí, v němž se elastické vlny nešíří (viz obr.2). Pro výpočet typických časových profilů byly zvoleny body pokrývající kritickou oblast, na obr.2 vyznačené křížky. Vzdálenosti těchto virtuálních zdrojů ke všem snímačům odhadla metoda hledající nejkratší cesty v obrázku. Následoval

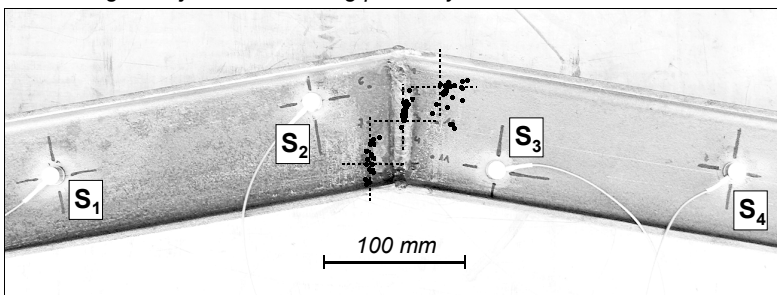
výpočet profilů časů příchodu podle vzorce (3) a učení neuronové sítě na aproximaci původní souřadnice virtuálního zdroje. Přesnost výsledků natrénované neuronové sítě lze posoudit ze zpětné projekce učících bodů předložených na její vstupy a zobrazených přímo do původního obrázku (viz obr.3). Významnější nepřesnosti jsou patrné pouze na hranicích tréninkové oblasti, zejména v blízkosti snímače č.2. Jedná se o případ, kdy velmi blízké časové profily odpovídají rozdílným lokalizacím a neuronová síť nemá kapacitu aproximovat lokálně velmi strmou závislost.



Obr.2 Umístění virtuálních tréninkových zdrojů na testovaném tělese
Fig.2 The placement of virtual training sources on tested body

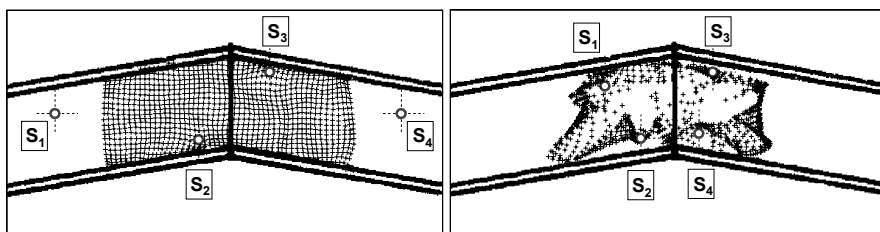


Obr.3 Projekce tréninkových bodů naučenou neuronovou sítí
Fig.3 Projection of training points by learned neural network



Obr.4 Výsledky lokalizace pen-testů
Fig.4 Results of pen-tests localization

Na obr.4 jsou uvedeny výsledky lokalizace tří sad 25-ti pen-testů provedených v místech vyznačených průsečíky čárkovaných čar. Rozptyl výsledných bodů je převážnou měrou způsoben chybou při určení začátku signálu, odhadovaných automatickou metodou [4]. Rozšíření tréninkové oblasti je možné pouze za předpokladu změny konfigurace snímačů AE. Množina virtuálních učicích zdrojů by neměla obsahovat body, které mají téměř shodné vzdálenosti ke všem snímačům, čímž ve vzorci (3) dochází k dělení velmi malými čísly. Metoda se tak stává numericky nestabilní a neuronové sítě jsou nuceny aproximovat příliš strmé závislosti, na což při rozumném množství neuronů nemají kapacitu. Výsledky projekce virtuálních tréninkových zdrojů pro dvě různé konfigurace snímačů můžeme porovnat na levé a pravé části obr.5:



Obr.5 Projekce virtuálních tréninkových zdrojů pro dvě různé konfigurace snímačů
 Fig.5 Projection of virtual training sources for two different sensor configurations

4. Lokalizace emisních signálů při zatěžování letecké součásti

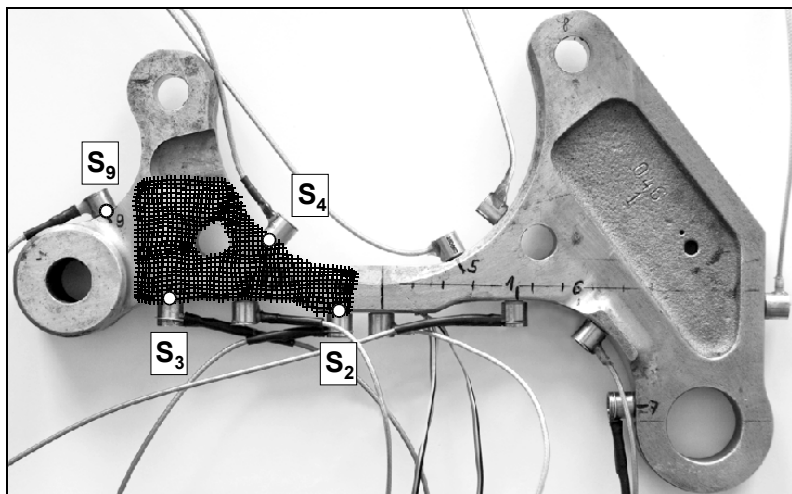
Výše popisovaná metoda byla původně vyvíjena pro zpřesnění lokalizace zdrojů AE na součásti předního podvozku letounu L-410, zvané "Steering Actuator Bracket" (SAB), která je spolu se snímači AE ilustrována na obr.6. Jelikož měření rychlosti elastické vlny na této součástce vykazuje příliš velký rozptyl, klasická triangulace se pro lokalizaci emisních zdrojů neosvědčila a bylo nutné hledat alternativní metody.

SAB byl cyklicky tahově namáhán jednoosým zatěžovacím strojem Instron-Schenck 100kN. Akustickou emisi během cyklování monitoroval a zaznamenával AE systém DAKEL XEDO. Na součásti zároveň probíhala expertní optická kontrola možné iniciace trhlin v materiálu.

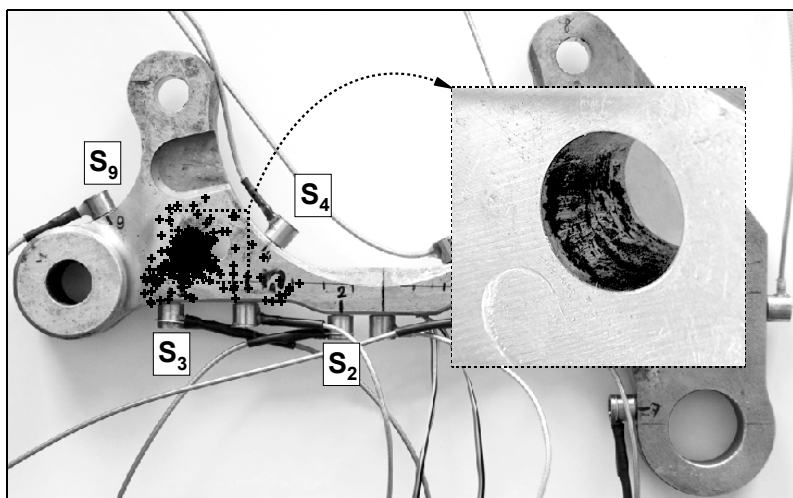
Pro lokalizaci zdrojů AE byla aplikována obdobná metodologie jako v případě střešního nosníku. Výpočet tréninkových dat vycházel z fotografie součástky, ve které metoda pro hledání nejkratších cest odhadla příslušné vzdálenosti virtuálních zdrojů ke snímačům. Následovala aplikace vzorce (3) a učení neuronové sítě na aproximaci původních souřadnic zdrojů. Nejlepší výsledky byly dosaženy pomocí neuronových sítí specializovaných na oblasti vymezené jen čtyřmi snímači. Vzdálenější senzory jsou spíše zdrojem větší chyby při určování začátku, než zpřesněním metody.

V průběhu dosavadního namáhání (během 290 tisíc zatěžovacích cyklů) byly detekovány emisní zdroje pouze od stěn otvorů pro upevňovací šrouby, od nekvalitně přilepených snímačů a poškozených tenzometrů. Typickým příkladem je otvor na levé straně součásti (viz obr.7), v jehož spodní levé čtvrtině se kumulují lokalizace detekovaných emisních událostí z příslušné poloviny součástky. Z detailního záběru v pravé části obr.7 je patrné silné opotřebení stěny otvoru vlivem

tření o šroub, což je nejpravděpodobnější vysvětlení mechanismu emisního zdroje. Na obr.6 jsou pro ilustraci plošného vývoje aproximační chyby zobrazeny tréninkové body zpětně promítnuté neuronovou sítí do původní učicí oblasti.



Obr.6 Projekce virtuálních tréninkových zdrojů naučenou neuronovou sítí
Fig.6 Projection of virtual training sources by learned neural network



Obr.7 Výsledky lokalizace skutečného emisního zdroje
Fig.7 Results of real emission source localization

5. Závěry

V příspěvku je testována metoda lokalizace zdrojů AE na bázi umělých neuronových sítí využívajících nově definované časové profily. Tento způsob relativizace chronologie příchodů signálu AE k jednotlivým snímačům umožňuje významné rozšíření aplikačních možností ANN. Popisována je metodologie lokalizace zdrojů AE na modelovém střešním nosniku a součásti předního podvozku letounu. Hlavní přednosti algoritmu mohou být shrnuty do následujících bodů:

- Metoda je inspirována zběžnou expertní analýzou lokalizace emisních zdrojů, zohledňující chronologii detekce signálu AE jednotlivými snímači.
- Nově zavedené časové profily umožňují numerické generování dostatečného počtu přesných učicích dat bez měřicích chyb. K jejich výpočtu lze použít vzdálenosti emisních zdrojů ke snímačům, odhadnuté algoritmem pro hledání nejkratších cest v materiálu na rastrovém obrázku konstrukce.
- Časové profily jsou nezávislé na změně měřítka a rychlosti elastické vlny v materiálu. Naučené neuronové sítě mohou být tedy aplikovány na všechny proporcionálně shodné konstrukce z jakéhokoliv izotropního materiálu.
- Pro zaručení numerické stability metoda paradoxně vyžaduje nesymetrické konfigurace snímačů AE.
- Největším zdrojem lokalizačních chyb je nepřesné určení začátku signálů a nikoli aproximační chyba naučené neuronové sítě.
- Metoda časových profilů se ukázala jako přenosný, robustní a snadno aplikovatelný algoritmus pro lokalizaci zdrojů AE.

Poděkování

Práce vznikla za podpory grantů MPO ČR č. FR-TI1/274 a FR-TI1/198.

Literatura

- [1] Blaháček M.: *Lokalizace zdrojů akustické emise pomocí umělých neuronových sítí*. (Diplomová práce, ČVUT FJFI, 1999)
- [2] Svojtka P., Kús V.: *Lokalizační algoritmy akustické emise pomocí geodetických křivek*. (37th Internat. Conf. on NDT "DEFEKTOSKOPIE 2007", Prague, 7-10 November 2007, Proc. ed. by M. Kořenská, P. Mazal, CNDT 2007, ISBN 978-80-214-3504-9, pp.249-256).
- [3] Chlada M., Blaháček M., Převorovský Z.: *Aplikace časových profilů při lokalizaci zdrojů AE pomocí neuronových sítí*. (39th Internat. Conf. on NDT "DEFEKTOSKOPIE 2009", Prague, 6-4 November 2009, Proc. ed. by P. Mazal, L. Pazdera, CNDT 2009, ISBN 978-80-214-3973-3, pp.303-310).
- [4] Chlada M.: *Expertní detekce příchodu signálu AE*. (36th Internat. Conf. on NDT "DEFEKTOSKOPIE 2006", Tábor, 7-9 November 2006, Proc. ed. by P. Mazal, CNDT 2006, ISBN 80-214-3290-X, pp.91-100)



DAMAGE DETECTION IN Mg-ALLOYS BY NONLINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY

DETEKCE POŠKOZENÍ Mg SLITIN NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVOU SPEKTROSKOPIÍ

Jan KOBER*, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ**, Zuzanka TROJANOVÁ***

*Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering

**Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Department

***Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics

kober@it.cas.cz

Abstract

Nondestructive evaluation of materials using nonlinear ultrasonic spectroscopy (NEWS) was performed on flat samples of Mg alloys. Initial state of variously prepared alloys specimens was tested by two-frequency NEWS method - Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). Three piezoelectric transducers were attached to a specimen. Two of them transmitted harmonic signals of different frequencies and the remaining sensor acted as signal receiver. Amplitude of one emitted signal was increased in defined steps so as to observe nonlinear effects. Consequently, spectral analysis of received signals was carried out, and harmonic or intermodulation spectral components were evaluated. Derived nonlinear parameters of tested samples were compared with results of visual inspection and metallographic analysis.

Key words: *nonlinear wave modulation spectroscopy, Mg alloys, Nondestructive Evaluation of Materials (NDE).*

Abstrakt

Na plochých zkušebních tělesech z hořčíkových slitin byl metodou nelineární ultrazvukové spektroskopie (NEWS) testován výchozí stav různě připravených vzorků. K nedestruktivnímu hodnocení byla použita dvou-frekvenční NEWS metoda - nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS). Na zkušební tělesa byly připevněny 3 piezoelektrické měniče, z nichž dva vysílaly harmonické signály o rozdílných frekvencích a zbylý měnič zaznamenával odezvu na buzení. Amplituda jednoho z vysílaných harmonických signálů byla postupně zvyšována tak, aby se projevil nelineární efekty. Následně byla provedena spektrální analýza zaznamenaných signálů s vyhodnocením harmonických a intermodulačních složek. Na základě spekter byly vyhodnocovány nelineární parametry. Získané spektrální charakteristiky byly porovnávány s výsledky vizuálního pozorování zkušebních těles na výskyt defektů a s výsledky metalografické analýzy.

Klíčová slova: *nelineární vlnově modulační spektroskopie, Mg slitiny, nedestruktivní hodnocení materiálů.*

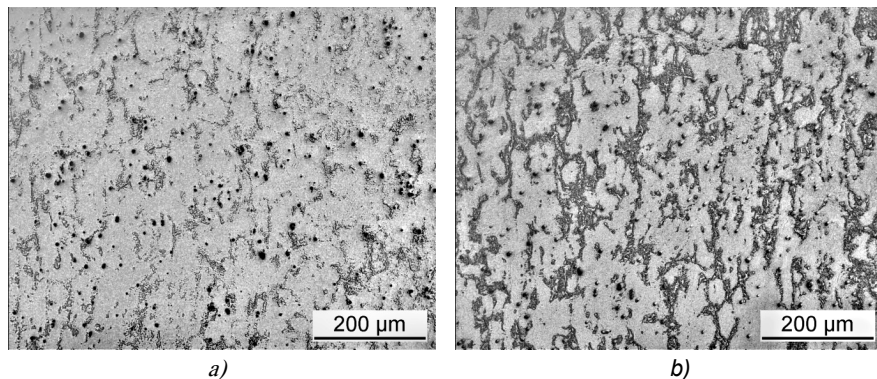
Úvod

Podíl nasazení slitin hořčíku v průmyslových aplikacích se stále zvyšuje. Slitiny hořčíku disponují výhodným poměrem pevnosti a hustoty. Jednou z nejčastěji používaných slitin je slitina AZ91, která obsahuje legující prvky hliník a zinek. Používá se pro lití přesných konstrukčních dílů i na výrobu válcovaných a protlačovaných profilů. Výhodné mechanické vlastnosti AZ91 (pevnost, houževnatost a odolnost vůči vysokocyklické únavě) jsou do jisté míry podmíněny vlastnostmi struktury materiálu. Obecnou nevýhodou hořčíkových slitin je jejich citlivost na přítomnost koncentrátorů napětí (např. konstrukčních vrubů a především trhlin) [1-3]. Uvedené skutečnosti poukazují na potřebu využití metod nedestruktivního hodnocení materiálu. V tomto článku jsou demonstrovány možnosti použití metody nelineární vlnově modulační spektroskopie na vzorcích z válcované slitiny AZ91 obsahujících defekty.

Materiál

Zkoušena byla čtyři plochá válcovaná tělesa z hořčíkové slitiny AZ91. Rozměry zkušebních těles byly shodně 120 x 15 x 1,5 mm. Slitina AZ91 je běžně používána pro tlakové lití a na výrobu plechů válcovaných za tepla. Hlavními legujícími prvky jsou Al (9 hm. %), Mn (0,13 hm. %) a Zn (0,7 hm. %). Mangan se do slitiny přidává za účelem zjemnění zrna, zinek a hliník pro zvýšení pevnosti [4].

Na zkušebních tělesech byla provedena kvalitativní EDX analýza, která odhalila výraznější zastoupení dalších prvků, především C a O. Jejich obsah byl ale na sledovaných vzorcích srovnatelný. Mikrostruktura materiálu je tvořena zrný tuhého roztoku Mg a Zn, částicemi intermetalické fáze $Mg_{17}Al_{12}$ a kulovitými částicemi Mn.

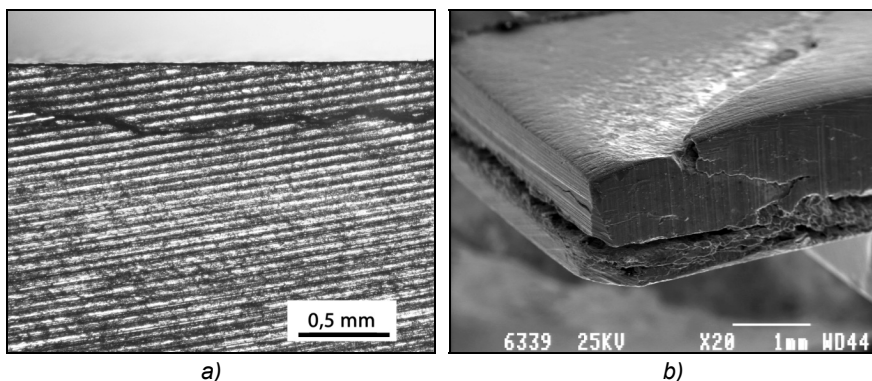


Obr. 1: Rozdíly v mikrostruktuře materiálu v rovině válcování.

- a) mikrostruktura vzorku 11
- b) mikrostruktura vzorku 15

Struktura analyzovaných vzorků vykazuje výraznou texturu danou válcováním a je značně nehomogenní. Metalografická analýza odhalila významné rozdíly v mikrostruktuře jednotlivých vzorků (viz obr. 1). Pro strukturu materiálu vzorku 11 jsou typické oddělené oblasti jemných rovnoosých zrn s výskytem jemných kulovitých částic precipitátu $Mg_{17}Al_{12}$ na hranicích zrn. Místy dochází ke koalescenci precipitátů do hrubších částic orientovaných do směru válcování. Struktura materiálu vzorku 15 vykazuje častější výskyt hrubých částic precipitátu. Tyto částice ale nejsou spojeny do větších celků jako u struktury materiálu vzorku 22. Metalografická analýza vzorku 23 nebyla provedena.

Zkušební tělesa byla také pozorována pod stereomikroskopem při relativně malých zvětšeních. Na stěnách těles, které byly kolmé k rovině válcování, byly pozorovány podélné trhliny. Trhliny ležely převážně v rovině válcování a zpravidla se nacházely blízko pod povrchem tělesa (viz Obr.2a). Nejvíce trhlín bylo zaznamenáno na vzorku 15. Vzorek obsahoval trhlinu sahající od konce až ke středu tělesa (tj. cca 6 cm dlouhá trhlina obr. 2b) a několik menších trhlín o rozměrech nepřesahujících 1 cm. U vzorků 11 a 23 bylo zaznamenáno stejné množství trhlín rozměry nepřesahující 1 cm. Na vzorku 22 nebyly žádné podpovrchové trhliny objeveny. Drobné trhlinky ale byly pozorovány na metalografickém výbrusu.



Obr. 2: Poškození vzorku 15: a) světelná mikroskopie, b) SEM.

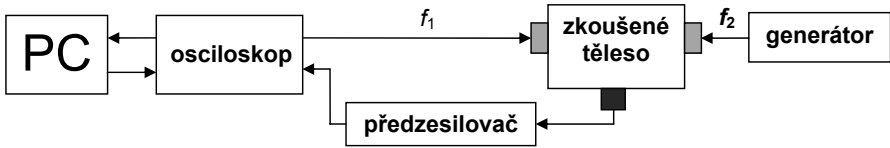
Metodika NWMS

Pro hodnocení vad ve vzorcích byla použita metoda nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS) [5,6]. Metoda vyžaduje použití nejméně tří ultrazvukových měničů. Dva z nich vysílají budící harmonické signály o rozdílných frekvencích f_1 a f_2 . Odezva na buzení je současně zaznamenávána prostřednictvím zbylých snímačů. Obecné schéma experimentálního uspořádání je na obr. 3. Konkrétní hodnoty budících frekvencí f_1 a f_2 jsou voleny s ohledem na vlastnosti použitých budičů a na geometrii a mechanické (modální) vlastnosti zkoušeného tělesa. Obecně mají být

budící frekvence voleny mimo rezonanční frekvence zkoušeného tělesa i budičů. Frekvence f_1 je volena alespoň třikrát nižší než frekvence f_2 , ale nesmí být jejím celočíselným násobkem. Dále je vhodné, aby typický interval mezi harmonickými frekvencemi a intermodulačními frekvencemi Δ (1) byl co největší. Potom bude zaručeno dobré rozlišení jednotlivých spektrálních složek měřeného signálu.

$$\Delta = \left| \text{round} \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \cdot f_1 - f_2 \right| \quad (1)$$

Měření probíhá tak, že zkoušené těleso je současně buzeno harmonickými signály o frekvencích f_1 a f_2 . Amplituda signálu s frekvencí f_2 se během měření nemění a amplituda signálu s frekvencí f_1 je postupně zvyšována v několika krocích. Pro každý krok je zaznamenána odezva zkoušeného tělesa. Následně je provedena spektrální analýza zaznamenaných signálů a vyhodnoceny harmonické složky f_1 a intermodulační produkty (postranní pásma okolo frekvence f_2 a jejich harmockých)



Obr. 3: Schéma konfigurace experimentu

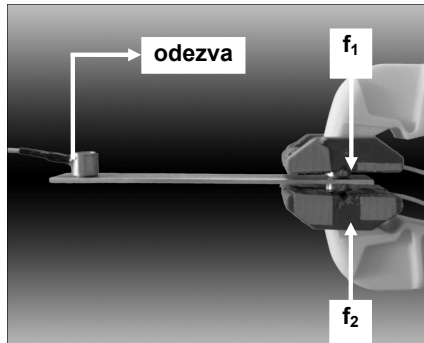
Defekty ve zkoušeném tělese se projeví nelineárním růstem harmonických a intermodulačních složek spektra odezvy. Informace o poškození přichází z objemu tělesa přibližně vymezeného polohou budičů a přijímačů. Při použití různých konfigurací polohy budičů a přijímačů metoda umožňuje vymezení defektních oblastí. Určení rozsahu poškození je možné pouze komparativně.

Výsledky měření a diskuse

Vzorky Mg slitiny byly upevněny do měřicího přípravku. Budiče harmonických signálů byly umístěny naproti sobě ve svěrkách. Akustická vazba byla tvořena přes silikonovou vazelinu. Přijímač odezvy byl kyanoakrylátovým lepidlem přitmelen na druhém konci tělesa (viz obr. 4). Aby se vyloučily vlivy experimentálního uspořádání na výsledky měření, byla provedena série měření při různých konfiguracích poloh budičů a přijímače. Bylo prokázáno, že výsledky měření při různých konfiguracích jsou srovnatelné.

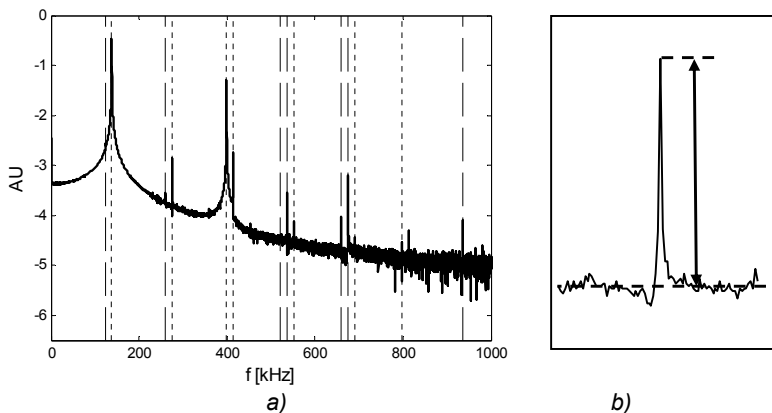
Při měření byly piezoelektrické měniče buzeny signály o frekvencích $f_1 = 138$ kHz a $f_2 = 399$ kHz. Budící amplituda signálu s frekvencí f_1 byla zvyšována v 17 stejných krocích v rozmezí 2 – 10 V. Amplituda signálu s frekvencí f_2 byla 5 V a nebyla měněna. Odezva zaznamenaná přijímačem byla vedena přes předzesilovač se zesílením 20 dB. Součástí předzesilovače byl i filtr typu horní propust s mezní

frekvencí 20 kHz. Signály odezvy byly zaznamenávány do PC pomocí USB osciloskopu a celý průběh měření byl řízen z programového prostředí MATLAB. Signály odezvy byly vzorkovány frekvencí 25 MHz (14 bit ADC) s délkou záznamu 128 kslov.



Obr. 4: Experimentální uspořádání zkoušek vzorků Mg slitiny.

Ze záznamů byla vyhodnocována frekvenční spektra signálů a z nich byly odečteny amplitudy složek odpovídající harmonickým frekvencím od f_1 a f_2 a intermodulačním produktům ($f_1 \pm f_2$, $f_1 \pm 2f_2$, $2f_1 \pm f_2$ apod.). Amplitudy zkoumaných složek byly vyhodnoceny tak, že byla odečtena výška odpovídajícího maxima od lokální střední hladiny šumu (viz obr.5b)



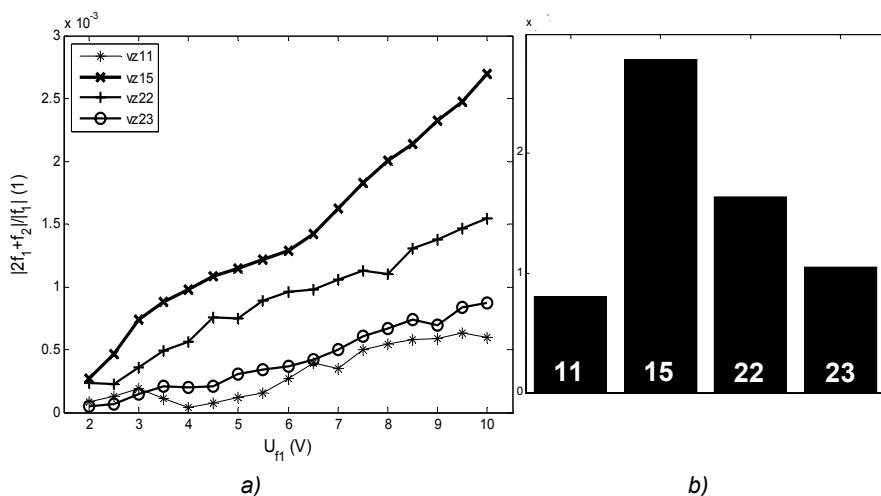
Obr. 5: a) Výřez z naměřeného spektra v semilog. souřadnicích s vyznačenými harmonickými (tečkovanou čarou) a intermodulačními frekvencemi (čárkovanou čarou). b) Ukázka odečtu hodnoty maxima ze spektra v lineárních souřadnicích

Odečtené hodnoty amplitud byly normovány amplitudou složky o frekvenci f_1 . Tímto způsobem bylo možné hodnotit nelineární chování analyzovaných složek spektra.

Jako nejvhodnější ukazatel nelinearity se u všech vzorků jevil intermodulační produkt $f_2 + 2f_1$. Při použití metody NWMS se zpravidla hodnotí postranní pásma okolo dané frekvence společně, ale při dané volbě budících frekvencí je produkt $f_2 - 2f_1$ výrazněji ovlivněn blízkostí f_1 . Závislost amplitudy složky $f_2 + 2f_1$, normované amplitudou f_1 , na amplitudě budícího signálu s frekvencí f_1 je na obr. 6a. Jako souhrnný parametr nelinearity lze vyhodnotit směrnici uvedené závislosti. Její hodnoty pro jednotlivá tělesa jsou vynesena do grafu na obr. 6b.

Hodnoty získaných nelineárních parametrů jsou v dobrém souhlasu s informacemi zjištěnými o vzorcích vizuálním pozorováním a podrobnou metalografickou analýzou. Největší nelinearitu vykazuje vzorek 15, na kterém bylo nalezeno nejvíce drobných trhlin, způsobených přípravou vzorku. Nelineární odezva vzorků 11 a 23 je srovnatelná, což odpovídá rozsahu poškození pozorovanému vizuálně. V případě nelinearity vzorku 22 jde pravděpodobně o spolupůsobení odezvy od drobných trhlin a vlastností struktury materiálu (velikost a deformace zrn), která je výrazně odlišná od ostatních vzorků.

Bylo experimentálně zjištěno, že pro uskutečněná měření jsou výsledky použité metody nezávislé na konfiguraci polohy budičů a přijímače a na volbě budících frekvencí. Hlavním kritériem pro porovnatelnost jednotlivých měření je přibližná shoda amplitud signálové odezvy na dané buzení.



Obr. 6: a) Závislost amplitudy intermodulační složky $f_2 + 2f_1$ na amplitudě budícího signálu pro sledované vzorky
 b) porovnání směrnic regresních přímek proložených závislostmi ad a)

Závěry

Na vzorcích Mg slitiny AZ91 byly zkoumány možnosti detekce vad ve vzorku pomocí nelineární ultrazvukové spektroskopie (NEWS). Aplikací NEWS metody dvou-frekvenčního směšování (NWMS) bylo porovnáním výsledků s metalografickou analýzou zjištěno, že metoda není závislá na konkrétním experimentálním uspořádání a volbě budících frekvencí. Hlavním kritériem porovnatelnosti výsledků měření na více tělesech je srovnatelná velikost amplitudy odezvy na dané buzení. Spektrální rozbohem získané nelineární parametry dobře korelují s materiálovými defekty zjištěnými jinými metodami. Úroveň nelinearity ve zkušebních tělesech, charakterizovaná amplitudou intermodulačního produktu $f_2 + 2f_1$ je pravděpodobně určována jak přítomností defektů v tělese, tak lokálními vlastnostmi struktury vyšetřovaného materiálu. Výsledky měření ukazují, že metodika NEWS může být vhodná nejen pro detekci vad v konstrukci (výskyt trhlin, koroze, apod.), ale i pro nedestruktivní hodnocení struktury materiálu.

Poděkování

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR-TI1/274 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS10/302/OHK4/3T/14.

Literatura

- [1] GRÉGR M., KOCICH R., JÍLEK L.: *Struktura hořčkových slitin po válcování a ECAPu*. (Kovárenství č.32, 2008)
- [2] HUBÁČKOVÁ J., ČÍŽEK L., KONEČNÁ R.: *Strukturální charakteristiky hořčkové slitiny AZ91*. (sb. konf. METAL 2003)
- [3] JANÍK V. et al.: *Hodnocení mikrostruktury a vlastností odlitků ze slitiny AZ91HP*. (sb konf. METAL 2006)
- [4] DRÁPALA J., et al.: *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs*. (Hořčík a hořčkové slitiny, skriptum VŠB - TU Ostrava, 2004, pp. 14-31, ISBN 80-248-0579-0)
- [5] GUYER, Robert A.; JOHNSON, Paul A. *Nonlinear Mesoscopic Elasticity: The Complex Behaviour of Granular Media including Rocks and Soil*. (Nonlinear Elasticity and Nondestructive Evaluation and Imaging, Wiley-VCH, Weinheim 2009, pp. 323-367, ISBN 978-3-527-40703-3)
- [6] DELSANTO P.P., ed: *Universality of Nonclassical Nonlinearity : Applications to Non-Destructive Evaluations and Ultrasonics*. (Springer Science, New York 2006, pp. 49-67, ISBN 0387-33860-8).



EXPLOITATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR FLOW-ACCELERATED CORROSION (FAC) MONITORING

VYUŽITÍ METODY AE PRO DETEKCI KOROZE URYCHLENÉ PROUDĚNÍM

Václav KOULA ¹⁾, Martin DRÁB ²⁾, Michal HAVAVKA ³⁾

¹⁾ ZD Rpety – DAKEL, ²⁾ FJFI ČVUT, ³⁾ Atómové elektrárne Bohunice (SK)
Contact e-mail: info@dakel.cz

Abstract

In this text we summarize the current procedures of steam pipeline inspections in nuclear powerplant Bohunice. A method of acoustic emission was used for localization of areas with an intensive FAC process. A STV parameter that correlates with the FAC process intensity has been derived and a STV analyzer has been developed. The STV analyzer allows a simple measurement of the STV parameter in the operational conditions and a quick evaluation of the measured data. The term "Flow-Accelerated Corrosion (FAC) process" in this text covers the following three degradation mechanisms: cavitation degradation, liquid droplet impingement erosion and flow-accelerated corrosion.

Key words: FAC process, flow-accelerated corrosion, erosion, cavitation, acoustic emission

Abstrakt

V příspěvku jsou shrnuty současné postupy kontroly parních potrubí v jaderné elektrárně Bohunice. Pro lokalizaci míst s intenzivním procesem FAC byla použita metoda akustické emise. Byl odvozen parametr STV korelující s intenzitou procesu FAC a vyvinut analyzátor STV umožňující jednoduché měření v provozních podmínkách a rychlé vyhodnocení měřených dat. Pod pojmem Flow-Accelerated Corrosion proces (FAC) jsou v tomto příspěvku chápány tři degradační mechanismy: kavitační poškozování, eroze vodními kapkami a koroze urychlovaná prouděním.

Klíčová slova: proces FAC, koroze urychlená prouděním, eroze, kavitace, akustická emise

Problematické působení degradačních mechanismů na potrubní systémy sekundárního okruhu věnují provozovatelé jaderných elektráren v posledním období velkou pozornost. V důsledku provozních událostí na některých elektrárnách byly rozpracovány programy řízení stárnutí potrubních systémů a jsou implementovány v provozních podmínkách. Na elektrárně Bohunice byly v roce 1992 na potrubních systémech zejména odběrů páry na 4. bloku zjištěny úbytky tloušťky stěn a v roce 1993 byla realizována rozsáhlá výměna komponent několika zejména parních odběrových potrubí TG. V rámci řešení této problematiky byly pro potřeby elektrárny v letech 1993 – 5 provedeny výpočtové analýzy vybraných potrubních systémů SO EBO V-2, jejichž cílem bylo zjištění pravděpodobného technického stavu jednotlivých komponent z hlediska působení korozně-erozního procesu.

Výsledkem analýzy bylo stanovení rychlosti koroze, zbytkové životnosti a termíny kontroly, resp. výměny jednotlivých komponent. Podle doporučeného roku kontroly jsou pak v průběhu GO prováděna UZ měření tloušťky stěn. První měření provedené v r. 1992 je vzhledem k chybějícím údajům z doby montáže považované za nulté měření. Na základě těchto UZ měření se po každé kampani vyhodnocuje aktuální technický stav sledovaných komponent.

Přesto mohou nastat případy intenzivního procesu FAC, které nemohou výpočetní metody predikovat z důvodů neznalosti okrajových podmínek. Jedná se např. o svary potrubí, kde může existovat možné přesazení, nebo svar na vnitřním povrchu přesahuje a vytváří tak překážku, za kterou mohou v některých případech vznikat intenzivní turbulence, umožňující intenzivní erozně-korozní poškozování, viz např. schéma na obr. 1. V obr. 3 je pak naznačeno zeslabení stěn segmentového kolena, vyříznutého z potrubí 6. odběru TG32 EBO.

V současné době však chybí diagnostické metody, umožňující tyto procesy detekovat (viz konference FAC 2010, Lyon, květen 2010). Vzhledem k tomu, že procesy FAC generují spojitý signál akustické emise, nabízí se možnost aplikace metody AE v kombinaci s metodami analýzy šumu.

Signál AE byl vzorkován aparaturou DAKEL-IPL, frekvencí 2 MHz. Z obr. 2 je zřejmý spojitý charakter AE a pro zpracování navzorkovaného signálu v první fázi byla použita metoda průměrovaných frekvenčních spekter. Z každých 2048 vzorků byl proveden výpočet frekvenčního spektra a tato spektra byla průměrována v čase 1 sec. Byly tak získány spektrogramy, viz obr. 4, kde na ose X jsou frekvence, na ose Y čas a na ose Z amplituda frekvenčního spektra na každé frekvenci (s krokem 1 kHz), prezentovaná barevnou (zde černobílou) škálou.

Spektrogramy v obr. 4 jsou ze dvou identických potrubí Ø219 mm na dnes již odstaveném bloku č. 2 elektrárny V-1 Jaslovské Bohunice. Na jednom z těchto potrubí UZ měření prokázalo ostře vymezenou oblast zeslabení stěny procesem FAC, viz spektrogram v obr. 4 vlevo. V obr. 4 vpravo je pak spektrogram potrubí bez vady. Byla prokázána reprodukovatelnost těchto spektrogramů. Po analýze byl definován parametr STV, související s rozptylem amplitudy frekvenčních spekter na vybraných frekvencích. Ukazuje se, že detekce procesu FAC nesouvisí s tvarem vlastního frekvenčního spektra (ten závisí na geometrii potrubí, vlnovodu a použitého snímače), ale s fluktuací amplitudy spektra na významných frekvencích v závislosti na čase.

Závěry

- 1) Detekce procesů FAC na parních potrubích metodou akustické emise v provozních podmínkách jaderných elektráren je možná
- 2) Byl zkonstruován prototyp analyzátoru AE DAKEL-STV, který umožňuje měření a vyhodnocení parametru STV v podmínkách jaderné elektrárny
- 3) Jsou připravovány experimenty pro ověření dosahu detekce v provozních podmínkách a možné separace jednotlivých mechanismů porušování metodou AE

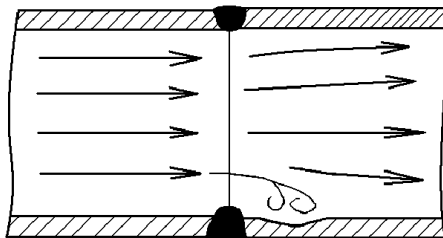
Literatura

[1] Koula, Václav – Dráb, Martin – Havavka, Michal: Possibilities of the Acoustic Emission Method for the Detection of Flow-Accelerated Corrosion, 2nd International FAC Conference on Flow Accelerated Corrosion (FAC 2010), Lyon, France, May 4-7, 2010

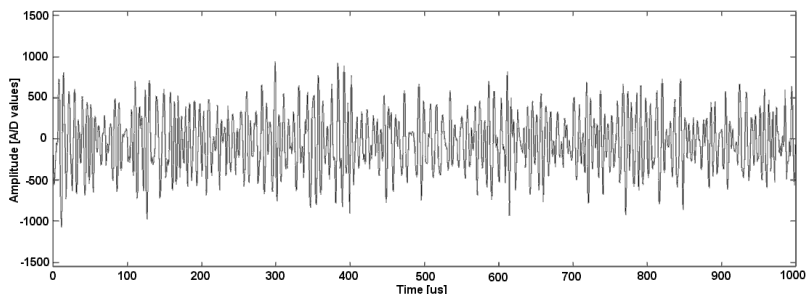
Prezentovaná metodika testování a analyzátor DAKEL- STV byly vyvinuty s podporou:

Úloha RVT č. 4600003655 „Vývoj a implementácia systému detekcie procesu poškodzovania potrubia pôsobením prúdiaceho média v podmienkach prevádzky elektrárne EBO V2“

Program MPO ČR TIP 09, projekt č. FR-TI1/371 „Integrovaný systém průběžného monitorování vybraných strojních uzlů a technologických procesů s využitím akustické emise“



Obr. 1: Vznik možného zdroje turbulencií - Genesis of turbulency source



Obr. 2: Signál spojitě AE - Continuous Acoustic emission signal

Segmentové koleno na 6. odběru TG32 EBO

průměr 426 mm, síla stěny 8mm

materiál ČSN 11416.1

tlak 1,059 MPa

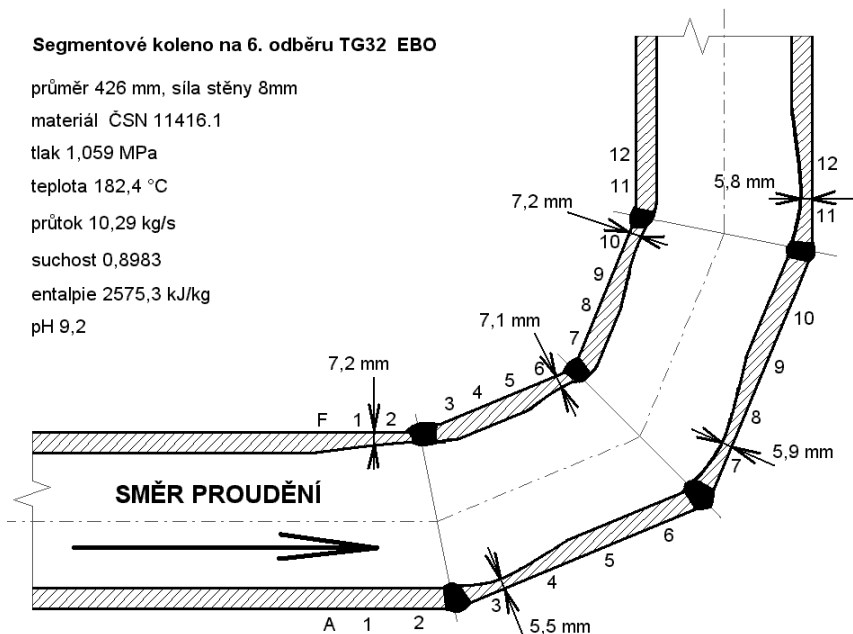
teplota 182,4 °C

průtok 10,29 kg/s

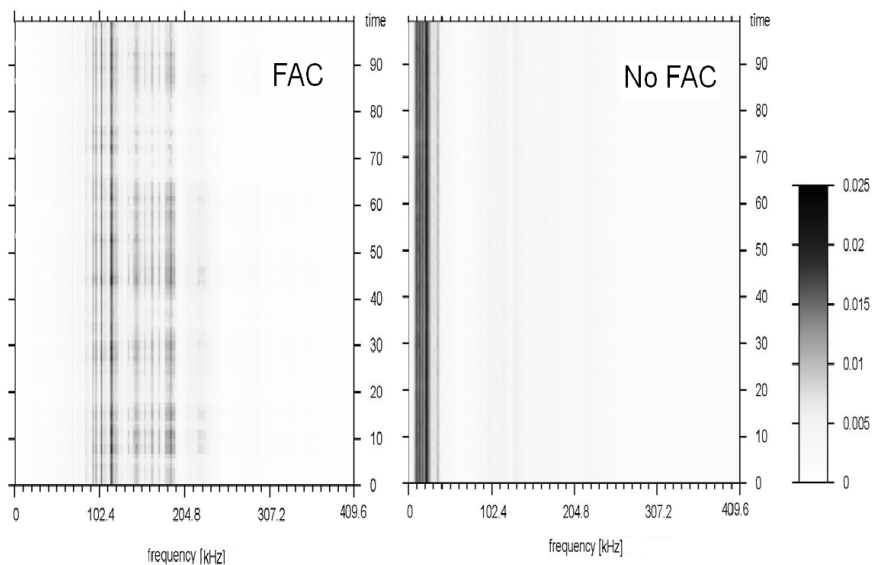
suchost 0,8983

entalpie 2575,3 kJ/kg

pH 9,2



Obr.3: Vyříznuté segmentové koleno - Segment-bend



Obr. 4: Srovnání spektrogramů s procesem FAC a bez něho
Spectrograms with active FAC process and without FAC



CONJUNCTION OF TWO ULTRASONIC NDT METHODS IN SHM SYSTEM

KOMBINACE DVOU ULTRAZVUKOVÝCH NDT METOD PŘI TVORBĚ SHM SYSTÉMU

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i.

zp@it.cas.cz

Abstract

Structural health monitoring (SHM) has become an important research area in the recent past. SHM system for instantaneous physical state assessment and residual life prediction of a structure is defined as a system with the ability to detect and interpret adverse changes in a structure in order to improve reliability and safety, and reduce life cycle costs. Such systems are today successively integrated into aerospace, and also into civil structures. The main goal of SHM is to prevent failures and limiting states of the structure, which can be achieved by periodic maintenance and repairs supported by proper diagnostics and early warning of limit states. Material and structural changes, resulting from aging and extreme events, can be reliably recognized by conjunction of various NDT/NDE methods. Selection of suitable methods is influenced as by technical parameters and economical indicators as well. Necessary conditions are also demands on full automation, including data transfer, processing, storage, and evaluation. Possibilities of two ultrasonic NDT methods combination, considered as a part of SHM systems are discussed in this paper. The first method is acoustic emission (AE), which enables real-time localization of structural damage initiation under operational stimulation conditions. The second method is Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS), which can be used without structure stimulation. The common employment of both methods is very effective as they both utilize the same piezoelectric transducers, cables, amplifiers, and signal recording and data evaluation devices. Additional signal generator with power amplifier is necessary in NEWS methods, although they can be also used for AE calibration. The utilization of common devices reduces necessary expenses for SHM system creation. A good correspondence of defective zones revealed by both methods is illustrated on fatigue damage of an aircraft part.

Keywords: *SHM, NDT, acoustic emission, nonlinear ultrasonic spectroscopy, defect location.*

Abstrakt

Systém pro monitorování okamžitého fyzikálního stavu konstrukce (SHM - Structural Health Monitoring) je definován jako systém schopný detekovat a interpretovat nežádoucí změny v monitorované konstrukci, s cílem zvýšit její spolehlivost a bezpečnost a snížit náklady, vynaložené během životnosti této konstrukce. SHM systémy jsou proto dnes postupně

integrovány do leteckých ale neztřídka i např. do stavebních konstrukcí. Hlavním úkolem SHM je předcházet porušování resp. vzniku mezního stavu konstrukce jak pravidelnou údržbou a opravami, tak zejména diagnostikou spojenou s včasným varováním blízkého se mezního stavu. Materiálové a konstrukční změny vlivem stárnutí a dalších extrémních událostí lze spolehlivě diagnostikovat pomocí kombinace různých NDT/NDE metod, při jejichž výběru je třeba kromě technické náročnosti uvažovat také ekonomické ukazatele, ale i možnosti plné automatizace včetně přenosu, zpracování, ukládání a vyhodnocení dat. V příspěvku jsou diskutovány možnosti kombinace dvou ultrazvukových NDT metod, uvažovaných jako součást SHM systémů pro letecké i stavební konstrukce. První z nich je akustická emise (AE), umožňující lokalizaci rozvíjejících se poruch při provozní stimulaci konstrukce v reálném čase, a druhá je nelineární ultrazvuková spektroskopie (NEWS), využitelná pro lokalizaci defektních zón i bez stimulujících zátěží. Současné nasazení obou těchto NDT metod je i z ekonomických hledisek velmi výhodné, neboť v obou případech jsou použity tytéž piezoelektrické snímače, kabeláž i zesilovače a zařízení pro registraci a vyhodnocování výstupních signálů. Pro metodu NEWS je oproti AE navíc zapotřebí přepínač kanálů a signálový generátor s budícím výkonovým zesilovačem, ale ty lze současně využít i při kalibraci AE. Společné využití většiny přístrojového vybavení oběma metodami podstatně snižuje náklady nezbytné na tvorbu SHM systému. Vzájemná korespondence defektních oblastí, vymezených oběma metodami je ilustrována na příkladu únavově namáhané letecké součásti.

Klíčová slova: SHM, NDT, akustická emise, nelineární ultrazvuková spektroskopie, lokalizace defektů

Poděkování: Práce vznikla za podpory grantů MPO ČR č. FR-TI1/274 a FR-TI1/198



POROVNÁNÍ ULTRAZVUKOVÉ KONTROLY TRUBEK S APLIKACÍ METODY MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU

Richard Regazzo, Václav Svoboda

Abstrakt :

Uvedený příspěvek se zabývá porovnáním dvou defektoskopických metod a to metody ultrazvukové a magnetické paměti materiálu aplikované na vzorcích trubek kotlových stěn. Jsou porovnány získané výsledky z trubek bez defektů a trubek s defekty vytvořenými po dlouhodobém provozu.

Ukazuje se dobrá shoda obou metod z hlediska výskytu defektů a dále při jejich lokalizaci na povrchu trubky.

Metoda magnetické paměti materiálu navíc nevyžaduje speciální úpravu povrchu pro provádění inspekce. Nedává informaci o velikosti defektu, ale určuje místa se zvýšenou koncentrací namáhání kde je potenciální nebezpečí vzniku trhlin (zejména únavových). Na základě výsledků lze podle speciálního programu určovat zbytkovou životnost zařízení po dlouhodobém provozu.

Z hlediska rychlosti prováděných inspekcí lze tuto metodu považovat za expresní.



BARKHAUSEN NOISE TESTING OF SURFACE DECARBURIZATION OF STEEL

TESTOVÁNÍ ODUHLIČENÉ VRSTVY OCELI METODOU BARKHAUSENOVA ŠUMU

Oleksandr STUPAKOV *, Ivan TOMÁŠ *, Břetislav SKRBEK **

* Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i., Na Slovance 2, 18221 Praha 8, Česká republika

** Technická univerzita v Liberci, Studenská 2, 46117 Liberec 1, Česká republika

Contact e-mail: stupak@fzu.cz, Web: www.fzu.cz/~stupak

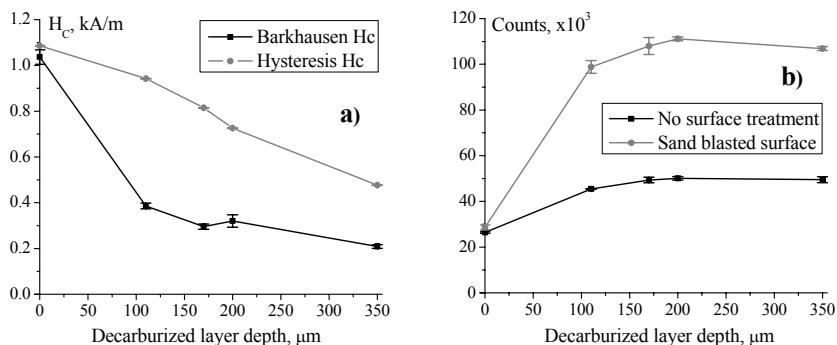
Industrially unfavorable process of surface decarburization of EN 54SiCr6 (CSN 414260) spring steel was simulated by annealing in air at 800°C with different time lags. Three sample series with different surface treatments were prepared: (i) no treatment after the annealing (with iron oxides at the surface), (ii) acid pickling and (iii) sand blasting. The obtained decarburized layers of 0.1-0.35 mm depth were examined by an optical microscope, by a wave dispersive spectrometer, and by a surface X-ray diffraction method.

Magnetic Barkhausen noise technique was tested for applicability of non-destructive characterization of the decarburized layer depth. A newly introduced parameter, Barkhausen noise coercivity, was proposed for practical use due to its sensitivity to the tested decarburization and its stability to the measurement conditions (see Fig. 1a). It was determined similarly to its hysteresis analogue as a field intersection point of the time integral of the envelope voltage of Barkhausen noise [1,2].

The sample surface field was measured directly by a vertical array of three Hall sensors. Their readings were extrapolated to the sample face to obtain the real subsurface sample field [1,2]. Other magnetic parameters, e.g. number of Barkhausen noise counts, were found to be sensitive to the residual compressive stresses for instance those introduced by the sand blasting (see Fig. 1b).

The authors are very grateful to Prof. J. Švejcar and Dr. N. Ganev for the performed wave dispersive and X-ray diffraction measurements, respectively. This work was supported by the Czech Science Foundation (GACR) under the project No. 101/09/1323.

Průmyslově nežádoucí proces oduhličení povrchové vrstvy běžné pružinové oceli ČSN 414260 (EN 54SiCr6) byl simulován žíháním na vzduchu při teplotě 800°C s různým časem výdrže v peci. Byly připraveny tři série vzorků s různě ošetřeným povrchem: (i) bez povrchové úpravy (s okujemi oxidů železa), (ii) s mořením v kyselině chlorovodíkové a (iii) s povrchem otryskaným pískem. Získané povrchové oduhličené vrstvy s tloušťkou v rozmezí 0,1-0,35 mm byly zkoumány optickým mikroskopem, vlnovým disperzním spektrometrem a metodou povrchové rentgenové difrakce.



Obr.1 (a) Závislosti Barkhausenovy a hysterézni koercitivity na hloubce oduhličené vrstvy pro sérii vzorků bez úpravy povrchů. (b) Závislosti počtu impulsů Barkhausenova šumu na hloubce oduhličené vrstvy pro sérii vzorků bez úpravy povrchů a ošetřené otrýskáním pískem.

Fig.1 (a) Dependencies of the Barkhausen noise coercivity and the hysteresis coercive force on the decarburized layer depth for the sample series with no surface treatment. (b) Similar dependencies of number of the Barkhausen noise counts for the sample series with no surface treatment and with the sand-blasted surface.

Studovali jsme zda je možno použít metodu magnetického Barkhausenova šumu pro nedestruktivní testování hloubky oduhličené vrstvy. Definovali jsme nový parametr, Barkhausenovu koercitivitu, která je vhodná pro praktické testování hloubky oduhličení pro svoji citlivost i svou stabilitu vůči podmínkám měření (viz Obr.1a). Tento parametr byl určen podobně jako tradiční magnetická hysterézni koercitivita jako průsečík časového integrálu obálky napětí Barkhausenova šumu s osou magnetického pole [1,2].

Povrchové pole vzorků bylo měřeno přímo s pomocí vertikální sady tří Hallových sond. Jejich údaje byly extrapolovány k povrchu vzorku aby bylo možno získat skutečné podpovrchové pole ve vzorku [1,2]. Bylo také zjištěno, že další magnetické parametry, např. počet impulsů Barkhausenova šumu, jsou citlivé na zbytkové tlakové napětí na povrchu vzorku, které může vzniknout např. po otrýskání pískem (viz Obr.1b).

[1] O. Stupakov, J. Pal'a, T. Takagi, T. Uchimoto: Governing conditions of repeatable Barkhausen noise response, *J. Magn. Magn. Mater.* **321** (2009), p. 2956-62.

[2] O. Stupakov, O. Perevertov, V. Stoyka, R. Wood: Correlation between hysteresis and Barkhausen noise parameters of electrical steels, *IEEE Trans. Magn.* **46** (2010), p. 517-20.



DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MAGNETOSTRICTIVE NDE TECHNIQUE FOR THE INTEGRITY ASSESSMENT OF THE STEEL STRAND EMBEDDED IN THE CONCRETE GROUT

Zhong-soo Lim, Taek-ryong Seong, Kyu-sik Park
RIST, Pohang, Rep. of Korea

Abstract:

The bridge is subject to a harsh environmental conditions for corrosion and breaking under varying stress. The assessment of the integrity of the prestressed multi wire steel strands embedded in the concrete grout is not an easy job until now and no particular method has been successfully developed. The magnetostrictive sensor can be used to generate the guided wave into the multi-core steel strand traveling along the axial direction. But the spatial restriction at the end section of the embedded concrete structure for multi strands layout makes it difficult to apply the magnetostrictive sensor technology therefore it has been restricted only to the stayed cable section. And the background noise from the embedded concrete structure makes it difficult to identify the flaw from the noise. We are focusing on the possibility of the application of the magnetostrictive sensor technology for the nondestructive inspection of the prestressed multi strands with multi core steel cable based on our self-developed electronics and custom software. The conventional heavy magnet is replaced by Ni-based strip using the remanent magnetic force as the bias magnetic field. The spatial restriction from the multi strand layout can be overcome by using the strip method which was developed for the pipe inspection. We has wrapped the multi-core steel strand with Ni-strip band which has been wound with Cu coil. And the band can be tightly fixed on the steel strand by a proper method. The electronics for the magnetostrictive sensor can be easily driven for the frequency scan and the frequency spectrogram is used for the defect asesment. The conventional rf waveform is susceptible to the noise from the embedded structure and a diversity of signal processing techniques has been developed to enhance the signal to noise ration. We can see directly the defect feature from the frequency spectrogram. But since the noise is still prominent we need further study to identify the defect information from the measurements. In this paper we will report the possibility of the magnetostrictive sensor technology for the defect assessment of the prestressed multi-core steel strand embedded in the concrete deck.

Key words: magnetostrictive sensor, multi wire steel strand bridge cable, frequency spectrogram, prestressed concrete deck



ULTRASOUND FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF COMPOSITE MATERIALS

ULTRAZVUK PRO NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ KOMPOZITOVÝCH MATERIÁLŮ

Petr Dobšák,

Olympus Czech Group, s.r.o., Evropská 176/16, 160 41, Praha 6

V uplynulých dvaceti letech došlo k výraznému rozvoji technologie výroby kompozitových materiálů a jejich nebyvalému rozšíření v technické praxi. V současné době nejsou tyto materiály zdaleka omezeny pouze na leteckou výrobu, ale prosazují se ve stále větší míře i do řady jiných průmyslových odvětví. Nedestruktivní zkoušení ultrazvukem se ukázalo jako efektivní metoda pro kontrolu kvality výroby, ale i pro indikaci a hodnocení případných provozních poškození. Přestože proces nedestruktivního zkoušení kompozitů ultrazvukem je v zásadě velice podobný zkoušení kovů, přesto vykazuje určitá specifika, díky kterým byly kromě univerzálních zařízení vyvinuty i přístroje které nenajdou uplatnění pro zkoušení jiných materiálů než kompozitových.

Měření tloušťky materiálu je základním parametrem který je třeba hodnotit a který lze měřit i na těchto materiálech ultrazvukem v rozsahu od desetiny po několik desítek milimetrů. Z těchto tloušťkoměrů je odvozen základní defektoskop 35RDC navržený pouze pro práci na kompozitech. Slouží k detekování delaminací a poškození kompozitových desek a nosníků bez přesného definování rozsahu a typu defektu. Je určen především pro provozní kontrolu, je velice operativní, snadný na obsluhu, lehký a mobilní. Funkuje na principu srovnávání výšky a tvaru echa a jeho pozice na časové základně. Výsledkem je informace o tom, zda je v daném místě materiál zdravý, či defektní. V případě pozitivního nálezu je označené místo obvykle analyzováno podrobněji přístroji pro konvenční ultrazvuk, (například některým z typové řady Epoch), případně PA (OmniScan MX).

Pro uhlíkové kompozitové materiály, ale i pro kompozity s velkým útlumem jako mohou být například materiály vyztužené skelnými vlákny, případně sendvičové konstrukce je určen přístroj BondMaster, který je opět navržen především pro práci na kompozitech. Využívá nízkých frekvencí v rozsahu 250Hz až 1,5MHz a v závislosti na typu materiálu lze zvolit techniku zkoušení „Pitch-Catch“ kdy jeden kontaktní trn v sondě je vysílač a druhý přijímač. Druhou technikou je metoda „MIA“ kterou se zjišťuje míra změny tuhosti materiálu ve zkoušeném místě. Je vyhodnocována jak amplituda tak i fáze zaznamenaného signálu. Obě zmiňované metody jsou prováděny bez přítomnosti akusticky vazebného prostředku. Třetí metodou, která již vyžaduje využití vazby o nízké viskozitě je metoda rezonanční, kde je opět současně hodnocena amplituda signálu i fáze, ale využívá se vyšších frekvencí ve srovnání s předchozími dvěma technikami.

Technologie PhasedArray je nejvhodnější pro uhlíkové kompozity, a to především nosníky a pláty větších tloušťek, kde je vyžadováno získání co nejpodrobnější a přesné informace o struktuře v objemu materiálu. Tato metoda může být využita opět pro výrobní i provozní zkoušení a to jak pro zkoušení v imerzi, tak i pro zkoušení kontaktní, například přístrojem OmniScan MX. Pro zkoušení kompozitů byly vyvinuty speciální sondy s tzv. „hluchými“ okraji sondy zmenšenými na minimum, což je jen 1,5mm od okraje sondy, a dále pak tvarové sondy pro zkoušení kritických míst v rádiusech tvarovaných nosníků. Zkoušení lze provádět na vnějších poloměrech před ohniskem, případně při využití předsádek po průchodu svazku ohniskem. Nejčastěji využívané frekvence jsou 5MHz a 3,5MHz, sondy jsou konstruovány s počtem elementů od 10-ti až do 128-mi v imerzním i kontaktním provedení s předsádkami. Obvyklý postup je ten, že se provede manuálně nebo automaticky jednoosý, případně plošný (dvoosý) sken přičemž hodnocení může probíhat on-line v průběhu skenování. Po ukončení skenu je uložen datový záznam který lze poté podrobně a snadno analyzovat. Podrobnější informace Vám v případě Vašeho zájmu rádi poskytneme.

Název	NDT for Safety / Defektoskopie 2010 40. mezinárodní konference a výstava NDT techniky – sborník
Editor	Pavel Mazal, Luboš Pazdera
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro nedestruktivní testování
Tisk	BETIS s.r.o. Praha
Vyšlo	listopad 2010
Vydání	první
Náklad	200 ks

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-4182-8

11th European Conference on Non-Destructive Testing

11th ECNDT

PRAGUE 2014

October 6 – 10, 2014

Czech Republic

EF European Federation for
Non-Destructive Testing
NDT



Czech Society
for NDT

Prague - the right place to host
the 11th ECNDT in 2014

Better NDT
- Warranty of Quality,
Reliability
and Safety

 **GUARANT**
INTERNATIONAL

www.ecndt2014.com

ISBN 978-80-214-4182-8