

Česká společnost pro nedestruktivní testování, z.s.
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2018

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

**48. mezinárodní konference a výstava NDT techniky
48th International Conference and Exhibition**



6.–8. listopad 2018
November 6–8, 2018

City Conference Center, Prague, Czech Republic

Hlavní sponzoři:



Sponzoři:



Czech Society for Nondestructive Testing
Česká společnost pro nedestruktivní testování, z.s.



DEFEKTOSKOPIE 2018

NDE for Safety 2018

48th International Conference and NDT Exhibition
48. mezinárodní konference a výstava NDT techniky

PROCEEDINGS

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

November 6 - 8, 2018
6. až 8. listopad 2018

Prague, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera, Pavel Mazal and Pavel Turek

All articles submitted before the deadline were reviewed by members of Scientific Committee.

Editors are not responsible for the reproduction quality in these Proceedings.

The contributions may be copied freely but credit should be given to the Proceedings.

Scientific Committee / Reviewers:

- Prof. Jaroslav Fiala – ZČU Plzeň
- Prof. Karel Hájek – UNOB Brno
- Prof. Karel Pospíšil – CDV Brno
- Ing. Monika Manychová – VUT v Brně
- Ing. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha
- Mgr. Libor Topolář – VUT v Brně

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal, Pavel Turek

Copyright © 2018

Czech Society for Nondestructive Testing

All rights reserved

Published by:

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Technická 2896/2, CZ 616 69 Brno

and

Czech Society for Nondestructive Testing
Technická 2896/2, CZ 616 00 Brno

printed version - **ISBN 978-80-214-5684-6**

OBSAH / CONTENTS

PAPERS / PŘÍSPĚVKY contributions written in English

Mihai L. CRAUS, Adriana SAVIN, Vitaly TURCHENKO, Oleksandr S. DOROSHKEVYCH, Alina BRUMA, Tatiana E. KONSTANTINOVA PHASE TRANSITIONS IN CERAMIC AND NANOPOWDER DOPED ZIRCONIA	1
Roy DEBOSHREE, Tuli SUNEET EFFICIENT SNR DETERMINATION ALGORITHM FOR PULSE COMPRESSION DEFECT DETECTION AND QUANTIFICATION	13
Lenka DOJCANOVA, Jizeng MA, Jie FU THE INTERNATIONAL INFORMATION SYSTEM ON OCCUPATIONAL EXPOSURE IN MEDICINE, INDUSTRY AND RESEARCH (ISEMIR): RADIATION PROTECTION TRAINING AND QUALIFICATIONS	19
V. I. EROFEEV, A. O. MALKHANOV, V. P. ROMASHOV EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRASOUND CHARACTERISTICS IN STEEL SAMPLES CUT OUT OF A PIPELINE THAT HAS BEEN EXPLOITED DURING A LONG TIME	27
Ferri HASSANI, Philippe GUEVREMONT, Moe MOMAYEZ, Kaveh SALEH ASSESSMENT OF CRACKED CONCRETE SLAB OF A SPILLWAY BY MSR-IMPACT ECHO	33
Hiraku KAWASAKI, Mami OMORI, Seiichi OMORI STUDY ON HEALTH MONITORING METHOD OF ACOUSTIC EMISSION USING FREQUENCY SHIFT	43
Sergey KOLOKOLNIKOV, Anatoly DUBOV PHYSICAL BASICS, PRACTICAL CAPABILITIES AND PURPOSES OF THE METAL MAGNETIC MEMORY METHOD APPLICATION FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF CRITICAL INDUSTRIAL EQUIPMENT	49
PING HUNG LEE, CHI JEN HUANG USING GUIDED WAVE TECHNIQUE AS CORROSION SCREENING TOOL ON PIPELINE INSPECTION	57
Houssam MAHMOUD, Pavel MAZAL, František VLASIC, Libor NOHÁL LEAKAGE DETECTION FOR PNEUMATIC CIRCLE OF BUS DOOR USING ACOUSTIC EMISSION AND OTHER NDT METHODS	67

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Jan KOBER, Alexander KIRSCHNER	79
NONLINEAR ULTRASONIC POROSIMETRY OF 3D PRINTED METALLIC PARTS <i>NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÁ POROZIMETRIE KOVOVÝCH SOUČÁSTÍ ZHOTOVENÝCH 3D TISKEM</i>	
Felipe I. H. SAKIYAMA, Frank LEHMANN, Harald GARRECHT	89
VIBRATION MONITORING OF A TELECOMMUNICATION BASE STATION BUILDING ACCORDING TO THE STANDARDS DIN 4150-3 AND ETSI EN 300 019-1-3	
Adriana SAVIN, Petrica VIZUREANU, Zdenek PREVOROVSKY, Rozina STEIGMANN, Milan CHLADA, Josef KROFTA, Madalina BALATU, Mihail Liviu CRAUS, Frantisek NOVY	97
MONITORING TECHNIQUES FOR SPECIAL ALLOYS FROM SOME MEDICAL PROSTHESES	
Philip SPERLING	107
X-RAY AND COMPUTED TOMOGRAPHY AS A TOOL FOR QUALITY ASSURANCE, PROCESS OPTIMIZATION AND METROLOGY INSPECTIONS IN THE FIELD OF ADDITIVE MANUFACTURING	
Eckart UHLMANN, Julian POLTE, Steffen MELNIK	113
POTENTIALS AND LIMITATIONS OF SIMULATION BASED ARTEFACT CORRECTION IN COMPUTED TOMOGRAPHY	

PŘÍSPĚVKY / PAPERS
příspěvky psané v českém jazyce

Michal BOHÁČIK, Břetislav SKRBEK	123
NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ ULTRAZVUKEM VE STUDENTSKÝCH PRACÍCH TU V LIBERCI <i>NON-DESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING IN STUDENTS' WORKS AT TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC</i>	
Vladimir DEKÝŠ, Ondrej ŠTALMACH, Alžbeta SAPIETOVÁ, Milan SAPIETA	135
POUŽITIE INFRAČERVENEJ KAMERY PRE NDT <i>USE OF THE INFRARED CAMERA FOR NDT</i>	
Martin DRÁB, Radim ČTVRTLÍK, Jan TOMÁŠTÍK, Lukáš VÁCLAVEK, Václav KOULA	141
NANOINDENTACE A SCRATCH TESTY S POUŽITÍM AKUSTICKÉ EMISE“	

Richard DVOŘÁK	151
AKUSTICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ BETONU DEGRADOVANÉHO VYSOKÝMI TEPLOTAMI S POROVNÁNÍM AKUSTICKÉ IMPEDANCE <i>ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HIGH TEMPERATURE DEGRADED CONCRETE WITH COMPARISON OF ACOUSTIC IMPEDANCE</i>	
Jaroslav FIALA	163
EPITAXIE, SPOJOVÁNÍ A TŘENÍ <i>EPITAXY, JOINING AND FRICTION</i>	
Michaela HODULÁKOVÁ, Libor TOPOLÁŘ, Barbara KUCHARCZYKOVÁ, Dalibor KOCÁB	175
POROVNÁNÍ PARAMETRŮ SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE ZACHYCENÝCH PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI V TLAKU U JEMNOZRNÝCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ <i>THE COMPARISON OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL'S PARAMETERS WHICH WERE RECORDED SIMULTANEOUSLY WITH THE COMPRESSIVE STRENGTH TESTS OF THE FINE-GRAINED CEMENT-BASED COMPOSITES</i>	
Milan CHLADA, Petr GÁLIS, Zdeněk PŘEVIROVSKÝ	185
ANALÝZA PŘESNOSTI LOKALIZACE ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE PRO OBECNÉ KONFIGURACE SENZORŮ <i>ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCATION PRECISION FOR GENERAL SENSOR CONFIGURATIONS</i>	
Michal JANKŮ, Ilja BŘEZINA, Josef STRYK	193
PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PŘI HODNOCENÍ STAVU POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ <i>OVERVIEW OF METHODS USED IN ASSESSING ROAD CONDITIONS</i>	
Štěpán JÍRA, Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, František VLAŠIC, Vendula SKŘIVÁNKOVÁ	203
KOERCITIVNÍ SÍLA A ÚNAVA FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU <i>COERCIVE FORCE AND FATIGUE OF FERROMAGNETIC MATERIALS</i>	
Bernard KOPEC	209
TAJEMNÝ, FASCINUJÍCÍ A NEPŘEDVÍATELNÝ ULTRAZVUK <i>A MYSTERIOUS, FASCINATING AND UNPREDICTABLE ULTRASOUND</i>	
Bernard KOPEC	217
NOVÁ CERTIFIKAČNÍ NORMA SYSTÉMŮ ISO 9001:2015 A CO DÁLE? <i>NEW CERTIFICATION STANDARD FOR SYSTEMS ISO 9001:2015 AND WHAT ELSE?</i>	

Vojtěch MAXERA, Lubos PAZDERA	223
LOKALIZACE MÍSTA ZDROJE AKUSTICKÉ EMISE <i>ACOUSTIC EMISSION SOURCE POSITION LOCATION</i>	
Jakub MRÁZ, Břetislav SKRBEK	229
ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA TUHOSTI DOSADACEJ DOSKY HLAVY VALCOV TEDOM Z LIATINY S LUPIENKOVÝM GRAFITOM PRED A PO PREVÁDZKE <i>ULTRASONIC DIAGNOSTIC THE RIGIDITY OF CONTACT PLATE OF TEDOM CYLINDER HEAD OF CYLINDERS MADE OF CAST - IRON BEFORE AND AFTER RUNNING</i>	
Josef NEUGEBAUER	243
VYUŽITÍ LMS PŘI ZKOUŠENÍ PERSONÁLU DEFECTOSKOPIE <i>USE OF THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS AT EXAMINATION OF NDT PERSONNEL</i>	
Jan PATERA, Zbyněk HLAVÁČ, Jindřich JANSÁ	249
NEDESTRUKTIVNÍ METODY PRO STANOVENÍ STUPNĚ DEGRADACE BETONU <i>NON-DESTRUCTIVE METHODS OF ASSESSING DEGRADATION OF CONCRETE</i>	
Miroslav ROXER	261
MOŽNOSTI ZKOUŠENÍ TRUBEK MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU METODOU – SOUHRN <i>POSSIBILITIES OF MAGNETIC PARTICLE TESTING OF TUBES – SUMMARY</i>	
Radek ŘEZÁČ	271
VÝROBA RADIONUKLIDOVÝCH ZDROJŮ PRO GAMAGRAFIÍ <i>PRODUCTION OF RADIONUCLIDE SOURCES FOR GAMMA RADIOGRAPHY</i>	
Vendula SKŘIVÁNKOVÁ, František VLAŠIC, Pavel MAZAL	277
ODEZVA AKUSTICKÉ EMISE NA ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ ADITIVNĚ VYROBENÉHO A ODLITÉHO MATERIÁLU <i>ACOUSTIC EMISSION RESPONSE TO FATIGUE DAMAGE OF ADDITIVELY PRODUCED AND CAST MATERIALS</i>	
Václav SVOBODA, František ŽEMLIČKA	287
APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE NÁDOBY Z AUSTENITICKÉ OCELI <i>APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION DURING PRESSURE TEST OF AUSTENITIC STEEL VESSEL</i>	

Vladimir SYASKO, Sergei GOLUBEV, Adam POLÁČEK	295
SOUČASNÉ BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ TLOUŠTKY FUNKČNÍCH POVLAKŮ A ZAJIŠTĚNÍ JEJICH SPOLEHLIVOSTI <i>PRESENT CONTACTLESS METHODS OF FUNCTIONAL COATINGS THICKNESS MEASUREMENT AND THEIR RELIABILITY PROVISION</i>	
Matouš VAZAČ	303
DEFEKTOSKOPIE U SPRÁVY ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY <i>DEFECTOSCOPY FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE ADMINISTRATION</i>	
Jana VESELÁ, Pavel MAREŠ, Jiří HODAČ	313
NEDESTRUKTIVNÍ A DESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ KOROZNÍHO POŠKOZENÍ A ROZVOJE TRHLIN VZORKŮ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ <i>NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE EVALUATION OF CORROSION DAMAGE AND PROGRESS OF CRACKS OF DISSIMILAR JOINT SPECIMENS</i>	
Jaroslav ZAČAL, Petr DOSTÁL, Jakub ROZLIVKA, Václav KAŠPAR	325
DETEKCE ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE <i>FATIGUE DAMAGE DETECTION IN COMPOSITE MATERIALS USING THE ACOUSTIC EMISSION</i>	
Pavel ZAHŘÁDKA, Vlastimil HABRCETL, Jan PATERA	331
VYUŽITÍ 3D PROFILOMETRIE V ENERGETICE <i>USING 3D PROFILEMETRY IN POWER ENGINEERING</i>	
Tomáš ZAVADIL, Petr ŽBÁNEK, Marie MOŘKOVSKÁ	339
MOŽNOSTI DETEKCE TEPELNĚ INDUKOVANÝCH STRUKTURNÍCH ZMĚN KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ SONDAMI PHASED ARRAY <i>OPTIONS FOR DETECTION OF THERMALLY-INDUCED STRUCTURAL CHANGES OF STRUCTURAL STEEL BY PHASED ARRAY PROBES</i>	
Tomáš ZAVADIL, Václav JANDURA	351
JAK ŘEŠIT PRAXI NDT PERSONÁLU – ROLE NDT LEVEL 3 <i>HOW TO ASSESS THE EXPERIENCE OF NDT PERSONNEL – THE ROLE NDT LEVEL 3</i>	
Petr ŽBÁNEK	359
PRINCIPY FUNGOVÁNÍ TECHNIKY FULL MATRIX CAPTURE PRO ZKOUŠENÍ DÍLŮ ULTRAZVUKOVOU METODOU <i>PRINCIPLES OF FULL MATRIX CAPTURE TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF PARTS BY ULTRASONIC TESTING</i>	

ABSTRAKTY / ABSTRACT

- Jan BRESSENDORFF** 377
FOCAL SPOT AND X-RAY IMAGING
- Dae-Hyun KIM, Bonyong KOO** 378
EVALUATION OF EFFECTIVE ELASTIC MODULUS OF OPTICAL FIBER
BY USING FBG SENSOR
- Junkyeong KIM, Minsu PARK, Byung-Joon YU, Seunghee PARK** 379
TENSILE FORCE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR PSC GIRDER
BRIDGES USING EMBEDDED EM SENSOR AND RBFN
- Ju-Won KIM, Jihwan PARK, Junghyeon Lim, Seunghee PARK** 380
MAGNETIC SENSING TECHNIQUE INCORPORATING WITH GPR BASED
3D INTERNAL IMAGING MODEL FOR ENCASED TENDON NDE
- Bohuslav KOLÁŘ** 381
KONTROLA SVARŮ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM POMOCÍ
RADIOGRAFICKÉ METODY
*TESTING OF THE ELECTRON BEAM WELDS USING RADIOGRAPHIC
METHOD*
- Zuzana KOMÁRKOVÁ** 382
UPLATNĚNÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ PŘI AUTOMATICKÉ VIZUÁLNÍ
KONTROLE
USE OF MACHINE VISION FOR AUTOMATIC VISUAL INSPECTION
- Seongin MOON, To KANG, Soonwoo HAN** 383
NEW APPROACH FOR LOCALIZATION AND MASS ESTIMATION OF
LOOSE PARTS IN REACTOR COOLANT SYSTEM BASED ON CYBER
PHYSICAL SYSTEM
- José Cristiano PEREIRA, Luciano Azeredo LUIZ** 384
RISK ANALYSIS IN THE INDUSTRIAL RADIOGRAPHY PROCESS USING
THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS AND BAYESIAN BELIEF
NETWORKS
- M. J. RANJBAR, S. SODAGAR** 385
HIGH FREQUENCY GUIDED WAVES EVALUATION OF PLATE-LIKE
STRUCTURES USING ULTRASONIC PHASED ARRAY TRANSDUCERS
- Dmitry SEDNEV, Andrey LIDER, Michael KROENING, Yana SALCHAK** 386
ROBOTIZED ULTRASONIC TOMOGRAPHY FOR SAFETY AND
SAFEGUARDING OF SPENT NUCLEAR FUEL

Václav SVOBODA, František ŽEMLIČKA	387
OVĚŘENÍ MOŽNOSTI APLIKACE MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU PRO KONTROLU PŘEDEPJTÉ VÝZTUŽE V MOSTNÍCH KONSTRUKCÍCH <i>VERIFICATION OF METAL MAGNETIC MEMORY METHOD FOR INSPECTION OF PRE-STRESSED STEELS IN BRIDGE STRUCTURES</i>	
Sheng-Po TSENG, Che-Hua YANG	388
DEVELOPMENT OF HIGH SPEED INVERSION TECHNIQUE FOR THE CHARACTERIZATION OF FULL-FIELD MATERIAL PROPERTIES BASED ON QUANTITATIVE LASER ULTRASOUND VISUALIZATION SYSTEM	
Tomáš ZAVADIL	389
ÚČEL KVALIFIKAČNÍ ZKOUŠKY V KVALIFIKAČNÍM A CERTIFIKAČNÍM PROCESU NDT PERSONÁLU <i>PURPOSE OF THE QUALIFICATION EXAM IN THE QUALIFICATION AND CERTIFICATION PROCESS OF NDT PERSONNEL</i>	

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

INDEX AUTORŮ / AUTHORS INDEX

B

Baltatu M.	97
Boháčik M.	123
Bressendorff J.	377*
Bruma A.	1
Březina I.	193

C

Craus M. L.	1, 97
Čtvrtlík R.	141

D

Deboshree R.	13
Dekýš V.	135
Dojcanova L.	19
Doroshkevych O. S.	1
Dostál P.	325
Dráb M.	141
Dubov A.	49
Dvořák R.	151

E

Erofeev V. I.	27
---------------	----

F

Fiala J.	163, 203
Fu J.	19

G

Gális P.	185
Garrecht H.	89
Golubev S.	295
Guevremont P.	33

H

Habrčeti V.	331
Han S.	383*
Hassani F.	33
Hlaváč Z.	249
Hodač J.	313

Hoduláková M.	175
Huang C. J.	57

CH

Chlada M.	97, 185
-----------	---------

J

Jandura V.	351
Janků M.	193
Jansa J.	249
Jíra Š.	203

K

Kang T.	383*
Kašpar V.	325
Kawasa H.Ki	43
Kim D.-H.	378*
Kim J.	379*
Kim J.-W.	380*
Kirschner A.	79
Kober J.	79
Kocáb D.	175
Kolář B.	381*
Kolokolnikov S.	49
Komárková Z.	382*
Konstantinova T.	1
E.	
Koo B.	378*
Kopec B.	209, 217
Koula V.	141
Kroening M.	386*
Krofta J.	79, 97
Kucharczyková B.	175

L

Lee P. H.	57
Lehmann F.	89
Lider A.	386*

Lim J.	380*
Luiz L. A.	384*
M	
Ma J.	19
Mahmoud H.	67
Malkhanov A. O.	27
Mareš P.	313
Maxera V.	223
Mazal P.	67, 203, 277
Melnik S.	113
Momayez M.	33
Moon S.	383*
Mořkovská M.	339
Mráz J.	229
N	
Neugebauer J.	243
Nohál L.	67
Nový F.	97
O	
Omori M.	43
Omori S.	43
P	
Park J.	380*
Park M.	379*
Park S.	379*, 380*
Patera J.	249, 331
Pazdera J.	223
Pereira J. C.	384*
Poláček A.	295
Polte J.	113
Převorovský Z.	79, 97, 185
R	
Ranjbar M. J.	385*
Romashov V. P.	27
Roxer M.	261
Rozlivka J.	325
Řezáč R.	271
S	
Sakiyama F. I. H.	89

Saleh K.	33
Salchak Y.	386*
Sapieta M.	135
Sapietová A.	135
Savin A.	1, 97
Sednev D.	386*
Skrbek B.	123, 229
Skřivánková V.	203, 277
Sodagar S.	385*
Sperling P.	107
Steigmann R.	97
Stryk J.	193
Suneet T.	13
Svoboda V.	287, 387*
Syasko V.	295
Štalmach O.	135
T	
Tomáščík J.	141
Topolář L.	175
Tseng S.-P.	388*
Turchenko V.	1
U	
Uhlmann E.	113
V	
Václavek L.	141
Vazač M.	303
Veselá J.	313
Vizureanu P.	97
Vlašic F.	67, 203, 277
Y	
Yang C.-H.	388*
Yu B.-J.	379*
Z	
Začal J.	325
Zahrádka P.	331
Zavdil T.	339, 351, 389*
Žbánek P.	339, 359
Žemlička F.	287, 387*

*) Pouze abstrakt, článek nebyl dodán.
 *) Only abstract, full paper was not delivered.



OmniScan MX2 PA2

Ultrazvuková technologie „Phased Array“ a „TOFD“ - možnost využití obou technik současně!

Odolný a snadno přenosný **OmniScan MX2 PA2** s Phased Array modulem druhé generace umožňuje rychlé skenování i záznam dat a nabízí výkonné softwarové funkce pro nedestruktivní zkoušení PA i TOFD. Přináší další výrazný posun v efektivitě zkoušení při zachování preciznosti v pokročilých AUT i ve standardních aplikacích.

Snazší a rychlejší nastavení

Kratší cyklus zkoušení, vyhodnocení i reportování

Vhodné pro:

- defektoskopii tavných svarových spojů
- tlakové nádoby
- zkoušení kompozitů
- svary na trubkách malých průměrů
- manuální a poloautomatické zkoušení
- korozní poškození

Scientific Solutions Division

Olympus Czech Group, s.r.o., člen koncernu,

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6, tel.: +420 221 985 211

info-industrial@olympus.cz

www.olympus-ims.com/en/omniscan-mx2



EPOCH® 6LT Přenosný ultrazvukový defektoskop

Lehký a kompaktní defektoskop EPOCH 6LT má všechny vlastnosti pokročilého ultrazvukového defektoskopu.

Komfortní ovládání jednou rukou: Minimalizace zátěže zápěstí díky nízké hmotnosti přístroje (890 g)

Jednoduchost použití: Ovládání menu přístroje otočným voličem palcem jedné ruky

Připojení k Wi-Fi: Volitelná možnost pro zálohování a sdílení naměřených dat a nastavení přes Olympus Scientific Cloud

Odolnost: Dle normy IP65/67 – drop test

EPOCH je registrovaná známka společnosti Olympus.

Scientific Solutions Division
OLYMPUS CZECH GROUP, S.R.O., ČLEN KONCERNU
Evropská 176/16, 160 41 Praha 6 | Tel.: +420 221 985 211 |
info-industrial@olympus.cz | www.olympus.cz

Více informací na www.olympus-ims.com/epoch6lt

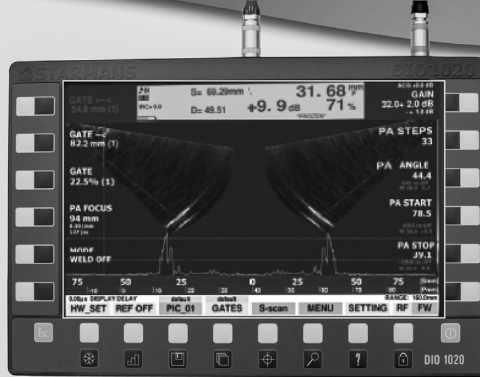
Defectobook

DIO 1020

STARMANS electronics Ltd.

www.starmans.net

NEW Portable ultrasonic flaw detector



Bigger but even thinner, lighter and powerful

Large 10" wide-screen display, high resolution 1280 x 800

Higher contrast, better visibility on a direct sun

Well-arranged operation software, fully compatible with DIO 1000

Modular concept:
Phased Array, TOFD
Conventional, Multi-channel
Rail inspection, Multiaxis scanning



www.starmans.net

PŘÍSPĚVKY / PAPERS

Poznámky / Notes



PHASE TRANSITIONS IN CERAMIC AND NANOPOWDER DOPED ZIRCONIA

Mihai L. CRAUS^{1,2}, Adriana SAVIN¹, Vitaly TURCHENKO²,
Oleksandr S. DOROSHEVYCH², Alina BRUMA³, Tatiana E. KONSTANTINOVA⁴

¹National Institute for Research & Development for Technical Physics, Iasi, Romania

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Institute of Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland
College Park, MD, USA

⁴Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O. O. Galkin of NASU,
Donetsk, Ukraine

Contact e-mail: asavin@phys-iasi.ro

Abstract

Zirconia (ZrO₂) doped with rare earth are promising materials for structural applications. The substitutions of Zr with rare earth like Y or with Ce allow the obtaining of ZrO₂ based materials resistant to structural changes around room temperature and avoiding the design of stress tetragonal to monoclinic transformation. The metastable phase formation in ZrO₂ can be induced by including in the oxide structure some vacancy defects. The influence of phase stability of ZrO₂ ceramics following the doping with Y has been investigated. Two types of samples were taken into study, obtained by means of ceramic technology and from ZrO₂ nanopowder doped with yttria and submitted to thermal treatment. The structure of these ceramics and nanoceramics and the phase stabilization using X-ray, neutron diffraction, Scanning Electron Microscopy (SEM) were carried out, Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) has been used to estimate the presence of low-density regions, state of sintering and the presence and development of small cracks in the structure.

Key words: X-ray and neutron diffraction; crystallites; zirconia-based ceramics; Ce dopants; resonant ultrasound spectroscopy

1. Introduction

Modern medical prosthesis include a wide range of bioactive composites glasses, glass-ceramics and ceramic-polymers. Biocompatibility properties and resistance to mechanical stress represent the most important features when designing new materials based on ceramics for medical implants [1]. Biocompatibility has been defined as the ability of a material to perform with an appropriate host response in a specific application [2]. Biocompatibility is one of the most important advantages of zirconia (ZrO₂)-based ceramics. Mechanical properties and bioinert behavior of ceramic materials based on zirconium oxides were extensively investigated in connection with their possible applications hip implants [3]. However, clarification is still required used annual rates of THA [4]. ZrO₂-based ceramics are preferred due to their advanced mechanical properties [5] (high-fracture toughness and bulk modulus, resistance to corrosion, high dielectric constant, chemical inertness, coefficient of thermal expansion similar to iron). It has been shown that, at ambient pressure, pure zirconia exhibits three crystallographic structures

[6, 7]. Ceramics based on the tetragonal modification T-ZrO₂ of zirconium dioxide are now one of the strongest and inert ceramics available. When the ZrO₂ is mixed with other oxides such as MgO, Y₂O₃, Ce₂O₃, tetragonal phase is stabilized.

The object of this paper is to obtain and to investigate the structure, mechanical properties of Zr_{1-x}(Ce/Y)_xO₂ and its modifications due to the various thermal treatments and variation of Ce/Y concentrations in the samples. The volume expansion caused by the cubic to monoclinic transformation induces large stresses, and these stresses cause ZrO₂ to crack upon cooling from high temperatures. By combining characterization techniques based on XRD and ND and Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS), a unique approach on evaluating the physical properties of these ceramics is developed, in order to estimate the presence of low-density regions, state of sintering, and the presence and development of small cracks in the structure and to evaluate the elasticity matrix which could help in advancing the understanding of properties and its applications.

2. Materials and methods

The mechanical and chemical properties of doped with rare earth or transition elements zirconia are intensively investigated in the last years. The chemical composition and the phase composition of doped zirconia influence the characteristics of the resulting materials. Zirconia doped ceramics are highly chemical and biological inert materials, but the phase composition could suffer change due to the external mechanical factors. The change of relative concentrations of phase volumes leads to an increase of the defaults concentration and at limit to the appearance of splinters. If we used such materials as implants, they must respect the corresponding standard characteristics [8]. The presence of a small concentration of oxygen defaults could lead to a stabilization effect on ratio between phase volumes concentrations. The substitution of Zr with small amounts of Ce or Y allowed obtaining stabilized zirconia. However, the real effect of concentration of oxygen vacancies on the stabilization is not yet explained. The samples with the chemical composition Zr_{1-x}Ce_xO₂ are obtained by a ceramic method and investigated by the methods already presented [9]. Some crystallographic and mechanical features of the samples are presented in Table 1 according to [10]. The obtained at 1500°C samples were tested by the already mentioned methods and subjected to a thermal treatment at 1000°C by steps of 5°C, 15 hours and following the structural changes. Using ultrasound method described in [11] Young modulus, shear modulus and Poisson ratio were determined from longitudinal and transversal velocities, and are presented in Table 1.

Table 1. Some crystallographic and mechanical characteristics of Zr_{1-x}Ce_xO₂ samples.

Ce concentration (x) /Sample #	Molecular Mass	Relative Density (%)	Elasticity Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Poisson Ratio	Diameter [mm]	Length [mm]
0.09 p2	127.62	84.9	132.75	51.6	0.30	10.86	10.0
0.13 p3	129.58	94.7	154.22	57.98	0.33	10.48	9.53
0.17 p4	131.53	99.7	172.82	63.54	0.36	10.34	9.17

In agreement with these data the increase of the cerium concentration in the samples and due the thermal treatment, lead to a variation of the mechanical characteristics (i.e. the sample with Ce concentration of 0.17, Table 1). It means that the mechanical characteristics are strongly influenced by the phase composition.

Two types of compact sets from $ZrO_2 + 3 \text{ mol } \% Y_2O_3$ nanopowders were prepared. Powders for two types of samples were prepared by co-precipitation method [12]. For the first type - from zirconia oxychloride, and for the second type - from zirconia oxynitrate. After drying in a microwave oven and subsequent calcination at $400^\circ C$ for 2 hours in a furnace of convection heating the powders was sealed by uniaxial ($P = 40 \text{ MPa}$) and after that by high hydrostatic pressure (HHP = 500 MPa). Investigated samples after baric influence were compact sets in the form of tablets with diameter $d = 16 \text{ mm}$ and height $h = 2 \text{ mm}$. Structure of powders and compact sets was investigated by X-ray diffraction (XRD) using a PANalytical device. Investigation of topology breaks of samples were carried out by scanning (SEM) and transmission (TEM) electron microscopy using JSM640LV and JEM-200A (JEOL) devices respectively. Objects for TEM were prepared by two-stage replicas method [13]. Moisture content in powder was determined by thermogravimetric analysis (TGA) using a specialized weights ADS50 (AXIS) at $120^\circ C$. Some of the samples were treated in air at $1000^\circ C$ for 10 hours. The phase composition as well as type of crystal structure of powder samples were analyzed by conventional X-ray diffractometers (Xpert Pro MPD PANalytical diffractometer (Phillips) with $CoK\alpha$ radiation and a BRUCKER AXS D8- Advance diffractometer) with $CuK\alpha$ radiation. A powder diffraction software package which includes the standards of the Crystallography Open Database [14] was used to determine the phase composition. The analysis of crystal structure of ceramic samples has been obtained at room temperature with the time-of-flight method at neutron High Resolution Fourier Diffractometer (HRFD) in experimental hall of pulsed reactor IBR-2, Dubna [15].

Resonant ultrasound spectroscopy (RUS) involves scanning of the resonance structure of a compact specimen (in our case a ceramic cylinder) with the aim of determine its mechanical properties [16-19]. In comparison to other ultrasound methods, resonant techniques are particularly interesting because they allow for easy and inexpensive detection of both internal and surface defects with a single test and has a suite of advantages, among which its applicability to small volume specimens. RUS is based on the principle that the mechanical resonant response of solids depend strongly on its elastic moduli, shape and density. Resonant (or natural) frequencies of a system can be either measured or calculated by solving equations of motion for the known shape [20]. The reverse is also true; if resonant frequencies of an object are known, its elastic properties can be determined [17, 20, 21].

Inhomogeneity in an object may be identified from a resonant frequency spectrum by resonant frequency shifts, peak splitting, increases in peak width and changes in amplitude. The method is based on the estimation of resonant eigenfrequencies [22], based on an eigenvalue and eigenfunction method described using the equation

$$\omega^2 K \alpha = E^\circ \quad (1)$$

where α is a vector comprising the juxtaposed components of $a_{i,\lambda}$ (the coefficient of the decomposition of the displacement field \vec{u}), $K = \frac{1}{2} \int_v \rho u_i u_i dV$ and $E = E_c + E_p$ is the total energy. Here, E_c represents the kinetic energy of the system, $E_c = \omega^2 K$, and E_p represents the potential energy of the system, $E_p = \frac{1}{2} \int_v C_{ijkl} \partial_j u_i \partial_l u_k dV$; C_{ijkl} forms the full linear elastic tensor for a homogeneous body (the compliance tensor), ω is the angular component of

the frequency, ρ is the mass density, and u is the elastic displacement field with the direction subscripts $i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}$. This problem has been solved for the interest cases. It is evident that the solutions of the eigenvalue and eigenfunction problem can only be found via numerical methods. The resulting small strain elastic vibrations can be described by the wave equation solution using the tensor linear elastic constants. For a homogeneous and isotropic body [11], the matrix C is

$$C = \begin{bmatrix} K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (2)$$

where K is the bulk modulus, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ and G is the shear modulus, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, E represents the Young's modulus and ν is Poisson's ratio.

3. Results and discussions

3.1. Structural parameters of sintered and treated samples doped with ceria

The substitution of Zr^{4+} (0.98 Å, CN=8) with Ce^{4+} (1.11 Å, CN=8) should lead to an increase of lattice constants or/and to structural change, implicitly to a change of phase composition. On other hand, the appearance of Ce^{3+} cations (1.283 Å), increases the vacancies concentration of oxygen and stabilizes the tetragonal phase, usual observed in compounds like $ZrO_{1.99}$ [23]. For the investigated by X ray diffraction untreated samples, when the Ce concentration increases we observed:

- 1) a monotonously increase of unit cell volume, of the concentration of the tetragonal phase, of the average size of the crystalline blocks and a decrease of microstrains (Table 2);
- 2) a monotonously decrease for the monoclinic phase concentration until zero ($x=0.17$) and of the average size of crystalline blocks, while the unit cell volume increases (Table 2). In the same time the microstrains corresponding to tetragonal phase decrease with the Ce concentration;

The treated samples present always a large concentration of monoclinic phase.

- 1) The XRD data for all treated samples, including that corresponding to $x = 0.17$, indicate the presence of large amounts of monoclinic phase (Table 2);
- 2) The unit cell volumes of tetragonal and monoclinic phases decreases with the increases of Ce concentration of the samples, this decrease being due probably to the increase of the Ce^{4+} concentration with the increase of the total concentration of Ce in the samples.

A complete transition from the monoclinic to tetragonal phase was not observed [9], for the treated samples (Table 2), a maximum for the tetragonal phase concentration correspond to $x=0.13$.

The unit cells volumes of both tetragonal and monoclinic phase decrease with the increase of the Ce concentration in the samples. This effect is due to a larger concentration of Ce^{3+} in some untreated samples. The microstrains decreases at treated samples with the increase of the Ce concentration.

The experimental points, calculated profile and difference curve of neutronograms are presented in Figure 1.

Table 2 The crystalline parameters (a, b, c, β), unit cell volume (V), average size of the crystalline blocks (D) and microstrains (ϵ) for concentrations of Ce (x) in $Zr_{1-x}Ce_xO_2$

x/ treatment	SG	a(Å)	b(Å)	c(Å)	β (°)	V(Å ³)	D(Å)	ϵ	Tetragonal phase concentration (%)
0.09/ untreated	P2 ₁ /c	5.1911	5.2204	5.3691	99.08	143.68	1400	0.0011	6.5
	P4 ₂ /nmc	3.6254	3.6254	5.2145	90.00	68.68	302	0.0493	
0.13/ untreated	P2 ₁ /c	5.1948	5.2220	5.3808	99.08	144.14	365	0.0037	21
	P4 ₂ /nmc	3.6254	3.6254	5.2145	90.00	68.84	484	0.0031	
0.17/ untreated	P2 ₁ /c								100
	P4 ₂ /nmc	3.6442	3.6442	5.2443	90.00	69.65	1606	0.0006	
0.09/ treated	P2 ₁ /c	5.1990	5.2188	5.3697	98.92	143.92	1199	0.0015	14
	P4 ₂ /nmc	3.6257	3.6257	5.2198	90.00	68.62	412	0.0018	
0.13/ treated	P2 ₁ /c	5.1923	5.2191	5.3715	99.07	143.74	1294	0.0016	25
	P4 ₂ /nmc	3.6243	3.6243	5.2242	90	68.62	859	0.0011	
0.17/ treated	P2 ₁ /c	5.1843	5.2109	5.3561	99.15	142.85	598	0.0007	15
	P4 ₂ /nmc	3.6259	3.6259	5.2127	90.00	68.53	458	0.0006	

Table 3. Structural and refinement parameters of $Zr_{1-x}Ce_xO_2$ (x= 0 – 0.17) at room temperature obtained by processing the data measured with HRFD, Dubna.

Composition Parameters	x= 0 monoclinic	x=0.09		x= 0.13 tetragonal	x= 0.17 tetragonal
		monoclinic	tetragonal		
a, (Å)	5.1453	5.2039	3.6233	3.6358	3.6452
b, (Å)	5.2091	5.2148	--	--	--
c, (Å)	5.3116	5.3767	5.2159	5.2378	5.2471
β , °	99.2252	98.9383	--	--	--
V, (Å ³)	140.522	144.14	68.476	69.237	69.720
R _{wp} , %	9.53	14		10.4	10.4
R _{exp} , %	7.35	6.62		4.2	4.5
χ^2	1.68	4.44		6.16	5.4

The phase composition obtained by XRD is due to a thin layer on the samples surface, while the data obtained by neutron diffraction correspond to the entire volumes of the samples. The untreated samples corresponding to $x=0.17$ are formed by a thin layer and an inner core with the same tetragonal structure. A small difference was observed between the unit cell volumes corresponding to these regions.

An important difference there is between the sample corresponding to $x=0.09$ and $x=0.13$: The first and second sample have surface layers formed by a mixture of monoclinic and tetragonal phases;

The inner volume of the first sample ($x=0.09$) contains a monoclinic and a tetragonal phases, while the second sample ($x=0.13$) contain only a tetragonal phase. The average values of microstrains for the entire samples [9] corresponding to $x=0.13$ and $x=0.17$ is about 0.0023.

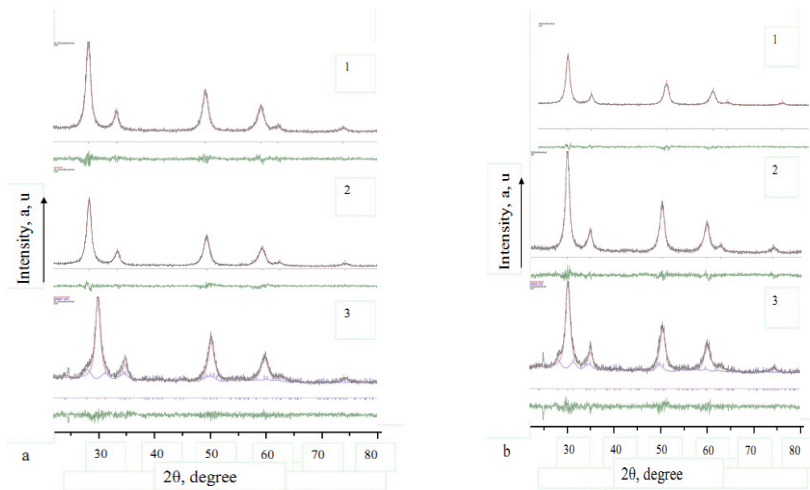


Fig. 1 Diffraction patterns: a) $ZrO_2 - 3 \text{ mol } \% Y_2O_3$ powder, (1), the compact $P = 40 \text{ MPa}$ (2) and the compact $P = 500 \text{ MPa}$ (3) for Cl (samples); b) the powder (1), the compact $P = 40 \text{ MPa}$ (2) and the compact $P = 500 \text{ MPa}$ (3) for N (b) samples.

A smaller dependence of microstrains on the Ce concentrations as in the thin layers on the surface of the same samples appeared [9] (Table 2).

3.2. Structural parameters of sintered and treated samples

TEM images of powders obtained from chloride and nitrate precursors and corresponding microdiffraction patterns are shown on Figure 2a and Figure 1 a1, and Figure 2 b and Figure 2 b1 respectively.

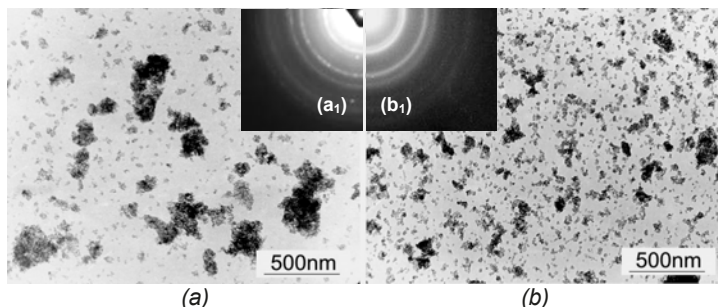


Fig. 2. TEM images of powder system $ZrO_2 - 3 \text{ mol } \% Y_2O_3$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$ obtained from chloride (a) and nitrate (b) precursors, and corresponding microdiffraction patterns for this powders (a1, b1 respectively).

The first one is slightly aggregated, but aggregates in both cases are loose, particles are relatively weak interconnected and can be easily separated by low-energy mechanical fields [24]. Microdiffraction structure (Figure 2, a1, Figure 2, b1) is identical for both types of powders. The presented microdiffraction does not allow to obtain a difference between cubic or tetragonal phases. Structure corresponds to reflections of Fluorite-like face-centered lattice of cubic crystal system with tetragonal distortions Fm3m or tetragonal (P4₂ / nmc) modification. The samples CL1 and N1 (Figures 1, a1; 1, b1) contains only one phase. This phase can be identified as cubic (Fm3m) or tetragonal (P4₂ / nmc), but a mixture between these phases cannot be excluded [25].

This type of structure is also characteristic for compacts obtained using low pressures (curves №2: CL2, N2: Figures 1, a 2 and 1, b 2). After influence of HHP in both samples small amount (16 and 14% for Cl and N samples, respectively) of monoclinic (secondary) phase can be identified, which is typical for these materials at high pressures [26]. The cubic phases differ from the tetragonal ones by the dimensions of the mosaic blocks (about 11-12 nm for the cubic phases and 6 – 7 nm for the monoclinic ones) and microstrains (0.0028-0.006 for the cubic phases, respectively 0.0034-0.0043 for the monoclinic ones (Table 4-5)). Unit cell volumes vary slightly with applied pressure. In agreement with the TEM data, initial powders derived from both chloride and nitrate precursors were relatively uniformly distributed in volume of samples and have a single phase (t-ZrO₂) with average particles size $d = 9$ nm. The data obtained by TEM measurements are characteristic for a very thin layer (around 100 nm or 1000 Å), while the XRD gave information concerning a thicker layer (10 – 100 μm).

Table 4 Variation of lattice constants (a, b, c), β angle, unit cell volume (V), average size of crystalline blocks (D), microstrains (ε) and space group (SG P4₂/nmc) for CL samples

Code	a (Å)	b(Å)	c(Å)	°(°)	V(Å ³)	D (Å)	ε	SG
CL1	5.117 ₆	5.117 ₆	5.117 ₆	90.0	134.0 ₃	130.3	0.0060	Fm3m
CL2	5.103 ₆	5.103 ₆	5.103 ₆	90.0	132.9 ₃	124.6	0.0056	Fm3m
CL3_cubic	5.128 ₁	5.128 ₁	5.128 ₁	90.0	134.8 ₆	114.8	0.0060	Fm3m
CL3_monoclinic	5.176 ₉	5.165 ₄	5.322 ₀	99.18	140.4 ₉	66.9	0.0034	P2 ₁ /c

Investigation of electrical properties of powders by the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) was conducted in [15]. The EIS-data shows that the surface component of nanoparticles conductivity for samples obtained from nitrate precursor is on a three orders of magnitude lower than that for samples obtained from chloride precursor ($\sigma_N = 6.58 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$; $\sigma_{Cl} = 1.87 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$ respectively).

Table 5 Variation of lattice constants (a, b, c), β angle, unit cell volume (V), average size of crystalline blocks (D), microstrains (ε) and space group (SG P4₂/nmc) for N samples

Code	a (Å)	b(Å)	c(Å)	°(°)	V(Å ³)	D (Å)	ε	SG
N1	5.109 ₈	5.109 ₈	5.109 ₈	90.0	133.4 ₂	111	0.0028	Fm3m
N2	5.126 ₄	5.126 ₄	5.126 ₄	90.0	134.7 ₂	125	0.0052	Fm3m
N3_cubic	5.105 ₃	5.105 ₃	5.105 ₃	90.0	133.0 ₇	102	0.0060	Fm3m
N3_monoclinic	5.183 ₅	5.225 ₆	5.268 ₅	99.18	140.8 ₈	70	0.0043	P2 ₁ /c

It can be seen that mass fraction of water in samples obtained from chloride precursor is almost on two times higher than in samples obtained from nitrate precursor: 11.5 and 6.4 wt% respectively. Water in case of oxide nanoparticles is most likely adsorbate [27, 28],

however, surface in case of particles obtained from chloride precursor coated with a more dense layer of ionized water than in case of powders obtained from nitrate precursor. Consequently, chemical prehistory determines physical properties of nanoparticles surface, in particular its degree of hydration.

3.3 Resonant ultrasound spectroscopy

The calculation of vibration modes of elastic objects with free boundaries is a classic problem in mechanics. Unfortunately, exact analytical solutions exist only for few cases such as isotropic spheres, cylinders and certain models of a parallelepiped [29]. In most cases, approximation methods as finite element method (FEM) or Rayleigh-Ritz method must be used for estimating the eigen-frequencies of normal modes [30].

Using finite element method, vibration modes are obtained, the amplitude of signal in spectra has dependence by properties (especially to the crystallographic structure and density) of the sample. The simulated information [10] is very important to determine which of the resonances are observables for investigated spectra and correspond to those experimentally obtained. The inhomogeneities inside the material can be identified from the resonance spectrum, by changes of the resonance frequency, splitting of peaks/increasing of their width, and modifications in amplitude [19]. The main elastic properties of the sample are obtained by used the inversion of data, that implying conjugate gradient method minimizing the objective function [10]. The optimization problem was numerically solved using Matlab 2014. The inversion was applied only for determination of E and G , and not for geometrical dimensions and respectively for densities of the cylindrical samples made from zirconia. The variation of crystallographic structure from sample modifies the position of the peaks from spectrum as well as their amplitude. Figure 3 presents the resonance spectrum between the 260 kHz and 340 kHz.

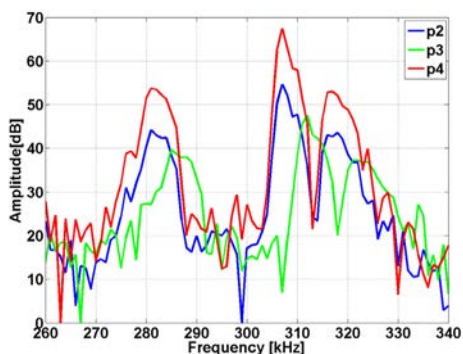


Fig. 3 Resonance ultrasound spectra for samples p2–p4.

4. Conclusions

The $Zr_{1-x}Ce_xO_2$ samples treatments parameters can strongly changes the phase composition, lattice constants, microstrains and average size of the crystalline blocks. A treatment at low temperature could induce an increase of monoclinic phase concentration. Always there are two region in the samples, with will differ one to another by the concentrations of monoclinic and tetragonal phases.

Nanopowders doped with yttrium have a much smaller average size of crystalline blocks as compared with the doped cerium zirconia powders. On other hands, we have another phase composition in the case of nanopowders. It seems that such nanopowders are formed by a thin layer with a possible tetragonal structure and a core volume with a cubic structure. For some nanopowders, the presence of a small amount of foreign phase, attributed to a monoclinic structure was observed. The Resonant Ultrasound Spectroscopy had emphasized the material inhomogeneities by identification in resonance spectra of splitting of peaks/increasing of their width, and modifications in amplitude.

Acknowledgements

This work was supported by a grant of the Romanian Ministry of Research and Innovation, CCCDI – UEFISCDI, project number PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0239. within PNCDI III.

References

1. Navarro M., Michiardi A., Castano O., Planell J. A., 2008. Biomaterials in orthopaedics. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(27), pp.1137-1158.
2. El-Ghany, O.S.A. and Sherief, A. H., 2016. Zirconia based ceramics, some clinical and biological aspects. *Future Dental Journal*, 2(2), pp.55-64.
3. Granchi, D., Savarino, L. M., Ciapetti, G., Baldini, N., 2018. Biological effects of metal degradation in hip arthroplasties. *Critical reviews in toxicology*, 48(2), pp.170-193.
4. Onuoha, K. O., Solow, M., Newman, J. M., Sodhi, N., Pivec, R., Khlopas, A., Sultan, A. A., Chughtai, M., Shah, N. V., George, J. and Mont, M. A., 2017. Have the annual trends of total hip arthroplasty in rheumatoid arthritis patients decreased?. *Annals of translational medicine*, 5(Suppl 3).
5. Agustín-Panadero, R., Román-Rodríguez, J. L., Ferreiroa, A., Solá-Ruiz, M. F. and Fons-Font, A., 2014. Zirconia in fixed prosthesis. A literature review. *Journal of clinical and experimental dentistry*, 6(1), p.e66.
6. French, R. H., Glass, S. J., Ohuchi, F. S., Xu, Y. N. and Ching, W.Y., 1994. Experimental and theoretical determination of the electronic structure and optical properties of three phases of ZrO₂. *Physical Review B*, 49(8), p.5133.
7. Savin, A., Craus, M. - L., Turchenko, V., Bruma, A., Malo, S., Konstantinova T. E., Burkhovetsky V. V., Monitoring technique for nanocrystalline stabilized zirconia from some medical prosthesis, IXth International Workshop, NDT in Progress Praga, 2017, pp. 85-92.
8. ISO 13356–2015 Implants for surgery - Ceramic materials based on yttria-stabilized tetragonal zirconia (Y-TZP).
9. Bruma, A., Savin, A., Craus, M. L., Turchenko, V., Malo, S., Konstantinova, T. E. and Prevorovsky, Z., 2018, September. Changes of phase composition of Zr_{1-x}(Ce/Y)_xO₂ complex oxides induced by thermal treatment. In *Low-Dimensional Materials and Devices 2018* (Vol. 10725, p. 107250W). International Society for Optics and Photonics.

10. Savin, A., Craus, M. L., Turchenko, V., Bruma, A., Dubos, P. A., Malo, S., Konstantinova, T. E. and Burkhovetsky, V. V., 2015. Monitoring techniques of cerium stabilized zirconia for medical prosthesis. *Applied Sciences*, 5(4), pp. 1665-1682.
11. Lemaitre, J., Chaboche, J. L. [Mechanics of solid materials], Cambridge University Press, Cambridge, (1994).
12. Konstantinova, T. E., Danilenko, I. A., Tokiy, V. V., Glazunova, V. A. Obtaining of Zirconia dioxide nanopowders. From innovation to innovation. *Science and Innovations 2005*, Vol. 1, 3, P. p. 76-87.
13. Schimmel, G. The technique of electron microscopy. Russia, 1972; 300p.
14. <http://www.crystallography.net>
15. Balagurov, A. M., 2005. Scientific Reviews: High-Resolution Fourier Diffraction at the IBR-2 Reactor. *Neutron News*, 16(3), pp. 8-12.
16. Visscher W. M., Migliori A., Bell T. M., Reinert R. A., On the normal modes of free vibration of inhomogeneous and anisotropic elastic objects. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1991, 90, 4, 2154—2162.
17. Migliori A.; Sarrao J.; Visscher W. M.; Bell T.; Lei M.; Fisk Z.; Leisure R. Resonant ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids. *Physica B: Condensed Matter* 1993, 183, 1, 1-24.
18. Migliori, A., Sarro, J. L., Resonant ultrasound spectroscopy: applications to physics, materials measurement and nondestructive evaluation. Wiley: New York, 1997.
19. Zadler, B. J.; Le Rousseau, J. H.; Scales, J. A.; Smith, M. L. Resonant ultrasound spectroscopy: theory and application. *Geophysical Journal International* 2004, 156(1), 154-169.
20. De Silva C. W. *Vibration: fundamentals and practice*. CRC Press: Boca Raton, FL, 2000.
21. Ren F., Case E. D., Morrison, A., Tafesse, M., Baumann, M. J. 2009 Resonant ultrasound spectroscopy measurement of Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio as a function of porosity for alumina and hydroxyapatite. *Philosophical Magazine*, 89(14), 1163-1182.
22. Myasnikov D. V., Konyashkin A. V., Ryabushkin O. A. 2010 Identification of eigenmodes of volume piezoelectric resonators in resonant ultrasound spectroscopy. *Technical Physics Letters*, 36(7), 632-635.
23. Martin U., Boysen H., Frey F. *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science*, 49, 403 (1993)
24. Doroshkevich A. S., Danilenko I. A, Konstantinova T. E., 2006 Diagnostics of nanopowder systems based on Zirconia dioxide by transmission electron microscopy. *Electron microscopy and strength of materials*, Vol. 13, pp. 151-159.
25. Strelakovsky V. N., Gorelov V. P., Plaksin S. V. 2009 Structural transformations of YSZ at concentrations up to 10 mol. % Y_2O_3 , studied by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. *Phase transitions, ordered states and new materials*, pp. 1-4.

26. Bouvier P., Djurado E., Lucazeau G., and all. High-pressure structural evolution of undoped tetragonal nanocrystalline Zirconia., *Phys. Rev. B*, 2000, Vol. 62, pp. 8731–8737.
27. Blumenthal U. B. *Chemistry of Zirconia*, Edited by Komissarov L. N. and Spitsyna V. I. Publishing House of Foreign Literature: Moscow, Russia, 1963; p. 345.
28. Lisichkin G. V. Chemical modification of the surface of mineral substances. *Soros Educational Journal* 1996; 4, pp. 52-59.
29. Mindlin, R. D., 1956. Simple modes of vibration of crystals. *Journal of Applied Physics*, 27(12), pp. 1462-1466.
30. Jaglinski, T. R., Lakes, S. 2011 Resonant ultrasound spectroscopy of cylinders over the full range of Poisson's ratio. *Review of Scientific Instruments*, 82, 035105.



EFFICIENT SNR DETERMINATION ALGORITHM FOR PULSE COMPRESSION DEFECT DETECTION AND QUANTIFICATION

DEBOSHREE Roy¹, SUNEET Tuli^{1,2}

¹Centre for Applied Research in Electronics, Indian Institute of Technology Delhi

²Bennett University, Greater Noida, India

Abstract

Lock-in thermography and pulse thermography are some conventional active thermography techniques. Pulse compression is a relatively new signal processing thermal imaging technique for defect detection. A frequency modulation excitation signal in pulse compression technique is expected to improve the defect detectability. However, the quantification of detected defects are challenging due to the nature of data that requires processing of entire video. An algorithm for signal to noise ratio (SNR) calculation for a given defect is proposed here.

Keywords: Thermal NDT, pulse compression, SNR calculation

1. Introduction

Lock-in thermography [1,2] and pulsed thermography [3,4] are both conventional active thermography techniques for defect detection. For a pulsed thermography the test-piece is exposed to a very high intensity light for a short duration. Lock-in thermography comprises of a modulated excited signal where the signal varies periodically with time. The frequency of modulation is known as lock-in frequency. The change phase and amplitude of the resultant thermal waves are studied [5]. A parameter known as diffusion length determines the deep defect detectability. Diffusion length is defined as the distance where the sample temperature reduces to 1/eth of that on the surface.

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c}}$$

Where μ is the diffusion length, k is thermal conductivity, ω is the angular frequency, ρ is density and c is the specific heat.

The Frequency modulation [6,7] is an extension of lock-in frequency where a band of frequencies are incident on a sample. The frequency range of the excitation source produces thermal waves with diffusion range that covers the range of defect range to be detected. The pulse compression is a relatively new thermal imaging technique [8,9]. The original idea of pulse compression thermal wave imaging is based on the signal processing technique used in RADAR [10]. Herein, the chirped response of the sample is correlated with the reference signal to generate a compressed pulse thermal response. The abstract describes the application of a pulse compression based defect detection technique. The paper explores the role of different pulse compression parameter for defect quantification. Further, a SNR calculation algorithm for defect quantification is presented.

2. Experiment Set-up

The basic set-up comprises of a test piece, a set-up to record the reference signal, an infra-red camera, an excitation source along with its modulation circuitry and a computer. Fig. 1 depicts the complete experimental set-up. The CFRP test-piece sample is shown in figure 2.

A 40 W LED source is the excitation source with a relay that turns on-off to modulate the source. An ldr records the reference signal at an interval of 10msec. A FLIR Silver 5000M infra-red camera is used to record the sample response. The camera has a resolution of 320×240 and the samples are acquired at a rate of 10 frames per second.

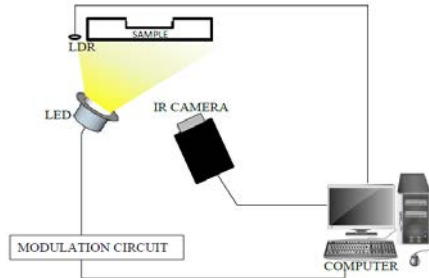


Fig 1 Experiment Set-up

The excitation signal is a linear up-chirp with frequency varying from 0.01 - 0.09 Hz with corresponding diffusion length from 8.1 to 2.7 mm respectively. The following CFRP thermal parameters are used for thermal diffusion length– thermal conductivity $4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, density 1600 kg/m^3 , specific heat $1200 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$.

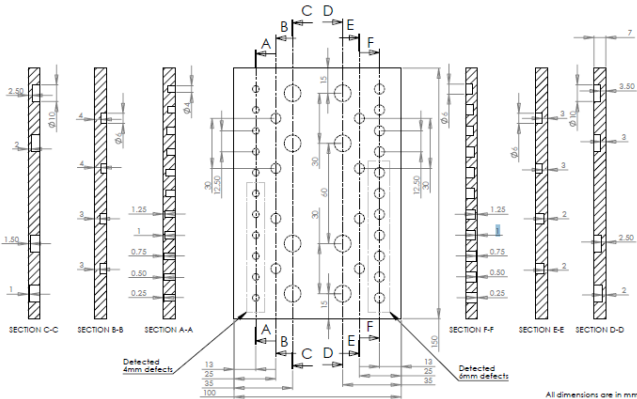


Fig 2 CFRP sample

Post-processing-

The chirped experiment for duration of 900 sec is processed off-line. Both the reference signal and the recorded thermal response of test-piece are polynomial fitted to remove the dc component. The resultant

offset-removes signals are cross-correlated in frequency domain to obtain the resultant compressed pulse signal.

3. Results

The resultant compressed pulse is described in figure 3(a) for a single pixel. The thermal image of the sample from the processing technique is described in figure 3(b).

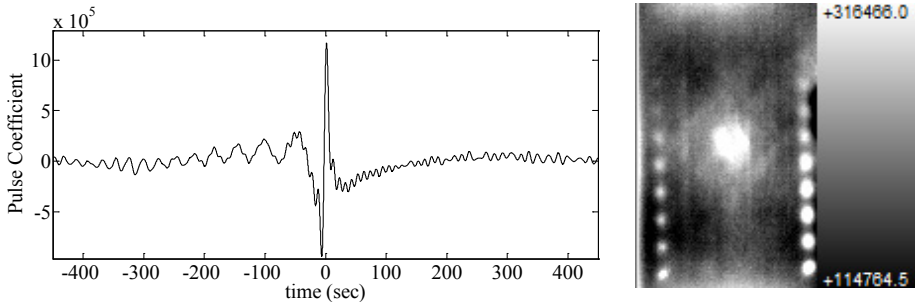


Figure 3 (a) Timing diagram for a single pixel (b) thermal image for a frame from the resultant Compressed Pulse

A defect is quantified in pulse compression with different pulse compression parameters like pulse peak amplitude, peak side-lobes and pulse peak time.

A SNR calculation based on pulse peak amplitude is described here. Since SNR for a given defect is dependent on the way a signal is defined, well formulated algorithm is required for its calculation–

- 1 The first step is to remove the non-uniformity in heating. The thermal images are considered as a 2-D surface with temperature representing the z-axis. A polynomial surface fitting of the image removes the surface non-uniformity arising due to non-uniform heating. A non-uniformity removed surface is depicted in Figure 4 (a)
- 2 Each defect location is identified manually, and a gaussian surface is fitted individually to defects (Figure 4(b)). The step 1 and 2 are applied to each frames separately. The variation of the fitted Gaussian surface amplitude with time is plotted in figure 5 for individual defects. The curve resembles a contrast curve in pulse thermography. The peak in the curve is considered as signal.
- 3 The background noise is determined by identifying and removing the defective zones.

Figure 6 shows the variation of SNR with defect depth for defect with diameter 4 mm and 6 mm respectively. The figure shows that SNR reduces considerably with defect depth. The results resemble with pulse thermography.

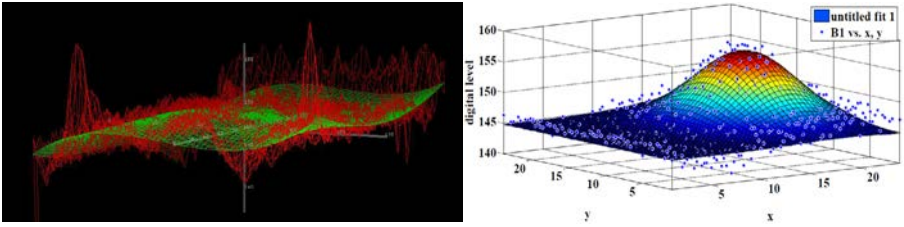


Figure 4 (a) Surface polynomial fitting for non-uniformity removal with the thermal image in red and fitted surface in green (b) A gaussian fitting for a defect with diameter 4mm and depth 0.25 mm

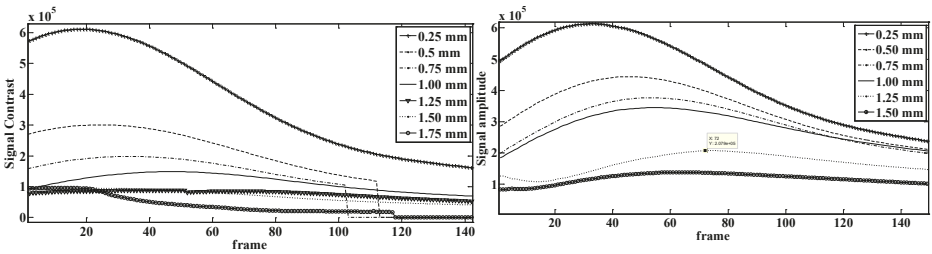


Figure 5 Variation of fitted gaussian surface with time (frames) for a defect diameter of (a) 4 mm (b) 6 mm at different defect depth

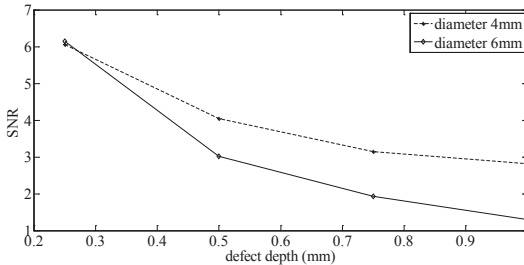


Figure 6 Variation of SNR with defect depth for diameter 4 mm and 6 mm

4. Conclusion

The application of pulse compression for defect detection is a new and effective technique. However, a defect analysis and quantification is carried out by a sequence of steps. The implementation of the SNR calculation algorithm for defect quantification will further help in comparing the pulse compression technique with the prevalent techniques. An efficient SNR calculation algorithm is described in the paper. The results are similar to pulse thermography. Additionally, the pulse compression parameters like pulse amplitude and peak side-lobe levels and peak time can be used for defect quantifications.

5. References

- [1] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *Journal of Applied Physics* Vol. 71, Issue 8, 1992, Jan. 1992, Pages 3962-3965.
- [2] Deboshree Roy, Krishnendu Chatterjee, and Suneet Tuli. "Characterization and Energy Absorption Efficiency Determination of LED as an Effective Photothermal Excitation Source in Lock-In Thermography." *IEEE Sensors Journal*, Volume 15, Issue 10, 2015, pp: 6010-6016.
- [3] N.P. Avdelidis, D.P. Almond, A. Dobbinson, B.C. Hawtin, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, "Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT, *Progress in Aerospace Sciences*", Volume 40, Issue 3, April 2004, pp. 143-162.
- [4] Lau, S. K., D. P. Almond, and J. M. Milne. "A quantitative analysis of pulsed video thermography", *NDT & E International* Vol.24, Issue 4, 1991, pp 195-202.
- [5] Krishnendu Chatterjee, and Suneet Tuli. "Image enhancement in transient lock-in thermography through time series reconstruction and spatial slope correction." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 61, Issue 4, 2012, Pages: 1079-1089.
- [6] Krishnendu Chatterjee, Suneet Tuli, Simon G. Pickering, and Darryl P. Almond, "A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques." *NDT & E International*, Volume 44, Issue 7, 2011, pp: 655-667.
- [7] Mulaveesala, Ravibabu, and Suneet Tuli. "Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection." *Applied Physics Letters* 89.19 (2006): 191913.
- [8] Suneet Tuli and Ravibabu Mulaveesala, "Defect detection by pulse compression in frequency modulated thermal wave imaging." *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Volume 2, Issue 1, 2005, pp: 41-54.
- [9] Krishnendu Chatterjee, Deboshree Roy, Suneet Tuli, "A novel pulse compression algorithm for frequency modulated active thermography using band-pass filter", *Infrared Physics & Technology*, Volume 82, May 2017, Pages 75-84.
- [10] John R. Klauder, "The theory and design of chirp radars." *Bell System Technical Journal*, Volume 39, Issue 4, 1960, pp: 745-808.



THE INTERNATIONAL INFORMATION SYSTEM ON OCCUPATIONAL EXPOSURE IN MEDICINE, INDUSTRY AND RESEARCH (ISEMIR): RADIATION PROTECTION TRAINING AND QUALIFICATIONS

Lenka DOJCANOVA¹, Jizeng MA¹, Jie FU¹

¹ International Atomic Energy Agency
Contact e-mail: L.Dojcanova@iaea.org

Abstract

It has been long known that there is a significant potential for industrial radiography personnel to receive non-trivial occupational exposure. In order to ensure safety of personnel working in industrial radiography, it is of utmost importance to guarantee proper education and qualifications in the area of occupational radiation protection.

The international experts group organized by the International Atomic Energy Agency (IAEA) has suggested to create an online tool, the Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research: Industrial Radiography (ISEMIR-IR) to assist NDT companies with implementation of the optimization principle in occupational radiation protection. Training of industrial radiographers and other personnel and the general training requirements were recognized as one of the key areas relevant for maintaining appropriate radiation protection of workers, public and the environment.

ISEMIR-IR online system was launched in 2017 based on the data from an extensive research of and results of the worldwide surveys. In 2010, three questionnaires were developed and sent to three different actors. Responses were received from 432 industrial radiographers from 31 countries, 95 NDT companies from 29 countries, and 59 national regulatory bodies.

All three questionnaires confirmed that education and training of radiographers is a major requirement in ensuring safety of personnel working in industrial radiography. The shortcomings identified in the surveys were for example emergency procedures training of radiographers who perform on-site radiography, and insufficient practical exercises for creating a safe situation or in source recovery.

Since its launch in 2017, one of the main areas for data collection is radiation protection training and qualifications of industrial radiographers.

Key words: radiation protection, optimization, education, training

Introduction

Industrial radiography provides a means of verifying the physical integrity of equipment and structures such as vessels, pipes, welded joints, castings and other devices. The structural integrity of such equipment and structures affects not only the safety and quality of the products but also the protection of workers, the public and the environment ⁽¹⁾. Industrial radiography by its nature is carried out under difficult working conditions, in remote or urban areas, with little supervision, and with strong radiation sources.

It accounts for approximately half of all the reported accidents for the nuclear related industry in developed and in low to middle income countries⁽²⁾. If performed in a safe manner, X-radiography equipment and gamma-radiography equipment used in industrial radiography pose no health benefits.

In some cases, the use of radioactive sources could lead to occupational exposures, both in normal operations and in accident situations. Related accidents and incidents occur in the NDT industry, and the dose rates received to a source or a device may be high enough to cause overexposure of extremities, and could potentially result in the loss of a limb⁽³⁾. As an outcome, occupational radiation protection is often scrutinized and not optimized.

Failure to adhere to working procedures or a lack of training are the potential causes of safety failures and higher exposures in the NDT industry⁽³⁾. The information about radiation protection training of industrial radiographers and other personnel and the general training requirements in this area is useful for drawing conclusions related to safety arrangements.

The exchange and analysis of information about individual and collective occupational radiation dose as well as about existing dose reduction techniques among operators, regulators, related experts and dosimetry services is essential for implementing effective exposure control programmes based on the proper training needs⁽¹⁾.

In order to address these gaps on a worldwide level, the IAEA has decided to conduct a worldwide survey, and to subsequently develop an international database called ISEMIR.

2. Worldwide survey of occupational radiation protection

2.1 WGIR and the Method

As a response to the inadequate radiation protection of staff in industrial radiography, the WGIR group of professionals with experience of working for NDT companies, client companies, NDT societies, technical service organizations, including education, training and inspection, and regulatory bodies, was established in 2010.

WGIR's main goal was to scrutinize internationally-accepted good practices and shortcomings in occupational safety in industrial radiography. The group was established to particularly define actions on how to improve occupational radiation protection, harmonize monitoring procedures, and to set up a global system for a regular collection and analysis of individual doses⁽⁴⁾.

The main activity of the group was to develop a worldwide survey. The data from the survey was later used to create an international database for optimizing occupational radiation protection.

In order to gain as much information as possible about the global situation in industrial radiography, the WGIR designed three different types of questionnaires. These were sent to national or state regulatory bodies responsible for radiation protection, NDT companies, and individual industrial radiographers. The survey was distributed for a period of one year, from 2010 until 2011.

The questionnaire for individual industrial radiographers consisted of 14 main questions while the NDT company questionnaire and the regulatory body questionnaire were more complex, comprising of 31 and 29 main questions. As for the training and qualifications' section, the regulatory bodies received the highest number of questions, 4 with 11 sub questions. The emphasis was given to the regulatory body role in training following the requirements of the IAEA Basic Safety Standards, which states that: "The regulatory body shall ensure the application of the requirements for education,

training, qualification and competence in protection and safety of all persons engaged in activities relevant to protection and safety”⁽¹⁵⁾. In comparison, the industrial radiography questionnaire contained 4 questions and 3 sub questions; and the questionnaires for operating companies contained 2 questions and 4 sub questions.

Topics addressed by each questionnaire included training in radiation protection; incidents; safety of the radiographer, the public and sources; inspections; emergency plans; and individual monitoring⁽⁵⁾.

Questions about radiation protection training addressed:

- facilitation of radiation protection training for staff by NDT companies and participation of staff in such training
- training being included into the NDT training or as a separate training
- the level of the training (level 1-3 based on the internationally recognized standards, ISO 9712)
- obtaining of formal qualification and/or certification
- undertaking theoretical and practical training and a refresher training
- procedures for emergencies being included in training.

To help facilitate the access to information in various regions, the radiographer’s questionnaire and the NDT company questionnaire were translated into Chinese, English, French, German, Portuguese, Russian and Spanish, with the addition of Dutch for the radiographer questionnaire⁽⁵⁾.

2.2 Survey Results

Responses were received from 432 industrial radiographers, 95 NDT companies and 31 regulatory bodies from different countries. In the case of all three questionnaires, the highest number of responses was received from Europe. NDT companies and regulatory bodies from the Asia and Pacific region provided the second highest number of responses for two types of questionnaires. Industrial radiographers from North America ended up second in responding to the individual radiographers’ questionnaire, right after Europe.

The data showed that the main safety breaches in all world regions were related to a lacking use of collimators/diaphragms, survey meters not as widely available as they should have been, a high frequency of incidents, occupational doses received by radiographers varied considerably with no correlation to a radiographic workload. The complete data is published in the IAEA Technical Document 1747.

The high occurrence of incidents and accidents was also confirmed by the survey with a discrepancy between the responses of individual radiographers and NDT companies. While the companies reported on average 0.03 accident and 0.05 near miss per one radiographer in five years, individual radiographers reported on average 0.04 accident and 0.1 near miss per in five years⁽¹¹⁾.

Collimators, which should be used frequently, reduce radiation levels and subsequent occupational doses to workers. For X-ray radiography, almost 80% of NDT companies stated that they required the use of these devices, but the radiographer responses suggested that some radiographers were not using diaphragms/collimators despite the company requirement⁽⁷⁾.

Radiographers’ occupational doses varied with 35 radiographers having their annual effective doses under the minimum detection limit of the personal dosimetry system. 90 radiographers reported to have between 5 and 10 mSv annually, and two radiographers between 30 and 50 mSv⁽⁹⁾. The biggest area of improvement was registered in the dose variation.

2.3 Survey Results Related to Training and Qualifications

All three questionnaires confirmed that a training of radiographers is a key in ensuring safety of personnel working in industrial radiography. Safety can be further strengthened by developing and improving the right skills of the industrial radiographers and other personnel involved in the process.

The survey confirmed that the need for and requirements of the radiation protection training appears to be generally well accepted by radiographers, operating companies as well as by the regulatory bodies. Most of the companies and regulatory bodies integrate some form of training in their requirements for personnel working with radiation sources. In the ideal situation, all NDT companies should have the training integrated as a part of the NDT training or as a separate training, but the result is nonetheless very much towards the desired situation ⁽¹¹⁾.

The IAEA Basic Safety Standards recommends that the regulatory body's role should be in ensuring the application of the requirements for education, training, qualification and competence in protection and safety ⁽¹⁵⁾. Despite the fact that the regulatory bodies perceive a different level of acceptable training, they all acknowledged the importance of the integration of such training to the NDT training in the companies or as a separate training received by the operators.

The inconsistencies appeared in specific trainings for emergency and insufficient training of radiation protection officers. More detailed results are described in sections 2.4-2.6.

2.4 Individual Radiographers' Responses

Most of industrial radiographers confirmed that radiation protection training was included in their NDT training, 89 % confirmed to receive the lowest stage of training, level 1 in accordance with the internationally recognized standards, ISO 9712 ⁽⁸⁾. Only 8 out of 432 radiographers (2 %) appeared not to have any radiation protection skills, either as an outcome of a separate training or as a training during the job ⁽⁶⁾.

Even though almost all radiographers felt well trained for the job, only 53 % of radiographers are trained for level 3 and thus, should be able to direct the NDT operations in a specific NDT method ⁽⁶⁾.

Training of radiographers who perform on-site radiography in emergency procedures appeared to be insufficient, with 10% of individual radiographers admitting that they did not feel well prepared for an emergency situation. This might be related to the less established training for emergency in the companies (please see the section 2.2)."

2.5 NDT Companies' Responses

The IAEA Basic Safety Standards recommends that the relevant principal parties, which have responsibilities in relation to protection and safety, shall ensure that all personnel have appropriate education, training and qualification so that they understand their responsibilities and can perform their duties competently, with appropriate judgement and in accordance with procedures ⁽¹⁵⁾. All companies recognized their responsibility in providing training to their staff, however some discrepancies were recorded through the survey questionnaires.

The survey registered inconsistencies between the theoretical and practical radiation protection trainings in NDT companies, both in regard to initial and refresher trainings.

Nearly all NDT companies, 96 %, confirmed to provide initial theoretical training, either outside or inside the company, which lasts on average 37 hours. A lower number of companies provided

initial practical training in radiation protection, 82 % with an average amount of 30 hours. Such practical training could be crucial for conducting of radiographers' tasks but the majority of companies do recognize its importance by providing such training ⁽⁹⁾.

83 % of companies provide refresher theoretical training and 16 companies provided no refresher training to their staff. The need for strengthening training might be seen in the practical refresher training. Just over half companies provided refresher practical training, with 39 companies not providing any at all ⁽⁹⁾.

2.6 Regulatory Bodies' Responses

All regulatory bodies confirmed the significance of training in radiation protection. Except of one, all stated that they require a person wishing to perform on-site radiography to have training on an acceptable level, which for 70 % meant radiation protection training included in the general NDT training. 80 % of regulatory bodies considered radiation protection training conducted as a separate training acceptable ⁽¹⁰⁾.

Only 70 % of regulatory bodies require the radiation protection training to include practical exercises for creating a safe situation until the source is able to be recovered. This number also reflects that in many countries the source recovery is restricted to specialised persons ⁽¹⁰⁾.

Radiation protection officer (RPO), a specialist in radiation safety and regulatory matters, should be well-trained for his or her duties. The survey showed that 30 % of regulatory bodies do not require a higher level of radiation protection training for the RPO than for a radiographer. This is an area essential for improvement, especially in the NDT industry with considerable amount of accidents and incidents ⁽¹¹⁾.

2.7 Discussion

It is to be assumed that most of the received responses are from the NDT companies and individual radiographers with better working practices. This is mainly because of the voluntarily nature of the questionnaires.

One quarter of all industrial radiographers' responders were the only responders from a particular NDT company. Only in the case of two companies, more than 20 operators from the same company responded to the questionnaire. Hence, we can assume that the single person responses were likely to be of a RPO, or at least of a person with an advanced knowledge in radiation protection ⁽⁶⁾.

The discrepancy of the responses between companies and individual radiographers prove that even though initial and refresher radiation protection training is in place, the responsibility on site lies with the individual radiographer. In some specific situations, industrial radiographers are pressured to complete a given task in a specific time period and hence work under pressure which increases the risk of safety being compromised ⁽⁷⁾.

As a result, it is recognised that the survey results cannot be considered truly representative of the worldwide practice of industrial radiography and all results must be interpreted with this caution ⁽⁶⁾.

3. Worldwide database

3.1 Design

The questionnaire data further showed a clear need for an improved optimization of occupational radiation protection in industrial radiography worldwide. As a next step, WGIR recommended to establish an online system collecting data focused on dose comparisons for specific occupational roles and conditions, and assessments of the impact of radiation protection actions.

During the design phase, objectives of the IAEA online database ISEMIR-IR were identified as:

- to facilitate the implementation of ALARA practices and effective exposure management;
- to provide efficient collection and maintenance of data on occupational exposure, radiation practices and incidents; including training and qualifications;
- to allow NDT companies to benchmark their own facility and individual radiographers' performances against global or regional data with training being one of the monitored areas, to define follow-up actions to address identified gaps and disseminate lessons learnt;
- to contribute to minimizing the likelihood of accidents, e.g. by identifying precursors, user feedback and experience ⁽¹³⁾.

The main database metric was defined as a mean dose per radiographic exposure - calculated based on the annual staff doses and the associated workload (number of exposures).

The actual data collection and questions were designed based on the gaps identified in the worldwide questionnaires. The data collection and questions part is divided into two sections, one identifies company main features, procedures, sources and incidents or accidents. The other part is dedicated to the information about the occupationally exposed workers.

The questions about the radiation protection training are included in the workers' section, which is called personnel information. After creating an entry for a particular occupationally exposed worker, the coordinator fills in his or her employment status and title. This and other data entry in ISEMIR-IR are anonymized and entered by NDT company coordinators, who are either company managers or RPOs, on an annual basis.

The information related to training and qualifications of the staff include questions about a valid radiation protection qualification, an initial and refresher radiation protection training, and training for emergencies.

Apart of the training questions, ISEMIR-IR collects data about individual industrial radiographers including their occupational doses, radiographic workloads, sources used, percentage of site radiography, use of collimators and survey meters, a number of incidents in a particular year. At a company level, different sections of ISEMIR data entry are dedicated to annual occupational doses, compliance inspections of radiographers, and preventive maintenance of devices.

As an outcome of the data entry, a NDT company is able to benchmark company data or radiographers' performances against global or regional data based on the main metrics, occupational dose per radiographic exposure, and to assess the effectiveness of its occupational radiation protection. One module of the system enables access also to individual radiographers.

The international database supports three types of analyses. All of these show also the possible relation with the training received:

- occupational doses per radiographic exposure for a given industrial radiographer as a function of personnel and facility attributes;
- benchmarking;
- trends with time (per radiographic exposure over successive years)⁽¹³⁾.

3.2 Launch and Data Collection

ISEMIR-IR has been developed in stages and the complete database has been launched in June 2017. It assists NDT companies in implementation of the optimization principle in occupational radiation protection.

Many data entry fields were made voluntary in order to enable participation of all interested parties.

The IAEA is currently collecting the anonymous data from all world regions. After more than one year since the official launch, 34 companies regularly participate in the data collection and others have expressed their interest.

Once the data reaches a significant level, the IAEA plans to publish a report, which will identify areas for improvement and corrective actions that should lead to enhancements in radiation protection worldwide.

4. Conclusions

In order to improve radiation protection optimization worldwide, an international database called ISEMIR-IR has been launched by the IAEA in 2017. NDT companies from all around the world can anonymously participate and contribute with their data focused on radiation protection elements including training and qualifications. The data has been designed based on the 586 questionnaires collected from various countries from Africa, Asia and Pacific region, Europe, Latin America and North America.

The 2010-2011 questionnaires confirmed that training and qualifications of industrial radiographers play a significant role in optimization of occupational radiation protection. The awareness about safety is generally well established among operators, NDT companies and the national regulatory bodies even though they perceive a different level of acceptable training. The inconsistencies in results appeared in specific trainings for emergency and insufficient training of radiation protection officers.

ISEMIR-IR, once fully utilized, could be used as a valuable resource for dose benchmarking of national, regional and international practices. With ISEMIR-IR's help, the IAEA plans to identify gaps that currently exist in the international practice of industrial radiography, the use of radiation sources, training and the use of protective equipment.

NDT companies all around the world are encouraged to participate in the database to enable it to become a viable tool for implementing optimization of occupational radiation protection.

Acknowledgements

The IAEA acknowledges the work of the members of the WGIR and would also like to thank the many individual industrial radiographers, non-destructive testing companies and regulatory bodies who advised during the process of the database development and participated in the survey.

References and footnotes

1. International Atomic Energy Agency, 'Radiation Safety in Industrial Radiography', Safety Standards Series No. SSG-11, pp 1, February 2011.
2. International Atomic Energy Agency, 'Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography', Safety Reports Series No.7, 1998.
3. International Atomic Energy Agency, 'Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography', Safety Reports Series No.7, pp 2, 1998.
4. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 1, 2014.
5. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 3, 2014.
6. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 6, 2014.
7. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 29-33, 2014.
8. International Organization for Standardization, 'ISO 9712:2012 Non-destructive testing -- Qualification and certification of NDT personnel', ISO 9712:2012, June 2012.
9. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 7, 2014.
10. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 8-9, 2014.
11. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 29-31, 2014.
12. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 75, 2014.
13. International Atomic Energy Agency, 'User Guide: The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', 2017.
14. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 10-11, 2014.
15. International Atomic Energy Agency, 'The Information System on Occupational Exposure in Medicine, Industry and Research (ISEMIR): Industrial Radiography', IAEA-TECDOC-1747, pp 23-26, 2014.



EXPERIMENTAL STUDY OF ULTRASOUND CHARACTERISTICS IN STEEL SAMPLES CUT OUT OF A PIPELINE THAT HAS BEEN EXPLOITED DURING A LONG TIME

V. I. EROFEEV, A. O. MALKHANOV, V. P. ROMASHOV

Mechanical Engineering Research Institute, RAS

Contact e-mail: erof.vi@yandex.ru

Abstract

The measurement of velocity of ultrasound propagation and spectral characteristics of the received scattered pulses in steel samples cut out of a pipeline that has been exploited during a long time period have been carried out. The correlation between the velocity of ultrasound propagation and the degree of degradation of mechanical properties of the material is established.

Key words: *ultrasound, mechanical properties of materials, velocity, spectral characteristics*

Main oil pipeline is one of the examples of objects exploiting in cyclic loading conditions. The main changes that are happen with the material of the pipeline usually associated with a change in the density of dislocations [1]. The utilization over the lifetime of the most grades of pipe steel is resulted in the significant changes of the dislocation structure. The data about the changes of the density of dislocations in pipe steel of main oil pipelines that are happen during their usage is shown in the Table 1. The results in the table were obtained with the help of electron microscopy.

Table 1. Changes in the density of dislocations in pipe steel [1]

Steel grade	Working lifespan year	The density of dislocations, cm ²	
		in perlite	in ferrit
17GS	Initial state	12,4	8,1
	12	13,1	13,4
	19	17,8	19,0
	29	30,9	31,4
14HGS	Initial state	12,0	6,9
	12	14,9	7,2
	24	16,2	14,3
	30	16,8	16,7

When the density of dislocations are over the certain value, the various dislocation mechanisms of microcracks formation start activating.

The microcracks can appear when the dislocation cross the slipbands, during the accumulating the boundary dislocations in a row. Hereafter such microcracks can turn to large cracks that poses threat for exploiting pipelines.

Thus the identification of high density areas of dislocations in steels for building main oil pipelines with the help of NDT is of practical importance.

For studying the characteristics for ultrasound propagation, hardware and software suite "Astron" [2] was used. It is designed to generate and receive acoustic impulses as well as it has the capabilities for measuring their characteristics and conducting spectrum analysis. The scheme of the device id the following (Fig. 1).

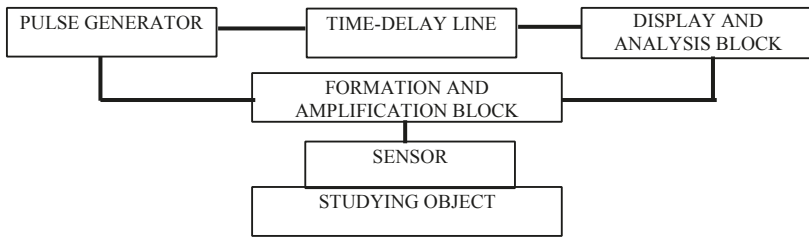


Fig. 1 The scheme of experimental assembly

Basic pulse produced by the generator of electrical pulses is applied to the block formation and amplification. After amplification the electrical pulse, it is converted and supplied to piezoelectric converter that starts generating elastic vibrations at the selfresonant frequency. In order the plate generate the limited number of impulses, it is damped. Thus, the vibrations generated by the plate gradually fade, but manage to excite elastic vibrations of the surface of the studying material, which are then distributed in the interior of the material. Further, the pulses reach the boundaries of the sample, they are reflected and sent back where they cross with the surface of piezoelectric-crystal plate they are converted into an electrical signal and fed to the display and analysis. The device allows you to see the reflected signals, which makes it possible to estimate the amount of attenuation. In addition, the device allows a high precision measurement of time intervals between the reflected ultrasonic pulses, what makes it possible, knowing the thickness of the test sample, to determine the velocity of propagation of elastic waves in it. Also, the device has a built-in program for the analysis of the spectral characteristics of the received signals. Thus, this device allows the entire set of studies of acoustic signals.

With the help of "Astron", the experiment was conducted to study the characteristics of the propagation of ultrasound in four samples cut from the pipeline being for a long time

in operation. All samples were made of steel 09G2FB. Physical and mechanical characteristics of the samples are listed in the Table. 2.

Table 2. Physical and mechanical characteristics of the samples

# of the sample	The limit of macroelasticity MPa	Yield limit MPa	Conclusions by the results of metallography
2	336	454	Normal state
10	195-236*	377-415*	Highly weakened state
16	234	413	Weakened state
18	259-308*	371-433*	Slightly weakened state

* - the data was obtained by the results of several experiments.

During the experiment the velocity of propagation of ultrasound was measured and the spectral characteristics of the reflected pulses were received. For the experiment used a sensor of longitudinal waves with the central frequency of spectrum 6 MHz. Measurements of the thickness of the samples were made with a micrometer. Measurement inaccuracy was related mainly to the precision of detection of the sample thickness and was about 20 m/s.

The results of the measurement of ultrasound velocity propagation are shown in Fig. 2.

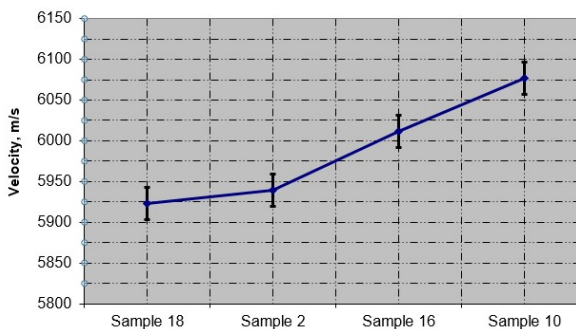


Fig. 2 The velocity of ultrasound propagation in samples

From the Fig. 2 it follows that with account of measurement inaccuracy the velocity of ultrasound propagation in samples #18 and #2 is approximately the same. In samples 16 and 10 the value of ultrasound velocity propagation is anomalously high – more than 6000 m/s.

In accordance with the theoretical model proposed in [3, 4], increasing the velocity of propagation of ultrasound in the material indicates an increase in the dislocation density in the material. The obtained experimental results support this hypothesis. A comparison

of the experimental data with the real properties of the samples is hampered by large spread of information regarding the macroelasticity limit and yield strength of samples 10 and 18. However, averaging the physical and mechanical properties of the samples shown in Table. 2, the samples can be arranged in descending order of their original characteristics as follows: a sample 2, further sample 18, then, with almost equal characteristics, samples 10 and 16. This arrangement substantially corresponds to the order obtained by measuring the velocity of the samples. This may serve as a confirmation that measure the velocity of ultrasound propagation in the material can serve as a basis for the evaluation of physical and mechanical properties of objects, in which the main changes occurring in the course of its utilization are caused by the change in the density of dislocations. During the experiment the spectral characteristics of the reflected signal was obtained as well (Fig. 3).

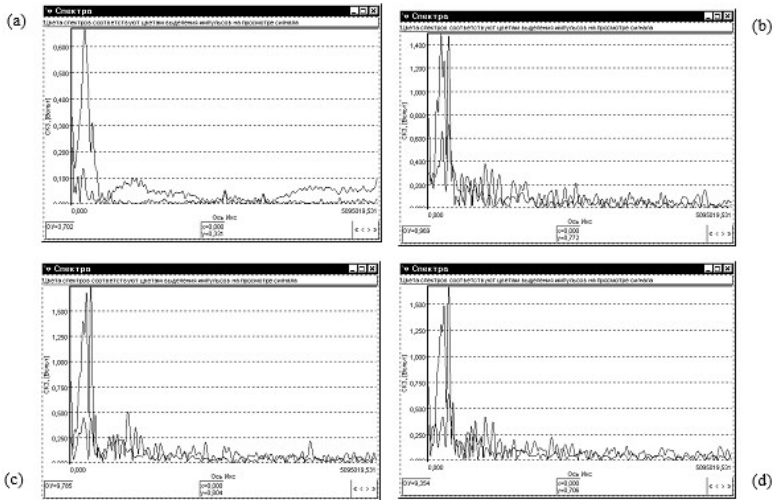


Fig. 3 The examples of received signals spectra: (a) sample 2, (b) sample 10, (c) sample 16, (d) sample 18

It is easy to see that the spectrum of the signal in the sample #2 substantially different from the spectra of the signals from three other samples; spectra of signals in the samples #18 and #16 look quite similar; spectrum of the signal in the sample is similar to the spectra of signals #10 samples #18 and #16, but has additional harmonic undetected on other samples.

By analysing the results of experiments, it can be noted that, despite the limited nature of the data, the results are in good agreement with the assumptions made in [3, 4] to describe the propagation of elastic longitudinal waves in solids with dislocations.

Acknowledgement

This work was supported by the grant projects of Russian Foundation for Basic Research 16-08-00776, 18-08-00715.

References

1. Gumerov A. G., Yamaleev K. M., Gumerov R. S., Ametov Kh. A. Defectiveness of oil pipelines and methods of their repair. Nedra, Moscow, 1998, 252 p. (in Russian).
2. Uglov A. L., Erofeev V. I., Smirnov A. N. 2009. Acoustic control of equipment during its manufacture and operation, Nauka, Moscow, 280 p. (in Russian).
3. Erofeev V. I., Romashov V. P. Effect of dislocations on the dispersion and damping of ultrasound in solids. Technical Physics Letters. 2002, Vol. 28, No 3, pp. 218-220.
4. Erofeev V. I., Romashov V. P. Effect of the cyclic loading and deformation of a material on the characteristics of propagation of a longitudinal acoustic wave. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004, Vol. 40, No1, pp. 46-50.



ASSESSMENT OF CRACKED CONCRETE SLAB OF A SPILLWAY BY MSR-IMPACT ECHO

**Ferri HASSANI ^{1*}, Philippe GUEVREMONT^{1*}, Moe MOMAYEZ ^{1*},
Kaveh SALEH ^{2*}**

^{1*} McGill University, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Montréal,
(Québec), Canada

^{2*} Research Institute of Hydro-Québec (IREQ), Civil Engineering Research
Group, Varennes, (Québec), Canada
Contact e-mail : saleh.kaveh@ireq.ca

Abstract

Assessment of concrete structures by non-destructive testing (NDT) has always been problematic simply because of the complex nature and the heterogeneity of the material.

This paper explores a promising NDT method used in today's civil and mining industry. The technique is based on the study of the reflection system of low frequency (20-50 kHz) body waves. The propagation of low frequency waves is well suited for heterogeneous materials because the waves suffer less attenuation which is typically promoted by absorption and scattering. The paper describes the MSR Impact-Echo (Miniature Seismic Reflection Impact-Echo) technique and discusses its capabilities in situ assessment of concrete structures.

This paper presents an in situ investigation performed on the crest slab of a spillway section of a concrete gravity dam in Québec, Canada. The focus of this article concentrates on the investigation of a recently performed restoration of a spillway section where unexplained surface opening cracks have formed on the top side of a spillway's concrete slab. The MSR-IE method was used to evaluate the extent of the damage caused by the surface bearing fissures. The investigation revealed that the vertical cracks were limited to the depth of the repaired section and that some regions of the slab clearly showed signs of a debonded interface between old and new concrete layers. The results of the in situ investigation led to cost-effective repair strategy.

Keywords: Dam, Cracked Concrete structure, NDT, NDE, Impact-echo, MSR

1. Introduction

Concrete structures are typically subjected to various types of forces which could cause cracking, spalling, and swelling. The deterioration could be due to excessive external stresses, thermal gradients, seepage, Freeze-thaw, rusting steel reinforcement, chemical reaction of concrete, etc.

Nondestructive testing of concrete has always been difficult to perform consistently due to the nature of the material itself [Sansalone et al, 1986]. The MSR Impact-Echo (*Miniature Seismic Reflection Impact-Echo*) technique has proven to be very beneficial to concrete NDT [Hassani et al, 1997 and 2001, Momayez et al, 2002]. As opposed to high

frequency ultrasonic pulse-through testing, MSR-IE testing is based on the propagation and reflection of low frequency longitudinal wave pulses. The use of the reflection principle enables one to utilize the method on only one exposed test surface as opposed to two opposite test surfaces which are required for standard ultrasonic investigations [Saleh et al, 1997; Guevremont et al, 1999].

Hydro-Québec is one of the major providers of electrical power in North America and has more than 100 concrete dams under management. Recently, one of its concrete dams underwent a major restoration, where a significant part of the work was performed on the crest slab in the spillway section (Figure 1).

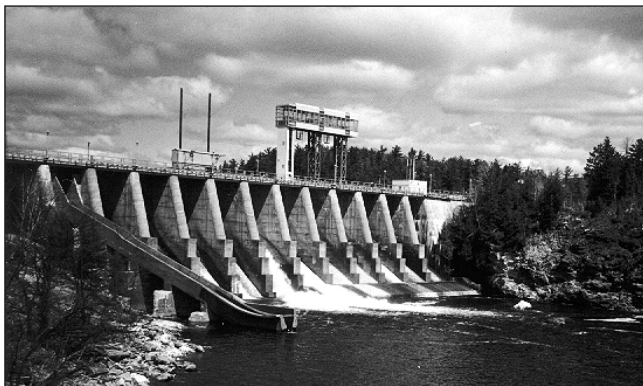


Figure 1: Investigated Spillway section of the hydroelectric plant

The repairs to the spillway section of the dam included the partial replacement of the crest slab which spans the total spillway section. In order to simplify the repair procedure and ensure the safety of the workers, only the top half of the spillway slab was removed and replaced with a new concrete. The new concrete layer is approximately 150 mm (6 in.) thick. The remaining original supporting layer of concrete averaged 180 mm (7 in.) thick (Figure 2).

The new repaired concrete was poured as a continuous slab spanning some of the support abutments. Following a brief period in service, the new repaired concrete began to exhibit unexpected signs of cracking. Surface-opening cracks began to appear in the new concrete layer. Subsequent to the elimination of basic causes which could promote such deterioration, the focus was put onto the assessment of the structural safety of the concrete slab. Additional concern was raised because of the use of the spillway that as a service throughway for the rest of the power station.

The MSR-IE method was seen as a cost effective technique for performing the condition assessment of the crest slab. The investigation spanned a distance of 6 m (19.7 ft) of the spillway. The visible cracks on the surface of the slab spanned the upstream to downstream directions. The main problem was to determine if the surface opening cracks propagated completely through the slab. Time restrictions at the site prohibited the authors from performing an extensive ultrasonic testing campaign which would have assisted to reveal the accurate depth of the surface cracks. Therefore, the impact-echo (IE) method offered a quicker solution to the problem of evaluating the fissures.

Additionally, the use of this system could assist the investigators in determining if there is any occurrence of debonding between the two layers of concrete.

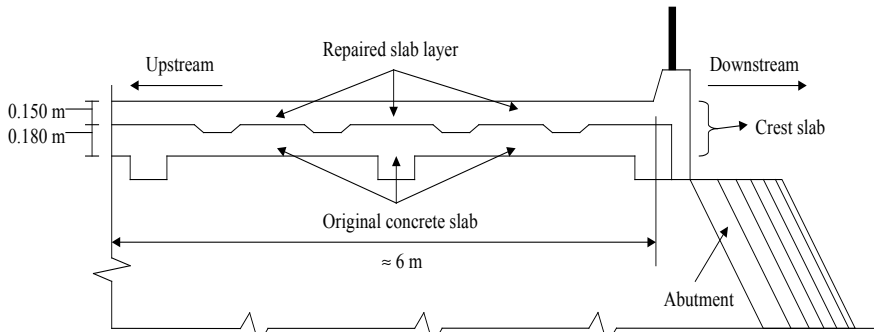


Figure 2: Cross section of the spillway crest slab (drawing not to scale)

2. Background

The MSR-IE method is based on the study of the propagation and reflection of elastic body waves in a heterogeneous material such as concrete. Of main interest is the propagation of longitudinal waves [Sadri et al, 1997]. A stress wave system is introduced into the test medium with the help of a mechanically spring loaded impact device equipped with a spherical impact tip (Figure 3).

The spherical tip allows for the introduction of a hemispherical system of waves into the test medium. This type of impact generates stress waves with frequencies up to 50 kHz. The low frequency longitudinal wave suffers less absorption and scattering when traveling through concrete because the generated wavelengths are typically larger than the largest aggregate size in the test medium. The velocity of longitudinal waves varies approximately between 3000 m/s (9840 ft/s) to 5000 m/s (16400 ft/s) in concrete. The velocity depends on the amount of voids and water in the concrete and the amount of internal reflectors (aggregates, honeycombing, etc...). The use of low frequency waves enables one to study concrete as a semi-homogeneous material. These body waves provide a better energy distribution over the lower frequency range, which results in an enhanced penetration ability into concrete. The longitudinal wave velocity (C_p) in a medium can be expressed as [Timoshenko and Goodier, 1970]:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

Where E is the dynamic modulus of elasticity in GPa, ν is the dynamic Poisson's ratio and ρ is the density of the medium in kg/m^3 . The velocity C_p is used to evaluate the thickness of concrete elements or the depth of internal anomalies. A broadband normal displacement sensor is used to capture the plate response due to successive returns of the incident stress wave into the medium. The response is then digitized and converted to the frequency domain by using an FFT routine. In most cases, MSR-IE testing produces frequency spectrums with high signal to noise ratios, therefore there is no need for using signal processing techniques such as multiple signal averaging for

the reduction of incoherent noise in the captured signal. The frequency of repeated longitudinal wave arrivals (f_p) is related to its wave velocity C_p by the following relationship:

$$f_p = \frac{C_p}{2T} \quad (2)$$

Where T is the thickness of the element or the depth of an anomaly and the coefficient $\frac{1}{2}$ is added to take account of the double travel distance of the longitudinal wave because the MSR-IE method is a one side test.

MSR-IE testing has been shown to be well suited for the detection of inclined crack profiles [Hassani et al., 2001 Momayez et al, 2002], evaluating the profile of hydraulically induced fissures in concrete slabs [Saleh et al., 1997], and detecting the thickness of shotcrete layers in underground mines [Guevremont et al., 1999] among other applications.

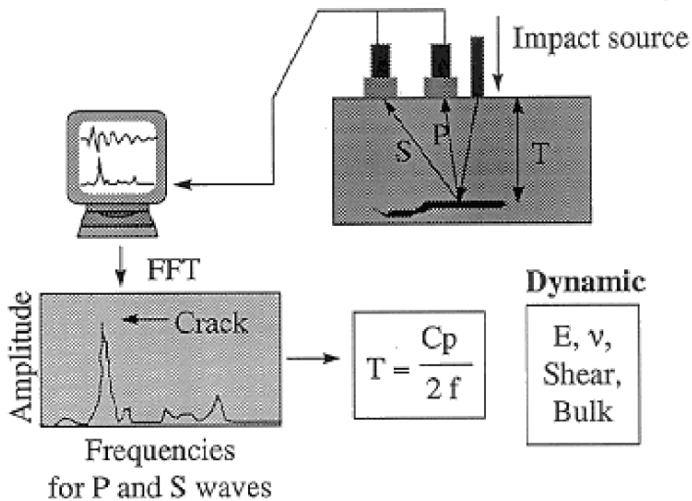


Figure 3: Schematic of the Impact Echo MSR system

3. In situ investigation

Upon arrival at the inspection site, the authors were quick to assess the situation and realized that five (5) sections of the spillway were going to be part of the investigation. In order to simplify the extent of the study due to time restrictions on site, the test procedure involved a reflection based methodology. The stress waves were generated on one side of the opening cracks while the broadband sensor was positioned on the other side. If the crack is shallow, multiple reflections of the longitudinal wave should be observed which originate from the diffracted tip of the crack. If the crack propagates completely through the concrete slab, it would be obvious that no stress wave reflection will occur towards the awaiting sensor. A reflection of the longitudinal wave will occur if there is an occurrence of debonding at the interface of the two layers of

concrete that form the new refurbished slab due to the difference in acoustic impedance at the interface location.

4. Methodology

The MSR-IE method is considered a point-by-point technique that is somewhat time-consuming but is one of the most accurate NDT methods available for in situ work on concrete to date. The limitations are related to the instrumentation (sensor coupling requirements) and sometimes to difficult data interpretation. The typical method of implementing an MSR-IE campaign is to identify the location of series of test points or a potential test grid. For the application discussed in this paper, series of positions were identified along the thirteen opening cracks of interest to the dam safety engineers on site (Figure 4). To ensure repeatability of the acquired signals and of the analysis, a minimum of three (3) signals were conducted at each of the 121 test positions, which covered the 5 sections (1, 2, 5, 6 and 7) of the spillway.

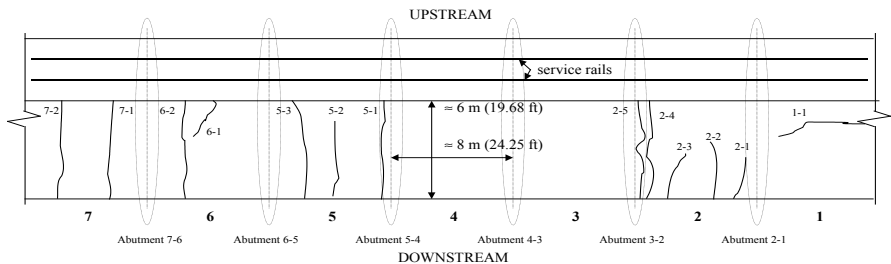


Figure 4: Top view of the position of the cracks and the spillway section numbers

5. Results

This section presents the results of the investigations performed within the five (5) spillway sections under consideration (sections 1, 2, 5, 6 and 7). A spillway section is considered to be the span between two abutments of the spillway (Figures 1 and 4).

The first spillway section to be investigated possessed one significant crack (Figure 4: Section 1, crack 1-1) which spanned in a direction perpendicular to the river banks (i.e. parallel to the longitudinal axis of the dam). The analysis of the MSR-IE test data shows that this crack did not completely pass through the slab and reach the underside of the slab.

The second spillway section to be investigated shows definite signs of excessive cracking. Five major surface opening fissures were identified and studied. Two cracks crossed the complete width of the slab (no. 2-4 and 2-5). At all test locations along the cracks, the longitudinal wave reflections were easily detected and captured by the MSR-IE data acquisition system. However, some areas of concern were observed. The signal analysis showed dominant longitudinal reflections at a frequency of 11.72 kHz. The longitudinal wave velocity of the concrete was evaluated as 3545 m/s. The detected frequency shows that an anomaly is detected at a depth of 0.151 m (0.495 ft) deep. The depth also corresponds to the thickness of the repaired section of the concrete slab as shown in Figure 2. In the frequency spectrum, the magnitude of the

frequency that corresponds to the repeated longitudinal wave reflections leads one to conclude that there is a significant change in acoustic impedance at the interface between the two layers of concrete (Figure 5). The change in acoustic impedance is possibly due to the debonding of the repaired layer. Since the interface is occasionally undetected, this seems like a plausible explanation. The frequency spectrum of test point P8L105 along crack 2-5 shows no sign of debonding at the interface; however the interface is still detected. The frequency spectrums of points P8L110, P8L115 and P8L120 along the same crack clearly show the frequency of the dominating reflected longitudinal wave oscillations.

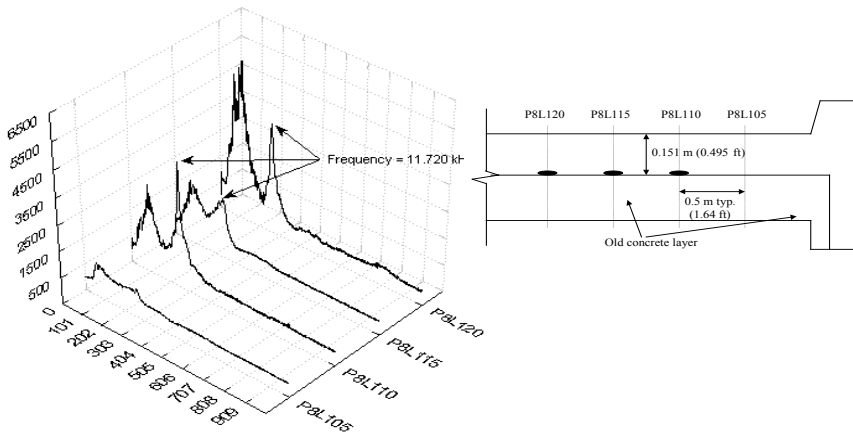


Figure 5: Sample data from the investigation of the 2nd section of the spillway, crack no. 2-5

The third tested section (section 5) to be investigated focused on the study of three important surface bearing cracks, two of which spanned the complete width of the repaired slab of 6.0 m (18.3 ft.). Once again, it was found that the opening cracks did not pass through the thickness of the slab. Along the length of two of the cracks, an interface at 0.146 m (0.479 ft.) and one at 0.151 m (0.495 ft.) were clearly intercepted. It is interesting to note that most of the detected interfaces occurred in proximity to positions of the supporting abutments.

This could suggest that the top slab section (i.e. the repaired layer) has been subjected to tensile forces which could be caused by thermal effects or excessive loading conditions between the abutments. The result of which would lead to debonding of the repaired concrete layer with respect to the original concrete layer. Figure 6 shows all the frequency spectrums of the data obtained along the crack no. 5-2 shown in Figure 4. Figure 7 shows a close-up of four frequency spectrums from the same crack as in the previous figure. The test positions P11L220 and P11L230 show the detection of the interface while the other two samples do not exhibit the dominant reflection frequency from the interface

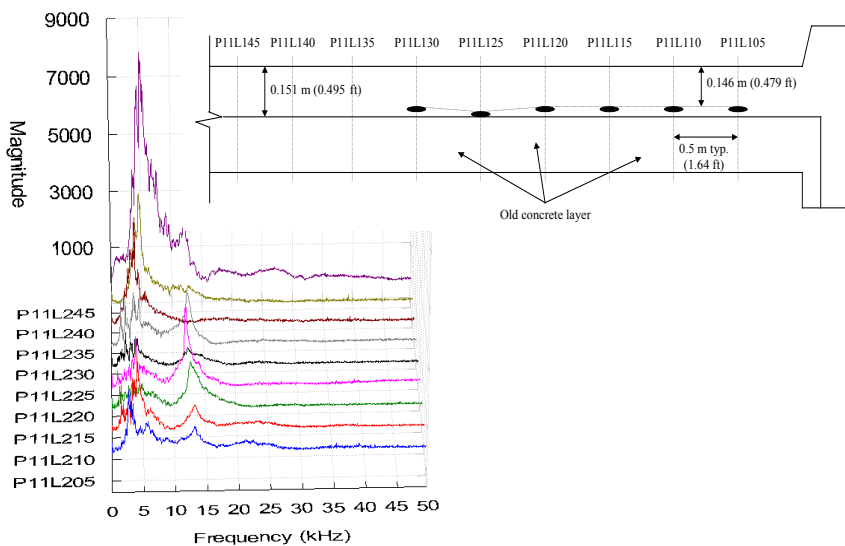


Figure 6: Frequency spectra obtained along crack no. 5-2 on spillway 5

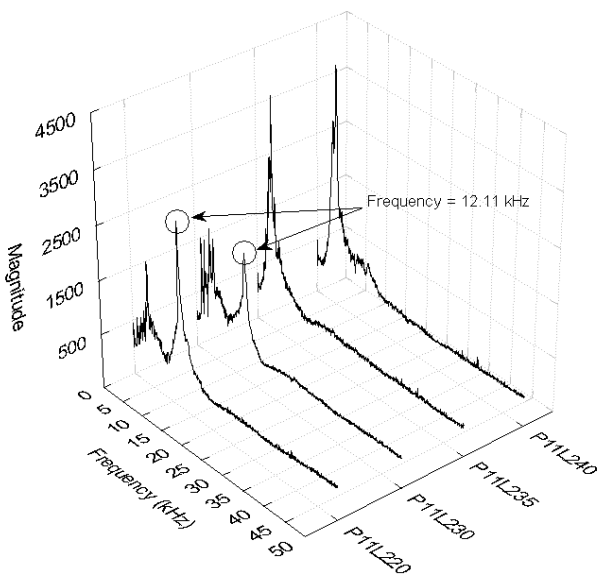


Figure 7: Sample data from the investigation of the crack no. 5-2 on the spillway 5

Notice the recurring high magnitude frequency peaks more than 12 kHz. Two of the spectrums clearly show the frequency that corresponds to the repeated oscillations of the longitudinal wave between the top surface of the slab and the interface.

On the sections 6 and 7 that were investigated, two cracks of importance were observed in each of the sections. Once again, none of the cracks propagated to the bottom side of the slab based on the MSR-IE test results. On this occasion however, three of the four cracks propagated completely across the 6.0 m (18.3 ft.) width of the slab in an upstream to downstream direction.

The interface between the thin replaced thickness of concrete and the old concrete slab was observed in three of the four cracks investigated. As opposed to the other sections of the spillway, the interface was detected in the center of these two spillway sections. Note however that the thickness of the top layer of concrete on the sixth section of the spillway was observed as thickness of 0.160 m (0.525 ft.) which was calculated with a longitudinal wave velocity of 3545 m/s.

6. Discussion

The MSR-IE method was used to assess the condition of cracks in five sections of a crest slab which span the spillway section of a dam. The nondestructive investigation proved to be a quick and efficient method which enables owners of the infrastructure to better assess the condition of their aging installations.

The results of this particular study effectively show that NDT impact-echo method have improved significantly over the last decade for a number of in situ applications. It was discussed that all the investigated fissures did not propagate through the complete thickness of the slab. The study also revealed an important aspect that could be a precursor to cracking. The interface between the old and new concrete is clearly visible due to a sudden change in acoustic impedance which was shown in the magnitude of the frequency that corresponds to the repeated longitudinal wave reflection from the interface. The fact that the interface is not detected at all test locations leads to the conclusion that debonding of the top layer is not an overall occurrence throughout the spillway section. Figure 8 shows the perimeters of the debonded areas that were detected during this study.

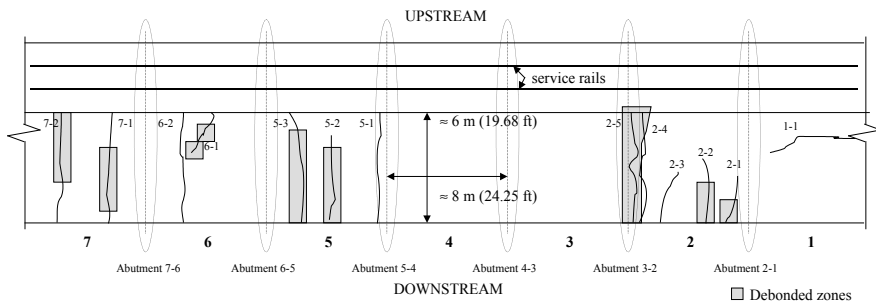


Figure 8: Perimeters of debonded zones detected by MSR-IE tests

It is important to note that the fissures observed in the slabs could be caused by other physical forces aside of those caused by dynamic deformation of the slab. According

to technical drawings of the dam, there seems to be a lack of reinforcement in the repaired section of the concrete slab which could perhaps prevent surface cracking of such a thin layer of concrete. The dam is situated in the western of the Province of Québec (Canada) where the temperatures can reach at minimum – 40°C (- 40°F) during the winter season. Another possible problem is the lack of expansion joints for such a long continuous layer of concrete that forms the top section of the slab. Without expansion joints cracks can be caused by concrete shrinking. There may be a variation of the shrinking rate of the old and new concrete which may cause internal stress variations in the concrete. As discussed previously and as shown in Figure 4 the discussion that brings one to the conclusion of layer debonding between the two interfaces is the high signal to noise ratio observed in the power density spectrums at frequencies that correspond to the

7. Conclusion

The assessment of the condition of the cracks in the spillway section of the hydroelectric plant took approximately five hours of data acquisition and another five hours of data analysis. As opposed to the other alternative assessment methods for concrete such as coring, the MSR-IE method has proved much less costly and less time consuming as an investigative tool.

In addition to these benefits, the investigation helped to avoid an underside investigation of the spillway section which could lead to heavy inspection costs and higher risks for the employees.

The study led to the evaluation of the thickness of the top layer and to the confirmation that the surface opening cracks did not spread completely through the complete thickness of the spillway slab. Based on the results of the MSR-IE tests, the dam safety engineers have determined that the crest slab of the spillway section is still structurally sound. At this time, Hydro-Québec expects to use impermeable products to cover the crest slab in order to eliminate water infiltration and limit cracking caused by ice water expansion during the winter months.

8. References

1. Sansalone, M., and Carino, N. J. (1986), *“Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves”*, National Bureau of Standards, U.S.A., NBSIR 86–3452.
2. Hassani F. P., Guevremont Ph., Momayez M., Sadri A., Saleh K (1997) *“Application of Nondestructive Evaluation Techniques on Concrete Dams”*; International Journal of rock Mechanics and Mining Science Vol 34, No 3-4, Paper No. 125
3. Hassani, F. P., Guevremont, P., Momayez, M., Saleh, K., Tremblay, S. (2001) *“A New Method for Testing Concrete in Dams”*. Hydro Review Journal, Vol. XX, No. 1, pp. 54-64, March 2001
4. Momayez, M., Hassani, F. P., Guevremont, P and Saleh, K. (2002) *“Application of MSR Non-destructive testing Technique to monitor the condition of a Buttress*

at Manic 5 Hydroelectric Dam in Québec”. Hydro Vision 2002, Oregon, USA, July 2002

5. Saleh, K., Hassani, F. P., Guevremont, P., Sadri, A., Lapointe, R., Ballivy, G., Rhazi, J., Kharrat, Y. (1997) *“Three seismic nondestructive methods used to monitor concrete slab injection tests”*. Journal of Pure and Applied Geophysics, vol. 150, no. 3, pp.605-625
6. Guevremont, P., Hassani, F. P., Momayez, M. (1999) *“Use of NDT for Thickness Measurement of Shotcrete Rock Support Systems in Underground Mines”*. 26th Conference on Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, July 25th-30th 1999, Montreal, Canada.
7. Sadri A., Hassani F. P., Saleh K (1997) *“Determination of Concrete Dynamic Elastic Constants Using a Miniature Seismic Reflection System”*. Journal of Materials Evaluation: Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 55, No. 7, pp. 817-820, July 1997
8. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., (1970) *“Theory of Elasticity”*; McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 567 pp.



STUDY ON HEALTH MONITORING METHOD OF ACOUSTIC EMISSION USING FREQUENCY SHIFT

Hiraku KAWASAKI*, Mami OMORI*, Seiichi OMORI*

*IHI Inspection & Instrumentation Co., Ltd.

Contact e-mail: h_kawasaki@iic.ihi.co.jp

Abstract

Acoustic Emission (AE) testing is considered as integrity evaluation of Carbon Fiber Refrain forced Plastics (CFRP) pressure vessels during proof tests and several standards for the evaluation such as from ASME that has been already established. The AE Testing is examined also as an intensity evaluation of pressure vessel and it is generally used the Felicity Ratio (FR) as well as an ASME standard. In our past research, we analyzed the frequency of AE signal waveform in the tensile test, and investigated change of frequency in each load state. We confirmed the frequency center-of-gravity (F.C.O.G) was changing before the load in which FR became down. There are some papers that the frequency analyses have been done to the specimen with the artificial notch or delamination. In this time, we examined the AE testing in hydrostatic test to actual CFRP pressure vessel. As a results, frequency of AE signals were change before the pressure which FR became down. Moreover, we obtained the tendency that tank was broken after occurring the low frequency signals. Therefore, we report regarding the method of evaluating damage by the frequency.

Key words: Acoustic Emission, CFRP, Frequency Center of Gravity, Felicity Ratio, Carbon Fiber Refrain forced Plastics, hydrogen fuel tank.

1. Introduction

CFRP were increasingly used in several engineering fields such as fuel tanks of space rockets and hydrogen cars. CFRP materials have high specific strength and excellent corrosion resistance compared to iron and steel materials. However the damage evaluation of CFRP was difficult because it could not be detect the several damages such as matrix crack, delamination, and fiber cut from conventional method on the metal material.

We had been studying the damage evaluation method during the tensile test for CFRP materials by AE testing [1]. We reported previously that there were some possibilities to detect a sign of delamination [2]. In this time, to confirm the applicability of our method in CFRP pressure vessel, we examined the AE testing to hydrostatic condition. The result of the AE testing was the same tendency as the tensile test. We could confirm the damage sign of the AE signals by CFRP pressure vessel.

2. Analysis method

The Kaiser Effect was extended to general state stress in AE testing. This phenomenon should that a material under load emitted acoustic waves only after a primary load level was exceeded. This effect could be quantified by using the FR, which was the load where considerable AE resumes, divided by the maximum applied load. This method was established as ASME standard [3]

The results of AE testing by CFRP tensile test were shown in Fig. 1 as an example. The relationship between AE Hits and tensile load were shown in Fig. 1(a). In the 2nd load, AE signals were not detected until the maximum applied 1st load and FR was 1.0. In the 3rd load, Felicity ratio less than indicate a distortion of the Kaiser effect. Therefore, CFRP was damaged in 2nd load. To confirm the tendency of AE signals from occurring damage, three AE signals were picked up from 2nd load. The picked waveforms of I II III show the Fig. 1(b). In the frequency range between 150 kHz and 400 kHz, peak frequency became gradually high with load increase. On the other hand, at the frequency less than 150 kHz, the peak frequency became gradually high with load increase (from waveform I to waveform II), but the peak frequency became low by waveform III. From these results, we were studying an analysis method using F.C.O.G in less than 150 kHz of frequency band [4].

The result of F.C.O.G was shown in Fig. 1(c). In the 1st load, F.C.O.G increased to about 110 kHz with load increase. In 2nd load which could think damage occurred, frequency decreased to 80 kHz. We confirmed that this phenomenon was just before delamination occurred in our past research.

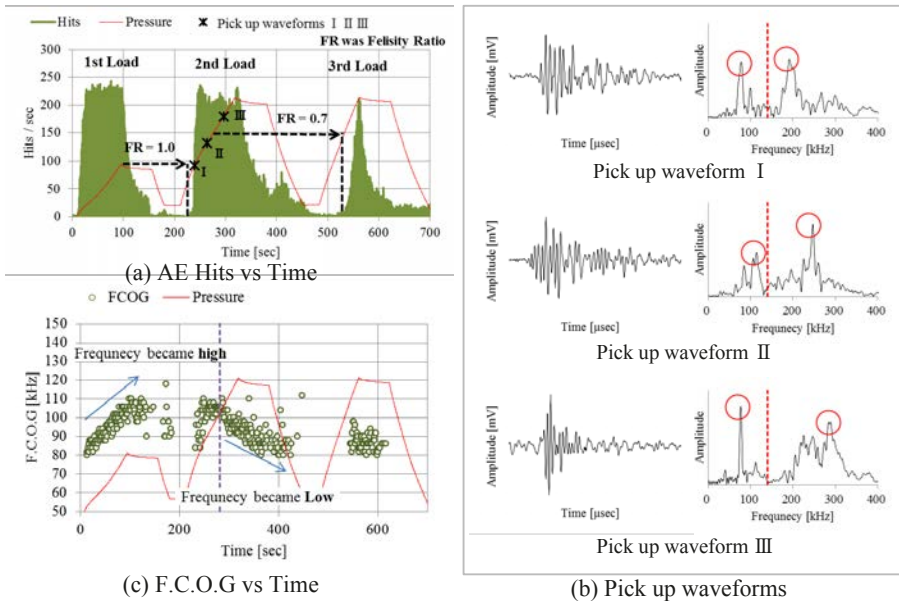


Fig. 1 Exmpl results of AE testing by CFRP tensile test

3. CFRP Pressure Vessel

We made the CFRP Pressure vessel in order to examine AE testing to hydrostatic pressure test by as an actual tank. Carbon fiber was applied the T700 made by Toray. It was manufactured by filament winding and material of liner was polystyrene. The thickness of the CFRP was approximately 20mm in order to break at pressure of 120MPa. At the size of pressure vessel, the outside diameter was 298mm and the length was 1,102mm.

AE sensor setting was shown in Fig. 2. Three AE sensors were set on the circumferential direction by pitch of the 120 degree and set in three points in the longer direction. In the part of the dome, each three sensors were set in the injection side and the end side. AE sensors were applied the VS150-RIC made by Vallen system GmbH. This sensor was type of integrated preamplifier. Frequency filter was set between 20 kHz and 120 kHz in order to detect the low frequency signals less than 150 kHz.

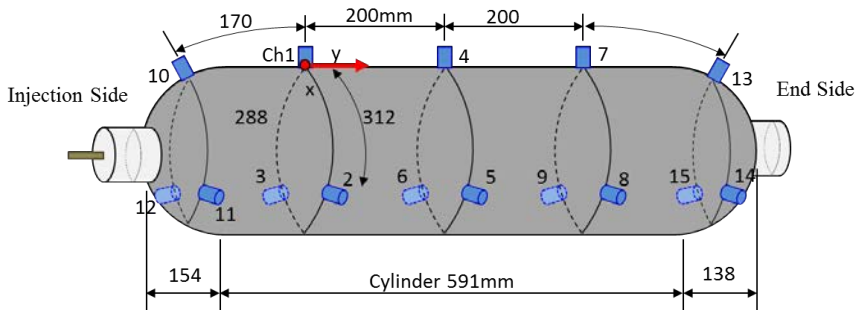


Fig. 2 Sample image of CFRP Pressure vessel and sensor settings

Picture of the pressure vessel after broken was shown in Fig. 3. (a) shows in picture of the whole tank, (b) was taken picture from the end side. From these picture, it was confirmed that the position of broken part was the part of the dome in the end side. In other part of CFRP, damages could be not detected.



Fig. 3 Picture of pressure vessel after broken

4. Results of the Acoustic emission

In order to confirm the pressure when the damage was occurred from FR, we repeated loading and unloading at eight times until the pressure vessel was broken. Time histories of AE Hits and pressure were shown in Fig. 4. The horizontal axis showed the test time, gray lines and the left vertical axis showed Hits / sec., black lines and the right vertical axis showed pressures. In the 6th and 7th loading, AE signals were detected during keeping loads. Pressure vessel was broken at 8th load, and the pressure was 135 MPa.

AE Hits in each loading were shown in Fig. 5. The horizontal axis showed pressure, the vertical axis showed Hits / 0.1 MPa. AE signals were not detected until previous maximum pressure before 6th load. In the 7th load, FR was 0.7 and pressure vessel was broken at the next load of 8th load. Therefore, it was thought that the damage of pressure vessel was occurred during 75 MPa to 100 MPa.

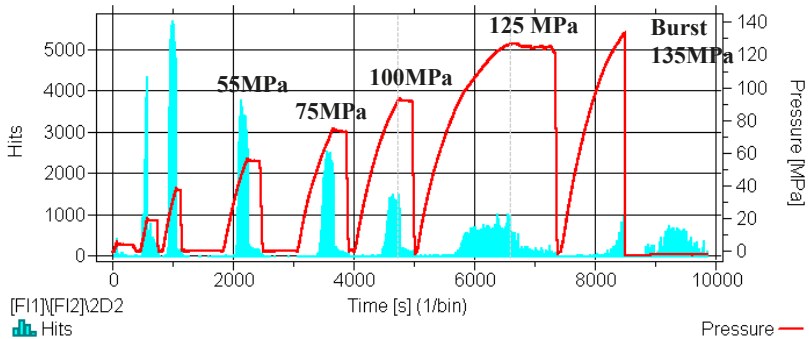


Fig. 4 Tendency of AE Hits (Hits and pressure vs time)

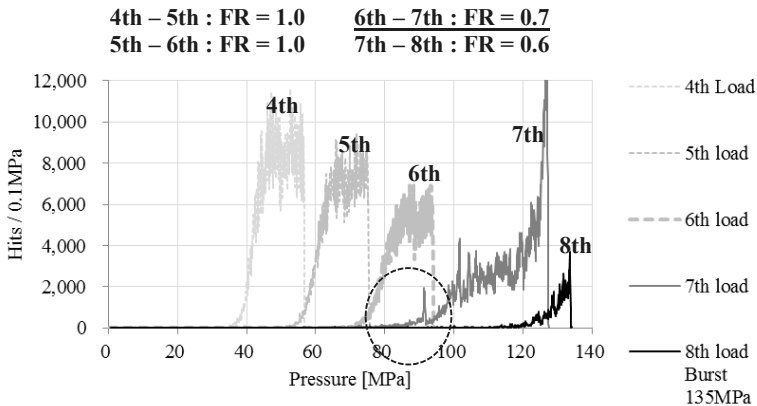


Fig. 5 Felicity Ratio (Hits vs Pressure)

Next, we considered the frequency analysis results. The result of the F.C.O.G was shown in Fig. 6. The horizontal axis showed pressure, gray circles and the left axis showed F.C.O.G by each AE signals. Black squares showed the concentrated parts of each F.C.O.G. Concentrated parts were become higher than 100 kHz from 90 kHz. And next, AE signals of F.C.O.G were concentrated to 95 kHz until 50 MPa. In the pressure during 50 MPa to 70 MPa, it was gradually lower to 80 kHz. When the pressure exceeded around 80 MPa, it was concentrated on near the 80 kHz until broken.

These results of F.C.O.G were the same tendency of tensile test. Therefore, we thought that the pressure which occurring damage was during 70 MPa to 80 MPa, because signals concentrated on 80 kHz after frequency became low. It was the same results of pressure using FR.

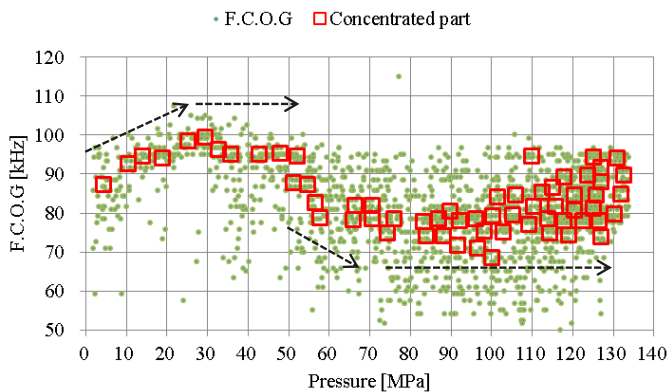


Fig. 6 Results of F. C. O. G

5. Conclusion

In this paper, we investigated the application properties of our proposal method using F.C.O.G to the CFRP pressure vessel. Frequencies of signals were become higher than 100 kHz from 80 kHz with pressure was rising. When the pressure was more than 60 MPa, frequency was became low to 80 kHz. When the pressure rises above 80 MPa, frequencies of signals were continuously concentrated on near the 80 kHz until the broken. These results were the same tendency of tensile test. Finally concentrated part of 80 kHz was thought the damage sign, because it was occurred after the FR was became low. Therefore, we thought the method using F.C.O.G was applicable to CFRP pressure vessels. Moreover, the damage evaluation of CFRP tanks was able to possible less the loading and unloading.

In the future, we will plan to investigate the cause of frequency changes.

6. References

1. H. Kawasaki, H. Nakamura: Study on the Damage Evaluation of CFRP in AE Measurement. Progress in Acoustic Emission XV, 2010, PP.247-252, JSNDI, Kumamoto.
2. H. Kawasaki, M. Takizawa, H. Nakamura, H. Sato, I. Iida: Study on the Damage Evaluation of CFRP using F.C.O.G part 2. Progress in Acoustic Emission XVII, 2014, PP.111-116, JSNDI, Kumamoto.
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Article 11, "Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastic Vessels", American Society for mechanical Engineers Vol.79, No.797, A1013-1, PP.115-118.
4. M. Takizawa, H. Kawasaki, H. Nakamura, H. Sato, I. Iida: Study on the Damage Evaluation of CFRP using F.C.O.G part 1. Progress in Acoustic Emission XVII, 2014, PP.111-116, JSNDI, Kumamoto.



PHYSICAL BASICS, PRACTICAL CAPABILITIES AND PURPOSES OF THE METAL MAGNETIC MEMORY METHOD APPLICATION FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF CRITICAL INDUSTRIAL EQUIPMENT.

Sergey KOLOKOLNIKOV, Anatoly DUBOV

Energodagnostika Co. Ltd., Moscow, Russia,
E-mail: mail@energodagnostika.ru

Abstract:

At present, a fundamentally new NDT method based on the use of the magnetic memory of metal (MMM) is more commonly applied in practice. It uses the natural magnetization formed during the products fabrication and service life. The article considers the capabilities of the MMM method for assessment of the stress-strain state (SSS) and non-destructive testing (NDT) of various-purpose industrial equipments, in order to detect the segments where the development processes of fatigue damage are intensively propagate. Based on the 100% inspection of metal components using the MMM method, detection of all potential dangerously-affected zones – the stress concentration zones (SCZs), and the removal of these zones during repair, are carried out. Thus, there is a real opportunity to ensure the safe operation and lifetime extension of metal components based on their actual state.

Keywords: defect, diagnostics technique, magnetic memory of metal, non-destructive testing, stress concentration, stress-strain state,

1 Introduction

The concept of "Metal Magnetic Memory" was first introduced by the author in 1994. Before that time it was not used in the technical literature. The following terms and concepts were known: "Magnetic Memory of the Earth" - in archeological studies; "Magnetic Memory" - in sound recording; "Shape Memory Effect", due to structural and phase transformations oriented by internal stresses in metal products.

Fundamental differences of the metal magnetic memory (MMM) method from other magnetic non-destructive testing (NDT) methods were repeatedly reported in articles [1, 2], in the training handbook [3].

Theoretical studies were reported in researches [4, 5, 6]. Based on the established correlation of dislocation processes with the magnetic phenomena physics, the concept of "metal magnetic memory" was introduced in products' metals and a new method of diagnostics was developed. The uniqueness of the metal magnetic memory method is that it is based on use of the self-magnetic leakage field (SMLF), occurring in zones of steady strips of dislocations sliding, stipulated by working loads action. SMLF occur because of domain boundaries formation at accumulations of high-density dislocations (dislocation walls). It is impossible to obtain an information source like a self-magnetic field at any conditions with artificial magnetization in working constructions.

Such information is formed and can be obtained only in a weak external field, as the Earth's magnetic field is, in loaded constructions when deformation energy is a cut above the energy of the external magnetic field. It is shown in practical works that MMM can be used both at the equipment operation and after working loads relief during the repairs. Magnetic texture, formed under the action of working loads, becomes, so to say, "frozen" after unloading by virtue of the "magnetic dislocation hysteresis". Thus, there appears a unique possibility to evaluate the actual stress-strained state of the equipment and to reveal at an early stage maximal damage zones in metal by reading this information using special tools.

Physical fundamentals of SMLF occurrence are principally different compared to magnetic leakage fields (MLF) occurring on defects of products at their artificial magnetization used in well-known magnetic NDT methods. SMLF occurs in local zones (from 0,1 up to tens of microns) on the surface and in depth layers of products metal. Nobody has never performed investigation of SMLF and the physical fundamentals of its occurrence till "birth" of MMM (the 90-s of the last century). There was no such task at all! Researches reported in [2-6] gives more detailed description of the mechanism of SMLF formation in ferromagnetic products.

However, in connection with arising till date issues of metrological nature and those associated with the role of the MMM method with regard to its practical application [7], it became necessary to give answers to the most urgent of them.

Firstly, the main purpose of the MMM method is detection on equipment and structures of stress concentration zones (SCZs) - the main sources of damages development - in the express control mode using specialized instruments and scanning devices.

SCZs are not only pre-known areas where the design features create different conditions for distribution of stresses caused by an external load, but these are also randomly located areas, in which due to the initial metal heterogeneity combined with off-design additional workloads large strains (as a rule, shear strains) occur.

Geometric feature of magnetic anomalies that characterizes SCZs is the distance between self-magnetic field extreme values multiple of the standard size of a product (thickness, width, diameter). This distance corresponds to the minimum distance between the adjacent glide pads or the shell critical size occurring, for example, at the pipe stability loss.

Inspection by the MMM method is carried out without metal dressing and artificial magnetization. The method uses residual magnetization formed naturally during the products manufacture and in the course of their operation.

Of course, one can doubt the possibility of SCZs and various metal defects detection by magnetic anomalies on products with unknown prehistory [7]. However, it is known that the criterion of the truth is practice! Numerous studies carried out by the authors of the method at manufacturing plants showed that all products of the same type, made of the same steel grade and under the same technology, have almost the same distribution of the residual magnetization, and magnetic anomalies are only identified during the inspection in the areas of residual stress concentration and different structural irregularities on individual products. And this is not surprising, since during formation, for example, of thermoremanent magnetization of products in the course of their manufacture, internal stresses, and not the weak external geomagnetic field, play the decisive role.

In the course of products operation the initial residual magnetization (RM) is redistributed under the effect of workloads, and magnetic anomalies, caused by geometric displacements and product standard size, occur in SCZs.

If local SCZs do not occur in the same-type products under the effect of workloads, the RM distribution pattern in them is practically the same. To make sure of this, it was necessary to inspect thousands of same-type units and products! Based on the established regularities and substantial

practical experience in inspecting various units of equipment and structures, the authors proposed a methodology of standardless calibration of inspection equipment and methods, as well as their respective metrology [3].

2 Diagnostics parameters in the MMM method.

1. In accordance with ISO 24497 [8-10] the MMM method is a non-destructive testing method based on recording and analysis of the distribution of the self-magnetic leakage fields (SMLF) that occur on products and equipment in stress concentration zones (SCZs).

SMLF that reflects residual magnetization formed naturally during the product manufacture should be distinguished from magnetic leakage fields (MLF) occurring on metal defects and cracks at artificial magnetization of a product (for example, in the course of the magnetic particle inspection).

2. For quantitative assessment of the level of stress concentration (sources of damages), the gradient of the normal (H^y) and/or tangential (H^x) SMLF components is determined:

$$K_{in} = |\Delta H y| / \Delta x, \text{ at } \Delta x \rightarrow 0 \quad K_{in} = dH / dx, \quad (1)$$

where Δx - is the distance between the adjacent points of inspection.

In some cases during the inspection of equipment stress-strain state (SSS) the resulting SMLF gradient is used:

$$|\vec{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

3. Among the basic calculation diagnostic parameters the MMM method uses the parameter m that characterizes the ultimate strain capability of the material:

$$m = K_{in}^{max} / K_{in}^{ave}, \quad (2)$$

where K_{in}^{max} and K_{in}^{ave} are the maximum and the average values of the field gradient, respectively, which are determined during the inspection by the MMM method of the same-type equipment units. Industrial and laboratory tests on the specimens established the relation between the limiting values of magnetic and mechanical parameters:

$$m_{lim} = K_{in}^{max} / K_{in}^{ave} \approx K_{in}^{lim} / K_{in}^t \approx \sigma_{lim} / \sigma_t, \quad (3)$$

where the values of K_{in}^{max} and K_{in}^{ave} , obtained as a result of the same-type equipment units inspection, correspond to the values of K_{in}^{lim} and K_{in}^t , obtained as a result of tensile testing of specimens made of the same steel grade at achieving, respectively, the ultimate true strength at failure σ_{lim} and nominal tensile strength σ_t .

Experimental studies also established that if the actual parameter $m_{act} \geq m_{lim}$, then in this case the limiting (critical) state occurs in the controlled equipment unit metal, at which a macrocrack forms. Physical substantiation of the parameter m_{lim} can be found in papers [3, 4, 5]. Illustration of the relation (3) can be represented on the example of the results of a steel specimen tensile testing at a constant strain rate up to its rupture with simultaneous measuring of the specimen's SMLF by the MMM method.

The relation (3) is used in the MMM method for assessment of the limiting state, at which a main macrocrack occurs and the damage development begins in the SCZ. According to evaluation in [5], the maximum detection accuracy of SCZs with the limiting state of the metal by the MMM method is not less than 90%.

Figure 1 shows the σ - ε diagram combined with the graph of the resulting field $\Sigma|\Delta H|$ gradient modular values variation depending on strain ε , where the total value $\Sigma|\Delta H|$ was obtained by stage-by-stage summation of $|\Delta H|$ changes on individual sections from the beginning of tests in the point A to the final point K - the moment of the specimen rupture.

Let us use this example to calculate the value of the parameter m by the relation (3) between the magnetic and mechanical characteristics.

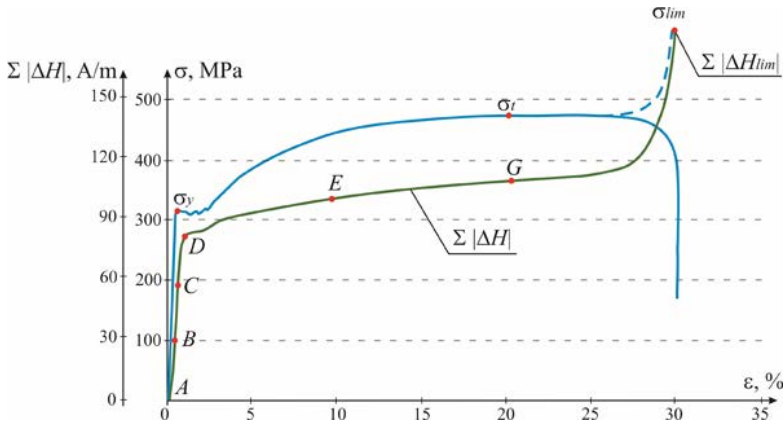


Figure 1. σ - ϵ diagram combined with the graph of the magnetic field $\Sigma|\Delta H|$ gradient total value variation due to strain for specimen No.3.

σ - ϵ diagram section from point G , corresponding to the tensile strength σ_t , to point K shows in a dotted line variation of the true stress in relation to the varying section in the specimen's neck right up to the limiting (breaking) σ_{lim} (Figure 1). For this specimen the value of σ_t , recorded on the tensile testing machine diagram, is equal to 458 MPa, and the design stress σ_{lim} in relation to the final section area in the neck turned out to be equal to 990 MPa.

Then the value of parameter m_{lim} for mechanical characteristics will be:

$$m_{lim} = \sigma_{lim} / \sigma_t = 990 \text{MPa} / 458 \text{MPa} = 2,16, \quad (4)$$

Then the value of parameter m_{lim} for magnetic characteristics will be:

$$m_{lim} = \Sigma|\Delta H_{lim}| / \Sigma|\Delta H_t| = 214 / 106 = 2,02, \quad (5)$$

where $\Sigma|\Delta H_t|$ и $\Sigma|\Delta H_{lim}|$ - are total variations of SMLF modular gradients obtained when achieving of nominal tensile strength σ_t and ultimate true strength σ_{lim} respectively.

Thus, this experiment with steel specimen tension resulted in obtaining of a good confirmation of the relation (3) between the magnetic and mechanical characteristics.

Studies [5] demonstrate that the square root of the ratio σ_{lim} / σ_t is equal to the average value of non-uniform strain ϵ_{n-uni} in the neck area:

$$d = \sqrt{\frac{\sigma_{lim}}{\sigma_t}} \approx \epsilon_{n-uni}. \quad (6)$$

Relations (4) and (6) suggest the magnetomechanical relation, which characterizes the limiting strain capacity of the metal:

$$d_{lim} = \sqrt{m_{lim}}, \quad (7)$$

where d_{lim} - is a mechanical parameter characterizing the limiting strain capacity.

The MMM method uses the relations (6) and (7) for assessment of the metal's limiting state, at which a main macrocrack occurs and the damage development begins in the SCZ.

According to evaluation in [5], the maximum detection accuracy of SCZs with the limiting state of the metal by the MMM method is not less than 90%.

It should be noted here that the opening of macrocracks at achieving the metal's limiting state amounts to fractions of a millimeter, which is a dead zone for the majority of NDT methods.

Therefore it is incorrect to compare the results of inspection by the MMM method, for example, with the results of UT, X-ray or VT. And any comments about the MMM method on over reject or under reject are not acceptable. The methods used for confirmation of the results of inspection in SCZs with the limiting state of the metal are: metallography, hardness measurement or control performed, for example, by ultrasound at the search level.

If the values of the actual magnetic parameter m_{act} are significantly higher than m_{lim} , i.e. $m_{act} > m_{lim}$, the size of cracks or various defects in SCZs become commensurable to the reject values in accordance with the existing norms for UT, X-ray, etc. And in this case, in the course of additional inspection by other NDT methods, such defects can be detected.

Combination of the results of inspection by the MMM method with other NDT methods dramatically increases the efficiency of inspection. At present the MMM method is widely used exactly in such complex inspection of the base metal and welded joints. SCZs are detected on the inspection object (IO) by the MMM method in the express-control mode without any surface preparation, then they are classified by the SMLF gradient and by the design parameter m , and after that the specified SCZs are additionally inspected by ultrasound or other NDT methods.

Classification of magnetic anomalies by sizes of defects located on the surface and inside the IO metal depth is possible, and the techniques of specific equipment units inspection using the MMM method are being developed in this area.

It should be noted that in various industries different standards for unacceptable defects in the non-destructive testing exist for identical inspection objects. Moreover, sizes of acceptable and unacceptable defects in the existing regulatory documents, as a rule, are insufficiently substantiated from the viewpoint of fracture mechanics. In this regard, it should be noted that an important feature of the MMM method is that it allows, using the parameters of magnetic anomalies in SCZs that already contain macrocracks of unacceptable sizes, to assess the extent of their danger, and to draw conclusions about the direction and intensity of their development. In conditions when the increasing number of metal damages on the long-term operated equipment has unexpected, fatigue nature, the MMM method, intended mainly for the early diagnostics of such damages, has obvious advantages over other NDT methods.

At present, more and more attention of experts is aimed at development of the technical diagnostics, lifetime and risk assessment, and monitoring the condition of the equipment. However, the "tragedy" of the situation is that, when assessing the limiting state of hazardous industrial facilities (HIF), experts working in this field face the fact that the existing regulations do not contain a clear definition of this concept from the viewpoint of fracture mechanics and materials science. Papers [5, 6] provide from the standpoint of modern knowledge of fracture mechanics a definition of such concepts as the "limiting state of metal" in a local SCZ of a structure and the "limiting state of the structural member itself". The MMM method allows to perform the equipment's actual state assessment, adequate to the above concepts, in practical diagnostics based on (3, 6, 7).

From the standpoint of modern knowledge in the field of fracture mechanics and materials science about the metal's and structural element's limiting state, it is also necessary to develop new regulatory documents on technical diagnostics, monitoring and HIF lifetime and risk assessment.

In conditions when it becomes possible, using the MMM method, to perform 100% equipment inspection and to identify all potentially hazardous zones, suspected to the damages development, lifetime and risk assessment becomes more specific and predictable [11].

In 2010 JSC STC "Industrial safety" supported by RSNTTD developed and put into effect a guidance document SDOS-05-2010 "Regulation on the certification of personnel in the field of stress-strain state non-destructive testing". Rosstandard TC-132 prepared and put into effect a number of national standards on "SSS Control". The demand for control of technical devices'

stress-strain state was featured in the "Rules for audit of industrial safety", approved by Rostekhnadzor Order No.538 of November 14, 2013. "Stress Control" as a new type of NDT was introduced in a series of guidance documents of PJSC "Gazprom" and other industries.

However, in relation with the topic "Stress Control" there is still a lot of controversy when using in practice different methods and inspection devices for SSS control [12]. According to [13, 14], the main efforts of experts working in this field should be aimed at detecting SCZs - the main sources of damages development.

Currently the MMM method, to the author's opinion, is the most suitable for the SCZs detection in practical diagnostics of equipment and structures. At the same time the MMM method allows to carry out assessment of the actual SSS of all structural elements in the express-control mode based on 100% examination.

Capabilities of non-contact magnetometric diagnostics (NCMD) of buried pipeline sections are of particular note. NCMD is also based on the regularities identified by the MMM method during the contact inspection. NCMD records magnetic anomalies in the geomagnetic field distribution caused by variation of the pipeline metal magnetization in stress concentration zones and in the areas of developing corrosion-fatigue damages.

Inspection of buried (or underwater) pipelines using NCMD must find an answer to the question: "When and where to expect damage or an accident?" Application of NCMD combined with the additional inspection of pipelines in the "prospect holes" (UT, eddy current, etc.) is aimed at solution of this problem. It is currently not possible to detect and classify developing defects in pipelines only based on the results of NCMD without any additional inspection in prospect holes.

However, it should be noted that if, based on NCMD results, additional inspection detected unacceptable defects only in a few SCZs of a multitude of detected SCZs, such a result is sufficiently effective! Because it is known that even the one prevented accident, for example, on a gas or oil pipeline, covers all costs of NCMD performing.

3 Conclusions.

The main purpose of the MMM method and its application scope should be noted:

- Quick screening testing of mechanical engineering products' quality for metal defects and local SCZs detection;
- early diagnostics of corrosion-fatigue damages and residual lifetime assessment of equipment and structures;
- defects detection (lamination, casting defects, etc.) in the deep layers of metal through the use of SMLF geometric parameters conditioned by dislocations glide pads in SCZs;
- 100% inspection of IO to detect local SCZs - sources of damages development;
- improving the efficiency of IO NDT due to application of the MMM method in combination with other NDT methods;
- reduction of material costs for performance of inspection due to refusing the use of artificial magnetization of IO and surface dressing (and in some cases - of insulation removal from IO).

The use of the MMM method provides the opportunity to study the metal's structural and mechanical properties at the physical level during specimens laboratory testing.

The use of the MMM method applies to any products made of ferromagnetic and paramagnetic material. At present in power engineer, petrochemical, oil, gas and other branches of Russian industry the MMM method is included in a number of guidance documents and industry standards (more than 50 documents).

References

- [1] A. A. Dubov. Fundamental distinctive features of the metal magnetic memory method and inspection instruments compared to the known magnetic non-destructive testing methods // Control. Diagnostics. 2003. No.12. pp. 27-29 p.
- [2] A. A. Dubov. Fundamental difference of the metal magnetic memory method from other known magnetic NDT methods. Results and prospects of the method development // Territory of NDT. 2016. No.2. pp. 64-68.
- [3] A. A. Dubov, Al. A. Dubov, S. M. Kolokolnikov. Metal magnetic memory method and inspection instruments: Training Handbook. Fifth edition. Moscow: "Spectrum" Publishing House, 2012. 395 p.
- [4] V. T. Vlasov, A. A. Dubov. Physical bases of the metal magnetic memory method. Moscow, ZAO "Tisso", 2004, 424 p.
- [5] V. T. Vlasov, A. A. Dubov. Physical theory of the "strain-failure" process. Part I. Moscow: ZAO "Tisso", 2007, 517 p.
- [6] V. T. Vlasov, A. A. Dubov. Physical theory of the "strain-failure" process. Part II. Process thermodynamics. Moscow: "Spectrum" Publishing House, 2016. 228 p.
- [7] E. S. Gorkunov, A. G. Efimov, A. E. Shubochkin, B. V. Artyemyev. On the question of magnetic NDT application to determine the stress-strain state of metal structures // World of NDT. 2016. No.3. pp. 52-55.
- [8] ISO 24497-1:2007(E). Non-destructive testing - Metal magnetic memory - Part 1: Vocabulary.
- [9] ISO 24497-2:2007(E). Non-destructive testing - Metal magnetic memory - Part 2: General requirements.
- [10] ISO 24497-3:2007(E). Non-destructive testing - Metal magnetic memory - Part 3: Inspection of welded joints.
- [11] A. A. Dubov. Monitoring of risks based on early diagnostics of equipment and structures metal state in stress concentration zones - sources of damages development // Himicheskaya tekhnika. 2016. No.4. pp. 26-28.
- [12] A. A. Dubov. New requirements to methods and means of materials' stress-strain state diagnostics // Mir izmereniy. 2012. No.6. pp. 38-42.
- [13] GOST R 52330-2005. Non-destructive testing. Stressed-strained state test on industrial objects and transport. General requirements.
- [14] GOST R 53006-2008. Lifetime assessment of potentially hazardous facilities based on express methods. General requirements.



USING GUIDED WAVE TECHNIQUE AS CORROSION SCREENING TOOL ON PIPELINE INSPECTION

PING HUNG LEE^{*}, CHI JEN HUANG

^{*} Taiwan Metal Quality Control Co. Ltd. Kaohsiung, R.O.C

Contact e-mail: leehung1218@gmail.com

Abstract

Industrial pipelines play a very important role in the petrochemical, refining, steel and power generation industries. Most of these pipelines are buried and their integrity is highly important. Defects like corruptions and cracks destruct the integrity of pipeline and can cause highly dangerous damage results. In Taiwan, the explosion of buried pipelines in Kaohsiung in 2014 has had a major impact on public safety. The issues related to pipelines inspection and safety management have been the focus of attention in the past few years. The guided ultrasonic wave technique can provide the possibility for rapid screening in long pipelines with corrosion. Especially the torsional mode $T(0,1)$ of guided waves has been used in the cases of the pipe in the hidden region substantially. In this study, several cases included aerial river crossing, corrosion under insulation, corrosion under pipe support, and soil to air corrosion were shown and the screening strategy of guided wave testing in different cases were discussed. The results showed that using guided wave as a screening tool and combining other NDT techniques can provide 100% volumetric coverage of the pipe wall. Areas having limited access for conventional NDT were also able to be inspected by guided wave.

Key words: *guided wave, corrosion, screening, pipeline*

1. Introduction

In a petrochemical plant, pipelines are used to transport all kinds of fluids, and specific kinds of pipes, such as coated pipes, are selected in response to different environmental conditions. Although pipelines can withstand high temperature, fire and remain stable under such conditions, water can easily penetrate the gap between the pipe and the coating material, resulting in a wide range of general corrosion mixed with localized corrosion. Inspection in these cases is extremely difficult. The picture in Figure 1 indicates an area of severe localized corrosion, circled by white chalk, embedded in the general corrosion environment. There are a variety of inspection methods, such as conventional ultrasonic testing, radiography testing, eddy current testing and magnetic flux leakage testing for pipe inspection. However, as for the long-range pipe inspection with those ordinary non-destructive testing methods are expensive, time-consuming, and do not perform a 100 % screening of the pipe. Especially in the cases of the pipe in the hidden region, i.e., insulated, buried, coated or other inaccessible regions cannot be easily inspected without expensive preparatory work. Contrary to the localized inspection methods, an alternative ultrasonic technique, guided ultrasonic waves, provides the possibility for rapid, reliable, 100 % coverage, and inexpensive nondestructive assessment of the pipelines. "Guided waves" is a type of wave propagation in which the wave is guided by the geometry of structures when the constructive interference of bulk waves happened. The pipe wall acts as a guide.

The advantages of guided wave include rapid screening, in service inspection, significant reduction of access costs, larger versatility owing to dispersive and multimodal nature, and 100 % volumetric coverage of the pipeline cross-section and the allowance of evaluating the inaccessible areas of complex structures. Those advantages make the technique sit high on the roster of non-destructive testing tool for inspecting long sections of pipe.

Alleyen and Cawley [1] developed dry coupled length-expander piezoelectric transducer based arrays bonded on the surface of the pipe axisymmetrically for emitting the longitudinal modes in the pipe at frequencies in the 50-70 kHz range. Site trials of the portable, dry-coupled piezoelectric transducer system showed the ability of the L (0,2) mode of propagating over distances approaching 50-m in a 6-inch steel pipe [12]. A substitute for the L(0,2) mode is to use the T(0,1) mode. The T (0,1) mode had been employed at lower frequencies to perform the rapid screening of long sections of pipe and this was implemented in the WaveMaker Pipe Screening system developed by Guided Ultrasonics Limited [3]. In the meantime, Sheard and McNulty [4] carried out comprehensive trials applications of guided wave inspection operating in the field under different site conditions. Cawley et al. [5] had discussed the progress of guided wave testing design for long-range inspection of pipe from research work to a commercial testing system at frequencies below 100 kHz.



Fig.1 Severe corrosion on pipes.

There are various ways to generate guided wave on pipe. The generation of guided wave modes depends on the characteristics of the excitation source. The commercial system WaveMaker Pipe Screening System G3 is used by Taiwan Metal Quality Control Co. Ltd. (TMQC) to generate the T (0,1) mode by wave structure matched method in this study. The transducer elements clamped to the pipe surface with a collar are dry coupled piezoelectric transducers and constructed using shear-polarized PZT elements. The transducer rings are classified as either solid ring (used for 4-inch pipe) or inflatable ring (used for larger than 6-inch pipe). The WaveMaker Pipe Screening System G3 consisting of ultrasonic guided wave transducer ring, the WaveMaker instrument, power supply, computer and cables is shown in Figure 2. To perform

a guided wave testing, the transducer ring is wrapped around the pipe and inflated to 20 psi firstly as shown in Figure 3. After connecting the ring, the instrument and the computer, signals with different frequencies were used to generate the torsional mode $T(0,1)$ propagating forward and backward on the pipe. Features such as bends, supports, welds and defects reflect the guided waves, while the reflected signals are received by the same transducer ring. All features in the scanning section of pipe are detected at the same measurement and the results are presented by the A-scan and C-scan display. The circumferential location is measured in a counter-clockwise direction in the forward direction of wave propagation and the axial location is measured from the distance between the transducer ring and the feature. In Figure 4, the lower part shows the A-scan display, the upper part is the C-scan display and a gray band between the A-scan and C-scan represents the schematic diagram of the pipe system under test. On the gray band, a black short line is marked as a weld, a triangle is marked as a pipe support and a rectangular band is marked as a pipe elbow. The processed results lines in the A-scan display are plotted in black for $T(0,1)$ mode and in red for $F(1,2)$ mode. The green bar is the dead zone of the measuring distance. The signal in the dead zone at zero distance cannot be collected and the gray area next to the dead zone is the near field of the transducer ring. It should be noted that the amplitude of the reflected signal in the near field cannot be measured for calculation. The horizontal axis is the distance from the position of the transducer and the vertical scale is the reflected amplitude in mill-volt in the figure. There are also two dashed lines called distance amplitude correction (DAC) lines, one of them is the weld level DAC and the other is the call level DAC. The results in C-scan display show the circumferential distribution of the indications around the pipe. In the C-scan display, horizontal axis denotes the distance from the position of the transducer, and the vertical axis denotes the circumferential location around the pipe. The images of the C-scan display processed by imaging algorithms show the amplitude of reflected signals over the unwrapped wall of the pipe.



Fig.2 The photograph of the guided wave testing system WaveMaker G3.

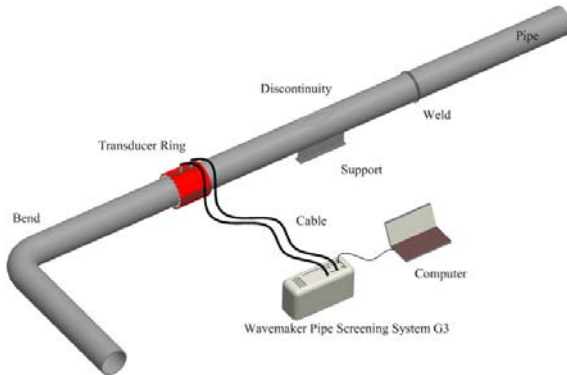


Fig.3 The schematic diagram of a typical guided wave testing configuration.

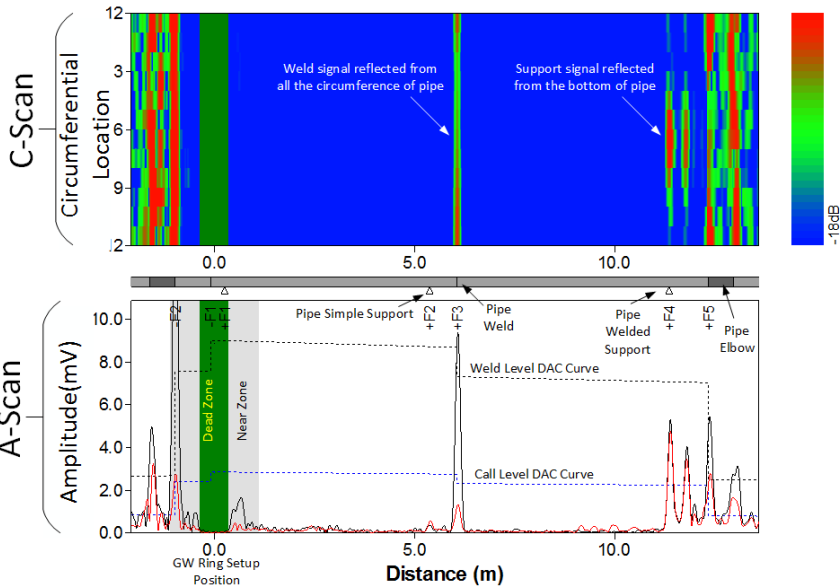


Fig.4 A-scan and C-scan representation of the GW signal

2. Case Study of Corrosion under Insulation Inspection by GWT

Guided wave testing was used to inspect insulated pipelines. The following details the CUI case of a pipe insulated by a more than 15 years insulation, where the pipe is prone to corrosion due to the combined effect of a corrosive atmosphere and a humid environment. The guided wave inspection was conducted on a 29 m-long section of 16 inch sch30 pipe between two elbows. As shown in the Figure 5, the array ring was set on the pipe section with removing the old insulation and configured to generate and receive the

torsional mode, T (0,1). Wavemaker G3 system was used to generate the signal and the laptop showed the collected data as the A-scan and C-scan. In Figure 6, each peak in the A-scan display represents a reflection from a pipe feature, such as pipe elbows, welds and the expected corrosion; the reflection of the welds shows a high amplitude, while the reflection of the corrosion shows a lower amplitude. There is a butt weld of the elbow at about 6.1 m from the ring labeled here as +F2. This was an important reference position for reporting and follow-up tests. Two possibility of severe corrosion indications can be seen at 4.7 m and -12.35 m, labeled on the schematic diagram as C1 and C3 respectively. The two signals show peaks in both the black and the red signals, indicating that the feature is non-axisymmetric. The C-scan shows the indications occurs at the bottom of the pipeline. Interpretation of the C1 and C3 signal amplitudes indicated an estimated cross-section loss of about 5% and 6% of the cross-sectional area of the pipe. Indications C1 and C3 are normally not uniform around the circumference, so they cause mode conversion. Thus, the peaks of red line get closer to the black line.

A visual testing and 3D Laser scanning technique were adopted to follow-up the severe indication C3. As shown in Figure 6, the picture of the severe corrosion can be seen at the location of C3 after removing part of the insulation and cleaning the pipe surface. The VT result showed one localized corrosion with a depth 6.5 mm and diameter 50 mm was founded at the bottom of the pipe. In Figure 7, the data of the pipe corroded pipe surface was collected by a portable 3D laser scanner. The depth and the size along the axial and circumferential direction of the corrosion was measured by a virtual pit gauge method. The result showed the size of the corrosion is 6.53 mm in depth, 63.6 mm in axial length, and 58.5 mm in circumferential length.

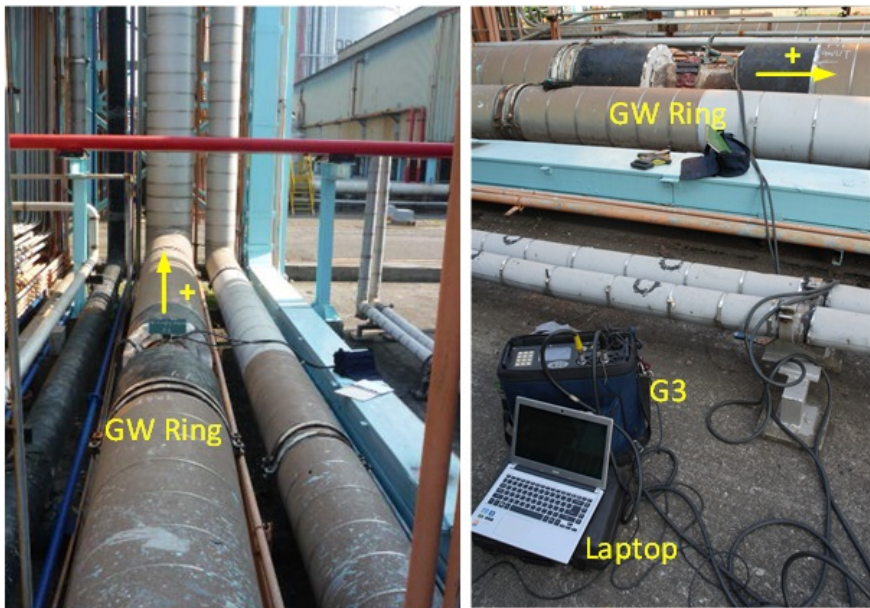


Fig.5 Case I: 16 inch pipe CUI Inspection by GWT

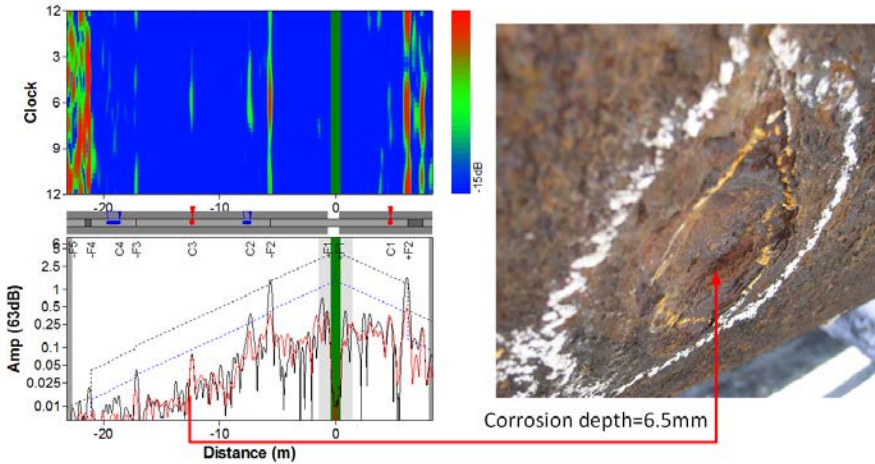


Fig.6 CUI GWT results and VT results

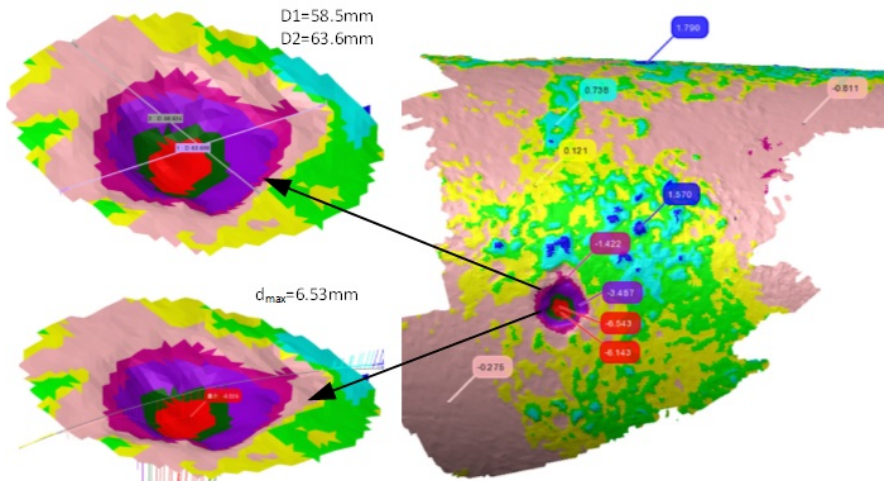


Fig.7 Using 3D Laser Scanning result to verified the indication C3.

3. Case Study of Corrosion under Welded Support Inspection by GWT

In Taiwan, according to the explosion by buried pipe leakage, the buried pipe safety is the focus of the requirements over the past two years. For long-range pipelines, unburied section is easy to be corroded especially located at the pipe support on river crossing section. Guided wave testing was used to inspect the coated pipelines. The following details the CUS case of a pipe, where the pipe is prone to corrosion due to the broken bitumen coating and the water from the river.

The guided wave inspection was conducted on a 18 m-long section of 4 inch sch40 pipe under the river. As shown in the Figure 8, the array ring was set on the pipe section with removing the old bitumen coating and configured to generate and receive the torsional mode, T (0,1). In Figure 9, each peak in the A-scan display represents a reflection from a pipe feature, such as pipe welds, longitudinal welded supports and the expected corrosion; the reflection of the two welds show a high amplitude, while the reflection of three pipe supports show a lower amplitude. There is a butt weld at about 1.5 m from the ring labeled here as +F1. This was an important reference position for reporting and follow-up tests. One possibility of severe corrosion indications can be seen at -2.0 m, labeled on the schematic diagram as S4. Considering the reflection behaviour of the longitudinal welded support, the big reflection should be dominated beyond the beginning of the pipe support [6]. However, by comparing the two signals of pipe support S4 and S5, at the exact beginning location of the welded support, S4 shows a bigger reflection (11%) than S5 (<3%). The signal show peaks in both the black and the red signals, indicating that the feature is non-axisymmetric. The C-scan shows the indications occurs from 6 o'clock to 11 o'clock of the pipeline. Interpretation of the S4 signal amplitude indicated an estimated cross-section loss of about 11% of the cross-sectional area of the pipe.

A visual testing was adopted to follow-up the severe indication S4. As shown in Figure 9, the picture of the severe corrosion can be seen at the location of S4 after removing part of the coated bitumen and cleaning the pipe surface. The VT result showed corrosion patch with a maximum depth 3.0 mm.



Fig. 8 Case II: 4 inch pipe CUS Inspection by GWT

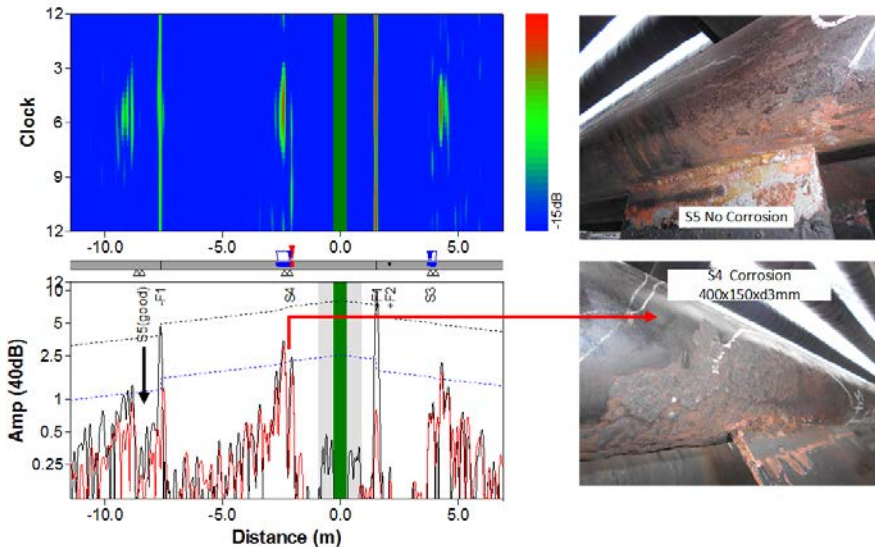


Fig.9 CUS GWT results and VT results

4. Case Study of Soil Interface Corrosion Inspection by GWT

The third case is also for long-range pipelines, *aerial river crossing* section is very important because the pipeline is under the bridge which many vehicles passing through the bridge every day. Once an explosion occurs on pipeline, it will directly affect the safety of residents. Most of the interface between the buried section and the aerial river crossing section would be covered by soil and loosen concrete. Water and Oxygen are easy to get together at the interface and induce the corrosion on pipeline. The following details the soil interface corrosion (SIC) case of a pipe, where the pipe is prone to corrosion due to the loosen soil and concrete and the water from the rain.

The guided wave inspection was conducted on a 12 m-long section of 6 inch sch40 pipe under the river. As shown in the Figure 10, the array ring was set on the pipe section and configured to generate and receive the torsional mode, $T(0,1)$. In Figure 11, each peak in the A-scan display represents a reflection from a pipe feature, such as pipe welds, pipe supports and the expected corrosion; the reflection of the two welds show a high amplitude, while the reflection of pipe support show a lower amplitude. There is a butt weld at about 4.2 m from the ring labeled here as +F2. This was an important reference position for reporting and follow-up tests. Two possibility of corrosion indications can be seen at 7.8 m and 8.0, labeled on the schematic diagram as +F3 and +F4. The +F3 signal show peaks in both the black and the red signals, indicating that the feature is non-axisymmetric. The C-scan shows the indications occurs from 5 o'clock to 6 o'clock of the pipeline. Interpretation of the +F3 signal amplitude indicated an estimated cross-section loss of about 7.5% of the cross-sectional area of the pipe. The +F4 signal show peaks with bigger black signal and smaller red signal, indicating that the feature is non-axisymmetric. The C-scan shows the indications occurs from 10 o'clock to 2 o'clock of the pipeline. Interpretation of the

+F4 signal amplitude indicated an estimated cross-section loss of about 11% of the cross-sectional area of the pipe. Comparing the two signal +F3 and +F4, +F3 was marked as severe corrosion indication because the ratio of red/black is close to 1 although the +F4 signal shows bigger black signal than +F3.

A visual testing was adopted to follow-up the indication +F3 and +F4. As shown in Figure 11, the picture of the severe corrosion can be seen at the location of +F3 after removing part of the loosen soil and concrete. The VT result showed a corrosion with a hole at the location of +F3 and corrosion patch with a maximum depth 3.0 mm distributed on the top surface of the pipeline.



Fig.10 Case III: 6 inch pipe SIC Inspection by GWT

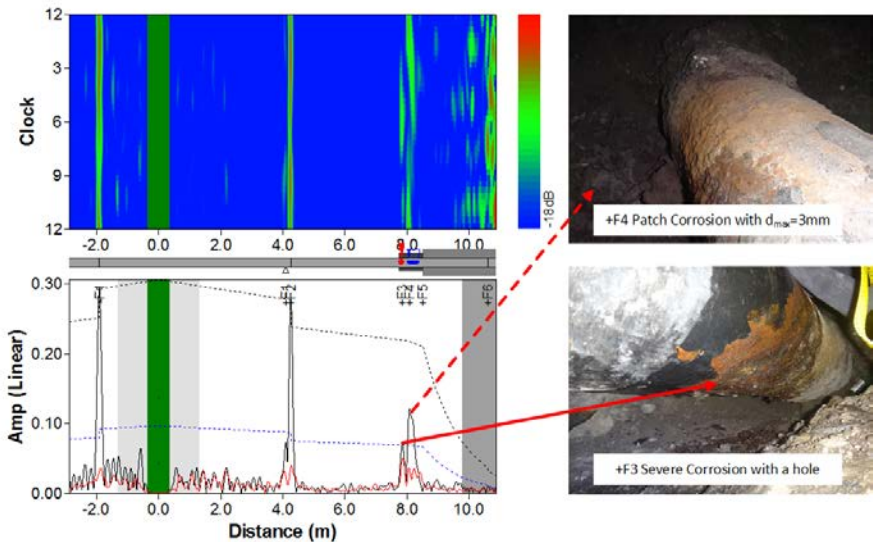


Fig.11 SIC GWT results and VT results

5. Conclusion

In Taiwan, the safety of long distance pipeline is paid close attention to in recent years. Besides the anticorrosion potential measurement and long distance pipeline anticorrosion monitoring mentioned in NACE specifications, we TMQC used guided wave testing technique to provide another scheme for checking the unburied section of pipeline service safety. The result in this study showed that using guided wave as a screening tool is typical of the best application of the technique in the field. For long-range insulated pipeline, GWT screened the whole pipeline with removing part of the insulation and called the indications to identify the follow-up location. Areas having limited access for conventional NDT were also able to be inspected by GWT. The combination of GWT and other NDT techniques can implement effective inspection in the pipeline safety management.

Reference

1. D.N. Alleyne and P. Cawley, "The Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 15(1), pp. 11-20, 1996.
2. D.N. Alleyne and P. Cawley, "Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework," *Materials Evaluation*, Vol. 45(4), pp. 504-508, 1997.
3. D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, M.J.S. Lowe and P. Cawley, "Rapid Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves," *Insight*, Vol. 43(2), pp. 93-96, 2001.
4. M. Sheard and A. McNulty, "Field Experience of using Long Range Ultrasonic Testing," *Insight*, Vol. 43(2), pp. 79-83, 2001.
5. P. Cawley, M.J.S. Lowe, D.N. Alleyne, B. Pavlakovic and P. Wilcox, "Practical Long Range Guided Wave Inspection-Applications to Pipes and Rail," *Materials Evaluation*, Vol. 61(1), pp. 66-74, 2003.
6. S.K. Yang, P.H. Lee, and J.W. Cheng, "Effect of Welded Pipe Support Bracket on Torsional Guided Wave Propagation," *Materials Evaluation*, Vol. 67(8), pp. 935-944, 2009.



LEAKAGE DETECTION FOR PNEUMATIC CIRCLE OF BUS DOOR USING ACOUSTIC EMISSION AND OTHER NDT METHODS

Houssam MAHMOUD¹, Pavel MAZAL¹, Frantisek VLASIC¹, Libor NOHÁL¹

¹ Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, mahmoud@fme.vutbr.cz, mazal@fme.vutbr.cz, nohal@fme.vutbr.cz, vlasic@fme.vutbr.cz

Abstract

This paper discusses the methods that detect the leakage of the pneumatic circle of the bus door, shedding light on a new approach to determining the leakage. Difficulties that face the leakage detection process are related to the complicated circle, and the available methods for detection. Applying different methods of non-destructive testing and distinguishing between them through acoustic emission. The study concentrates on the analysis, investigation, performance, and the new applications of the pneumatic circle of bus door. An artificial leak is made in the circle which is controlled manually to determine the quantity and location. The necessary parameters for comparison have been selected after analysing the signals that were obtained from the tests. Root mean square (RMS) of acoustic emission signal, frequency spectrum and time describe the different responses and changing in the signal with and without leakage related with the behaviour of the signal during open and close the door.

Due to more stringent safety requirements, buses used by public transport companies and private operators have had safety controls fitted to protect their passengers and to reduce the hazard of accidents in the traffic.

Key words: Acoustic Emission, Root Mean Square, Frequency Spectrum, Leakage.

1. Introduction

Acoustic emission testing is a method of non-destructive testing (NDT). Elastic stress waves generated by the energy released when microstructural changes occur in a material propagated through the pipe wall and recorded by using acoustic sensor [1]. Fundamental principles of AE leak detectors rely on the fact that escaping gas or liquid through a small breach creates a high frequency sound wave that travels through the enveloping system via an acoustic leak path [2]. Partitioning between transmitted and reflected waves in the leakage detection depends on the angle of incidence and relative material acoustic impedances [3]. The efficiency of the acoustic methods for the leakage detection was studied and the problem of the use of threshold was discussed to determine the leakage sources [4].

Pneumatic actuators convert fluid energy into straight line motion (linear actuators). Pneumatic systems are used in various fields of technology, for different purposes, to achieve different tasks. Compressed air has been used to drive a variety of tools: air hammers, polishing, drilling, transportation of loose materials, pneumatic brake systems and door opening [5].

Door control on bus door has three input and two output signals. Each output is functionally connected to all inputs and analytical represents a logical function of three variables upon which the entire system be described [6].

A variety of defects can occur, which could lead to a catastrophic failure. Therefore, it is important to detect as soon as possible. Those defects include leakage, leaks in motion, galling and mechanical defects. Leakage can be caused by the deterioration or loss of sealing function, damage of the seals within the components. defects cause high cycle fatigue damage from an external force [7]. The results were compared to find distinctive differences between the damaged and undamaged cylinders. The frequency spectrum, counts and events were not sufficient to identify all defects. The frequency spectrum was replaced later by the RMS. The results of the research proved the relation between RMS and leakage. For the AE signal, the most frequently used AE parameters are the RMS [8].

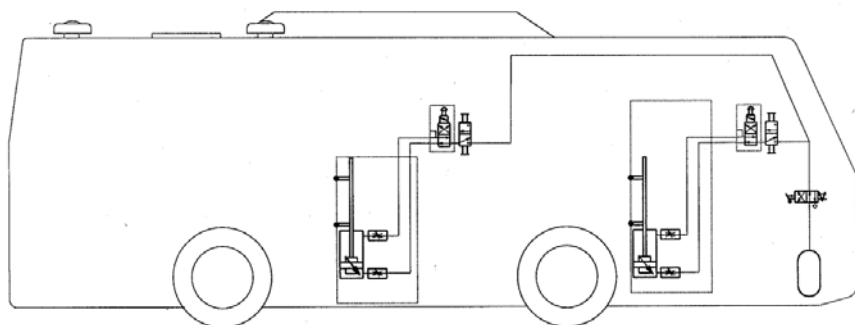


Figure 1 Basics of pneumatic installation bus for transport [6]

2. The experiment

The experiment was conducted in a specialized laboratory at Brno University of Technology. The experiment platform contains testing devices and some equipment including cylinders, AE sensors which are installed on different positions of the cylinder, air pressure supply, pneumatic control system, the linear potentiometer and the AE monitoring system by analyser DAKEL – Zedo and components of installation opening and closing the door on the buse.

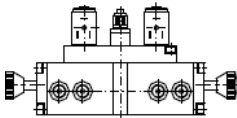
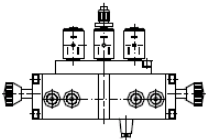
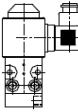
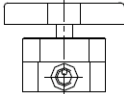
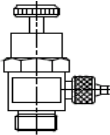
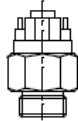
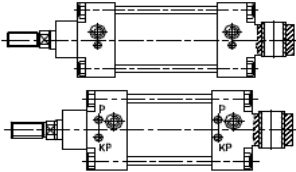
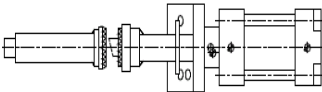
 <p>The control valve system with a safety circuit.</p>	 <p>Control valve, electronically controlled system (ETS)</p>
 <p>The control valve for the primary and backup systems</p>	 <p>The auxiliary valve</p>
 <p>Throttle valve</p>	 <p>Push switch</p>
 <p>Linear cylinders to open the door on the outside</p>	 <p>Rotating mechanism to open the door</p>

Figure 2 Related components of installation opening and closing the door on the buses [6]

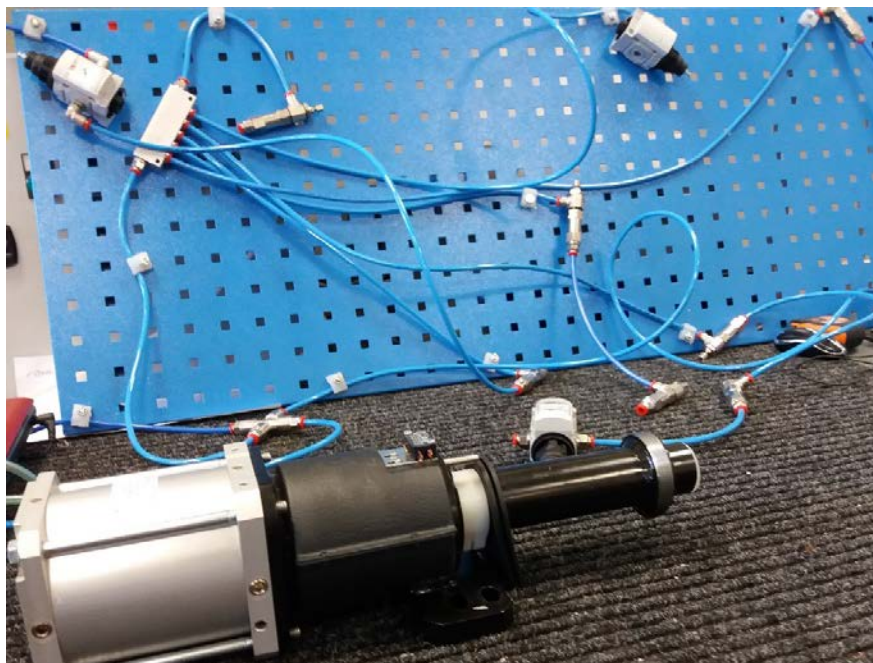


Figure 3 Simulation of the pneumatic driving circle to open the door

3. Results and discussion

The signals were obtained by two sensors, one of them on the right (A) and the other on the left (B). using a pen test before each measurement to ensure that the sensors have the same amplitude.

The relation between RMS and displacement explains the steps of movement of piston of cylinder and the changing of signal according to initiation and end of stroke and damping area.

In progress stroke, the piston starts to move without any changing on the signal, which is steady and smooth. When the head of piston arrives to the cushion area the signal changes as shown in the figure 4, until the head of piston impacts the head cap cushion and stops for 0.1second and returns to make the retreat stroke in the same way.

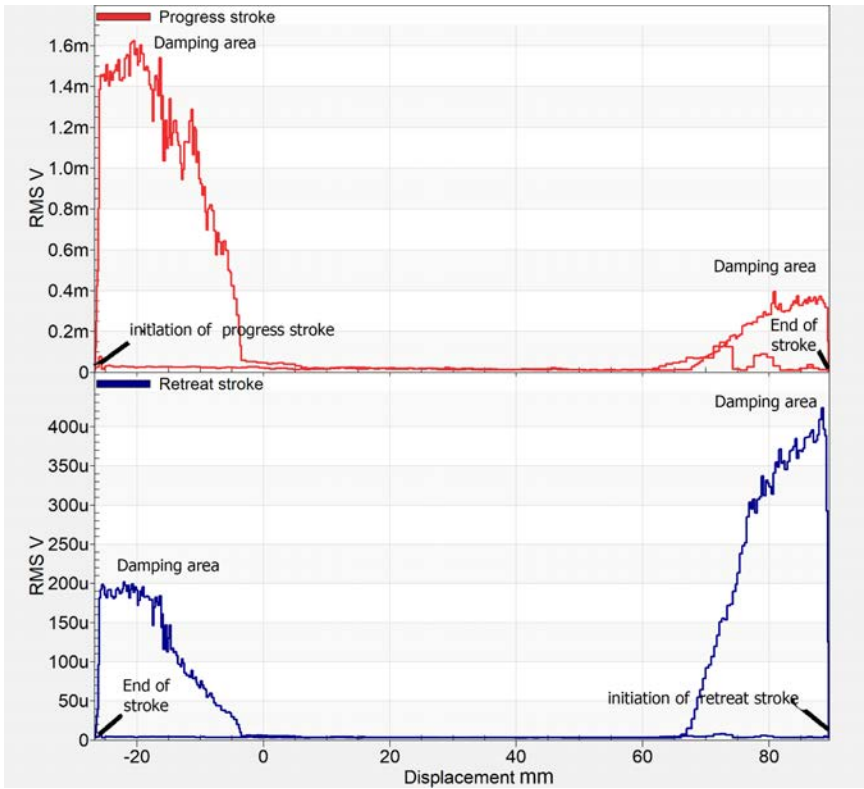


Figure 4. The relation between RMS and displacement for undamaged cylinder No.33

However, undamaged and damaged cylinders were compared to find distinctive differences between them. the data was normalized. All cylinders had the same throttling adjustment before and after creating the artificial defect. In case of damaged cylinder, the time of the stroke was extended. The stroke time should be the same but the defect in the cylinder causes this delay.

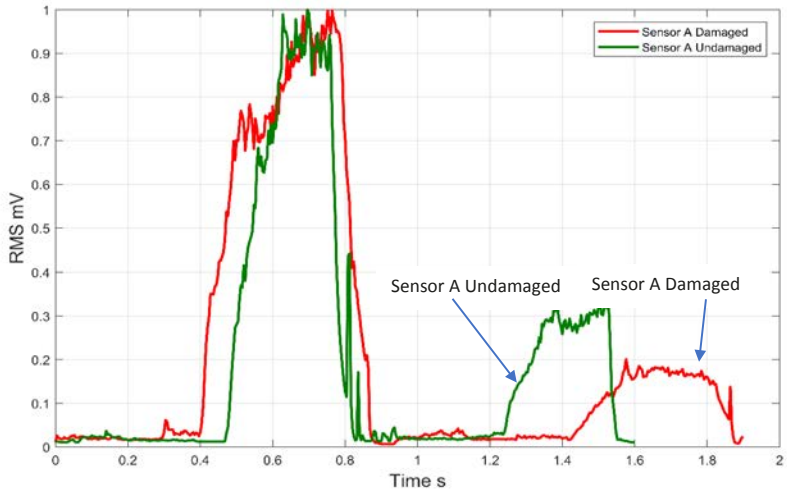


Figure 5. Comparing between damaged and undamaged cylinders No. 25, NP08, PP03 derived from the sensor A

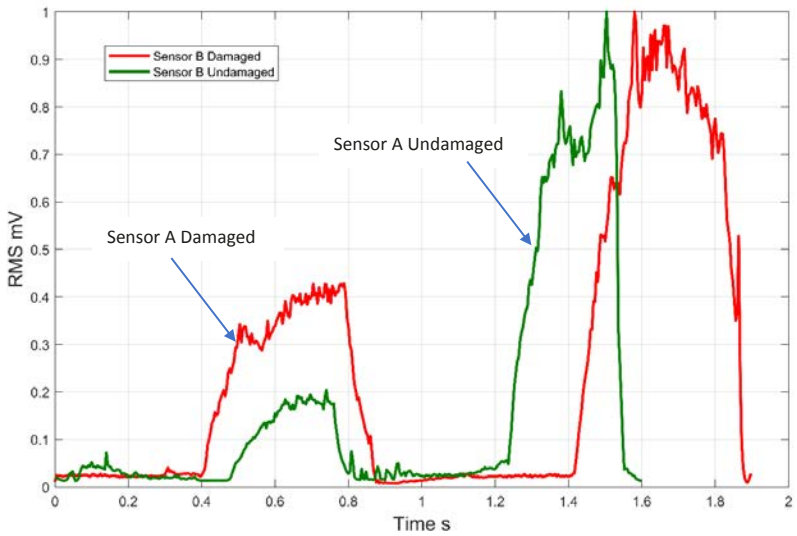


Figure 6. Comparing between damaged and undamaged cylinders No. 25, NP08, PP03 derived from the sensor B

When the door is closed and there is no leak in the port of cylinder

In the progress stroke, the load and the pressure are in the same direction. After the valve is opened by the digital input, the air hits the piston and makes a peak in the signal. There are some effects on the signal at the beginning due to the air passing through the throttle nozzle; the piston vibrates at the beginning of its movement then the speed of its movement becomes steady until the initiation of the damping phase. The high amplitude of AE near sensor A is a result of the damping that happened in the head cap of the cylinder. When the head cushion piston impacts the head cushion cap, a small peak in the signal appears, and after that the air is expelled.

In the retreat stroke, the load and the pressure are in different directions. After the valve is opened by digital input, the air impacts the piston and makes a peak in the signal. There is a delay in the movement and the signal at the beginning because it needs enough pressure to move the piston. Following that, the speed of its movement becomes steady until the initiation of the damping phase. The high amplitude of AE near sensor B is a result of the damping that happens in the rear cap of the cylinder. When the rear cushion piston impacts the rear cushion cap, a small peak in the signal appears. After that air is expelled.

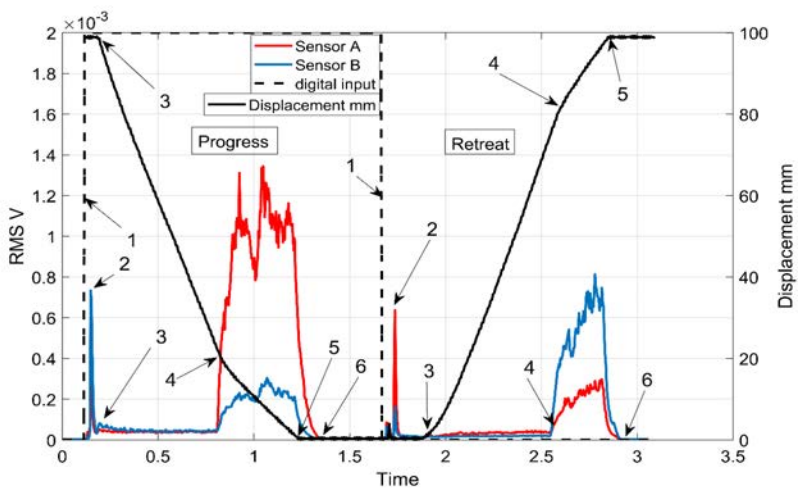


Figure 7 When the door is closed and there is no leak in the port of cylinder

(1) the valve is opened by the digital input to let the air pass through the port, (2) the impact of the air at the cushion piston, (3) the initiation of movement, (4) the initiation of the damping phase 21.7mm before the TDC, (5) when the cushion piston impacts the cushion cap, and stops, (6) the end of venting air and relaxing and the end of the stroke.

When the door is opened and there is no leak in the port of cylinder

In the progress stroke, the load and the pressure are in different directions, it acts in the same way as in the previous example. In the retreat stroke, the load and the pressure are in the same direction, and it also acts in the same way as the previous example.

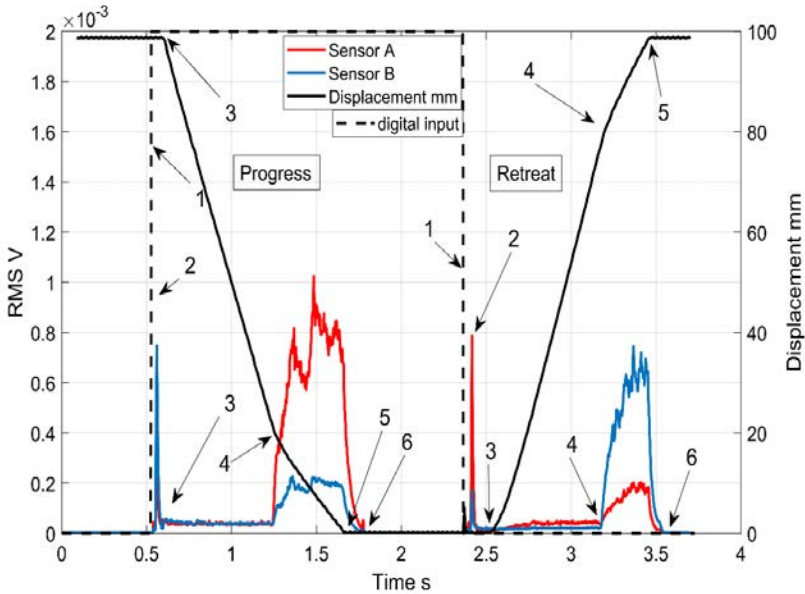


Figure 8 Load 1 kg was applied above the undamaged cylinder

When the door is closed and there is leak in the port of cylinder

When the load is below the cylinder. In the progress stroke, the load and the piston movement are in the same direction; the leak is in port B and the air is expelled through port A, so there is a huge amplitude of RMS from sensor B, and there is a signal from sensor A. The leak continues flowing from port B after the piston stop, so the signal from sensor B is bigger than from sensor A.

In the retreat stroke, the load and the piston movement are in different directions; the leak is from port A and the air is expelled through port B, so there is a huge amplitude of RMS from sensor A, and there is a signal from sensor B. The leak continues flowing from port A after the piston stops, so the signal from sensor A is bigger than from sensor B.

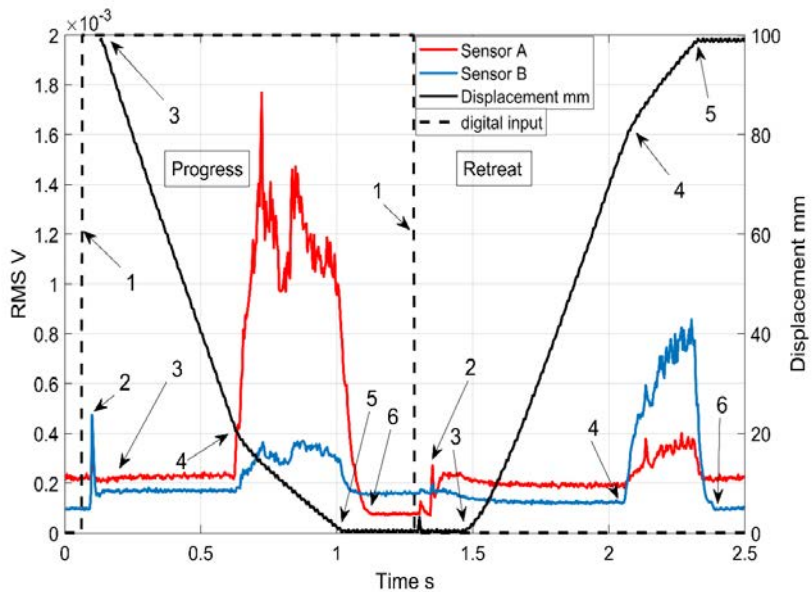


Figure 9 When the door is closed and there is leak in the port of cylinder

When the door is opened and there is leak in the port of cylinder

When the load is above the cylinder. In the progress stroke, the load and the piston movement are in different directions; the leak is in port B and the air is expelled through port A. The RMS from sensor A and the RMS from sensor B are in the same amplitude, and the leak continues flowing from port B after the piston stops, so the signal from sensor B is bigger than from sensor A. In the retreat stroke, the load and the piston movement are in the same direction, and the leak is from port A and the air is expelled through port B. The RMS from sensor A and the RMS from sensor B are in the same amplitude. The leak continues flowing from port A after the piston stops, so the signal from sensor A is bigger than from sensor B.

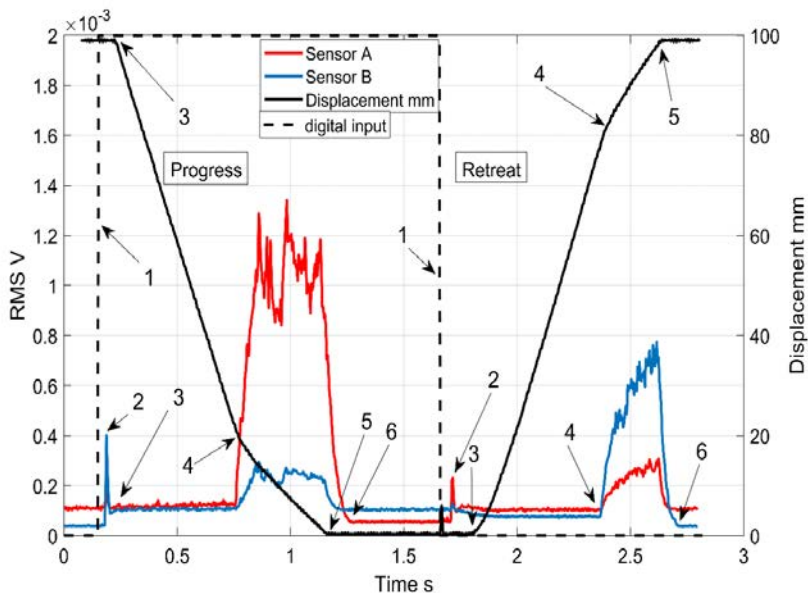


Figure 10 When the door is opened and there is leak in the port of cylinder

4. Conclusion

Current results show good conformity and reproducibility. Acoustic emission application in this domain of diagnostics brings higher quality results than currently used methods. Acoustic emission detectability of leakage depends on detection sensitivity, detection selectivity, differential pressure, and leak size. The Acoustic emission can be applied to detect and locate leaks if there is enough pressure fluid acting across the leak. The obtained results prove significant sensibility of acoustic emission signal in this application domain.

When there is a leak in the port of the cylinder, the peak of the signal appears during the stroke, not only in the damping phase.

The RMS parameter can be used as an important criterion for the evaluation of pneumatic cylinders, particularly in combination with other monitored parameters.

The specific ratio between maximum RMS from sensor B and sensor A in the retreat stroke can determine whether the cylinder is damaged or undamaged.

This project in the beginning of the research, and this is the first step to collect data and measuring and the research will be continued.

5. Acknowledgment

This work is an output of research and scientific activities of the Technology Agency of the Czech Republic project No. TH0310422" **Mobile devices for detecting defects in pneumatic systems**" and was also supported by the project No. FSI-S-14-2329 "Vibro-isolation system of cosmic carrier payload" of the Faculty of Mechanical Engineering of BUT.

6. References

- [1] M. Lympertos, S. Evangelos. Acoustic emission source location in dispersive media. *Signal Processing*. 2007, 87(12), 3218-3225. DOI: 10.1016/j.sigpro.2007.05. 010.ISSN01651684: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168407001934>
- [2] The American Society for Testing and Materials, Standard E750-88 Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrument, Philadelphia, PA, Volume 03.03, 1993.
- [3] O. Hunaidi, W.T. Chu: Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Appl. Acoust.* 58, 235–254 (1999)
- [4] M.A. Hamstad, A. O’Gallagher, J. A. Gary: Transform applied to acoustic emission signals. Part 1: source identification. *J. Acoust. Emiss.* 20, 39–59 (2002)
- [5] British Compressed Air Society; *British-Pneumatic-Handbook*, pp.1-10 <https://ar.scribd.com/document/253225887/British-Pneumatic-Handbook>.
- [6] Slobodan Stefanovic, Pneumatic - Logic Synthesis of Bus Door from Aspect of Automation, (JPMNT) *Journal of Process Management – New Technologies*, International Vol. 3, No.1, 2015.
- [7] H Mahmoud, F Vlastic, P Mazal, M Jana, Leakage Analysis of Pneumatic Cylinders Using Acoustic Emission, *INSIGHT*, Vol. 59, No. 9, pp. 499-505. ISSN: 1354- 2575, 2017.
- [8] H Mahmoud, F Vlastic, P Mazal, M Jana, Application of Acoustic Emission Method to Diagnose Damage in Pneumatic Cylinders, *ILEC Conference Centre, London, UK, WCCM17*, Vol. , 13-16 June 2017.



NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÁ POROZIMETRIE KOVOVÝCH SOUČÁSTÍ ZHOTOVENÝCH 3D TISKEM NONLINEAR ULTRASONIC POROSIMETRY OF 3D PRINTED METALLIC PARTS

**Zdeněk PŘEVOROVSKÝ¹, Josef KROFTA², Jan KOBER¹,
Alexander KIRSCHNER³**

¹Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i, Praha
²Fraunhofer IFAM, Dresden; Germany
Contact e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

Aditivní výrobní technologie 3D tisku (AM – Additive Manufacturing) se v současné době stávají nikoli pouze dodatkovými, ale zejména při výrobě složitějších kovových dílů nahrazují klasické výrobní postupy. 3D tiskárny tavící kovové prášky pomocí laserových či elektronových paprsků (LBM, EBM) vyžadují správnou volbu mnoha nastavitelných parametrů. Nevhodně zvolené výrobní podmínky mají za následek vznik zárodečných defektů, jako jsou vysoká porozita, neprotavené oblasti („trhliny“) v kladených vrstvách apod., které mají za následek špatné mechanické vlastnosti a mohou vést k porušení součásti. Optimalizace parametrů vyžaduje zpětnou vazbu na základě NDT/E metod ke kvantitativnímu hodnocení výskytu poruch. Komplikovaná geometrie a vnitřní struktura dílů omezují možnosti použití standardních, relativně jednoduchých a levných NDT/E metod. V příspěvku jsou diskutovány výsledky nedestruktivního testování prizmatických vzorků z materiálu Ti-6Al-4V vyrobených 3D tiskem (EBM) s uměle vytvořenými vadami (porozita, centrální „trhlina“). Vzorky byly testovány nelineárními ultrazvukovými metodami NEWS (nelineární ultrazvukové spektroskopie). Ke kvantitativní kalibraci stochastické porozity zjištěné NEWS metodami (0,2 – 25%) byly vzorky následně hodnoceny pomocí metalografických výbrusů. Nejlepší výsledky klasifikace porozity byly získány pomocí metody NWMS (nelineární vlnová modulace) a ESAM (analýza symetrických excitací). Jako velmi jednoduché kritérium porozity se ukázal také širokopásmový přenos signálů rozmiřaných v rozmezí 100-300 kHz.

Klíčová slova: 3D tisk kovových součástí, nedestruktivní hodnocení, nelineární ultrazvuková spektroskopie.

Abstract

Additive manufacturing (AM) of metallic parts (3D printing) becomes today very effective technology for production complicated metallic parts. 3D printers, melting metallic powders using laser or electron beams (LBM, EBM), require setting of many variable parameters, which determine quality and performance of printed parts. Inappropriate conditions lead to presence of incipient defects, like high porosity, cracks, etc., which can result in bad mechanical properties and failures. AM process optimization requires a feedback from nondestructive testing and evaluation (NDT/E). Complicated internal structure, complex geometry and internal structure limit applicability of standard, easy, and cheap NDT/E techniques to quantitatively assess the initial faults. In this contribution are discussed NDT results obtained by NEWS methods (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) to classify

presence of pre-determined defects in Ti-6Al-4V prismatic samples fabricated by EBM printer. Quantitative calibration of porosity (0.2 to 25 %) was additionally realized by metallography. The best porosity classification results were obtained by NWMS (Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy) with chirp excitation and ESAM (Excitation Symmetry Analysis). Very simple and reliable is also the overall chirp energy transfer in frequency band 100 to 300 kHz.

Keywords: *additive manufacturing of metals, 3D printing, Non-Destructive Evaluation, nonlinear elastic wave spectroscopy.*

1. Introduction

3D printing builds objects by joining materials one layer at a time, usually building them from the bottom up [1], which provides freedom to design parts, optimizes their functionality and eliminates conventional manufacturing processes. Manufacturers introduce their own unique technologies generally divided into categories defined in the ISO/ASTM 52900:2015 Standard. This paper focuses on printing of metals using Electron Beam Melting (EBM) manufacturing technique [2]. This technique implies complicated processes with many variable parameters determining the performance and resulting product quality, which needs NDT/E methods as for online process control as for NDT of final products. Principles and characteristics of used test methods are specified in the standard ISO 17296-3:2014, and review of NDT/E methods applied in AM is in the study [3]. Mostly used are e.g. visual methods, X-ray radiography and computed tomography, neutron diffraction, shearography, thermography, profilometry, digital image correlation, and acousto/ultrasonic methods. Acousto /ultrasonic methods ranging from simple tap tests to C-scanning and acoustic emission provide automated quality control and defect detection [3], nevertheless the presence of complex internal structure, mixed materials, and complex shapes limit their standard procedures applicability. Most frequently investigated defects are in the AM literature defects like porosity and internal voids or cracks, difficult to evaluate and classify. Therefore, our research was focused on nonlinear ultrasonic, especially to Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS), which was not yet used for that purpose. NEWS methodology is less expensive and less complicated than computed tomography and similar methods. All NEWS procedures at ultrasonic frequencies consist in excitation of samples by transmitting transducer(s) and recording the response by receiving transducer(s). Transmitter is emitting elastic waves of fixed or variable frequencies with constant or growing amplitude as to excite nonlinear effects due to presence of defects exhibiting local nonlinear elastic behaviour [4].

2. 3D printed samples with artificial defects

The goal of this study was to ascertain potentialities of NEWS methods to detect manufacturing defects in 3D printed metallic samples from Ti-6Al-4V alloy. In the Fraunhofer Institute IFAM-DD in Dresden (IFAM) were prepared two sets of prismatic test specimens of two sizes: a) 60 x 15 x 10 mm, and b) 100 x 20 x 15 mm. Samples contained artificially created internal defects of two types along with dense samples without defects. Both printed series were fabricated by EBM on an Arcam Q20+ machine operating at acceleration voltage of 60 kV and a helium pressure of $4 \cdot 10^3$ mbar. Powder with a nominal particle size from 45 μm to 105 μm was supplied by Arcam AB. The fresh powder chemical composition of Ti alloy was 6.25 % Al,

4.23 % V and 1200 ppm O. The build process began with the preheating of the steel start plate to ~ 700 °C. Fresh powder was applied in 90 μm thick layers, which were heated by fast scanning with a defocused electron beam. For the fabrication of dense titanium samples the standard parameter set was used. A beam current between 3.5 mA and 28 mA depending on scan length was employed. The lateral distance between parallel scan lines was 220 μm . The beam was not used with its smallest diameter below 200 μm , but defocused. Scan speed was adjusted such that line energy (i.e. beam power relative to scan speed) of ~ 800 J/m resulted.

Two types of created artificial defects were 1) disc-shaped free volumes with 5 mm diameter and thicknesses between 200 μm and 500 μm (one per sample) were omitted from melting. Because overhanging surfaces tend to sink in, the real geometry of these artificial cracks was less defined and their thickness is somewhat smaller. The second type of defects was created by the line energy reduction down to 200 J/m within a volume of 30 x 9 x 6 mm size centered within the samples in the set a) and shifted to one end in set b). This leads to a formation of lack of fusion defects. This type of porosity has irregular shape and is randomly distributed within the sample volume. The samples of both series and their defects are listed in Table 1 (set a) and Table 2 (set b), and shown in Fig. 1 and Fig. 2.

Table 1: Set a) of tested samples

<p>Circular defects #0.dense sample #1.circular defect $\varnothing 5$ mm, 200 μm max. thickness #2.circular defect $\varnothing 5$ mm, 300 μm max. thickness #3.circular defect $\varnothing 5$ mm, 400 μm max. thickness #4.circular defect $\varnothing 5$ mm, 500 μm max. thickness</p> <p>Porosity #5.dense sample #6. average stochastic porosity 0.9 % #7. average stochastic porosity 10.1 % #8. average stochastic porosity 14.3 % #9. average stochastic porosity 25.0 %</p>
--

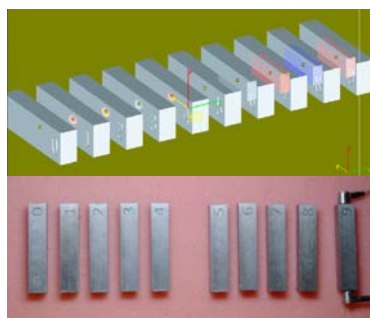


Fig. 1: Samples of set a). Defects schema (up) and photos of grinded samples (down)

Table 2: Set b) of tested samples

<p>Porosity - shifted along the z-axis (asymmetry) #A. stochastic porosity (little) #B. internal volume with stochastic porosity (more) #C. internal volume with stochastic porosity (max)</p> <p>#D. dense sample #E. circular defect $\varnothing 6$ mm, 250 μm max. thickness #F. circular defect $\varnothing 10$ mm, 250 μm max. thickness</p>
--

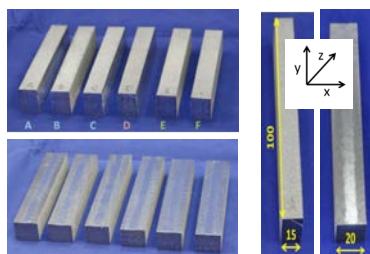


Fig. 2: Samples of set b) with one grinded side

At the beginning were samples tested by standard ultrasonic NDT with direct probes 4 to 8 MHz in both Pulse/Echo and Pitch/Catch modes from all sides. Due to internal microstructure inhomogeneity all AM samples (including “dense”) exhibited a lot of internal reflections, so that it was not possible reliably distinguish various sample

damages. After that, the NEWS tests were realized with various procedures. The elastic nonlinearities are classified as “classical” or “non-classical” (hysteretic), which may be caused by presence of defects. Such nonlinear wave (dynamic) effects are manifested e.g. by resonant frequency shifts, generation of harmonics and subharmonics, odd harmonics enforcement, frequency mixing (intermodulation), nonlinear wave front reversal (time reversal nonlinearity), amplitude dependent attenuation etc., and nonlinearity is quantified by various parameters. The mentioned types of defects are illustrated in Fig. 3 and Fig.4. Fig.3 shows circular defects of max thickness 200 and 500 μm in samples similar to #1 and #4 made in parallel with set a), and observed on their metallography sections. Fig.4 shows four metallographic cross sections performed after measurements on the sample #7 of set a), which illustrates stochastic porosity of average evaluated from figures as 14.3 %.



Fig. 3: Circular defects of diameter 5 mm and maximal thickness of 200 (left) and 500 (right) μm , respectively. Cross sections of defects are shown on metallography of samples similar to #1 and #4.

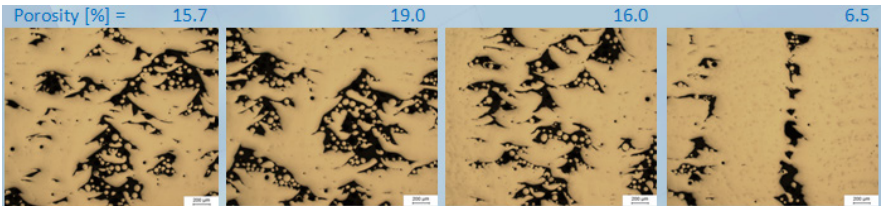


Fig. 4: Metallographic cross sections of the sample # 8 with average porosity 14.3 %.

3. Experimental setup and procedures

Experimental setup in series a) used for NEWS methods was relatively simple. It is shown in Fig.5. To the sample shown in left part were to opposite sides glued by cyanoacrylate two piezoelectric transducers DAKEL IDK 09 (6 mm diameter), one for transmitting and second for receiving of ultrasonic waves in frequency band 100-600 kHz. Excitation amplitudes used in NEWS tests were relatively low (dynamic displacements of the order 10^{-8} to 10^{-4} m). Signals were generated by arbitrary waveform generator (AWG) of the TIE-PIE HS5 combined USB device (digital oscilloscope and AWG) and amplified in power amplifier up to 70 V output. Second transducer detected waves passing through the sample length and the output signals were recorded with one HS5 oscilloscope channel and stored to PC where they were evaluated in MATLAB and damage indicators were derived.

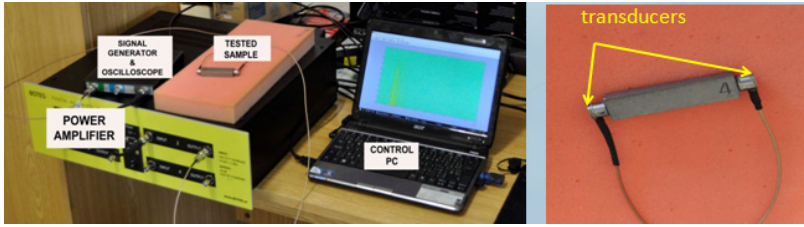


Fig. 5: Equipment used for NEWS tests in a) series and the sample with glued transducers.

Similar arrangement was used in the series b) tests where transducers were not glued to samples but only pressed with constant force through Si-vaseline. In some tests was also used a laser Doppler vibrometer as receiver for the sample scanning along its length.

Three different NEWS procedures were applied in measurements:

1. Harmonics growth analysis with growing excitation amplitude [4]
2. Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) [5]
3. NEWS Excitation symmetry analysis (NEWS- ESAM) [6]

Three another NEWS procedures were also tested - Nonlinear Resonance Spectroscopy (NRUS) [4], Scale Subtraction Method (SSM) [7], and Pulse Inversion (PI) [6], but they gave not satisfactory results. All tested methods were more successful in classification of porosities and less in the case of circular defects.

4. Results of NEWS testing methods

4.1. Harmonics growth analysis

Each specimen of set a) with porosity defects (#5 - #9) was tested five times while the transmitting transducer was always reattached. Samples were excited by the chirp function 150-400 kHz with 25 V amplitude. The response was recorded at 10 MHz sampling frequency. Then, the spectrogram was computed using cosine tapered window 2.5 ms long. Excitation frequency is almost constant in such window and harmonic frequencies can be extracted. The samples exhibited a strong resonance between 150 to 250 kHz, and the optimal range for nonlinear analysis was found between 300 to 400 kHz. Sample nonlinearity was revealed by emphasized harmonics. The results show that nonlinear ultrasonic analysis can be used to distinguish degree of porosity. Attenuation of the material increases with porosity as well, which is documented by decrease of fundamental amplitude in Fig.#6a), second harmonic also decreases (Fig. 6b), but the third harmonic increases (Fig.#6c) and the ratio of 3rd to 2nd harmonics reliably indicates porosity growth, which can be used as a simple damage criterion (Fig.#6d) If we compare that diagram with average stochastic porosity evaluated from metallographic sections (Fig.#6e), we obtain directly porosity calibration curve (Fig.#6f). These dependences are caused by increasing hysteretic nonlinearity of the porous materials.

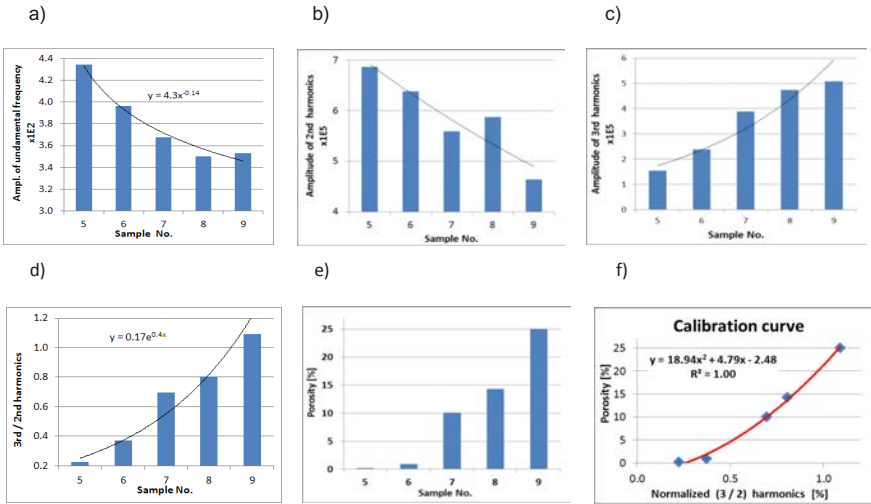


Fig. 6: Amplitude changes of fundamental and harmonics with growing porosity at samples #5 to #9.

4.2. NWMS (Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy)

NWMS, the nonlinear wave mixing procedure [5] consists in sample excitation with two different relatively prime fundamental frequencies f_1 (lower) and f_2 (higher) with growing one or both their amplitudes. Resulting spectra contain together with both fundamental frequencies also their higher harmonics like in previous case and also intermodulation side bands: $(2f_1, 3f_1, \dots)$, $(f_2 \pm f_1, f_2 \pm 2f_1, \dots, 2f_2 \pm f_1, \dots)$. This procedure allowed classification of samples with circular gap defects but not completely unambiguously. For the tests of series a) samples #0 to #4 (maximal gap thickness 0, 200, 300, 400, and 500 μm) were chosen mixing frequencies $f_1 = 62 \text{ kHz}$ and $f_2 = 116 \text{ kHz}$, which were summed to create excitation signal with frequency $f = f_1 + f_2$ and amplitude $A(f) = A(f_1) + A(f_2)$ (ratio 1:1). Resulting signal was transferred to AWG and through the power amplifier emitted to the sample by only one actuator. The input amplitude was growing step by step from 0.02 V up to maximum 1V. Responses were different as each sample has different attenuation at different frequencies. Spectral values of sidebands resulting from 50 measurements with growing excitation amplitude were fitted by straight lines, and their normalized slopes were used for samples classification. The most promising results for defect classification exhibited first order intermodulation around the 3rd harmonic of frequency f_2 : $3f_2 \pm f_1$. The resulted slopes with growing excitation amplitude are plotted as column diagrams in Fig. 7.

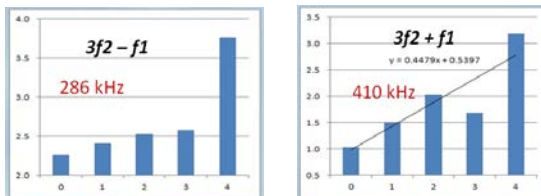


Fig. 7: Slopes of $3f_2 \pm f_1$ intermodulation sideband growths at samples #0 to #4 with circular defects.

Left diagram in Fig.7 clearly distinguishes samples with growing artificial circular defect thickness. Remarkable is a high difference at the sample #4 with 0.5 mm gap compared to others, namely to sample #3 with 0.4 mm defect, which is out of virtual polynomial or exponential trend. It is even more pronounced in the right sideband $3f_2+f_1$ (right in Fig.5) where the sample #3 is completely out of linear trend. It should be noted that the gap thicknesses were determined only approximately due to their irregular forms and the used excitation amplitudes were much lower than the maximal gap thickness.

A different NWMS procedure was applied to the a)-series samples #5 to #9 with dispersed porosity defects, which are much smaller than circular gaps. The first exciting frequency f_1 was continuously growing using the linear chirp function $f_1(t)$ in frequency range 50 to 300 kHz, while the second frequency was held constant $f_2 = 191$ kHz. Both signals were mixed in PC, and then sent to AWG. Relatively long chirp was used as to input enough energy for all sample resonances. Recorded test results were analyzed in spectrograms. In Fig. 8 left are plotted log-magnitudes of the chirp's 4th harmonics at 127.5 kHz for all 5 samples #5 to #9. Results are normalized on the "dense" sample #5. The added quadratic interpolation of logarithmic data shows calibration dependence on sample porosity. In the middle part of Fig. 8 is diagram of overall spectral energy of each sample normalized on sample #5. It embodies linear fall with growing porosity, which can also serve as a sample porosity measure. The linear drop of the overall energy transfer corresponds to growing attenuation, which can be also used for quantitative evaluation of dispersed porosity (see calibration curve right in Fig. 8).

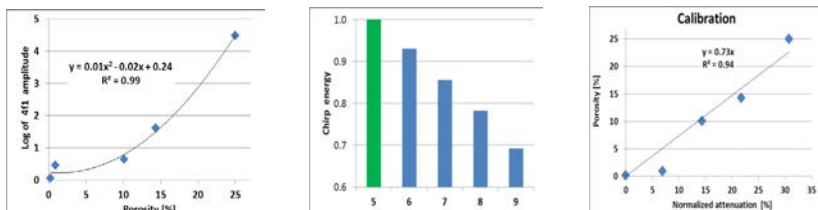


Fig. 8: Sample #5 to #9 porosity changes characterized by normalized 4th harmonics of instantaneous chirp frequency 127.5 kHz (left) , and total chirp energy transfer (middle) with calibration curve (right).

4.3. NEWS – ESAM (Excitation Symmetry Analysis Method)

It permits extraction of a nonlinear parameter N_3 from the nonlinear response y on excitation x . The response is considered to be a 3rd order polynomial function of variable x :

$$y(t) = N_1x(t) + N_2x^2(t) + N_3x^3(t) \quad (1)$$

Then, three phase shifted excitations (shifted by 120°), corresponding to the irreducible representations of point group C^3 , are used to suppress linear and quadratic terms and 3rd order nonlinear part extraction. Suppression of the original excitation x is performed by the energy calculation:

$$E_{03} = \int |x^3(t)|^2 dt \quad E_3 = \int |N_3x^3(t)|^2 dt = N_3^2 E_{03} \quad , \quad (2)$$

which allows determine nonlinear parameter N_3 . For excitation of samples #A to #F of second series b) were used three phase shifted variations of tapered sine signal with frequency 333 kHz and amplitude 25 V: $S_1(0)$, $S_2(2\pi/3)$, and $S_3(4\pi/3)$. All signals were sampled by 20 MHz and three-times repeated. ESAM parameters N_3 were evaluated by energy summations of all three responses $S_1(0)+S_2(2\pi/3)+ S_3(4\pi/3)$. Fig. 9 (left) shows N_3 averages at all 5 samples: #D – without defects, #A to #C – growing porosity (not directly

evaluated), #E and #F – two samples with circular defects of diameter 6 and 10 mm respectively, and the same maximal thickness 250 μm . The same samples were also tested by procedure similar to previous one on total chirp energy transfer in frequency band 100-300 kHz. Results of those tests are also in Fig.9 (right). Both tests show consistent results. Nonlinearity parameter is growing with sample porosity (left diagram) and growing is also attenuation (right diagram). An interpretation of only two samples with circular defects of different diameters is not clear and better specification of that defects would be necessary.

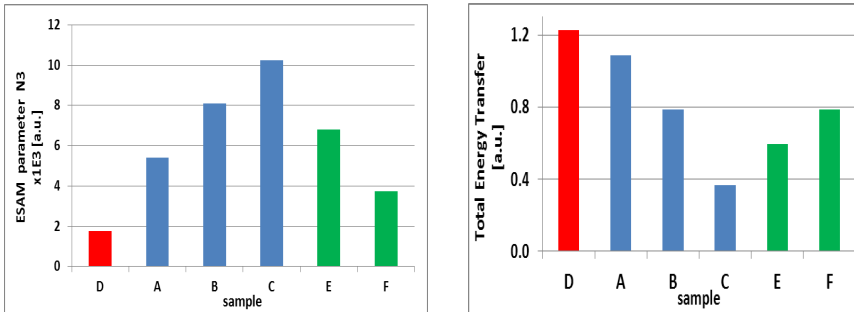


Fig. 9: NEWS-ESAM nonlinear parameters of series b) samples #A to #F with different defects (left). Results of the total chirp (100-300 kHz) energy transfer on the same samples (right).

5. Conclusions

Four nonlinear and linear elastic wave spectroscopy NDT methods were applied to evaluate and classify artificially made defects during additive manufacturing (3D printing) of prismatic metallic samples. Relatively simple experimental arrangements were used to interrogate samples and record their response by piezoelectric transducers or laser vibrometer at ultrasonic frequencies of tens to hundreds kHz. Two different defect types need different NDT techniques: circular gaps of various thicknesses 0.2 – 0.5 mm cannot be easily distinguished by applied very sensitive NEWS methods. On the other hand, the stochastically dispersed small scale porosities, which are difficult to be quantitatively evaluated by other NDT methods, were successfully evaluated using nonlinear harmonics analysis, NWMS and NEWS-ESAM procedures. Also wide-band sweeping chirp energy transfer (attenuation) can be effectively used for simple porosity classification. Quantitative porosity evaluation requires calibration with some direct physical measurements like e.g. destructive metallography. Some NEWS procedures may be applicable also for in-situ AM process monitoring. Further development of NEWS methods for NDT/E of AM parts needs tests on parts with more complicated shapes, materials, and manufacturing conditions to optimize the methodology.

Acknowledgements

The work was supported by the Grant Agency of the Czech Republic under the grant no. GACR 17-22615S, and by Institutional support RVO: 61388998 (CR), which are gratefully acknowledged.

References

1. K Hanson, "Industrial 3D Printing For Dummies", Proto Labs Special Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2017.
2. T Schnabel, M Oettel, B Mueller, "Design for Additive Manufacturing - Guidelines and Case Studies for Metal Applications". Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU, Report on Project no. 141283, Dresden, May 2017.
3. BM Sharratt, "Non-Destructive Techniques and Technologies for Qualification of Additive Manufactured Parts and Processes: A Literature Review", Contract Report no. DRDC-RDDC-2015-C035 of the Sharratt Research & Consulting Inc., Canada, March 2015.
4. PP elsanto, ed., "The universality of Non-classical Nonlinearity with Applications to Nondestructive Evaluation and Ultrasonics", SPRINGER- Kluwer Academic Publishers, New York, Heidelberg, 2007.
5. J Kober, Z Prevorovsky, "Theoretical investigation of nonlinear ultrasonic wave modulation spectroscopy at crack interface", *NDT& E Int.*, 61, 10–15, 2014.
6. S. Dos Santos, C Plag: *Internat. J. of Non-Linear Mechanics*, 43, 164–169, 2008.
7. CLE Bruno, AS Gliozzi, M Scalerandi, P Antonaci, "Analysis of elastic nonlinearity using the scaling subtraction method", *Phys. Rev. B*, 79, 064108, 2009.



VIBRATION MONITORING OF A TELECOMMUNICATION BASE STATION BUILDING ACCORDING TO THE STANDARDS DIN 4150-3 AND ETSI EN 300 019-1-3

Felipe I. H. SAKIYAMA* **, Frank LEHMANN*, Harald GARRECHT*

*Materials Testing Institute, University of Stuttgart, Germany

**Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brazil

Contact e-mail: felipe.sakiyama@mpa.uni-stuttgart.de

Abstract

A long-term structural monitoring system concerning the serviceability limit state for vibration in a telecommunication base station building in Stuttgart, Germany, is presented. The monitoring system was deployed in 2014 to verify whether the vibration caused during the construction work of a 19-floor 50,000 square meters commercial building, located in front of the monitored building, could lead to damaging or malfunctioning of the telecommunication equipment. The monitoring campaign is divided into two phases; the first is running since 2014 and comprises the monitoring of the building's vibration velocity according to DIN 4150-3, while the second began in 2018 to measure the telecommunications equipment's peak acceleration to shock response according to ETSI EN 300 019-1-3. The specificities of the monitoring system are discussed. Acceleration sensors installed in different levels and rooms of the building transfer the collected data in real-time to an online server, where it can be organized for visualization, and a set of alarms and warnings based on the standards' limit values can be configured. Since the monitored building is a telecommunication base station, wireless network for the communication between the sensors was not allowed, nor was the utilization of the local internet connection to transfer the monitoring data. To overcome these limitations, a combination of LTE mobile router and powerline network is used.

Key words: Structural health monitoring, Vibration monitoring, Telecommunication, Serviceability limit state

1. Introduction

Construction sites can generate high level of vibration due to the construction process and the use of heavy equipment. This may cause disturbance, limit certain activities and damage the adjoining buildings, specially in dense urban areas. To assess the actual influence of such vibration on a specific building or equipment, a direct vibration measurement at or near the affected object must be deployed (1).

A vibration monitoring system of a telecommunication base station (TBS) building in Stuttgart, Germany, is presented. The monitoring campaign started in 2014 due to verify whether the vibration caused during the construction work of a 19-floor 50,000 square meters commercial building, located in front of the monitored building, could lead to damaging or malfunctioning of the building and telecommunication equipment. The monitoring was divided into two phases; the first is running since 2014 and comprises the monitoring of the building's vibration velocity according to DIN 4150-3, while the second began in 2018 to measure the telecommunications equipment's peak acceleration to shock response according to ETSI EN 300 019-1-3.

2. Vibration monitoring according to DIN-4150-3

2.1. Procedures

The DIN-4150-3 norm addresses the effects on buildings' structure due to vibration by comparing the measured vibration velocity and frequency to recommended limit values. The vibration monitoring can be done by direct measurement using either seismometer for displacement, velocity or acceleration, and is divided into two procedures: one for short-term, and another long-term vibration. Since the building described in this paper is subjected to aleatory vibration caused by a nearby construction site, only the short-term procedure will be described.

During the monitoring of short-term vibration, the horizontal vibration velocities at the highest slab must be considered, where the maximum value of the two main horizontal directions will be considered as critical and compared with the limit values.

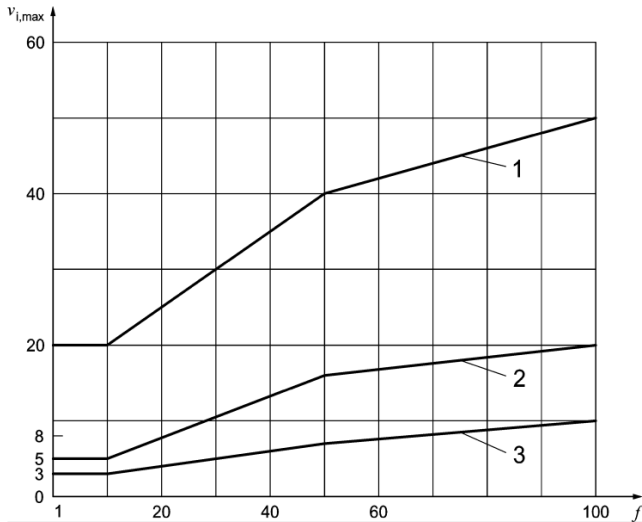
As an alternative, the monitoring of short-term vibration can be done at the building's foundation level. In this case, the maximum vibration velocity value $v_{i,max}$ of the three main directions $i = x, y, z$ will be used.

A table with the recommended limit values for the vibration velocity is given in function of the building's type, the sensors' location, and the vibration's frequency interval (Table 1). While the recommended limit values for the vibration velocity are fixed for all frequencies when the highest slab level is monitored, the limit values varies according to the frequency interval when the vibration at the foundation is measured. For a residential building, e.g., the vibration maximum velocity measured on the foundation cannot exceed 5 mm/s for the frequency interval 1 to 10 Hz. To better illustrate the limit values at the foundation, a complementary graphic is presented with the limit values for each building type and frequency interval (Figure 1).

The vibration frequency is obtained by Fourier transform. First, the maximum vibration velocity of a time interval is identified. Then, the main segment of the vibration signal is extracted. Before the transformation to the frequency domain, a Hanning window function is obtain from the signal main segment. Finally, a discrete Fourier transform to the frequency domain is completed. With the knowledge of the vibration velocity and frequency.

Table 1. Recommended limit values for the vibration velocity (see DIN-4150-3 for the complementary notes, translation (2)).

Class	Building type	Limit values for the vibration velocity $v_{i,max}$ in mm/s			
		Foundation level		Highest slab level	
				Horizontal	Vertical
		1 Hz to 10 Hz	10 Hz to 50 Hz	All frequencies	All frequencies
1	Comercial, industrial and similar structures	20	20 to 40	40 to 50	20
2	Residential or similar (also during construction)	5	5 to 15	15 to 20	20
3	Buildings that due to vibration sensitivity cannot be classified as 1 or 2	3	3 to 8	8 to 10	20



Legend

- 1 Class 1
- 2 Class 2
- 3 Class 3
- f Frequency (Hz)
- v Vibration velocity (mm/s)

Figure 1. Graphic representation of the velocity limits at the foundation level from Table 1 (2).

2.2. Monitoring system

The monitoring system according to DIN-4150-3 for Class 3 buildings is composed by three triaxial vibration velocity seismometers installed on the building's foundation level. The main specifications are showed in Table 2. Each seismometer was connected to a node with a processing board and a mobile modem, which sends the measure data via LTE network to a server for storage (Figure 2).

Table 2. Veloget 3d seismometer specifications.

Fabricant	Solgeo
Model	Veloget 3D
Frequency range	1 – 315 Hz
Measure range	+/- 12,5 mm/s at 1000 S/s
Dynamic range	> 130 dB
Spectral noise	55 nm/s
Sensitivity	40 V/m/s

An online application with tools such as live visualization of the measured data, alarming setup with SMS and e-mail notification, and remote configuration is available with both full control for the administrators and read-only for costumers or guests. The monitoring system runs continuously, with event-triggered measurements at

1000 S/s. The application has a built-in software that calculates the vibration frequency associated with each vibration velocity peak using the Fourier transform and checks if a measured data is above the DIN's limits. It is possible to visualize the summary measurements of a time interval or events at specific time point.

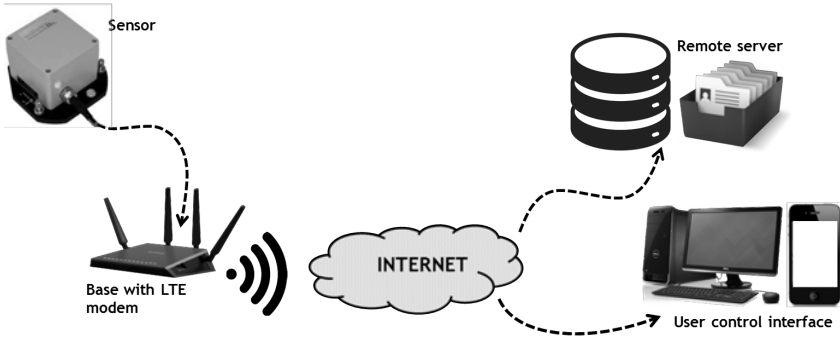


Figure 2. Scheme of the monitoring system for vibration velocity.

Figure 3 shows the correlation between the measured vibration velocities and its corresponding frequencies in the three directions of one sensor. The data corresponds to the time interval from October 22 to 24, 2017. It can be observed, that although peaks of vibration were detected, the majority stayed below the limit values for the DIN-4150-3 Class 3.

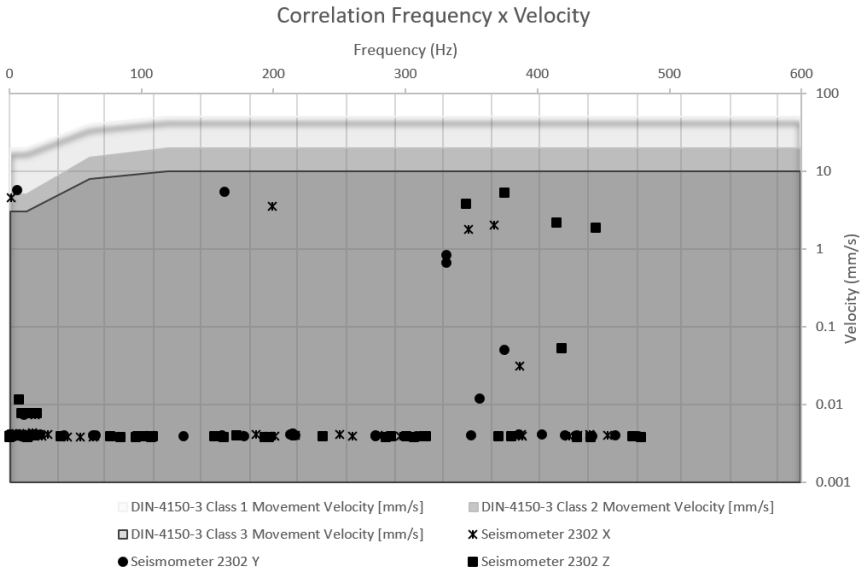


Figure 3. Correlation between frequency and velocity of the measured vibrations. Time interval from October 22 to 24, 2017.

However, it can be noted that two points, corresponding to the directions X and Y, presented values above the limit for Class 3. The above limit value at Y direction is showed in Figure 4. The velocity was recorded on October 23, 2017, at 11:59:55 hours, with a time offset from 1500 ms to 1800 ms. The vibration's peak occurs at time offset 1536 ms, with a velocity of 5,737 mm/s.

To assess whether the vibration is above the limits given by DIN-4150-3, the measured vibration must be transformed from the time domain to the frequency domain using discrete Fourier transform. The spectral analysis is showed in Figure 5, where the frequency 5,86 Hz can be extracted. According to Table 1, the maximum velocity for frequencies between 1 and 10 Hz for Class 3 building is 3 mm/s. Hence, the measured velocity of 5,737 mm/s is above the stated limit. This event triggered an alarm via e-mail, sent to both the system's administrator and to the building's manager.

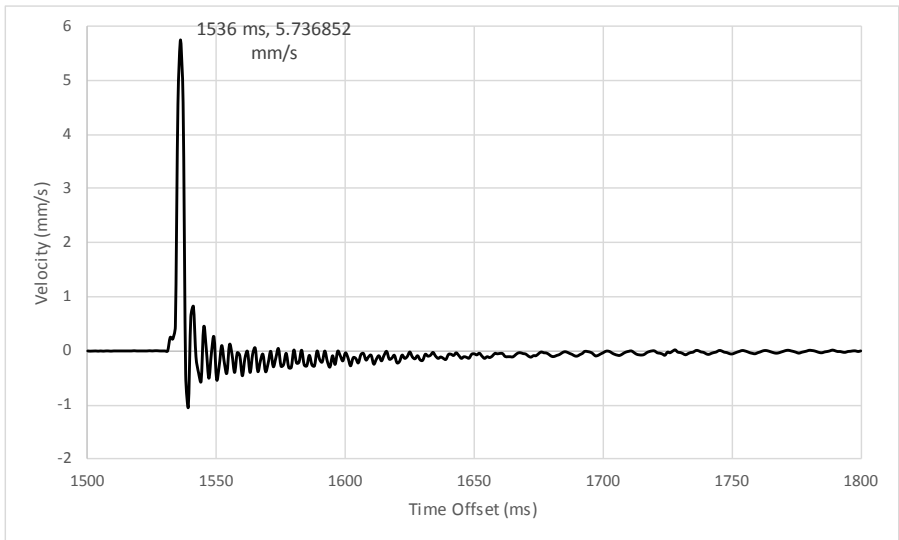


Figure 4. Recorded velocity at Y direction.

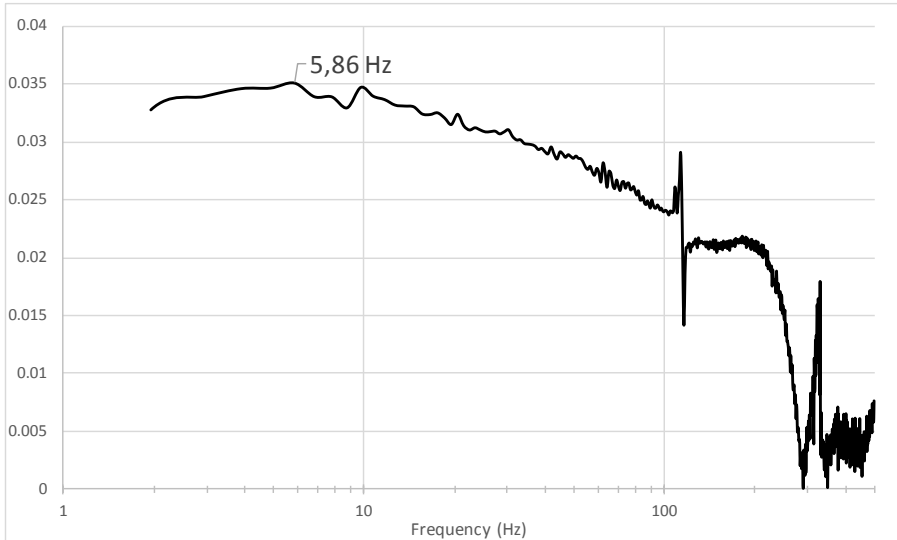


Figure 5. Spectral analysis of the recorded velocity at Y direction.

3. Vibration monitoring according to ETSI EN 300 019-1-3

3.1. Procedures

The ETSI specifies the environmental conditions for telecommunications equipment. It defines classes of environmental conditions and their severities to which telecommunication equipment may be exposed. The environmental conditions specified are climatic, biological, chemically, mechanically active substances, mechanical, and earthquake. In this paper, the mechanical condition is the objective of the monitoring system.

The mechanical conditions are divided into stationary and non-stationary vibration, given in terms of maximum amplitude, acceleration, duration, frequency range and the environmental classes (Mechanical conditions ETSI EN 300.). For this case study – vibrations on telecommunication equipment caused by a nearby construction site, class 3M1 – the non-stationary vibration is appropriated. A maximum peak acceleration of 40 m/s^2 – for all frequencies – with a maximum duration of 22 ms are specified for the environmental class of the monitored telecommunication station. Since the threshold is a parameter that can be obtained by direct measuring using accelerometers, no further calculation is necessary.

Table 3. Mechanical conditions ETSI EN 300 (3).

Environmental parameter		Unit	Class							
			3.1 and 3.6		3.2 and 3.3		3.4 and 3.5 (see note 1)		special 3M3 (see note 1)	
a)	Stationary vibration, sinusoidal (see notes 2 and 4)									
	displacement amplitude	mm	0,3		1,5		3,0		1,5	
	acceleration amplitude frequency range	m/s ² Hz		1 2 to 9	5 9 to 200		10 2 to 9		5 2 to 9	5 9 to 200
b)	Non-stationary vibration, including shock (see note 3)									
	shock response spectrum type L, peak acceleration (ã) duration	m/s ² ms		40 22		40 22				70 22
	shock response spectrum type II, peak acceleration (ã) duration	m/s ² ms					250 6			

NOTE 1: When the consequences of mechanical failure are minor, or the probability of high mechanical stresses is rare, the mechanical levels of IEC class 3M3 may be chosen.
 NOTE 2: Units are peak displacement amplitude (mm), peak acceleration amplitude (m/s²) and frequency range (Hz).
 NOTE 3: For definition of Model Shock Response Spectra (First Order Maximax Shock Response Spectra) see IEC 60721-3-3 [1], and Maximax see IEC 60088-2-27 [2].
 NOTE 4: Random vibration is often a more realistic vibration characteristic compared with sinusoidal. Test severities for random vibration are given in EN 300 019-2-3 [5] and these represent all types of vibration found in practice. Random vibration is therefore recommended to be used as an environmental parameter unless significant sinusoidal vibration is known to be present in a particular application. IEC 60721-3-3 [1] presently has no data for random vibration levels experienced in practice.

3.2. Monitoring system

The monitoring system for acceleration after the ETSI EN 300 is composed of six accelerometers (Table 4) installed in different rooms direct on the telecommunication equipment. For security reasons, the use of the local network nor the wireless data transmission was permitted. To overcome this limitation, a powerline communication (PLC) network was created using Devolo's dLAN® Powerline adapters with power over (PoE) ethernet technology. Each sensor node is connected via ethernet cable to a powerline adapter; a second powerline adapter is installed in a room without any telecommunication equipment, e.g. a deposit room, with mobile reception; finally, a mobile LTE router is connected to the powerline adapter, providing internet access to all sensors connected in the PLC network (Figure 6). This system uses the same online application as the system for vibration velocity.

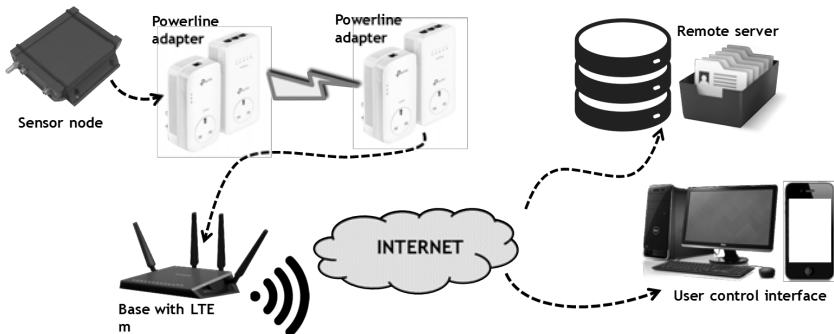


Figure 6. Scheme of the monitoring system for vibration acceleration.

Table 4. BMA280 accelerometer specifications.

Fabricant	Bosch
Model	BMA280
Acceleration range	+/- 16 g
Sensitivity	512 LSB/g
Resolution	1.953 mg/LSB

4. Conclusion

The vibration monitoring of a building or equipment requires the correct selection of sensors and proceedings to meet the expected assessment of potential damages or malfunction. In this work, two different approaches were presented: the vibration effect on a telecommunication base building, and the vibration effect on the telecommunication equipment. The first concerns the structural effects on the building, where the vibration velocities and frequency spectral were measured using velocity seismometers and compared with the recommended limit values given by the norm DIN-4150-3. The latter comprises the effects on the telecommunication equipment, where accelerometers were installed direct on the equipment to control the acceleration according to ETCI EN 300 019-1-0 standard.

A complete continuous long-term monitoring system was deployed for both cases, with real-time data visualization, alarm triggering and remote configuration. Both systems allow the building's manager to keep track of the effects on the building structure and the telecommunication equipment due to the vibration caused by the large construction site nearby.

5. References

- [1] BURGE, PAUL / BUEHLER, DAVID, ed. *Issues and Recommendations for Construction Vibration Monitoring*. 2nd ed.: Curran Associates, 2014. 978-1-63266-978-0.
- [2] *DIN 4150-3 2015*.
- [3] EE. EN 300 019-1-3 - V2.3.2 - Environmental Engineering (EE); Environmental conditions and environmental tests for telecommunications equipment; Part 1-3: Classification of environmental conditions; Stationary use at weatherprotected locations.



MONITORING TECHNIQUES FOR SPECIAL ALLOYS FROM SOME MEDICAL PROSTHESES

**Adriana SAVIN^{1,*}, Petrica VIZUREANU², Zdenek PREVOROVSKY^{3*},
Rozina STEIGMANN¹, Milan CHLADA³, Josef KROFTA³,
Madalina BALTATU², Mihail Liviu CRAUS^{1,4}, Frantisef NOVY⁵**

- ¹ National Institute of R&D for Technical Physics, NDT Department, Iasi, Romania
² Gh.Asachi Technical University, Faculty of Science and Materials Engineering, Iasi, Romania
³ Institute of Thermomechanics, NDT Laboratory, Prague, Czech Republic
⁴ Frank Laboratory for Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
⁵ University of Zilina, Department of material Engineering, Zilina, Slovak Republic
Contact e-mail: asavin@phys-iasi.ro, zp@it.cas.cz

Abstract

This paper presents complementary methods for noninvasive evaluation of an exotic class of alloys possible to be used in medical prosthetics. The interest in this study is the analysis of Ti alloys with different concentration of Mo and Si, in order to make the elastic modulus and Poisson ratio reach values appropriate with human bones. The both methods, acoustic emission and resonant ultrasound spectroscopy are proposed as complementary methods for nondestructive evaluation of entire sample volume.

Key words: *Ti alloys, acoustic emission Resonant Ultrasound Spectroscopy, biocompatible*

1. Introduction

In last decades, high progress in medical devices for endoprosthetic applications has been carried out. Nowadays, due to this progress in medical technology, it is possible to replace about every joint in the human body. Most of the implant is modular [1], assuring the possibility to adapt the geometry of the prosthesis to the joint morphology of the patient. Modular components (metal augments) of various size and shapes are used to restore bone defects, and should be able to support a revision. The size and placement of augments are highly dependable on the bone loss pattern. These augments are secured with multiple screws for rigid bone fixation. This solution provides more flexibility during primary surgery and simplified revision procedures [2]. All of these innovative joint prostheses require new materials for loading element such as hip stem, the acetabular cup and the sliding apparatus etc. The respective material has to exhibit excellent biocompatibility, mechanical strength and resistance to compression and bending loads along with high corrosion-resistance and wear-resistance. Generally, very few grades can satisfy these requirements [3], and there were selected a special group of titanium/titanium alloy, CoCrMo alloys for implants based of steels along with ceramics. Titanium alloys are particularly biocompatible and enhance osseointegration. Ti-Mo-Si alloys have gained the attention of biomedical industry due to specific strength and corrosion resistance and the best biocompatibility

among metallic materials used in medical prostheses. Depending on the application, parts of the prostheses are used with suitable surface finishes and coatings. The elastic modulus of α and $\alpha+\beta$ Ti alloys is much higher [4] than of natural bone (10-30GPa). Intense researches are known in the domain of development of new bio-functional alloys based on Titanium [5] and fatigue endurance [6], considered more appropriate of human bones as mechanical bio-functioning compared with polymers and ceramics biomaterials [7-8]. In order to characterize the material, the experimental determination of elastic matrix, mechanical wear and the probability of appearance and propagation of thin cracks are imposed.

This paper proposes to examine mechanical properties of biomaterials based on Ti used in medical prosthetic with different ratios between alloying elements, i.e Mo 15-20%, Si 0.5-1% to improve the bio-functional characteristics of the materials. For this investigation, we used alternative methods such as scanning electron microscopy and microstructure characterization, acoustic emission (AE) and resonant ultrasound spectroscopy (RUS) as nondestructive methods. EDX are involved, to choose the best concentration of elements with the aim to improve of mechanical properties.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Titanium properties, i.e. tenacity, low density, resistance to corrosion, stiffness, etc. made it together with its alloys in combining other alloying elements (Fe, V, Mo, etc.) a good replacement of steel pieces also in automotive industry (engine components – valves, connecting rods, drive shafts, crankshafts). Due the biocompatibility, titanium alloys have broad applications in medical implants and prosthetic devices. Fabrication techniques, approaches to improve mechanical properties, studies on controlling cell and tissue responses, and alloys are recently analyzed [9]. Studies about titanium and titanium-based alloys for orthopedic applications are more and more nowadays emphasized. When the prostheses are implanted to reconstruct the bone, to prevent bone resorption and to obtain adequate remodeling, their Young's modulus must be close to that of the bone. Using high purity elements Ti-99.8%, Mo-99.7% and Si-99.2% as starting materials, the Ti 84 Mo 15 Si 0.75 alloy was prepared with vacuum arc melting furnace, in argon atmosphere. The advantages of using this equipment are very high melting temperatures can be achieved, the possibility of vacuum melting the metallic samples under a protective atmosphere and can create alloys with uniform composition.

Ti-Mo alloys being a viable alternative for prostheses, compatible biomechanical and biochemical, having mechanical features compatible to the human bones, the best being the β Ti alloys with central cubic crystalline structure (bcc), because the titanium atoms are not dense packaged as in the case of α with dense closed packed (hcp) structure. Molybdenum has been selected as alloying element, secondary as ratio, because it not producing toxic reaction and is non-allergic, being in balance with the human body. The mechanical properties are improved by alloying Ti with β isomorph stabilizers (i.e Mo), alloying that improve the resistance to corrosion. For the acoustic emission and RUS analysis, from the studied probe, a cube sample with 10mm side has been cropped using MAXIEM 1530 device, which provides high-pressure water jetting with a precision of 0.1mm/ml.

2.1.1. Ultrasound characterization of sample

After preparing the samples by mechanical grinding and polishing, the propagation speeds of the longitudinal and transverse ultrasound waves through the samples were determined using the echo pulse method. Young modulus, shear modulus and Poisson ration have been obtained from recorded data and they are presented for sample #1 (Ti15Mo) and sample #2 (Ti15Mo0.5Si) in Table 1.

Table 1

Sample	Composition	length [mm]	Density [g/mm ³]	Young modulus [GPa]	Shear modulus [GPa]	Poisson ratio	C _l [m/s]	C _t [m/s]
#1	Ti15Mo	10	4958.6	112.96	42.16	0.34	5981	2916
#2	Ti15Mo0.5Si	10.07	5055.39	118.44	44.53	0.33	5962	2968

For titanium alloy cube samples, having 10 mm sides, in order to determine mechanical parameters such as Young modulus E, shear modulus G and Poisson ratio, the propagation speed of ultrasound waves were measured using impulse - echo method. Longitudinal velocity wave was measured using a sensor G5KB GE with central frequency of 5 MHz, the coupling being assured by coupling gel. The transversal wave velocity was determined with a sensor MB4Y GE with central frequency of 4 MHz. The Panametrics PR 5073 Pulser Receiver is used for the emission impulses and the reception of the signals. The digitizing of the signals and the measurements of the time of flight was made with the digital oscilloscope Le Croy Wave Runner 64Xi.

2.1.2. Microhardness measurement

The measurements of microhardness were performed by Vickers method, with a load of 100gF (HV100) in 25 seconds, on faces of the sample after cutting with method mentioned above. The Vickers microhardness remains approximately constant at all faces of the sample at value HV 322 for sample #1 and HV 294. The results obtained from the experimental researches on TiMoSi alloys, was compared with the classical biomaterials as the Ti6Al4V alloys and CoCrMo alloys and the results are in according to the literature [10].

2.1.3. SEM evaluation

For characterizing the structure (TiMoSi), SEM and EDX analysis have been performed. Relevant information about influence of Si concentration over structure are obtained. A Scanning Electron Microscope (QUANTA200 3D) operating at an acceleration voltage of 20 kV has been used of the topographical characterization of the specimens. SEM images emphasize that the Ti alloys is compact (Figure 1). A further confirmation of the local atomic percentage of the elements in sample composition is given in Figure 2.

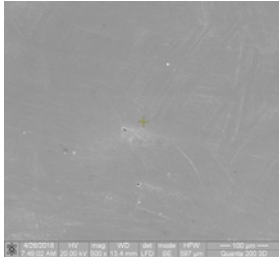


Fig. 1 SEM analysis of TiMoSi alloy

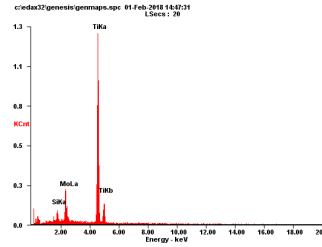


Fig. 2 EDAX of specimen

2.2. Resonant ultrasound spectroscopy

Resonant ultrasound spectroscopy (RUS) involves scanning of the resonance structure of a compact specimen (in our case metallic cube) with the aim of determine its mechanical properties [11-12]. RUS is based on the principle that the mechanical resonant response of solids depend strongly on its elastic moduli, shape and density. Resonant (or natural) frequencies of a system can be either measured or calculated by solving equations of motion for the known shape [13]. Inhomogeneity in an object may be identified from a resonant frequency spectrum by resonant frequency shifts, peak splitting, increases in peak width and changes in amplitude.

Let v be an isolated body, that is, one bounded by a closed stress free surface. Let C_{ijkl} be its elastic stiffness tensor and let ρ be its density; both quantities may vary with position in v . Let ω be a non-negative real number, and $\bar{u}(\bar{r})$ be a real valued function at position \bar{r} in v . Then, the combination $\{\omega, \bar{u}\}$ is a free oscillation or resonance if the real-valued displacement field

$$S(\bar{r}, t) = R(\bar{u}(\bar{r}) \exp(j\omega t)) \quad (1)$$

where $j = \sqrt{-1}$, satisfies the elastic equations of motion in v and the stress-free boundary condition on its surface. The potential energy E_p associated with the displacement field \bar{u} is given by the strain energy¹⁴

$$E_p = \frac{1}{2} \int_{\Omega} C_{ijkl} \partial_j u_i \partial_l u_k dV \quad (2)$$

where $u_i, i=1,2,3$ are the Cartesian components of \bar{u} and we are using the summation convention for repeated indices. C_{ijkl} forms the full linear elastic tensor for a homogeneous body (the compliance tensor), ω is the angular component of the frequency, ρ is the mass density, and u is the elastic displacement field with the direction subscripts $i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}$. The corresponding kinetic energy, E_c of the system is

$$E_c = \omega^2 K \quad \text{with} \quad K = \frac{1}{2} \int_v \rho u_i u_i dV \quad (3)$$

The quantity

$$I = \omega^2 k - E_p \quad (4)$$

is stationary if and only if ω and \bar{u} are a resonance of \circ [15], i.e. the value of l does not change if we replace \bar{u} with $\bar{u} + \delta\bar{u}$, where $\delta\bar{u}$ is any small displacement. This is the Rayleigh-Ritz method [16].

The method is based on the estimation of resonant eigenfrequencies, based on an eigenvalue and eigenfunction method described using the equation

$$\omega^2 K \alpha = E \alpha \quad (5)$$

Relation (5) is a standard form for the generalized symmetric eigenvalue problem. Both k and E are real and symmetric, and k is positive definite. This problem has been solved for the interest cases. It is evident that the solutions of the eigenvalue and eigenfunction problem can only be found via numerical methods. The equipment configuration is shown in Figure 3.

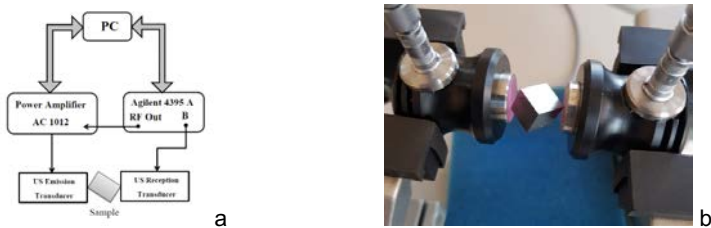


Fig. 3 Experimental set-up for RUS: a) scheme; b) sample placement

The probe is fixed between the emission transducers (excites an elastic waves with constant amplitude and variable frequency for specimen) and reception transducers (that detects response in US frequency of sample) in order to accomplish the condition of stress free surface. The equipment allows the setting so that for the established position of the cylindrical sample, the contact on the edge assures the excitation of a maximum number of possible resonances for the fixed geometry.

2.3. Acoustic emission

Acoustic Emission (AE) is the class of phenomena whereby an elastic wave, in the range of ultrasound usually between 20 kHz and 1 MHz, is generated by the rapid release of energy from the source within a material [17]. Useful for the investigation of local damage of materials, AE is used successfully for monitoring mechanically, thermally, etc., stimulated materials and structures. These "events" are occurring during the processes of mechanical loading of pieces and structures, being accompanied by structural changes that generate local "sources" of elastic waves. The AE is very sensitive method to recognize a damage mechanism during the deformed of the small pieces, can be used to identify running failure modes and to verify various damage models.

Several methods for material characterization were used before the mechanical compression testing with registration of continuous AE. The influence of Mo/Si concentration in the TiMoSi alloy on AE due to formation and propagation of microcracks was studied. Due to the high sensitivity of piezo-transducers, AE is a technique widely used to identify failure initiation, the initial stages of damage, damage propagation, and catastrophic failure of the material. The samples having 10mm³ were used for compression loading by INSTRON 100 KN testing machine at the constant displacement velocity rate 0.2 mm/min. Small dimensions of the samples

not allowed direct 9 mm diameter transducer attachment, and a hard metal cover was used as a waveguide. The USB oscilloscope with 2 MHz sampling rate was used instead of specialized AE analyzer for continuous AE signal recording analyzed in MATLAB after the test. The experimental setup is presented in figure 4.

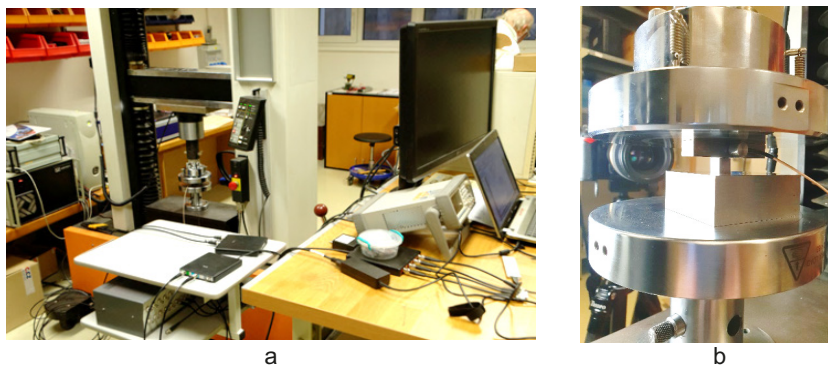


Fig. 4 Experimental setup for compression test with AE monitoring

The frequency band of transducers was relatively flat (10 dB) in 30-500 kHz range. The small dimensions of the sample did not allow direct attaching of transducer. The transducer were glued with cyanoacrylate onto a hard metal plate cover, playing the role of waveguide from transducer, toward the sample. A support plate was also used on the bottom, to avoid damage the surface of loading clamps by the small and very hard specimen.

Electrical signal coming from piezoelectric transducer (Dakel IDK-09) was amplified with 20dB gain (PAC 2/4/6 preamplifier) and then streamed by USB oscilloscope (TiePie HS-5) to PC with the sampling frequency 1MHz. During the continuous recording of AE activity, the basic signal parameters as numbers of eight threshold crossings and RMS per each second were computed, together with the level of stress and strain available at loading machine analog outputs. All oscilloscope control settings, data recording and computations were carried out in Matlab 2017a software by original optimized code.

3. Experimental results

The non-destructive techniques as RUS and AE are used for increasing the confidence coefficient in the test analysis. The micro cracks accumulate with cyclic loads, the preexistence of the voids can be transformed into the propagation crack. It is very important to know, in order to obtain and characterize the materials that the perturbations of material properties (density and especially the elastic constants tensor) affect the resonance frequencies and especially how they affect. To evaluate what resonances will be observed in an experiment of the sample is very important to simulate the response sample at these. The experiment shows that it is useful to use resonance eigenvalues and eigenvectors in prediction.

3.1. AE test results and their interpretation

Diagrams with AE activity of Ti alloy sample are presented in figure 5. AE activity during tests of Ti alloy samples Ti -15Mo and Ti15Mo 0.5Si, were compared with actual stress and strain measured by the loading machine – Figure 5. Both signals show linear dependence of AE activity (illustrated by RMS) on increasing of applied stress within the range of elastic deformation. The loading was driven by linearly increasing strain, so the beginning of non-linear change in stress curve envelope shows the level, at which the plastic deformation starts (marked up by the blue dot). However, in case of Ti-15 Mo-0.5 Si such level was not reached due to the limits of loading machine. Decreasing of AE activity in the range of plastic deformation of specimen probably reflects the changing dynamics of structural changes. After stopping of displacement (highest peaks of stress curves), the material started to relax and produced only weak and decreasing sporadic acoustic emission.

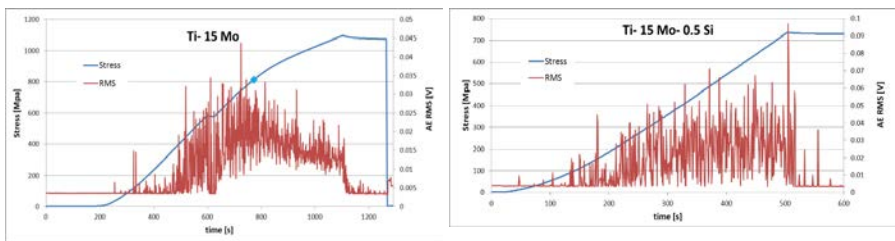


Fig. 5 Acoustic emission activity

3.2. RUS

Inhomogeneity in an object may be identified from a resonant frequency spectrum by resonant frequency shifts, peak splitting, increases in peak width, and changes in amplitude. The method is based on the estimation of resonant eigenfrequencies [16], based on an eigenvalue and eigenfunction method [18]. For these, we have used an equipment configuration as the one shown in Figure 3. The TiMoSi alloy cube sample is supported by two piezoelectric ultrasound transducers, for emission and reception respectively, placed at opposite corners of the metal cube. The resonance spectra were traced for the samples denoted #1 and #2 according to Table 1. Therefore it can be concluded that *every mode must fall into one of the three classes* [14]: *extensional* axisymmetric mixtures of compression and shear motions, *flexural* modes through a long pass that are tilted with respect to the axis, (the flexural modes occur in pairs named doublets, both members of which have the same resonance frequency) and *torsional* (the frequencies of these modes depends entirely upon the samples shear velocity) mode.

Figure 6 shows the resonant spectra for the sample #1 and #2 in the frequency range 120 kHz and 200 kHz. The RUS spectrum describes a large amplitude response detected when the frequency corresponds to one of the samples eigenfrequencies.

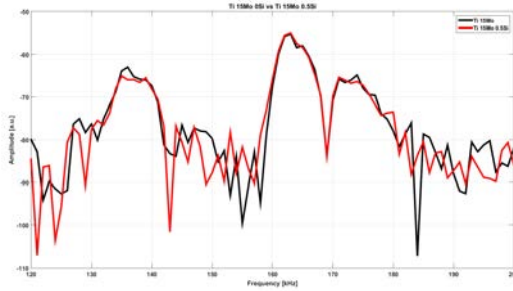


Fig. 6 Resonance ultrasound spectra for sample #1 and #2

Figure 6 describes the typical response for the two tested samples, in a frequency range comprised between 120 kHz and 200 kHz chosen based on our preliminary analysis performed on similar materials.

The oscillation eigenfrequencies were calculated using/based on the parameters set presented in Table 1 using SolidWorks 2014, Simulations Toolbox. For these samples, considered axisymmetric, isotropic and homogeneous, a mesh of 62280 nodes and 43215 elements has been used. Figure 7 shows the vibration modes obtained by simulation, for the frequencies between 120 kHz and 200 kHz. The resonance frequencies obtained by simulations correspond to those experimentally obtained.

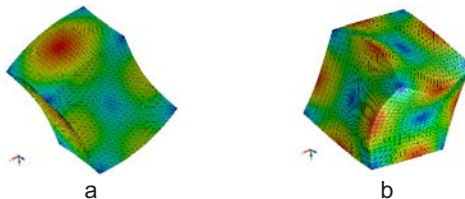


Fig. 7 Resonant modes for sample #2 : a) extensional mode – 148kHz; b) flexural mode – 197kHz

The inhomogeneities inside the material can be identified from the resonance spectrum, by changes of the resonance frequency, splitting of peaks/increasing of their width, and modifications in amplitude. In order to determinate, in the basis of experimentally measured resonance spectra, of the main elastic properties of the sample, the inversion of data was used, implying conjugate gradient method [11], minimizing the objective function

$$F = \sum_i w_i \left(f_i^{(p)} - f_i^{(m)} \right)^2$$

where $f^{(p)}$ are the computed frequencies, $f^{(m)}$ are the measured frequencies, w_i are the weights, which characterize the confidence we have in the measurements. The optimization problem has been numerically computed in Matlab 2014a. Because the number of peaks and the corresponding frequencies is relatively small, the inversion was only applied to determine the Elastic (E) and shear (G) moduli and not the geometrical dimensions of the cube samples made from TiMoSi alloy.

4. Conclusions

The success in implant depends on several parameters that may improve considering both biological and mechanical criteria. According to Regulation (EU) 2017/745 on medical devices (the MDR) and Regulation (EU) 2017/746 on in vitro diagnostic medical devices (the IVDR), high quality and safety should be reached for medical devices, by obtaining performant materials.

Choosing the biocompatible alloys from TiMoSi system with different Mo/Si concentrations, the selection of materials with optimal structural and mechanical properties of the samples made from these complex alloys with different Mo/Si concentration is being followed. The porosity of the alloy is determined by mechanical properties compatible with human bone. The requirements in medical domain are taken into consideration at the realization of samples, delivering an alloy system to correspond and frame into the necessary limits (elastic modulus 20-60Gpa, strength 15-25%, stain 5000-1000MPa, stress 600-1000MPa).

RUS is a reliable technique, which emphasizes the eigenfrequency intervals, which exhibit a slight change as a function of samples composition, for monitoring structural modifications related to sample density. Slight material anisotropy leads to splitting of the higher modes but not of the fundamental torsion mode. In the case of the studied samples, whose ratio is around the unit, the interpretation is favorable because the torsional mode is the lowest one, well separated from the others for $\frac{1}{2} > 0$, allowing immediate extraction of the shear modulus and its damping. The initiation of fracture of metal alloy elements can be due to the presence of low-density zone-containing dispersed high-density agglomerates in the volume and any deformation, which will be immediately apparent through changes in the resonance modes, with deviations from the normal spectrum. If the elements are discontinuities, with a density smaller than the prescribed value and the elastic and shear moduli smaller, modifications appear in the shape of the spectrum and the resonance frequencies.

Future research should focus on the SEM analysis regarding the modified percent of Mo (20%) and Si (0.5-1%), and their effect in alloying.

5. Acknowledgments

This work was supported by a grant of the Romanian Ministry of Research and Innovation, CCCDI – UEFISCDI, project number PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0239, within PNCDI III.

6. References

1. Grunert, R., Schleifenbaum, S., Möbius, R., Kopper, M., Rotsch, C., Drossel, W.G., Hammer, N. and Prietzel, T., 2018. Novel concept of a modular hip implant could contribute to less implant failure in THA: a hypothesis. Patient safety in surgery, 12(1),1.
2. Kinov, P. and Tivchev, P., 2013. Revision hip arthroplasty: management of bone loss. In Arthroplasty-Update. Chapter 15, pp 301 – 338 (London: InTech).

3. ISO 7206-6:2013, Implants for surgery—Partial and total hip joint prostheses—Part6: Endurance properties testing and performance requirements of nek region of stemmed femoral components.
4. Xie, F.X., He, X.B., Cao, S.L., Lu, X. and Qu, X.H., 2013. Structural characterization and electrochemical behavior of a laser-sintered porous Ti–10Mo alloy. *Corrosion Science*, 67, pp.217-224.
5. Niinomi, M., 1998. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), pp.231-236.
6. Jambor, M., Nový, F., Bokovka, O., Trako, L. and Oravcová, M., 2018. Influence of structure sensitising of the AISi 316Ti austenitic stainless steel on the ultra-high cycle fatigue properties. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 157, p. 05011). EDP Sciences.
7. Li, Y., Yang, C., Zhao, H., Qu, S., Li, X. and Li, Y., 2014. New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*, 7(3), pp.1709-1800.
8. Coakley J, Isheim D, Radecka A, Dye D, Stone H J and Seidman D N 2017 Microstructural evolution in a superelastic metastable beta-Ti alloy *Scripta Materialia* 128 pp 87-90.
9. Leyens, C. and Peters, M. eds., 2003. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
10. Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R. and Gogia, A.K., 2009. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review. *Progress in materials science*, 54(3), pp.397-425.
11. Visscher, W.M., Migliori, A., Bell, T.M. and Reinert, R.A., 1991. On the normal modes of free vibration of inhomogeneous and anisotropic elastic objects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(4), pp.2154-2162.
12. Migliori, A. and Maynard, J.D., 2005. Implementation of a modern resonant ultrasound spectroscopy system for the measurement of the elastic moduli of small solid specimens. *Review of Scientific Instruments*, 76(12), p.121301.
13. De Silva, C.W., 2006. *Vibration: fundamentals and practice*. CRC press.
14. Zadler, B.J., Le Rousseau, J.H., Scales, J.A. and Smith, M.L., 2004. Resonant ultrasound spectroscopy: theory and application. *Geophysical Journal International*, 156(1), pp.154-169.
15. Dahlen, F. and Tromp, J., 1998. *Theoretical global seismology*. Princeton university press.
16. Myasnikov, D.V., Konyashkin, A.V. and Ryabushkin, O.A., 2010. Identification of eigenmodes of volume piezoelectric resonators in resonant ultrasound spectroscopy. *Technical Physics Letters*, 36(7), pp.632-635.
17. www.ndt.net.
18. Jaglinski, T. and Lakes, R.S., 2011. Resonant ultrasound spectroscopy of cylinders over the full range of Poisson's ratio. *Review of Scientific Instruments*, 82(3), p.035105.



X-RAY AND COMPUTED TOMOGRAPHY AS A TOOL FOR QUALITY ASSURANCE, PROCESS OPTIMIZATION AND METROLOGY INSPECTIONS IN THE FIELD OF ADDITIVE MANUFACTURING

Philip SPERLING*¹

¹YXLON International GmbH, Essener Bogen 15, 22419 Hamburg, Germany

* E-Mail: philip.sperling@hbg.yxlon.com

Abstract:

At the moment computed tomography is the only available technology to give an insight on quality, geometrical features and process quality of highly complex additive manufactured parts. With different application examples I will show the challenges for the quality of AM parts and influences by design and production process.

Keywords: Radiographic testing (RT), Computed Tomography (CT), Metrology, Process Optimization, Additive Manufacturing (AM)

1. INTRODUCTION

Computed tomography (CT) goes light years beyond regular 2-D X-ray technology to deliver accurate three-dimensional images of scanned objects, including their voids and areas of differing density. It has become one of the most important and powerful non-destructive testing (NDT) methods - an achievement resulting from the continuous improvement of CT scanning and reconstruction methods.

Today, CT is used for research and development, failure analysis, process and quality control, small series inspection, combined DR-CT inspection, defect and material analysis, assembly checks and, becoming more and more important, metrology, i.e. dimensional measurements.

2. EXPERIMENTAL METHOD

The experiments were performed either with a standard laboratory dual-source micro-CT or with a customized high-power industrial CT. Depending on the material, geometry and wall thickness of the additive manufactured (AM) part we chose the most suitable solution to achieve the best results.



Figure 1: Different x-ray and CT solutions for different applications: Cheetah EVO, FF20 and FF85.

3. CHALLENGES FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Different application examples from different industries will be presented during the presentation to show challenges, problems and typical defects for this production method.

Due to the free part complexity in the AM production process the parts can have a complex outer shape and a lot of internal features like lattice structures or a complex network of channels. This complexity leads to increased demands for the inspection of such parts. In a lot of traditional manufactured parts the 2D x-ray inspection already gives a sufficient level of information about the part and the associated production process steps. For the majority of AM parts the inspection by Computed tomography is the only method that delivers a sufficient level of information.

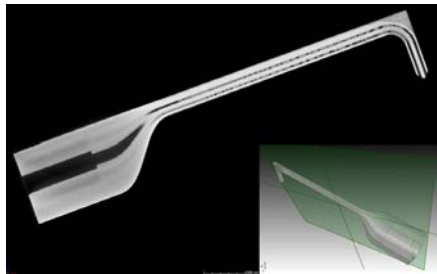


Figure 2: Flow measurement nozzle with internal defects.

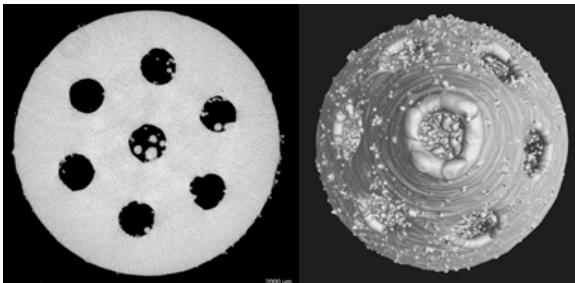


Figure 3: Air probe with internal defects (closed channels).

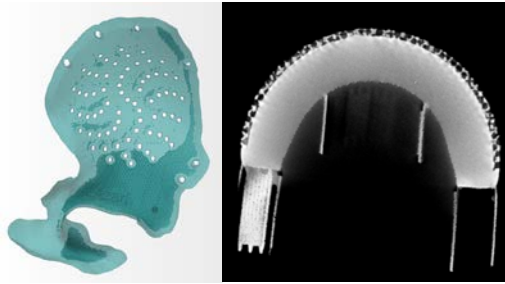


Figure 4: Cranial implant with powder residue in the lattice structure. Acetabular hip implant with inclusions.

Industrial X-ray and CT are powerful inspection methods for the final part. In this more traditional way you can assure the final quality of a part. With the high depth of information delivered by CT this method can also be used to give a deeper understand of the production process and single process steps.

This reaches from the CT analysis of powder which is the raw material in the powder bed fusion AM printing process to the inspection of test cubes used for the parameter development.

With the inspection of a small portion of raw powder the CT analysis can deliver information on the powder particle volume, porosity and sphericity. This information delivers insight into the condition of the powder and the powder production and recycling process.

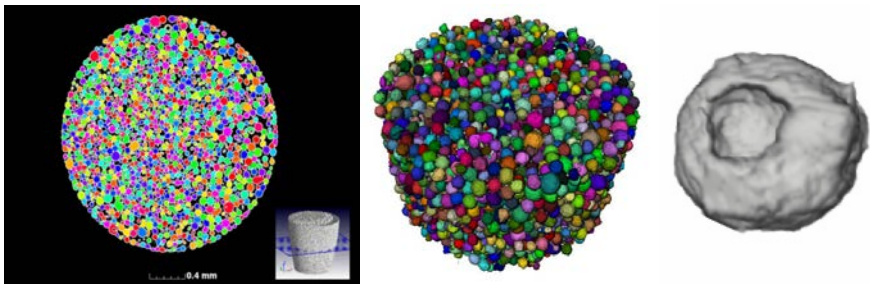


Figure 5: Powder particle volume analysis for a metal powder.

Another very interesting application is the CT inspection of test cubes for the parameter development. At the moment the users have to make a lot of effort in developing the right printing parameters and materials for their products. For this development the user is printing hundreds of test cubes with variances in printing parameters to find the optimum parameter setting. In the following analysis this cubes are often inspected with standard metallographic analyses like microscopic analysis of micro sections or density measurements. These analyses can be done much faster with the CT scanning of such test cubes. This procedure is not only much faster but also gives more information from every single cube over the complete volume not only the single micro section.

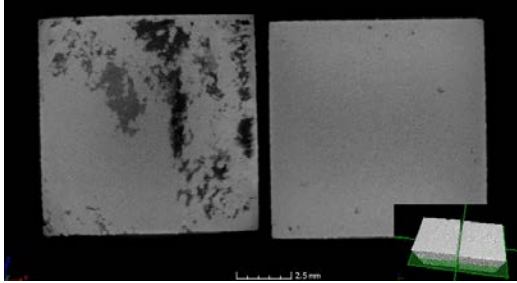


Figure 6: CT results for different test cubes for a printing parameter study.

4. CT METROLOGY

With the right system configuration CT is a technology to do highly precise and repeatable measurements for geometrical features. Especially for additive manufactured parts with their complex internal features like cooling channels, bionic and lattice structures it is crucial to measure internally.

In this example a bionic optimized helicopter bell crank with a lot of free form surfaces is shown is shown with different types of measurements.

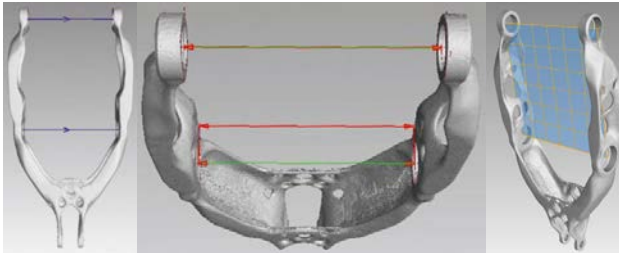


Figure 7: CT metrology for an optimized 3d printed helicopter bell crank.

5. CT AS A TOOL FOR PROCESS OPTIMIZATION

During the presentation different examples how to use an industrial CT scanner as a tool for process optimization for the additive manufacturing production process will be shown. With all the previously mentioned analyses reaching from the raw powder over the process parameter test cubes and the inspection of the final part the industrial x-ray and CT is a powerful tool to get more insights into the additive manufacturing production process and gives opportunities to improve this process regarding quality and production time.

CT as a tool for process optimization



CT is a tool for quality assurance
and can be used for **process optimization**

Figure 8: CT as a tool for process optimization.

6. RESULTS

With the presentation of these applications from additive manufacturing and the x-ray and CT inspection it was demonstrated how the performance of a today's x-ray and CT devices, can support the analysis and inspection tasks for quality assurance, metrology and process optimization for additive manufactured samples through different process steps.



POTENTIALS AND LIMITATIONS OF SIMULATION BASED ARTEFACT CORRECTION IN COMPUTED TOMOGRAPHY

Eckart UHLMANN*, Julian POLTE*, Steffen MELNIK*

*Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK,
Production Systems, Pascalstraße 8–9, 10587 Berlin, Germany
Contact e-mail: steffen.melnik@ipk.fraunhofer.de

Abstract

In computed tomography common artefact correction methods generally address one type of artefacts, thus in praxis usually a combination of different methods is used. Without expert knowledge the user of 3D X-ray scanners is frequently over-challenged figuring out what kind of correction method should be used and when. Simulation based artefact correction in contrast is capable of dealing with multiple kinds of artefacts simultaneously. This includes e. g. beam hardening, partial volume artefacts, off-focal radiation and scatter. The simulation based approach uses prior knowledge about the specimen and the X-ray parameters for calculation of artificial projection images. While in medicine the structure of the specimen (patient) is generally unknown, in field of none destructive testing and quality assurance specimens often exists in form of design data. During simulation based artefact correction artificial images are calculated for every measured projection. Aim is the identification and correction of corrupted projection integrals. A common example is scatter correction, where scatter distribution is determined by Monte-Carlo simulation. For correction the scatter is subtracted from measured projection data, resulting in reduced inconsistencies and enhanced signal-to-noise ratio (SNR). Subsequently, the corrected image data is used for 3D reconstruction. Although simulation based artefact correction is capable of enhancing 3D image quality, physically correct simulation of projection data can be challenging in terms of accuracy and runtime. Especially when the simulation includes a large variety of artefacts. The aim of this paper is to show the potentials and limitations of simulation based artefact correction algorithms and to discuss the need for full Monte-Carlo method. Furthermore, the requirements for optimal simulation results are determined.

Key words: Artefact Correction, Monte-Carlo-Simulation, Computed Tomography

1 Introduction

In computed tomography (CT), inconsistencies in measured projection images P lead to artefacts in 3D image reconstruction that can be recognized as brightness curves as well as light and dark stripes on high-contrast edges. With the emergence of the first CTs, procedures have been developed to correct artefacts. Most approaches address one specific type of artefacts. For example, linearization techniques [HER79,

KAS05, KAC06] as well as iterative reconstruction techniques [MED83, WAN96, OEH07, PAR16] address beam hardening artefacts while scatter kernel are used for scatter correction [LOV87, SEI88, BAE12]. In GESTEBY [GJE16] a comprehensive overview of different artefacts and the correction methods is given. With advancing computer technology and faster hardware, simulation based correction method becoming more and more popular. The approach allows the prediction and identification of artefacts by physically correct simulation of artificial X-ray images. Disadvantage of the method is the need of prior knowledge about the X-ray imaging setup. In contrast to medical applications, in industrial metrology the parameters are usually well known. Thus, the Information about the specimens can be obtained from construction data.

2 Method

In this work, the simulation based artefact correction approach consists of simulating a polychromatic projection image P^S and an ideal monochromatic projection image P_1^S for each projection image P measured [MA16]. The simulation is based on prior knowledge about specimen, X-ray parameters and projection geometry. The geometry information and the material composition of the specimens are specified by a virtual model. The simulated polychromatic projection images P^S contain the weakened polychromatic intensities I_1 as well as inconsistencies that lead to artefacts in 3D reconstruction. The ideal projection images P_1^S , on the other hand, are free of inconsistencies. The difference image P_Δ of the projection images P and P^S contain deviations from the specimen to the model. To a certain extent, a target/actual comparison takes place. The deviations are set off against the ideal projection images P_1^S , for an artefact-reduced 3D reconstruction. The algorithm follows the approach presented in MELNIK [MEL17a]. The processing steps of the simulation based artefact correction approach can be seen in [figure 1](#). First the virtual model of the specimen is created. Subsequently the registration step is performed, whereby the transformation of the model to the measured projection images P is determined. With the known transformation artificial images are calculated, which are used for image correction. Finally, the corrected images are reconstructed to a volumetric dataset. In the following, the processing steps are described in detail.

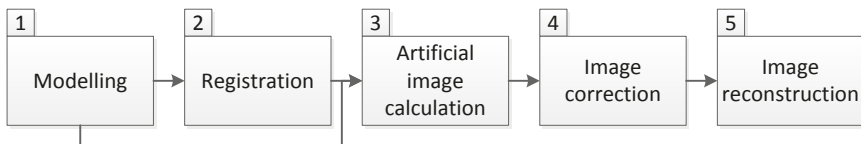


Figure 1: Processing steps of the simulation based artefact correction approach

2.1 Modelling

There are different approaches for modelling virtual specimens. The first method is based on mathematical basic bodies, so-called solids, and allows the modelling of

virtual test bodies with high precision. This means that the determination of radiation lengths η and point-in-solid-tests can be carried out very precisely. Disadvantage of this method is that only models of low complexity can be created. The modelling of foams or porosity for example is nearly impossible and leads to an unmanageable amount of solids. If the modelling is too complex for mathematical description, a voxel-based approach can be used. Thus, the modelling can be done by segmenting a CT scan of a master component. As alternative CAD surface data can be converted into a voxel-model, enabling very complex specimens to be modelled with relatively little effort. In that case the user have to make sure that each material region is assigned a correct material. The accuracy of the model depends on the resolution r of the voxel-model. It should be noted that the memory consumption rises with increasing resolution r . Next to the described methods native surface models can be used without conversion. Surface data is usually presented as triangular nets. For intersection tests or the calculation of the radiation lengths η the beam has to be tested against each triangle. This procedure is very accurate, but takes a lot of computing time t since the tests usually have to be performed for all triangles.

2.2 Registration

For calculation of artificial projection images the position of the model relative to the measured projection images B shall correspond to the specimen. For this purpose usually a registration is performed, whereby the transformation T_{m2i} is determined. Figure 2 shows the base coordinate system with model and one projection image.

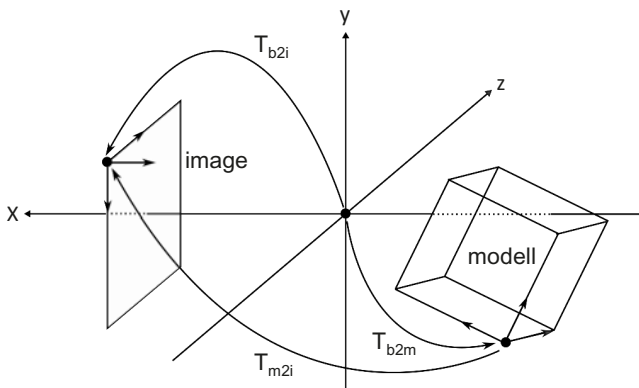


Figure 2: Base coordinate system with model and one projection image

The transformations T_{m2i} , T_{b2m} and T_{b2i} indicate the relative positioning between the components. The model can either be registered to measured X-ray projections P or

to an initial 3D-reconstruction. A combination of both methods is also possible. In this work the model was registered to an initial 3D reconstruction using the ELASTIX software [STE15]. In experiments it was determined that accuracies of subvoxel precision can be archived. Depending on parametrization, for large spatial deviation of specimen and model or in presence of strong artefacts, inaccuracies of several voxels can occur. In case of an inaccurate registration the artificial projection images are not calculated completely congruent to the measured projection images P. This circumstance leads to an error-prone correction, whereby deviations from the model are incorrectly recognized and corrected like artefacts. Therefore the major technical risk of the presented method is the assurance of a precise correspondence between the positional relationship of the virtual model and the specimen. This is especially important in metrology where high accuracy requirements apply. In theory, for robot-guided systems registration is not necessary, since the position of the specimen can be determined via robot kinematics. However, sufficient positioning accuracy of the robot must be ensured. That means the repeat accuracy of the robot should be subvoxel accurate. Otherwise, there will be deviations in the calculation of the projection images. As an alternative to the registration process, the model can be created by segmentation of an initial 3D reconstruction. In this way the transformation T between actual and target corresponds. The greatest source of errors are artefacts in 3D dataset, which make a voxel-accurate segmentation difficult.

2.3 Artificial projection images

For calculation of artificial projection images, two different methods were implemented: MC simulation and forward projection. The MC method is the most common approach for simulating artificial X-ray images. During simulation the propagation of each individual photon is tracked and the interaction with matter is calculated by taking the physical model into account. The intensities I_1 of the projection images approach the expected values with increasing number of simulated photons. This means for a high image quality of artificial projection images a large number of photons must be simulated. Due to low efficiency of image calculation, where only a small part of the photons hits the detector, MC methods are generally computation- and time-intensive [KAL81, BAE12]. In addition, the MC method suffers from quantum noise, as does the actual measurement process. In addition to the MC simulation, a forward projection according to the Lambert-Beer law was implemented [ING88]. The calculation of the intensity I_1 is done according to [equation 1](#), with attenuation coefficient μ and initial intensity I_0 .

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu \eta} \quad \text{Eq. 1}$$

During forward projection the weakened intensity I_1 per pixel is calculated for an infinitesimally thin needle beam. This does not correspond to the physical conditions, since in practice the measured intensities I_1 are averaged over the width of the detector elements. However, in this way the mixing of partial intensities is avoided when calculating ideal projection images P_1^s . Another advantage is that the calculation according to the Lambert-Beer law does not consider scattered radiation. For this reason forward projection is preferable over MC simulation for calculating the ideal X-ray projections P_1^s . The calculation of the polychromatic X-ray images P^s by means of forward projection is only practicable if the possibility exists to simulate scattered radiation in another way or if the proportion of scattered photons is negligibly small. Partial volume artefacts can be simulated by multiple sampling of pixels.

When calculating the corrected image data, mono- and polychromatic images are set off against each other. Due to the energy dependence of the attenuation coefficient μ a contrast adjustment should be performed. Otherwise, it may happen that in reconstructed image data the same material is represented by different grey value distributions. The reason for this is the mixing of mono- and polychromatic intensities I_1 . Since X-ray parameters for simulation of projection images P^s are determined by the measured projection images P , the contrast ratios are adjusted during the simulation of the monochromatic projection images P_1^s . For this purpose, an attenuation coefficient μ_m is searched for each material, which has the greatest agreement with the polychromatic attenuation coefficient μ . Two methods were used to determine the attenuation coefficient μ_m : linear regression and grey value analysis. For contrast adjustment using linear regression, a straight line is sought that minimizes the RMS error ϵ to the projection integrals p of a material over the radiation length η . The procedure is similar to the linearization technique for beam hardening correction. The found straight line can be used to calculate the attenuation coefficient μ_m for the monochromatic projection images P_1^s , which leads to the greatest conformity with the projection integrals p [MEL17b]. The problem with this method are differences in the non-linearity of the projection integrals p as a function of the radiation length η and the photon energy E . Due to this, the regression line yields results of different quality. The non-linearity of the polychromatic attenuation coefficient μ is large, especially with short radiation lengths η and strong absorbers. The linear regression is only suitable for specimens made of one material and provides the best results with relatively uniform radiation lengths η . Alternatively, the contrast can also be adjusted by skilfully selecting the monochromatic photon energy E .

Contrast adjustment using histogram analysis, is based on the assumption that materials in the 3D reconstruction are represented by a grey value distribution. The expected value e is calculated for the grey value range of each material. Due to performance reasons, for each material only a subset of randomly selected voxels are reconstructed. The affiliation of the voxels to a certain material region can be determined based on the model. The expected value e has the greatest conformity to all other grey values of the material region. The smaller the variation of the grey values around the expected value e , the better the contrast adjustment. In 3D reconstruction, the individual attenuation coefficients μ are usually reconstructed physically inaccurate. The reconstructed grey values therefore only indicate the relations between the attenuation coefficients μ . As a result, the projection images P_1^s are adapted to the simulated polychromatic images P^s by linear scaling. A general problem

of contrast adjustment are artefacts in the difference image P_{Δ} . Artefacts are not corrected in image regions in which the specimen deviates from the model. For example, cupping in uncorrected image regions leads to a brightness curve in 3D reconstruction. The adaptation of contrast conditions to a material with a brightness curve is not easily possible and is quickly perceived as visually disturbing.

2.4 Image correction

The image data is corrected according to [equation 2](#). Compared to the other processing steps, the actual correction can be implemented very efficiently. For this purpose, the ideal projection images P_i^S are set off against the difference image P_{Δ} of measured and simulated projections.

$$P_{\text{corrected}} = P - P^S + P_i^S \quad \text{Eq. 2}$$

3 Results

For evaluation, an X-ray scan was performed using the Metrotom 800 from CARL ZEISS INDUSTRIAL METROLOGY GMBH, Oberkochen. A total of 750 projection images P were measured on a 360° circular path. The acceleration voltage was set to $U_B = 90$ kVp with a tube current $I_B = 100$ μ A. For maximum beam hardening artefacts, pre-filtering was dispensed with. Based on simulated projection data an artefact correction for an aluminium step cylinder was performed. In [figure 3](#) two slices of the reconstructed step cylinder are shown. Figure 3a depicts the original slice and figure 3b the corrected slice. For 3D reconstruction the FBP algorithm was used [FEL84]. It can be seen, that the beam hardening artefacts were corrected. Only a few cone beam artefacts can be noticed due to cone beam geometry and the approximative 3D-reconstruction algorithm. Since the cylinder consists of homogeneous material, linear regression was used for the contrast adjustment.

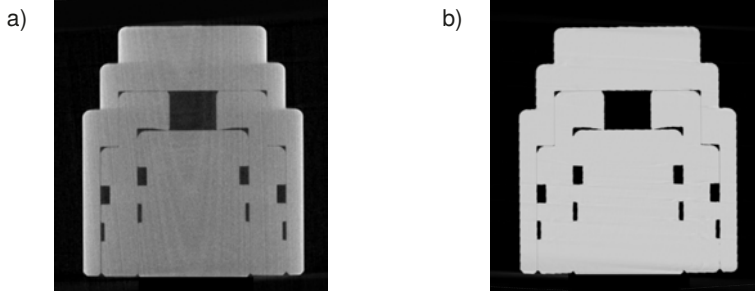


Figure 3: Reconstructed slices of an aluminium step cylinder; a) uncorrected b) corrected

4 Conclusion

In summary it can be stated that the approach presented is capable of simulating a large variety of artefacts occurring in CT. Artefacts can be identified and corrected on basis of artificial X-ray images. Artificial images can be reused once they have been created and the measurement setup remains the same. This enables efficient correction in applications such as inline-CT, where the measurement setup rarely changes. The correction of individual specimens is currently not considered economical due to the long calculation time t . An implementation on the graphics cards may solve this issue. The choice of modelling technique depends on the complexity of the specimen as well as time t and accuracy requirements with the mathematical description being the most accurate. The greatest challenge of the simulation based approach is the subvoxel accurate registration of the virtual model to the specimen.

References

- BAE12 Baer, M.; Kachelriess, M.: Hybrid scatter correction for CT imaging. *Physics in medicine and biology* (2012) 21. S. 6849–6867.
- FEL84 Feldkamp, L. A.; Davis, L. C.; Kress, J. W.: Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical Society of America A* (1984) 6. S. 612.
- GJE16 Gjestebj, L.; Man, B. de; Jin, Y.; Paganetti, H.; Verburg, J.; Giantsoudi, D.; Wang, G.: Metal Artifact Reduction in CT. *IEEE Access* (2016). S. 5826–5849.
- HER79 Herman, G. T.: Correction for beam hardening in computed tomography. *PHYS. MED. BIOL.* (1979) 24. S. 81–106.
- ING88 Ingle, J. D.; Crouch, S. R.: Spectrochemical analysis. Englewood Cliffs NJ u.a.: Prentice-Hall, 1988.
- KAC06 Kachelriess, M.; Sourbelle, K.; Kalender, W. A.: Empirical cupping correction: a first-order raw data pre-correction for cone-beam computed tomography. *Medical physics* (2006) 5. S. 1269–1274.
- KAL81 Kalender, W.: Monte Carlo calculations of X-ray scatter data for diagnostic radiology. *Physics in Medicine & Biology* (1981) 5. S. 835.
- KAS05 Kasperl, S.: Qualitätsverbesserungen durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-Computertomographie. Erlangen, Universität Erlangen–Nürnberg, Dissertation: 2005.
- LOV87 Love, L. A.; Kruger, R. A.: Scatter estimation for a digital radiographic system using convolution filtering. *Medical physics* (1987) 2. S. 178–185.
- MAI16 Maier; Joscha; Leinweber; Carsten; Sawall; Stefan; Stoschus; Henning; Müller; Tobias; Hammer; Michael; Christoph; Ralf; Kachelrieß; Marc:

Simulation-Based Metal Artifact Reduction for Computed Tomography of Multi-Material Components. *iCT Proceedings* (2016). S. 1–12.

- MED83 Medoff, B. P.; Brody, W. R.; Nassi, M.; Macovski, A.: Iterative convolution backprojection algorithms for image reconstruction from limited data. *J. Opt. Soc. Am.* (1983) 11. S. 1493–1500.
- MEL17a Melnik, S.; Soika, K. L.; Uhlmann, E.: Simulated monochromatic images for artefact correction in cone-beam CT. *International journal of computer assisted radiology and surgery* (2017) Suppl 1. S. 199–200.
- MEL17b Melnik, S.; Uhlmann, E.: Parameter optimization for simulation-based artefact correction in computed tomography. *Jahrestagung der BIOMEDIZINISCHEN TECHNIK und Dreiländertagung der MEDIZINISCHEN PHYSIK* (2017) s1. S. 86.
- OEH07 Oehler, M.; Buzug, T. M.: Statistical Image Reconstruction for Inconsistent CT Projection Data. *Methods Inf Med* (2007) 03. S. 261–269.
- PAR16 Park, H. S.; Hwang, D.; Seo, J. K.: Metal Artifact Reduction for Polychromatic X-ray CT Based on a Beam-Hardening Corrector. *IEEE transactions on medical imaging* (2016) 2. S. 480–487.
- SEI88 Seibert, J. A.; Boone, J. M.: X-ray scatter removal by deconvolution. *Medical physics* (1988) 4. S. 567–575.
- STE15 Stefan Klein and Marius Staring: *Elastix, the manual*: 2015. URL: http://elastix.isi.uu.nl/download/elastix_manual_v4.8.pdf. (Access: 07.05.2018).
- WAN96 Wang, G.; Snyder, D. L.; O'Sullivan, J. A.; Vannier, M. W.: Iterative deblurring for CT metal artifact reduction. *IEEE transactions on medical imaging* (1996) 5. S. 657–664.

PŘÍSPĚVKY / PAPERS



NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ ULTRAZVUKEM VE STUDENTSKÝCH PRACÍCH TU V LIBERCI

NON-DESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING IN STUDENTS' WORKS AT TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC

Michal BOHÁČIK¹, Břetislav SKRBEK²

¹Žilinská Univerzita v Žiline,

²Technická univerzita Liberec,

michal.bohacik@fstroj.uniza.sk, bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt:

Přehled diplomových, bakalářských a doktorských prací v toku času 15 předcházejících let v oblasti ultrazvuku. Práce spojující témata, rozvoj poznatků s aplikacemi – Zákaznická témata řešící dílčí výrobní problémy. Shrnutí, závěr, neřešené náměty pro budoucnost – nedostatek studentů technických oborů – kombinované doktorské studium – zahraniční studenti.

Abstract:

Survey of master's, bachelor's and doctoral thesis during 30 years in ultrasound field. These works are united with topics, knowledge development with applications. Topics from customers solving partial manufacturing problems. Resume, conclusions, still unsolved topics for future – lack of students of technical disciplines – combined doctoral study – students from abroad.

1. Úvod

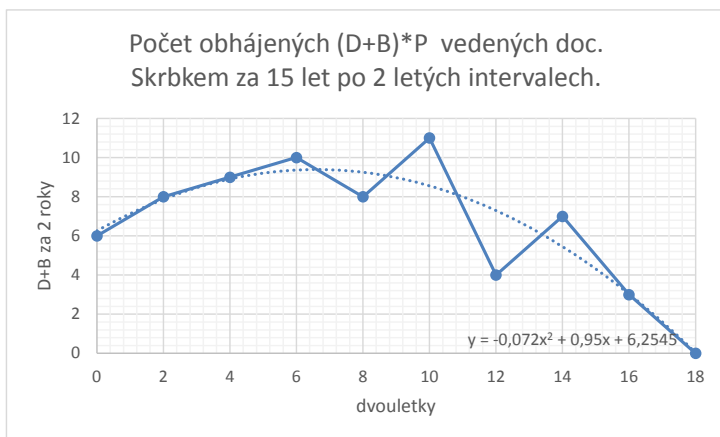
Příspěvek předkládá v tematických okruzích teze a některé zajímavé výsledky 22 diplomových a bakalářských prací v oblasti využití ultrazvuku. Práce vznikly dle zadání projektů, firem a specializace pracoviště katedry materiálu SF TU v Liberci.

Počtem tvoří zhruba třetinu všech obhájených prací vedených doc. Skrbkem.

Nelichotivý vývoj četnosti D+B prací obhájených s ubíhajícími léty L ukazuje obr. 1. Výstižně jej charakterizuje pro interval let 2000 až 2018 polynommická křivka (1). Dle grafu obr. 1. například v letech 2000 a 2001 bylo dohromady obhájeno šest studentských závěrečných prací a v letech 2010 a 11 prací 11.

$$D+B = 0,95*L - 0,072*L^2 + 6,25 \quad [1] \quad (1)$$

Hlavním výzkumným okruhem na katedře materiálu je nedestruktivní strukturoskopie, především slévarenských slitin. Proto se jí zabývá 13 prací; z toho 7 řeší vlastnosti litiny. Klasická defektoskopie je námětem 7 prací, strukturní porózitou se zabývají 2 práce.



Obr. 1. Počet prací obhajovaných v r. 2000 až 2018.

2. Ultrazvuková strukturoskopie

Diplomová práce (1) vznikla zadáním ATG a.s. Praha s konzultanty: Ing. Jiří Blahušek, Ing. Petr Tichý. Na bohaté škále vzorků ocelí provedena měření útlumu a rychlosti zvuku při různých frekvencích.

Provedenými experimenty bylo zjištěno:

UT metoda

- žíhací struktury mají vyšší hodnotu útlumu než kalící a zušlechtněné
- mezi zušlechtněnými vzorky není významný rozdíl v hodnotě útlumu
- s rostoucí velikostí zrna roste hodnota útlumu
- rozdíl v hodnotě útlumu žíhaných a kalených nebo zušlechtněných vzorků roste s frekvencí
- měřením rychlosti zvuku nebyly zjištěny výraznější změny
- nebyla zjištěna jednoznačná závislost mezi hodnotami pevnosti a koeficientem útlumu a totéž platí o naměřených hodnotách tvrdosti

ET metoda

- je možné odlišit nezpracovaný vzorek (původní stav) od tepelně zpracovaných vzorků
- spolehlivě lze odlišit žíhací struktury od kalících nebo zušlechtněných
- velikost zrna nemá zřetelnější vliv na odezvu materiálu

RTG metoda

- tato metoda neprokázala možnost rozlišení různě tepelně zpracovaných vzorků.

Povrchové kalení ocelí bylo námětem prací (12, 16) na popud firmy TEDOM a ŠKODA-AUTO a.s. Ondřeje Růžičky. Závěry bakalářské práce:

1. Hloubku zakalení vačkové hřídele nákladního automobilu TEDOM je nutné, dle rozboru struktury, měřit ultrazvukovou metodou. Měřicí sestava USLT 2000 vyžaduje dvojitou sondu s frekvencí vyšší než 10 MHz.
2. Tvrdost zakalené vrstvy vačkové hřídele měřené přístrojem MIC 10 se sondou MIC-205L je možné měřit pouze na stykových plochách. Tato měřicí sestava je náchylná na kolmost.

3. Hloubku zakalení klikové hřídele automobilu ŠKODA z LKG je nutné měřit ultrazvukovou metodou. Použitá sestava USLT 2000 vyžaduje také dvojitou sondu s frekvencí vyšší než 10 MHz.
4. Sondu nutno vést velmi přesně s konstantním náklonem k povrchu, aby se získal odraz od zrn přechodové oblasti.

V rámci magisterské práce byl navržen polohovací přípravek v imerzní vaně.

Poznatky:

- a) Při měření nedestruktivními metodami se zkonstruovaný polohovací přípravek ukázal jako plně funkční a pro laboratorní zkoušení zcela dostačující. Je v něm možno přesně upnout a polohovat měřicí snímače těchto metod vůči zkoumané strojní součásti – vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM.
- b) Běžně užívaná destruktivní metoda určování topografie zakalených vrstev na vačkové hřídeli rozvodu motoru TEDOM je dle provedeného výzkumu zcela funkční, nicméně je také velmi časově náročná.
- c) Dle metalografického rozboru struktury vačkové hřídele rozvodu motoru TEDOM je pro topografii zakalených vrstev vhodné využít ultrazvukovou metodu měření.
- d) Pro další vývoj je nutno použít sondu o frekvenci až 25 MHz a průměru menším než 5 mm. Také bude třeba opatřit ultrazvukový přístroj s frekvenčním rozsahem přijímače až do 25 MHz.
- e) Pro odstranění silného ruchu provázejícího měření je doporučeno pokusit se aplikovat analogově-digitální převodník signálu a dále také použít Wienerův filtr.

Úkolem diplomové práce (2) bylo provést ultrazvukovou diagnostiku vytvrzení slévárenské Al slitiny KS 1275 na vzorcích pístů, které byly podrobeny různým stupňům tepelného zpracování – vytvrzení. Zadání firmou ŠKODA MOTORY Jablonec konzultoval ing. Karel Šelepá.

Použity frekvence sond 2 až 12 MHz. Hodnoty útlumů vypočítaných pro konečný stav měřených vzorků se pohybují přibližně v rozmezí od 0,3 do 0,7 dB/mm a nepředkládají žádné přesvědčující závislosti ani ve vztahu k naměřeným tvrdostem ani k teplotám tepelného zpracování.

Nejlepší výsledky dosáhly frekvence okolo 12 MHz, přičemž frekvence pod 5 MHz už velice zkreslují výsledné hodnoty. Pro stanovení ideální frekvence by bylo vhodné provést další měření a vzájemně je porovnat.

Pro další aplikace ultrazvukové diagnostiky odrazovou impulsovou metodou, doporučuje diplomant zněnu průběhu zkoušky, která by se měla zaměřit na sledování vytvrditelné slévárenské slitiny ve dvou krocích. Prvním krokem by bylo sledování slitiny v okamžiku bezprostředně po zakalení z teploty rozpouštěcího žíhání, a druhým krokem zkoušky by bylo sledování již vytvrzené slitiny.

Výsledky NDT struktury netradičních slitin v (22) prokazují použitelnost především ET a MT. Změny akustických vlastností souvisely věrohodně se změnami struktury tepelným zpracováním hlavně u hliníkových bronzů.

2.1. Vlastnosti litin

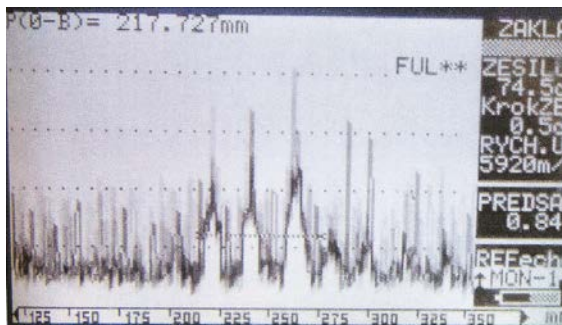
Práce věnované litinám (převážně odlitkům s lupínkovým grafitem) technicky navazují. Základní výpočtové vztahy a metodiku stanovení konstant pro měření modulu pružnosti E_0 (základní parametr pro rozlišení jakosti grafitických litin) přímo na odlitcích sléváren, které o UT diagnostiku svých produktů projevíly zájem, předkládá (3).

Tab. 1. Průměrné hodnoty jednotlivých veličin litin produkovaných slévárnami.

Slévárna	μ	ρ [g/cm ³]	K	HB
Moravské Železárny Olomouc	0,256	7,2709	458,06	226
VOS Písek	0,331	7,1914	410,72	195
FERREX Liberec	0,304	7,1134	427,71	232
AGS Jičín	0,342	7,0687	398,82	227
ČKD Hradec Králové - Plotiště	0,285	6,84	430,0	209

$$E_0 = (L/L_u * K) \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

L...skutečná tloušťka stěny; L_u...ultrazvukem (kalibrovaným na ocel) měřená tloušťka stěny.



Obr. 2.

Experimentálním materiálem byly standardní zkušební tyče d 30 × 210 mm. Použity přímé sondy 0,5 až 2,25 MHz. Využito transformace podélné vlny na příčnou odrazem o válcové stěny tyče. Projeví se na zobrazení A násobnými echy za 1. koncovým echem – obr. 2.

Stejný experimentální materiál a metoda využita v pracích (9, 11) k určení vlivu tepelného zpracování a legování Cu a Si na hodnoty E₀ litin.

Měření změn akustických vlastností litin po nerovnovázném TZ ukázalo většinou významný pokles v rychlosti šíření podélných i příčných vln. Hodnoty se také lišily dle toho, zda byla litina s LLG nebo LKG. Proto je nutno při ultrazvukové strukturoscopii dbát na odlišení TZ a litých vzorků.

Na základě měření nevelkého množství vzorků nelze dělat jednoznačné závěry, ale i přesto lze tvrdit, že modul pružnosti je jen minimálně ovlivňován legurami Si či Cu.

O rozsah použití levného českého UZ tloušťkoměru DIO570 k měření na litinách se pokusila bakalářská práce (7). Se sondou SEB2 a jejími ekvivalenty bylo dosaženo nejširšího rozsahu použití – tab. 2.

Tab. 2.

SONDA	LITINA	Jakost EN	Rozsah tlouštěk [mm]
SEB 2	LLG	GJL 200	5 až 120
	LKG	GJS 500 – 6	6 až 200
PQ2/10-2C	LLG	GJL 200	4 až 8
	LKG	GJS 500 – 6	4 až 15
PQ2/10-4C	LLG	GJL 200	Není vhodná
	LKG	GJS 500 – 6	4 až 10

Stejný student David Bílek po dvou letech se ve své magisterské práci (14) vývojem matematických modelů podílel na realizaci patentovaného kombinovaného strukturoskopu TELIT v rámci projektu MPO pro slévárnu SKS Krnov. TELIT sestává právě z DIO570 (L_u), posuvného měřítka (L) a magnetického tvrdoměru DOMENA B3 (HBM). Z měřených hodnot L_u , L a HB TELIT řídícím PC počítá pevnost R_m , E_o , HB a podíly volitelných strukturních složek. V práci doporučeny nevhodnější tvary plochých vzorků pro simulaci metalurgických poměrů ve stěnách odlitků.



Obr. 3. Strukturoskop TELIT 1.

Rozšíření NDT mechanických vlastností a tvaru grafitu přesných litinových odlitků pro potřeby TK slévárny IEG Jihlava obsahuje (18). Doporučuje vytvořit matematické modely pro výpočet R_m , HB, E_o a % GVI na míru vždy pro určitý druh odlitku. Univerzální modely se neosvědčily.

Rozložení hodnot E_o , R_m , HB v silných (L nad 40mm) stěnách odlitků měřila prostředky NDT pro firmu TEDOM a.s. práce (20). Jeden z mnoha poznatků: Např. u odlitku silného 60–80 mm jakosti ČSN 42 2430 (setrvačnik motoru) lze očekávat v tepelné ose litinu jen trochu méně pevnou (v tomto případě o 13 MPa), zato v povrchové partii je litina více jak o třídu jakostnější (42 2435). Konkrétně o 64 MPa. Tento pás kvalitní litiny je více jak 15 mm široký, je škoda ztrácet tento kvalitní pás zbytečným obráběním. Průběhy mechanických vlastností výrazně zmírňuje legování litiny, například mědí.

3. Defektoskopie

Cílem diplomové práce (4) pro ATG Praha bylo navržení funkce a činnosti ostříku při aplikaci průchodové ultrazvukové metody. Navržený ostřík měl sloužit k rychlé a spolehlivé kontrole dílů z kompozitních materiálů používaných v letecké technice.

Navržený ostřík je vhodný pro kontrolu sklolaminátových či uhlíkových kompozitů, včetně kompozitů s voštinovým jádrem. U vzorků s voštinovým jádrem byly detekovány všechny vady mající velikost větší než průměr použitého vodního sloupce. U vzorků bez voštinového jádra byly detekovány i vady mající rozměry menší než průměr použitého vodního sloupce.

Navržený ostřík není vhodný pro kontrolu kompozitu s pěnovým jádrem, neboť používaná pěna je velmi porézní materiál a není ultrazvukem prozvučitelná. Plánované užití automatizovaného ultrazvukového manipulátoru by mělo odstranit či omezit většinu nepříznivých vlivů, které se projevily při experimentálním ověřování funkčnosti navrženého ostříku. Automatizovaný manipulátor však nebyl v době vzniku této diplomové práce k dispozici.

Diplomová práce (5) vedená rovněž v ATG se zabývá nahrazením neekonomické destruktivní kontroly plastových vík motorů vhodnou nedestruktivní metodou. Konkrétně se jedná o pevnostní kontrolu zalisovaného spoje: mosazná závitová vložka x plast (polyamid PA 66).

Přes v práci zmiňované komplikace se zvolená impulsní odrazová ultrazvuková metoda jeví jako vhodná k detekci zaplnění drážky mosazné závitové vložky plastem a tím i k určení pevnosti sledovaného spoje. Její využití v praxi je reálné a z finančního hlediska přijatelné (maximální profit při nahrazení destruktivního ověřování nedestruktivním). Navrhované řešení lze na základě dosud provedených operací pokládat za realizovatelné, jsou však nutné ještě další vývojové a ověřovací práce.

Na základě provedeného experimentu (6), který sloužil vědeckému týmu pracovníků KMT byl pravděpodobně první svého druhu u aluminidů, je možné konstatovat:

- Slitiny FeAl 15 až 40 vykazují vysoký útlum, který je o jeden řád vyšší, než mají oceli a až o dva řády vyšší, než má Al (při srovnatelné frekvenci ultrazvukového vlnění).
- Nejvhodnější, alespoň pro orientační zkoušení těchto materiálů, jsou sondy s jmenovitou frekvencí 2 MHz, při zkoušení vzorků menších rozměrů nejlépe dvojité. Pro vzorky větších rozměrů by měly ještě lépe vyhovovat sondy o jmenovité frekvenci 1 MHz.
- Rychlost zvuku (rychlost šíření podélných ultrazvukových vln) u materiálu typu Pyroferal je zhruba o 10 % nižší, než je rychlost zvuku u oceli.
- Chování náhradních vad zkoušených u materiálu typu Pyroferal je možné označit za standardní. Úměrně rostoucí velikosti vady roste i vadové echo.
- Ještě lepších výsledků by bylo dosaženo při použití vzorků větších rozměrů (např. možnost sestavení DAC křivky). Vzorky určené pro DAC a strukturoskopii by měly obsahovat co možná nejmenší množství reálných vad.
- Vzhledem k neexistenci podkladů pro ultrazvukovou kontrolu aluminidů železa, byl celý experiment koncipován spíše jako seznámení se s tím, jak se tyto materiály chovají při ultrazvukovém zkoušení. Výsledky zkoušení je tedy možno chápat spíše jako orientační.
- Získané informace by měly pomoci při případném budoucím seriózním zájmu o ultrazvukovou kontrolu výrobků z daných materiálů. Pomoci mohou také pracovníkům vývoje materiálů na bázi Fe₃Al např. při kontrole vzorků určených k mechanickým zkouškám, kdy je třeba odhalit vady, které by mohly výsledky těchto zkoušek znehodnotit.

Určení optimální nedestruktivní ultrazvukové metody, s jejíž pomocí mají být spolehlivě odhaleny nespojitosti na rozhraní litinová vložka – Al – blok motoru ŠKODA-AUTO s konzultantem Ing. Richardem Regazzo si kladla za cíl (8). Vložky pro větší plochu kontaktu z blokem jsou drážkované. Detekována výška opakovaného echa přechodové zóny.

V závěru praktické části (8) je představeno již hotové zařízení s označením K-Scan dodávané firmou Krautkramer a využívajícím pulsní odrazovou uz. metodu v imerzním prostředí zaměřené právě na zadanou kontrolu. Toto zařízení je podkladem pro realizaci automatizovaného měřicího stanoviště. Bloky motoru se zakládaly do vany s vodou nebo olejem. Poté rotující sonda snímající plochu válce dává informace přes defektoskop počítači, který by vyhodnocuje kvalitu zalití a spojení.

Diplomová práce (10) se zabývá UT vnitřní jakosti válcových katod pro PVD povlakování v zařízeních SHM Šumperk. Praktická část se zabývá zjišťováním a zkoumáním vad, tj. jaká je velikost vady, její typ, četnost vad, a také vztahem mezi náhradní a reálnou vadou. Zkoušky rotující katody v imerzním prostředí s vypočteným náklonem imerzní přímé sondy 10 MHz.

Opakovaná detekce nepřipustných dutin v litých katodách vedl k realizaci dodávek tvářených válcových katod.

Ultrazvukové zkoušky prováděné defektoskopem omniScanMX (15) s využitím techniky Phased Array - sfázované soustavy (PA) odhalily nespojitosti materiálu v kovových (ocel, litina, hliník atd.) a nekovových (polymery, např. polyamid) objektech. Typy zobrazení, které máme k dispozici během měřicích testů, názorně prezentují lokalizaci a předpokládanou velikost vady. Cílem (15) bylo otestování zapůjčeného (OLYMPUS) ultrazvukového defektoskopu OmniScanMX a vypracování návodu k obsluze pro laboratorní cvičení předmětu DPD (defektoskopie a provozní diagnostika).

Bakalářská práce (19) pojednává o nedestruktivní diagnostice litých hornin (čedič a korund - produkty firmy EUTIT s.r.o) převážně ultrazvukovou metodou. výrobou a v praktické části jsou výsledky měření ultrazvukovým přístrojem DIO 562 při použití 1MHz a 4MHz sondy.

Výrobky jsou prozvučitelné. Doporučena kontrola ve vodní lázni. Trubka celá ponořená do vody se bude měřit přes vodní akustickou vazbu a bude se otáčet v rolnách.

Na vzorku čedičové cihly byl vytvořen tvar DAC křivky pro rutinní kontrolu čediče na vnitřní vady.

Diplomová práce (21) je zaměřena na stanovení tloušťky stěn dutých lopatek plynových turbín ze žárovečných Ni a Co slitin litých v 1. Brněnské strojárně Velká Bíteš. V případě dodaných vzorků turbínových lopatek se však jedná pouze o tzv. superslitiny Ni, konkrétně Inconel 713 LC u lopatek 02 a 05 a MAR-M 247 v případě lopatky T40. Dále se diplomová práce zabývá porovnáním výsledků několika metod (UT, ET, MT), přičemž má práce poskytnout náhled jakým směrem vést případný další výzkum měření tlouštěk stěn dutých lopatek.

Měření probíhalo pomocí čtyř přístrojů a to: Dio 562, Nortec 1000, NDT1 K5 a Domena B3.

Experiment diplomové práce prokázal možnost měření tlouštěk turbínových lopatek všemi metodami, avšak s rozdílnou přesností a použitelností. Jako metoda s nejlepšími výsledky se jeví měření s tloušťkoměrem NDT1 K5. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití litinových špon jako pomocného feromagnetického média. V této kombinaci přístroje a média bylo dosaženo průměru odchylek jednotlivých měření od 3,85 do 6,54 %, absolutní odchylky vycházejí od 0,052 do 0,115 mm a směrodatné odchylky od 4,66 do 9,35 %.

3.1. Disperzní vrstvy - porózita

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním porózity a tloušťky naspěkané bronzové vrstvy na ložiskových pánvích prostřednictvím nedestruktivních metod testování. Práce vyhodnocuje vhodnost a spolehlivost použitých nedestruktivních metod k odhalování míry porózity.

Bakalářská práce (13) se zabývá zkoumáním porózity a tloušťky (0,2 až 2 mm) naspěkané bronzové vrstvy na ložiskových pánvích motorů TEDOM prostřednictvím nedestruktivních metod testování. Práce vyhodnocuje vhodnost a spolehlivost použitých nedestruktivních metod k odhalování míry porózity.

Hodnoty předpokládané (spočítané) pórovitosti od té skutečné liší v průměru pro akustický útlum o 1,158 % a pro rychlost zvuku v průměru o 1,136 %. Akustické vlastnosti velmi dobře korelují s pórovitostí vrstev.

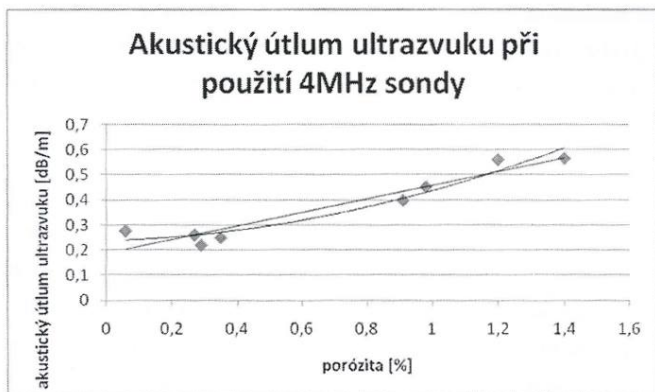
Cílem práce (17) zadané slévárnami lití Al slitin pod tlakem bylo pomocí nedestruktivní metody ultrazvukové defektoskopie určit vztah porózity a akustického útlumu u Al slitin. K experimentu byly odlity hranoly s konstantní vnitřní pórovitostí katedrou slévárenství na polské Politechnice Czestochowské.

Defektoskop Dio 562 pracoval s postupně připojovanými dvojíty sondami o frekvenci 1, 2, 4 a 10 MHz.

Tab. 3. Střední hodnoty výsledků, kontaktní sonda 10MHz, 6mm, měření na bronzových vrstvách ložisek.

zjištěná pórovitost [%]	fiktivní útlum ultrazvuku [dB/m]	rychlost pronikání ultrazvuku bronzovou vrstvou [m/s]	elektrická vodivost bronzové vrstvy [S/m]
3,0	229,5	5 377	36308000
3,4	281,5	5 954	32198000
4,0	300,8	4 405	31513000
12	483,2	3 923	23977000
19	1279,5	3 558	2740000

Nejtěsněji charakterizuje perezitu Al odlitků měření útlumu při 4 MHz – obr. 4.



Obr. 4. Porózita slitiny Al měřená útlumem UZ vln.

Kontrola porózity tlakových odlitků akustickým útlumem dle zjištěného matematického modelu lze aplikovat při automatické kontrole hromadně odlévaných odlitků.

4. Závěr

Úkoly pro další práce:

Měřit povrchově kalené vrstvy hřídelů na vyvinutém přípravku se sondami min. 25 MHz s využitím Wienerova filtru.

Měření vytvrditelných slitin ve dvou krocích (hodnotit rozdíl vlastností obou stavů): Ihned po zakalení z teploty rozpouštěcího žíhání a po vystárnutí (vytvrzení).

Pro přesnější určení změn akustických vlastností tepelným zpracováním litin by bylo vhodné provést měření na více vzorcích stejného složení.

Zohlednění vlivu pozice na stromečku na mechanické vlastnosti přesně litých litinových odlitků

Experimenty s aluminidy zaměřit na použití některých speciálních sond, případně i na jiné metody zkoušení ultrazvukem.

Za finanční podpory firmy EUTIT s.r.o. bude možno vyvinout kontrolní úlohy k provozní kontrole výrobků EUTIT s.r.o.

Před případnou konkrétní aplikací metod měření tloušťky stěn turbínových lopatek v 1. BS bude nezbytný aplikační vývoj, který by stanovil přesné podmínky měření, zajistil by přesné polohování sondy a sestavil korekční křivky.

Kritický nedostatek studentů prezenčního studia se částečně nahrazuje získáváním studentů kombinovaného studia (dvouleté studium bakalářů na inženýry, doktorská studia).

This publication was written at the Technical University of Liberec as part of the project "The study and evaluation of the material's structure and properties" with the support of the Specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2018.

Literatura – studentské diplomové a bakalářské práce katedry materiálu (KMT) Technické univerzity v Liberci:

- [1] Vokurka, Lukáš. VYUŽITÍ ULTRAZVUKU PRO HODNOCENÍ ZMĚN VYVOLANÝCH TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM OCELI. KMT170, 2003
- [2] Kužel, Martin. ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA VYTVRZENÍ SLÉVÁRENSKÉ AI SLITINY. KMT 152, 2003.
- [3] Šimáček, Milan. FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LITIN S LUPÍNKOVÝM GRAFITEM RŮZNÝCH SLÉVÁREN. KMT B 93, 2004.
- [4] Silný, Tomáš. ULTRAZVUKOVÁ KONTROLA KOMPOZITNÍCH STRUKTUR LETECKÉ TECHNIKY. KMT 173, 2004.
- [5] Fridrich, Martin. ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA SPOJE KOVOVÝ INSERT PLAST NA MOTOROVÉM VÍKU. KMT-B 85, 2004.
- [6] Vik, Milan. ULTRAZVUKOVÁ DEFECTOSKOPIE ALUMINIDU ŽELEZA. KMT 189, 2004.
- [7] Bílek, David. VÝZKUM TLOUŠŤKOMERU DIO 570 V ULTRAZVUKOVÉ STRUKTUROSKOPII LITIN. KMT-B 113, 2006.
- [8] Klinger, Jan. ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA SPOJE LITINOVÁ VLOŽKA ALBLOK MOTORU. KMT B-115, 2006.
- [9] Pacola, Milan. ZMĚNY AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ LITIN NEROVNOVÁŽNÝM TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM. KMT B116, 2007.
- [10] Kovář, Ondřej. INNER QUALITY OF CATHODES FOR PVD COATING. KMT 225, 2007.
- [11] Subotová, Barbora. VLIV Cu, Si V LITINĚ NA HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI. KMT 273, 2008
- [12] Růžička, Ondřej. NEDESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ HLOUBKY A TVRDOSTI POVRCHOVÉ KALENÝCH VRSTEV. KMT B 138, 2007.
- [13] Švec, Martin. VÝZKUM PORÓZITY KOVOVÝCH SOUSTAV V PRÁŠKOVÉ METALURGII METODAMI NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ. KMT B 141, 2009.
- [14] Bílek, David. PARAMETRIZACE ZAŘÍZENÍ TELIT. KMT 248, 2009. KMT 248, 2009.
- [15] Kornas, Łukasz. TESTING AND ADAPTATION OF OMNISCAN MX DEFECTOSCOPE IN NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR APPLICATIONS IN PRACTICE. KMT 256
- [16] Růžička, Ondřej. PŘÍPRAVEK NA TOPOGRAFII KALENÝCH A TVRZENÝCH VRSTEV NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI. KMT 271, 2011.
- [17] Zdeněk, Cejnar. VZTAH POREZITY K AKUSTICKÉMU ÚTLUMU AI a Mg SLITIN. KMT B 165, 2011.
- [18] Suchomel, Jiří. STRUCTURE DISTRIBUTION IN PRECISE CAST IRON MOULDED ON MELTABLE MODEL. KMT B 209, 2013.

- [19] Slezák, Jan. THE STUDY OF ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF CAST ROCK PRODUCTS' HOMOGENEITY. KMT, studijní program B2301, 2014.
- [20] Benešová, Jana. THE LAYOUT OF MECHANICAL PROPERTIES IN SPECIFIC THIC-WALKED CAST-IRON CASTINGS. KMT, studijní program B2301, 2014.
- [21] Vaněk, David. NEDESTRUKTIVNÍ TOPOGRAFIE STĚN DUTÝCH LOPATEK PLYNOVÝCH TURBÍN. KMT, studijní program N2301, 2015.
- [22] Toth, M. AKUSTICKÁ A MAGNETICKÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE ALUMINIDŮ, SLITIN MĚDI A KOBALTU. KMT, studijní program N2301, 2014.



POUŽITIE INFRAČERVENEJ KAMERY PRE NDT USE OF THE INFRARED CAMERA FOR NDT

Vladimír DEKÝŠ¹, Ondrej ŠTALMACH¹, Alžbeta SAPIETOVÁ¹, Milan SAPIETA¹

¹Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovensko

Abstrakt.

Príspevok sa zaoberá skúsenosťami získanými s používaním infračervenej kamery FLIR SC7500 pri nedeštruktívnych skúškach na Katedre aplikovanej mechaniky Strojníckej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline. Predmetom záujmu je detekcia trhlin v kovových a kompozitných materiáloch. Pri takomto type meraní je meraný objekt budený zdrojom ultrazvukovým, optickým, alebo iným zdrojom budenia a infračervená kamera slúži ako detektor, ktorý sníma vyžiarenú energiu z povrchu meraného objektu. Získaná odozva z budeného objektu je spracovaná metódou lock-in. Okrem problematiky detekcie trhlin je taktiež možné s uvedeným typom detektoru určiť deformácie analyzovaného objektu alebo vlastné frekvencie a tvary kmitov.

Keywords: NDT, lock – In, aktívna termografia

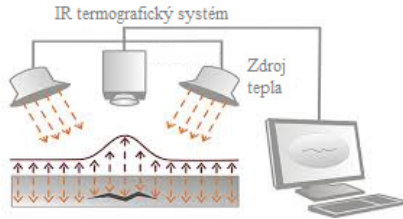
Abstract:

The paper deals with the experience gained with the use of the FLIR SC7500 infrared camera in non-destructive tests at the Department of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanical Engineering of Žilinská univerzita in Žilina. The subject of interest is the detection of cracks in metallic and composite materials. In this type of measurement, the measured object is excited by a source of an ultrasonic, optical, or the other source of excitation, and an infrared camera serves as a detector that receive the radiated energy from the surface of the measured object. The signal received from the excited object is processed by the lock-in method. In addition to crack detection, it is also possible with this type of detector to determine the deformation of the object or its natural frequencies and modal shapes.

Keywords: NDT, lock – In, termography

1 Aktívna termografia

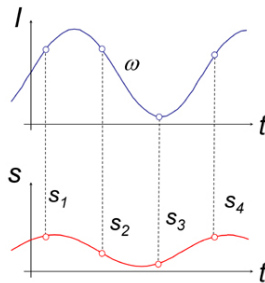
Aktívna termografia je väčšinou založená na riadení stimulácie tepelnej vlny v telese, následnom snímaní rozloženia teplôt IR termografickým systémom a analýzou signálu. Defekty v podpovrchovej vrstve sa prejavujú rozdielmi v rozložení povrchových teplôt. Zdrojom tepla môže byť halogénová lampa, pulzný laser, xenónová výbojka alebo teplý pudiacim vzduch. Pri známych vlastnostiach materiálu je možné z tepelného obrazu vyhodnotiť rozsah a hĺbku podpovrchových porúch teoreticky alebo porovnaním s etalónom. [1]



Obr. 1. Schéma systému aktívnej termografie

2 Lock – in metóda

Lock – in termografia je založená na modulácii riadeného tepelného toku dopadajúceho na diagnostikovaný objekt. Tepelná (obvykle sínusová) vlna preniká dovnútra telesa a v mieste zmeny prostredia, t.j. anomálie/odchýlky v štruktúre materiálu testovaného objektu odráža sa späť k povrchu. Na povrchu objektu dochádza k interferencii objektom vyžrávaného a na objekt dopadajúceho toku žiarenia (tepelného), keď potom termogramy snímané termografickou kamerou sú modifikované tepelnou vlnou emitovanou zvnútra diagnostikovaného objektu. Rozborom signálu z každého pixelu detektora kamery je možné stanoviť oddelene amplitúdu aj fázový posuv odozvy. Vyhodnotenie amplitúdy a fázy obrazového signálu je možné doceliť rôznymi spôsobmi, najčastejšie sa používa spracovanie štyroch o 90° fázovo posunutých obrazov. [1]



Obr. 2. Princíp vyhodnotenia amplitúdy a fázy, pričom I je budiaca vlna, S je žiarenie dopadajúce na detektor.

3 Vybrané merania pomocou NDT na ZU

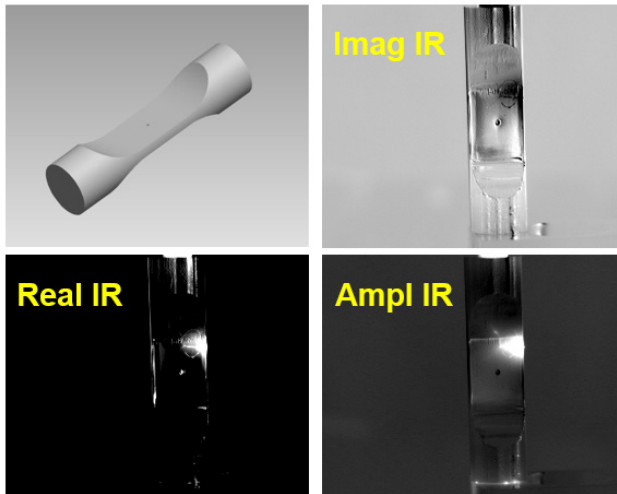
V nasledujúcich kapitolách sú popísané niektoré z meraní, pomocou aktívnej termografie, ktoré sa uskutočnili na katedre aplikovanej mechaniky Žilinskej univerzity v Žiline.



Obr. 3. Ultrazvukový systém budenia a termokamera FLIR SC7500

3.1 Vzorka pre únavové skúšky

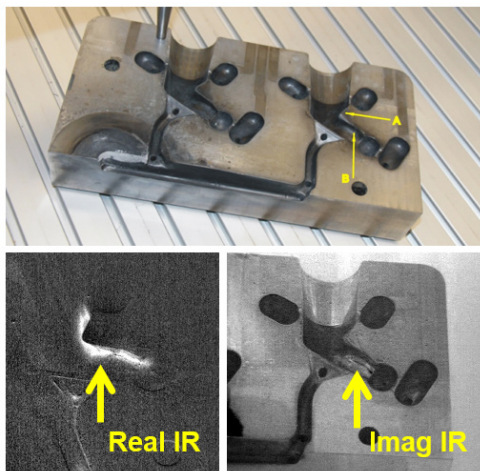
V spolupráci s Katedrou materiálového inžinierstva sa vykonávalo nedeštruktívne meranie vzorky po únavovej skúške, na ktorej sa nachádzala únavová trhlinka. Po spracovaní nameraných dát, metódou Lock – in, dostávame päť typov termogramov, ktoré sú reprezentované ako obraz: komplexný, imaginárny, reálny, amplitúdový a fázový. Každý z týchto termogramov sa počíta odlišne, pričom pri každom meraní môže lepšie zobrazovať danú anomáliu iný z týchto termogramov. Na Obr. 4 môžeme vidieť ako sa v trhline po excitácii ultrazvukovým systémom generuje teplo a taktiež môžeme vidieť termogramy, amplitúdový, imaginárny a reálny, ktoré najlepšie zobrazovali danú trhlinku. Na uvedených snímkach je prezentovaná detekcia existujúcich trhlín na vzorke.



Obr. 4. Model vzorky pre únavové skúšky a výsledné termogramy zobrazujúce trhlinku na vzorke

3.2 Zlievarenská forma

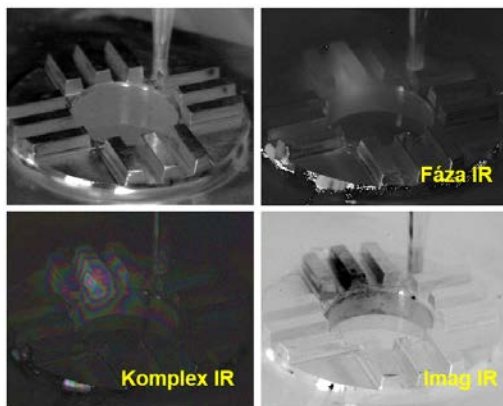
V spolupráci s Katedrou technologického inžinierstva sa vykonávalo nedeštruktívne meranie zlievarenskej formy s cieľom vyhľadania problémových oblastí na meranom objekte. Po spracovaní nameraných údajov boli poškodené miesta formy lokalizované a následne podrobené ďalšej analýze. Z Obr. 5. je zrejmé, kde sa poškodené miesta formy nachádzajú.



Obr. 5. Zlievarenská forma a výsledné termogramy zobrazujúce poškodené miesta

3.3 Zubová spojka

V spolupráci s Ústredným defektoskopickým strediskom železníc ŽSR sa vykonávalo nedeštruktívne meranie zubovej spojky s cieľom lokalizovať poškodené zuby.



Obr. 6. Zubová spojka a výsledné termogramy zobrazujúce poškodené zuby

Záver

Cieľom príspevku bolo priblížiť informácie o tom, čo je aktívna termografia a ako sa využíva v oblasti NDT. V článku boli ukázané, niektoré vybrané výsledky z meraní, ktoré sa uskutočňujú na katedre aplikovanej mechaniky na Žilinskej univerzite v Žiline. V príspevku sme sa obmedzili na prezentáciu detekčných schopností systému, keď boli detegované trhliny v oceľových objektoch. Za pozornosť stojí možnosť detekcie aj na tvarovo zložitých objektoch, ako je dno vtokového kanálu na forme alebo päta zubu. Ide o jeden zo spôsobov nedeštruktívneho skúšania, ktorý môže rozšíriť bežne používané detekčné postupy v strojárstve, keď ako detektor odozvy systému na budenie bola použitá infračervená kamera. Niektoré ďalšie podrobnosti je možné nájsť v [2,3,4,5].

Tento článok vznikol s podporou projektov VEGA 1/0795/16, KEGA 017ŽU-4/2017 a Agentury pre podporu vedy a výskumu č. APVV-0736-12.

Referencie

1. PEŤKOVÁ, V., SVOBODA, J. 2016. *Termodiagnostika*. ISBN 978-80-8126-132-9
2. STANKOVIČOVÁ, Z., DEKÝŠ, V., NOVÁK, P., STRNADEL, B. 2017. *Detection of natural frequencies using IR camera*. In *Procedia Engineering*, Vol. 192, s. 830-833, ISSN 1877-7058
3. SAPIETA, M., DEKÝŠ, V., STANKOVIČOVÁ, Z. 2014. *Nedeštruktívne skúšanie materiálu pomocou lock-in metódy*. In: *Technológ*, Roč. 6, č. 2, s. 81-84, ISSN 1337-8996
4. STANKOVIČOVÁ, Z., DEKÝŠ, V., NOVÝ, F., NOVÁK, P. 2017. *Nondestructive testing of metal parts by using infrared camera*. In: *Procedia Engineering*, Vol. 177, s. 562-567, ISSN 1877-7058
5. STANKOVIČOVÁ, Z., DEKÝŠ, V., NOVÝ, F., NOVÁK, P. 2017. *Detekcia defektov použitím infračervenej termografie*. In: *Technológ*, Roč. 9, č. 1, s. 59-63, ISSN 1337-8996



NANOINDENTACE A SCRATCH TESTY S POUŽITÍM AKUSTICKÉ EMISE

Martin DRÁB¹, Radim ČTVRTLÍK², Jan TOMÁŠTIK², Lukáš VÁCLAVEK³
a Václav KOULA¹

¹ ZD Rpety – DAKEL, Ohrobecká 408/3, 142 00 Praha 4, Česká republika

² Regionální centrum pokročilých technologií a materiálů, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 779 00 Olomouc, Česká republika

³ Fyzikální Ústav AV ČR, Společná laboratoř optiky Univerzity palackého a Fyzikálního ústavu AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 779 00 Olomouc, Česká republika
drab@dakel.cz, radim.cvtvrtlik@upol.cz

Abstrakt

Vyhodnocování nanoindentace a vrypových zkoušek spoléhá převážně na analýzu záznamů hloubky a zátěže v čase. Tento přístup se ukázal dostatečný ve většině případů pro nejrůznější materiály (tenké vrstvy, mikroobjekty, kompozity, atp.). Avšak je mnoho situací, kde indentační křivky resp. záznamy hloubky a zátěže v čase neposkytují dostatek informací pro pochopení a zachycení komplexnější deformační odezvy materiálu. I přesto, že mikroskopická pozorování zbytkových vpichů resp. vrypů přispívá k rozšíření možnosti vyhodnocení testů, nevysvětluje to dynamiku studovaného procesu či fenoménu, což se týká především netransparentních materiálů. Na druhé straně záznam akusticko-emisních vln tento nedostatek odstraňuje poskytnutím nedestruktivního způsobu získání doplňujících informací.

Akustické vlny generované v průběhu mechanických testů na nano-mikro úrovni jsou bohatým zdrojem informací o deformačním chování testovaného materiálu, což platí především pro iniciaci a propagaci trhlin na testovaném povrchu či povrchové vrstvě. Proto analýza akustické emise poskytuje lepší pochopení a komplexnější interpretaci výsledků získaných nanoindentací a vrypovým testem.

Síla AE metody bude demonstrována pro tvrdé ochranné SiCN povrchové vrstvy nanosené na silikon zkoumané pomocí vrypové zkoušky. Kombinace AE a nanoindentace bude prezentována na křemíku a různých typech skla, včetně vytvrzených skel. V obou případech bude analýza AE událostí korelována se standardními přístupy.

Úvod

Účelem tohoto textu je ukázat, že pro nanoindentaci a vrypové testy tenkých povrchů dokáže akustická emise při správném technickém vybavení a použití doplnit komplementární informace k tradičním parametrům vyhodnocovaným při těchto metodách a přinést tak mnohem více informací vedoucích k přesnějším výsledkům daných měřicích zkoušek.

Pro vlastní nanoindentaci a vrypové testy byl použit přístroj NanoTest verze Platform 3 od firmy MicroMaterials, umožňující provádět nanoindentaci, mikroindentaci, vrypové (scratch), dynamické a zátěžové zkoušky.

Nanoindentor byl dodatečně vybaven speciálním na míru vyrobeným snímačem firmy DAKEL v podobě držáku vzorku (viz obr. 1), který lze šroubem připevnit na místo původního pasivního kovového bloku. Vlastní držák je konstruován tak, aby piezoelement uvnitř tohoto bloku měl co možná nejlepší akustický kontakt s horní plochou držáku, na který se lepí vzorek a tudíž, abychom dokázali zachytit i velmi jemné a jinak velmi silně zatlumené vibrace vznikající porušováním tenké vrstvy na substrátu vzorku.

Akustickou emisí sice ke svým přístrojům někteří výrobci nanoindentorů již po nějakou dobu dodávají (zpravidla jako volitelné vybavení), nicméně tato je často realizována pomocí snímače umístěného na držáku indentorového hrotu, což znamená, že veškeré akustické vlny musí přijít z materiálu přes velmi tenkou špičku indentorového hrotu, což způsobuje velmi silné ztlumení signálu a tudíž ji spousta uživatelů nepoužívá a považuje za velmi málo citlivou pro daný typ testů. V našem případě se snažíme ukázat, že při správné konfiguraci, umístění a citlivosti celého AE systému je tato metoda i pro nanoindentaci a vrypové testy velmi užitečná a přínosná. V případě zde ukázaných konkrétních měření bylo pro snímání a vyhodnocování dat použito systému DAKEL IPL (4x 12-bit AE kanál na 2 MSPS se zesílením 0–80 dB) přičemž signál z držáku vzorku byl rozdělen na všechny 4 kanály s různými zesíleními pro lepší dynamiku signálu. Snímač v držáku v sobě navíc obsahuje integrovaný 43 dB nízko-šumový předzesilovač DAKEL AS4.

Vyhodnocování vrypových testů a tenké vrstvy

Vrypové (scratch) testy na tenkých vrstvách se dělají především jako zkoušky adheze a koheze, jejichž cílem je zjistit kritické zátěže, při kterých začne materiál selhávat. Indentor je táhnut po povrchu při zvyšující se zátěži, při čemž v testovaném materiálu postupně vznikají komplikovaná pole napětí, vedoucí k nejrůznějším způsobům porušení materiálu. Dvěma z hlavních určovaných parametrů je jednak tzv. *dolní kritická zátěž* (L_{C1} nebo jen L_C), což je zátěž, při které se objeví první trhlinka, a určuje míru kohezní síly povrchové vrstvy. Druhým parametrem bývá tzv. *horní kritická zátěž* (L_{C2}), což je zátěž, při které dojde k totálnímu odtržení povrchové vrstvy od substrátu, a určuje míru adhezní síly povrchové vrstvy k danému substrátu. [1,2]

Mezi obvyklé způsoby vyhodnocování takových zkoušek se počítá především vizuální analýza zbytkové rýhy po vrypu pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) nebo konfokálního skenovacího LASERového mikroskopu (LSCM), viz obr. 2 nahoře.

Druhým neobvyklejším způsobem vyhodnocování je analýza křivek hloubky a zátěže (obr. 2 dole silná křivka, v tomto případě se zátěž od jisté vzdálenosti lineárně zvyšuje od 0 až po 500 mN) na vzdálenosti (resp. čase, což je pro konstantní posuv ekvivalentní). Zpravidla se pro kontrolu generuje nejprve topologie povrchu před testem, tedy de-facto vryp s minimální konstantní zátěží, kterým získáme hloubkový profil testovaného místa před testem (na obr. 2 dole spodní tenká křivka). Po té křivka hloubky pronikání indentoru při vlastním testu, která bývá hodnotově největší, neboť v materiálu často dochází k částečně vratné plastické deformaci (na obr. 2 dole horní tenká křivka). A nakonec topologie zbytkové stopy po vrypu. Analogicky jako v případě počáteční topologie tím získáme hloubkový profil zbytkového vrypu po testu (na obr. 2 dole prostřední tenká křivka).

Nejjednodušším způsobem, jakým lze pro účely vrypových zkoušek vyhodnotit signál akustické emise je vygenerování obálky AE signálu s nějakým rozumným časovým rozlišením. V našem případě měření trvá 45 s s konstantním posuvem 10 $\mu\text{m/s}$ a křivky, které ze systému nanoindentoru dostaneme, mají nějakých 267 bodů, tedy přibližně 6 Hz, což odpovídá rozlišení přibližně 1,6 μm . Jako použitelný kompromis mezi velikostí (a tedy především také zobrazitelností) dat a přesností bylo zvoleno 2000 bodů obálky na zkoušku, což odpovídá přesnosti 0,225 μm .

Po doplnění obálky signálu akustické emise se v ideálním případě všechny analýzy shodují, viz obr. 3. Když se ale podíváme např. na hodnoty dolní kritické zátěže pro různé varianty filmů amorfního silikon carbon nitridu (a-SiCN) určené buď z vizuálního pozorování konfokálním mikroskopem, nebo pomocí křivky hloubky anebo pomocí obálky akustické emise (viz obr. 4), uvidíme několik věcí. Za prvé, že ne vždy hodnota dolní kritické zátěže určená těmito třemi způsoby musí vzájemně odpovídat. A za druhé, že ve většině případů jednoduché použití obálky akustické emise odhalí tuto mez nejdříve a tudíž to vypadá, že v mnoha případech je tato metoda z daných tří nejcitlivější. Každopádně srovnání těchto tří způsobů nám poskytuje hlubší náhled do dynamiky porušení daných vrstev a pouhé mikroskopické vizuální pozorování či vyhodnocování zátěžových křivek může být zavádějící.

Akustická emise totiž detekuje i podpovrchové praskání, které nemusí být vidět ani vizuálně (např. pokud je trhlinka planární delaminace nebo směřuje pouze směrem dolů a ne k povrchu) ani na křivce hloubky (viz obr. 3a a 3b). Pro některé povrchové materiály můžou dokonce jak povrchový snímek, tak křivky hloubky a zátěže vypadat úplně stejně a bez jakýchkoliv detekovatelných prasklin či odloupenutí, jako např. u CrN a AlCrN. Nicméně při zapojení akustické emise zjistíme, že CrN má výrazné podpovrchové praskliny už téměř od začátku zatěžování, zatímco AlCrN nikoliv.

Nanoindentace a praskání skla

Jedna z aplikací nanoindentace pro různé varianty skla spočívá v zjištění jeho odolnosti vůči reálnému mechanickému poškození v terénu pomocí ostrého bodového kontaktu s diamantovým hrotem (Berkovičova pyramida). Přičemž zkouška bývá rozdělena na 3 fáze. V první fázi se zátěž lineárně zvětšuje od nuly do stanoveného maxima (tzv. loading), pak se po nějakou dobu drží zátěž na stanovené maximální hodnotě (tzv. creep) a ve třetí fázi zátěž opět lineárně klesá na nulu (tzv. unloading). Zkoumá se, při jaké zátěži sklo poprvé praskne a jakým způsobem (např. radiálně směrem ven od hran hrotu nebo laterálně podél stěn hrotu), z čehož lze pak odvodit modul pružnosti.

Na obr. 4 můžeme vidět devět různých variant skel zatěžovaných stejným způsobem, pokaždé s jinou odezvou. Pro každou tuto variantu i obálka akustické emise vypadá jinak a dá se z ní snadno zjistit, zda a při jaké zátěži dané sklo praskne bez ohledu na to, jak vlastně vypadá výsledný mikroskopický snímek.

Pro nás bude v tuto chvíli zajímavá především varianta s označením K10, pro níž průběh obálky akustické emise můžeme vidět na obr. 5. Na tomto vzorku je především zajímavé to, že při vizuální inspekci není vidět vůbec žádná prasklina. Tudiž by se na základě pouze tohoto standardního pozorování mohlo velmi mylně zdát, že tento vzorek je ze všech devíti testovaných vzorků nejodolnější. Na druhou stranu, při i pouze zevrubném pohledu na obálku akustické emise je naopak jasné, že toto sklo praská hned od začátku zátěžové fáze. Nicméně se v tomto případě jedná o tzv. mediánové trhliny, které se šíří pouze od hrotu směrem dolů a ne do stran ani k povrchu mimo místo vpichu (viz obr. 6) a tudíž nejsou standardním pozorováním detekovatelné, zatímco akustickou emisí ano.

Poslední ukázka na obr. 7 jsou výsledky indentace vzorku Gorilla glass (které se používá např. jako ochranné sklo pro mobilní telefony). Na této ukázce je vidět, že kromě obálky akustické emise lze stejné efekty zachytit i pomocí pokročilejšího zpracování přes spektrogram akustické emise, kde jsou dané události taktéž zachytitelné a navíc lze tímto způsobem dělat i další kvalitativní analýzu různých typů poškození.

Detekce brzkého mechanického poškození

Další snahou při zkouškách zde popisované alternativní konfigurace systému akustické emise od firmy DAKEL pro nanoindentaci a vrypové zkoušky bylo pokusit se nějakým vhodným způsobem automaticky v korelaci s vizuální detekcí na mikroskopu a křivkami hloubky vrypu zachytit co nejdřívejší poškození materiálu při vrypových zkouškách, u kterých v daném materiálu nedochází na začátku (anebo v celé zkoušce) k žádnému praskání. Takovým materiálem je např. oxid titaničitý (TiO_2). Z mikroskopické vizualizace reziduální stopy na obr. 8 (dole) se ukazuje, že k prvnímu mechanickému poškození vrstvy dochází na pozici někde kolem 5 μm , což bychom rádi akustickou emisí zachytili.

Při pohledu na standardní obálku signálu akustické emise vidíme, že kolem 5 μm se nic zajímavého neděje. Teprve až někde kolem 8–10 μm se začnou nějaké drobné události tu a tam trousit a významný nárůst obálky detekujeme až teprve někde po 32 μm , když se vrstva TiO_2 prorazí a hrot začne rýt do substrátu (viz obr. 9). Analogický je pohled na tentokrát další klasické zpracování akustické emise, tedy na kumulativní křivku počtu hitů v čase (viz obr. 8), která navíc ještě závisí na hodnotě nastaveného prahu detekce hitů. (Je-li nastaven příliš nízko, detekujeme pouze šum a křivka velmi strmě roste i už v době, kdy na hrot ještě ani nezačala působit žádná síla. Je-li pak síla nastavena výš, je vidět pouze to, co vyplývá z pohledu na obálku nebo horší.)

V tomto případě dokonce ani celkový spektrogram signálu akustické emise nepřinese na první pohled žádné lepší informace. Nicméně se ukazuje, že v daném spektrogramu pouze na jistých vybraných frekvencích specifických pro daný materiál (ale které lze automaticky vybrat např. pomocí STV algoritmu, v našem ukázkovém případě je to frekvence 31 kHz) lze vysledovat zónu plastické deformace daného materiálu pomocí změny směrnice regresní křivky, která je až do té doby nulová. Zároveň se minimálně v tomto případě také ukazuje, že kubická regresní křivka proložená hloubkou topologie reziduální stopy má inflexní bod v místě, kde dojde k úplnému proražení povrchové vrstvy a začne rytí do substrátu. Celá situace je zobrazena na obr. 10.

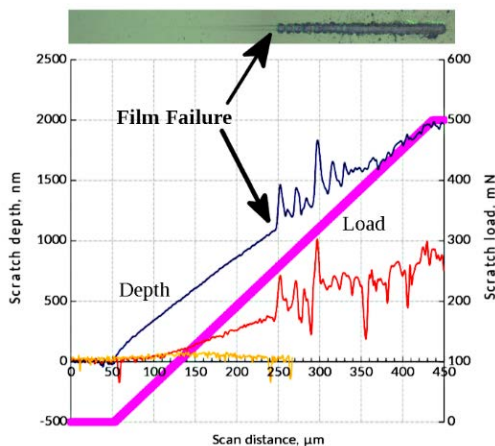
Závěr

Akustická emise je při správném použití a konfiguraci systému velmi silný nástroj v materiálovém výzkumu i na nano a mikro úrovni. Tato nedestruktivní technika dokáže vhodně doplňovat destruktivní techniky, jako je nanoindentace a vrypový test, ke kterým může být vhodným spolehlivým zdrojem unikátních informací o povrchovém i podpovrchovém poškození. Lze ji snadno použít a je zde možnost buď pouze jednoduché klasické analýzy anebo i pokročilejších technik, přičemž i ta pouze jednoduchá analýza může ve vyhodnocování testů velmi výrazně pomoci. S pomocí akustické emise lze také detekovat velmi brzké porušení materiálu ještě před vytvořením trhlin.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání (OP VVV-MŠMT) prostřednictvím projektu Nano4Future reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000754 a projektu CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008422. Autoři také děkují projektu TH03020245 Technologické agentury České republiky.

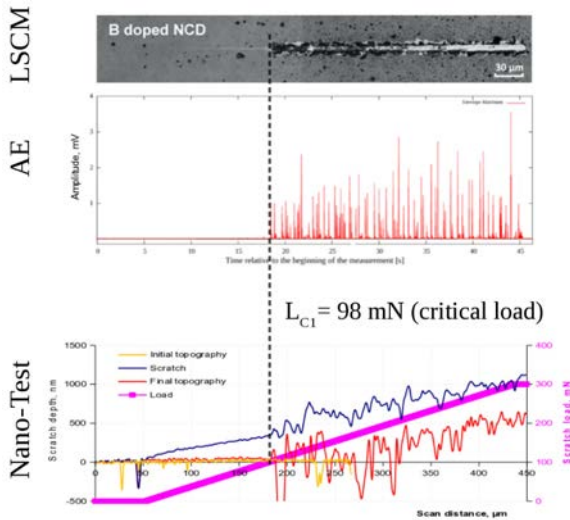
Obrazová příloha



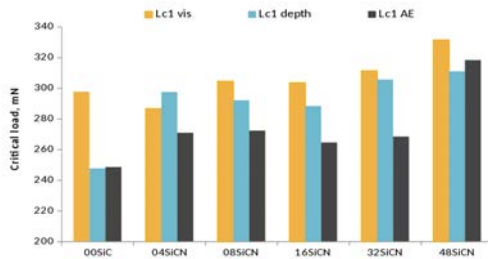
Obr. 1: Běžně vyhodnocované parametry vrypových zkoušek. Nahoře vizuální obrázek ze skenovacího konfiokálního mikroskopu. Dole v grafu v čase vynesená křivka zátěže a pak postupně odshora křivka hloubky při zátěži, při topologii po vrypu (tedy dávající profil hloubky reziduální stopy) a při topologii před vrypem (tedy tvar povrchu před testem).



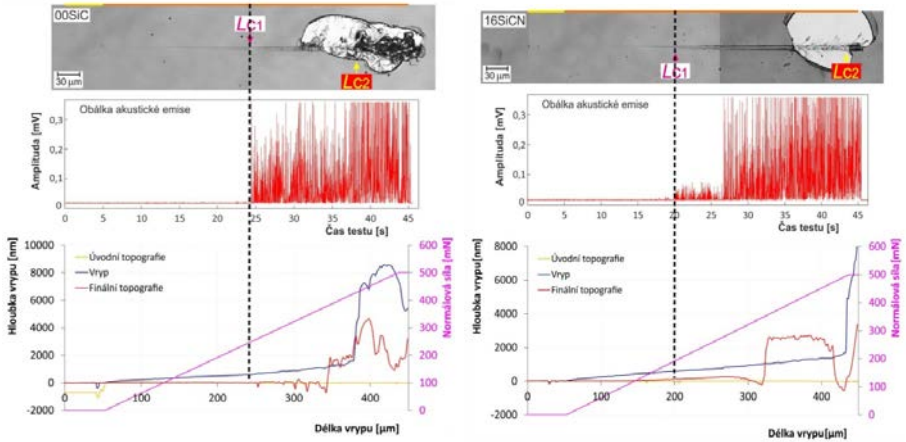
Obr. 2: Detail na míru vyrobeného držáku vzorku s vestavěným snímačem akustické emise a příkladem na něm nalepeného vzorku (v tomto případě se jedná o bulkový vzorek, ne o tenkou vrstvu).



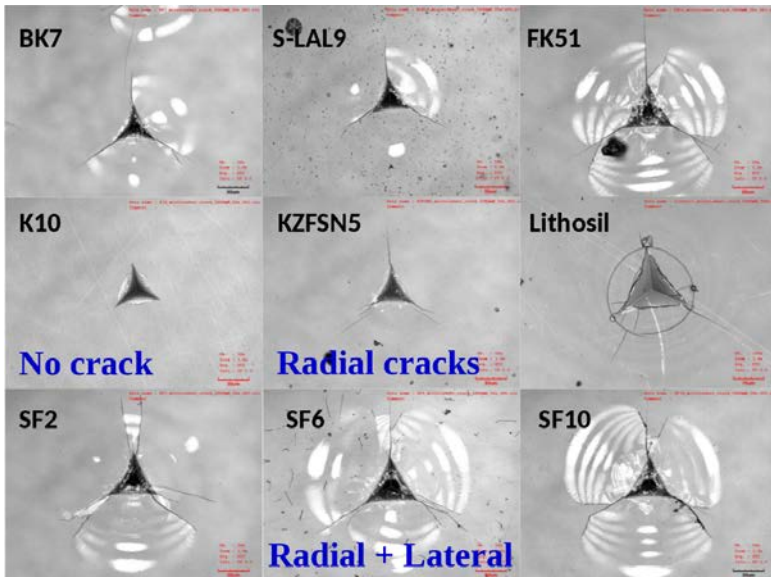
Obr. 3: Příkladem, kdy vizuální analýza reziduální stopy z konfokálního mikroskopu (nahore) i křivky hloubky (dole) se shodují s obálkou akustické emise (uprostřed) při vrypovém testu, je vzorek bórem dopovaného nanokrystalického diamantového filmu. Svislá přerušovaná čára ukazuje spodní kritickou zátěž.



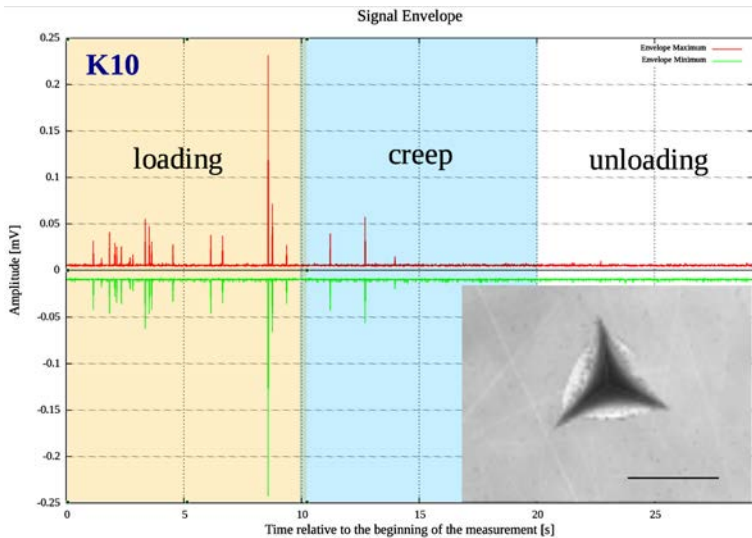
Obr. 3a: Srovnání detekce dolní kritické zátěže (L_{C1}) pomocí vizuální inspekce konfokálním mikroskopem, analýzy křivky hloubky a obálkou akustické emise na různých variantách a-SiCN filmů. Ve většině případů AE detekuje dříve.



Obr. 3b a 3c: Na těchto dvou příkladech si můžeme podrobně ukázat, že akustická emise detekuje již prvotní praskání, dokonce i podpovrchové, které vizuálně není vůbec vidět a na křivce hloubky občas jen nepatrně. Na snímkách z mikroskopu je taktěž pěkně vidět zpětné odtrhnutí velkého kusu vrstvy i za indentorem.

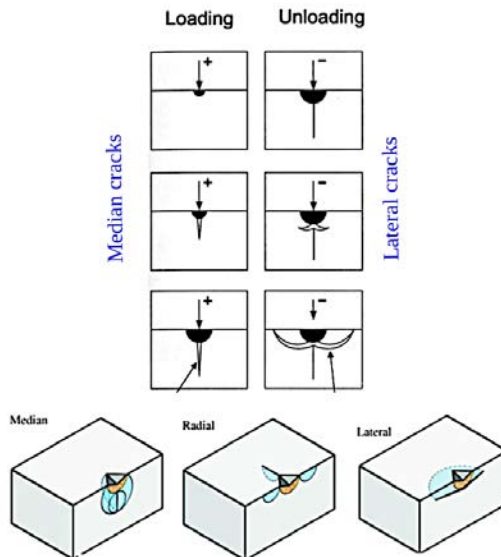


Obr. 4: Nanoindentace Berkovičovým hrotem do různých variant skla produkuje různé varianty a míry poškození.

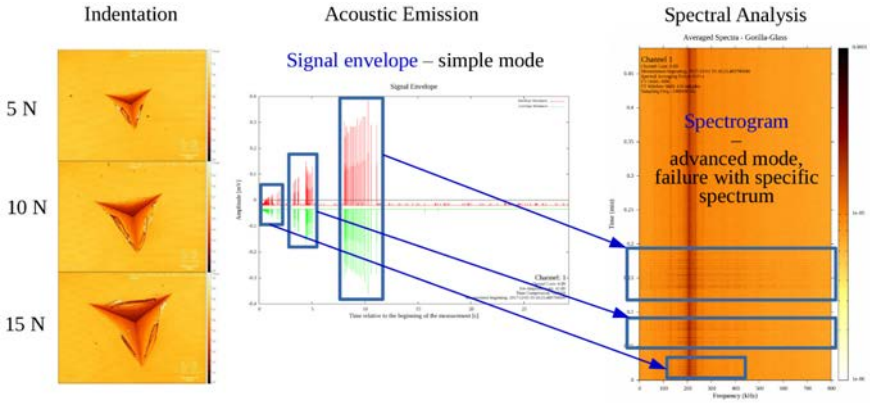


Obr. 5: Nanoindentace Berkovičovým hrotem do skla K10 vizuálně nevykazuje žádné známky prasklin. Akustická emise však jasně ukazuje, že k podvrchovému praskání dochází již velmi brzy v začátku zátěžové fáze.

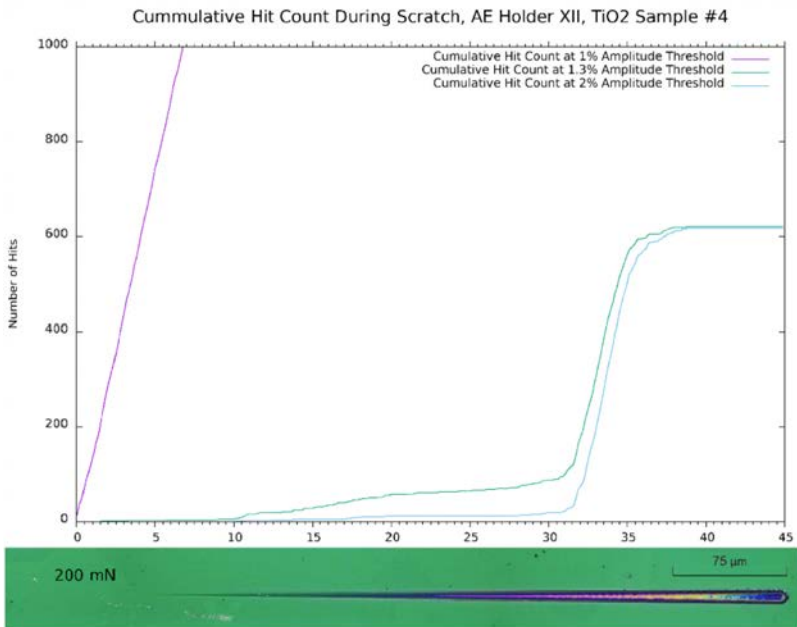
Loading vs. Unloading Failure dynamics



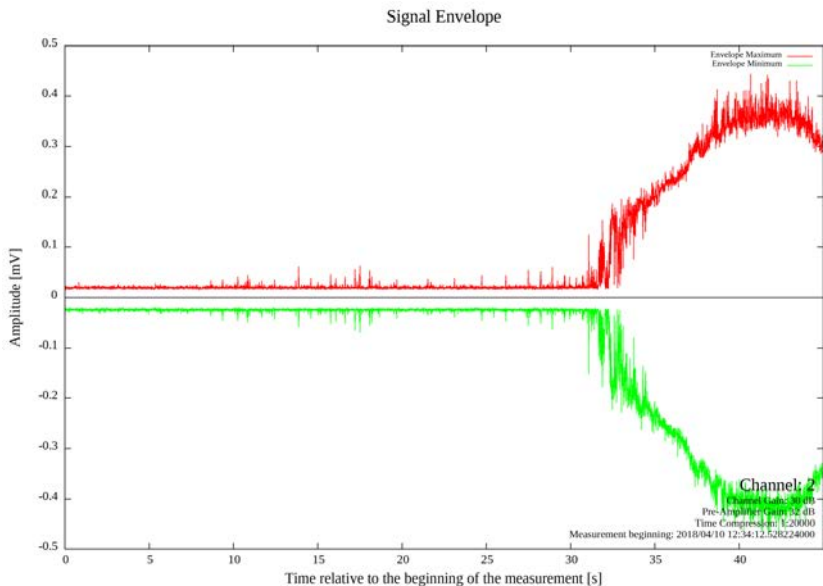
Obr. 6: Mechanismus vzniku různých typů trhlin v křehkých materiálech při nanoindentaci. [3]



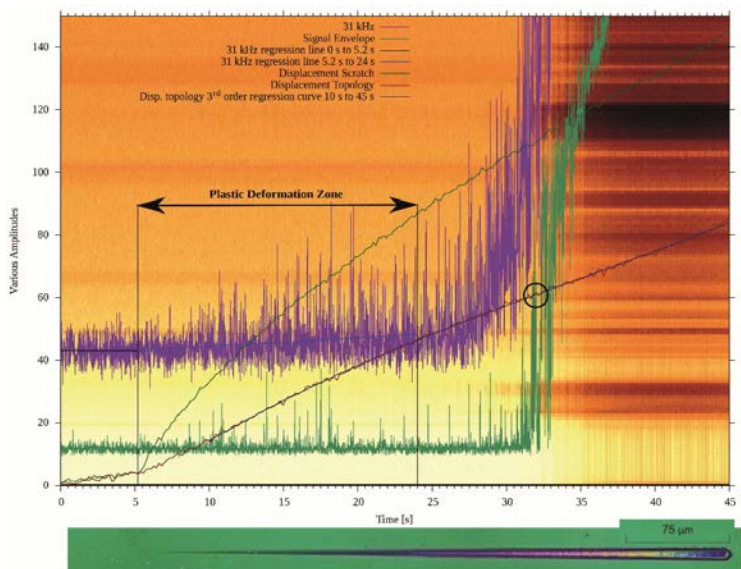
Obr. 7: Ukázka mikroskopických indentů do Gorilla glass při různých maximálních zátěžích. A ukázka adekvátního záznamu obálky akustické emise a k tomu korespondující spektrogram signálu akustické emise, kde jsou dané události také patrně viditelné, ale lze z nich vhodným zpracováním potenciálně vytáhnout více informací.



Obr. 8: Graf kumulativních hitů (nahore) závisí hodně na správném nastavení prahů detekce hitů, ale i s nejlepším možným nastavením neukáže počátek zóny plastické deformace TiO_2 materiálu, která podle vizualizace z konfokálního mikroskopu (dole) začíná někde kolem 5 μm .



Obr. 9: Z klasického vyhodnocení obálky akustické emise také nelze v tomto případě určit počátek zóny plastické deformace TiO_2 materiálu.



Obr. 10: Počátek zóny plastické deformace TiO_2 materiálu při vrypové zkoušce detekovaná pomocí nárůstu směrnice regresní křivky v řezu spektrogramu na 31 kHz (fialová) a zároveň označení inflexního bodu na křivce hloubky pro topologii vrypu. Daný bod určuje místo průrazu povrchové vrstvy a počátek rytí do substrátu.

Reference

- [1] Soutar, A. M., Chen, Q., Raja Khalif, R. E., 2008. Evaluation of commercially available transparent hard coating for polycarbonate, SIMTech technical report (STR_V9_N3_09_STG) 9 (3): 161-165.
- [2] Aliofkhaezrai, M., 2014. Anti-Abrasive Nanocoatings: Current and Future Applications. 112.
- [3] Lawn, B., 1993. Fracture of Brittle Solids, Cambridge Univ. Press
- [4] Tomáščík, J., Čtvrtlík, R., Dráb, M., Maňák, J., Coatings 2018, 8(5), 196; doi: 10.3390/coatings8050196.



AKUSTICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ BETONU DEGRADOVANÉHO VYSOKÝMI TEPLOTAMI S POROVNÁNÍM AKUSTICKÉ IMPEDANCE

ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HIGH TEMPERATURE DEGRADED CONCRETE WITH COMPARISON OF ACOUSTIC IMPEDANCE

Richard DVOŘÁK I*

*VUT, Fakulta Stavební, Ústav Fyziky

Contact e-mail: dvorak.r1@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Článek je zaměřen na nedestruktivní testování betonu pěti receptur, rozdílných v použitém kamenivu, degradovaných vysokými teplotami. Testování je provedeno pomocí měření rychlosti průchodu ultrazvuku a kladívkovou metodou Impact-Echo. Nedestruktivní výsledky jsou porovnány s konvenčními destruktivními zkouškami. Pevnost v tahu a hustota je porovnána s rychlostí ultrazvuku v zkoušeném materiálu, s rezonanční frekvencí zkoušených těles a změnou akustické impedance. Srovnání změřené akustické impedance v závislosti na reziduální tahové pevnosti teplotně degradovaného betonu poukazuje na zajímavou závislost těchto veličin a polemizuje nad možností zkoumání tohoto typu poškození skrze změnu akustické impedance.

Klíčová slova: nedestruktivní testování, beton, vysoké teploty, vibroakustika, akustická impedance, impact-echo, rychlost průchodu ultrazvuku

Abstract

The paper is focused on non-destructive measurement of high temperature degraded concrete test specimens of five mixtures different by the use of coarse aggregate. Testing is done by ultrasonic pulse velocity method and Impact-Echo method. Non-destructive results are compared with destructive tests. Ultrasonic pulse velocity, dominant resonance frequency and acoustic impedance are discussed and compared with changes in density and tensile strength of concrete. The paper suggests possible assessment of degraded concrete by the change in acoustic impedance dependent on residual tensile strength.

Key words: non-destructive testing, concrete, high temperature, vibroacoustic, acoustic impedance, impact-echo, ultrasonic pulse velocity method

1. Úvod

Akustické nedestruktivní metody mohou být dobře použity pro odhalování vad a poruch, jako jsou praskliny, dutiny, kavery nebo delaminace v prostém, vyztuženém nebo i předpínaném betonu. Lze je též využít pro posouzení stavu konstrukce, která byla komplexně degradována různými vnějšími činiteli (Epasto, Proverbio, & Venturi, 2010).

Vibroakustické metody můžeme rozlišit na aktivní a pasivní z úhlu pohledu buzení signálu. Aktivní metody využívají umělé vnesení mechanické vlny do zkoušeného materiálu pomocí budiče a následné zaznamenání signálu změněného průchodem materiálu zkoušeného prvku přijímačem. Budič může mít různé podoby od sférických kladívek po piezoelektrické budiče. V případě přijímačů lze použít kontaktní piezoelektrické snímače nebo bezkontaktní vysoce citlivé mikrofony. Pasivní metody využívají vznik akustických mechanických rázů buď od uvolňování vzniklého napětí v konstrukci, nebo od samotného provozu konstrukce. Tato publikace se bude věnovat aplikaci metodám aktivním.

V průběhu testování nedestruktivní vibroakustickou metodou, jako je například Impact-Echo nebo měření rychlosti průchodu ultrazvuku, je posuzována změna signálu vytvořeným průchodem mechanické vlny zkoušeným materiálem. Nejčastější nástroj pro posouzení těchto signálů je Fourierova rychlá transformace, kterou lze získat frekvenční spektrum a posuzovat tak různé vlastní rezonanční frekvence zkoušené konstrukce. Tímto způsobem lze získat vlastní frekvence podélného f_L , ohybového f_{H1} a f_{H2} a kroutivého vlnění f_t . Změna ve frekvenčním spektru může indikovat změnu ve fyzikálně mechanických vlastnostech konstrukce.

Další akustickou nedestruktivní metodou je měření rychlosti průchodu ultrazvuku je založená na přesném záznamu času signálu vybuzeného a časové prodlevy, kterou zabere mechanické vlně prostoupit zkoušenou konstrukcí. V takové sestavě ultrazvukový buzený puls má tendenci cestovat nejkratší možnou trasou skrze zkoušenou hmotu. Výstupem z této metody je rychlost šíření ultrazvuku v testovaném materiálu v_L . V případě degradovaného materiálu, kde vznikly mikrotrhliny a materiál se stává více křehkým, ultrazvukový puls je donucen cestovat delší trasou.

2. Akustická impedance

Při degradaci materiálu komplexním činitelem, jako je například zvýšená teplota, dochází ke změně jak fyzikálně mechanických, tak fyzikálně chemických vlastností. Kromě často posuzovaných veličin jako vlastní první druhá, popř. třetí rezonanční frekvence a rychlost zvuku v materiálu je akustická impedance Z . Tato veličina v sobě kloubí hustotu materiálu D a rychlost průchodu mechanické vlny.

$$Z = D \cdot v_L \quad (1)$$

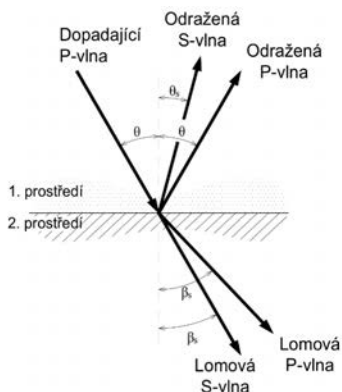
Akustická impedance hraje důležitou roli v mechanismu prostupu akustické vlny testovaným materiálem.

Mechanická vlna se šíří v materiálu v podobě podélného vlnění, které se skládá ze tří složek vlnění – podélného vlnění (P vlna), smyková vlnění (S vlna) a povrchové vlnění (vlna R), též nazývaná Rayleighova vlna. Poměrné srovnání rychlosti šíření jednotlivých složek vlnění jsou znázorněny na obrázku č. 2. Tyto vlny se šíří v materiálu ve formě sfér, které narážejí na trhliny, defekty a části materiálu, které dosahují různé objemové hmotnosti. V momentě nárazu mechanické vlny na rozhraní materiálu s různou akustickou impedancí, dojde buď k částečnému pohlcení, odrazení nebo lámání vlny. Každé takové rozhraní tedy slouží jako další zdroj mechanického vlnění. Tento proces je znázorněn na obrázku č. 1 a je dále popsán rovnicí 2.

$$R_n = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

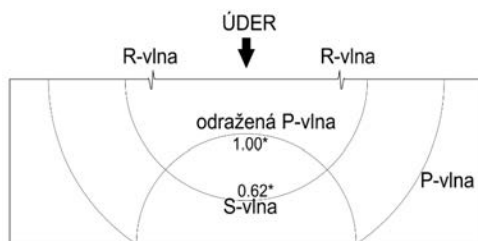
Kde je Z_1 je akustická impedance prvního media a Z_2 je akustická impedance druhého media. Výpočtem poměru R_n pak můžeme zjistit, jak se mechanické vlnění v daném místě zachová.

Pokud se mechanická vlna pohybuje zkušební tělesem zhotovené například z betonu¹ a dojde k nárazu mechanické vlny na vnější hranici tělesa, vzduchem naplněné póry nebo praskliny dojde k odrazení mechanické vlny. Zaznamenaný signál je tedy součtem mnohočetného odrazu mechanického vlnění uvnitř zkušební tělesa.



Obr. 1. Odraz a lámání mechanické vlny při prostupu materiálem (Malhotra & Carino, 2004).

Fig. 1. Reflection, refraction and fraction of mechanical waves on interface of two different mediums (Malhotra & Carino, 2004).



*Čísla znázorňují relativní rychlost vlny

Obr. 2. Různé typy vln (Malhotra & Carino, 2004).

Fig. 2 Different types of mechanical waves [2]

Akustická impedance tak v sobě kloubí dva parametry cementových kompozitů, které jsou výrazně ovlivněny vysokými teplotami.

¹ Beton má akustickou impedanci $Z=9 \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ a vzduch má $Z=0,413 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

3. Proces degradace betonu

Beton je heterogenní cementový kompozit, který se obecně skládá z plniva, pojiva, přísad, příměsí a záměsové vody. Plnivo můžeme rozlišit na jemné plnivo o frakci 0,063 mm až 4 mm a hrubé kamenivo, které se udává od 4 mm do 32 mm. Nejčastěji používaná maximální frakce hrubého kamenivo je 32 mm. Každá ze složek betonu reaguje na zvýšené teploty jiným způsobem a projevují se i tzv. synergický efekt jednotlivých složek. Z pohledu materiálu můžeme rozlišit reakci betonu na dílčí reakce kameniva, cementového kamene a fyzikálně a chemicky vázané vody.

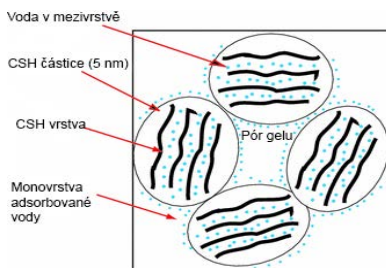
3.1. Kamenivo

Reakci kameniva můžeme rozlišit dle geologického původu a převažující složky. Kameniva s vysokým obsahem křemičitého podílu jsou výrazně ovlivněny fázovou změnou β -křemen na α -křemen při 573 °C. Křemenné krystaly během této teploty změny svou krystalickou strukturu doprovázené zvětšením objemu o 0,86 – 1,00 %. Už při teplotě 300–400 °C začíná vznik prasklin, což vede k zvýšení porozity a vodní absorpce.

Kamenivo bohaté na vápenec je méně odolné vůči nižším teplotám, ale v porovnání s křemičitým kamenivem je jejich odolnost téměř totožná. Nad 700 °C však projevuje vápenité kamenivo lepší odolnost vůči vysokým teplotám hlavně díky dodatečnému vypalování vápence $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2^\uparrow$. Po překročení teploty 900 °C vykazují oba typy kameniva velice podobné chování (Savva, Manita, & Sideris, 2005).

3.2. Cement

Reakce cementového kamene byla zevrubně studována v průběhu uplynulých dekad. Proces degradace cementového kamene můžeme rozdělit na 3 hlavní mechanismy. Odchod fyzikálně a chemicky vázané vody s tím spojený rozklad složek jako jsou CSH gely, ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ nebo portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Schéma složení hlavního představitele struktury cementového kamene v zatvrdlém stavu je CSH gel, jehož struktura je znázorněna na obrázku č. 3.



Obr. 3. Struktura CSH gelu (Pinson, a další, 2015).

Fig. 3. tructure of CSH gel (Pinson, et al., 2015).

Tyto složky jsou bohaté na chemicky vázanou vodu, která se postupně při zvýšené teplotě přeměňuje na páru. Počátek první degradace cementového kamene tedy nastává již od 100 °C, kdy se začíná rozkládat ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26(\text{H}_2\text{O})$, který je většinou v malém množství přítomen v cementovém kameni. Zároveň od 100 °C začíná rozklad CSH gelů. Chemicky vázaná voda dále odchází z jednotlivých složek, kdy přibližně okolo 420–500 °C dochází k rozkladu portlanditu. Tyto degradační procesy způsobují popraskání a smrštění cementového kamene (Zhang & Ye, 2012). Tento proces opět přispívá ke vzniku prasklin a vytvoření dalších vzduchových překážek mechanickému signálu.

4. Návrh experimentu

Předmětem této publikace je porovnání nedestruktivně získaných parametrů a jejich porovnání z pohledu akustické impedance. V rámci tohoto experimentu byly porovnané výsledky z testování zkušebních těles 5 různých receptur. Každá receptura se poté skládala z 63 zkušebních těles trámčů o rozměrech 100 × 100 × 400 mm.

Zkušební tělesa byla pálena na teploty 200 až 1200 °C po 200stupňových krocích. Teplotní nárůst byl nastaven na 300 °C · hod⁻¹ a teplota byla udržována po dobu 1 hodiny. Poté byla ponechána k samovolnému vychladnutí v peci. Každá teplotní sada byla před výpalem předsušena na 110 °C, čímž byla odstraněna fyzikálně vázaná voda v kapilárách a pórech betonu. Tímto krokem se předchází explozivnímu odprýskávání, ke kterému by jinak mohlo dojít uvnitř uzavřené pórové struktury betonu. Voda v kapalné fázi přechází při překročení teploty 100 °C do plynného stavu a její tlak v uzavřených pórech roste až do situace, kdy překročí tahovou pevnost cementové matrice a kameniva a dojde k částečnému nebo explozivnímu odprýsknutí povrchových vrstev (Zhao, Zheng, Peng, & van Breugel, 2014). Testované receptury se skládaly převážně z těžného křemičitého jemného plniva frakce 0/4 mm z lomu Žabčice a hrubého drceného kameniva frakce 4/8, 8/16 a 11/22 mm z lomu Olbramovice. První tři receptury byly navrženy s ohledem na proměnlivou kompozici hrubého kameniva, poslední dvě receptury byly vyrobeny s odlišným cementem založené na kompozici hrubého kameniva receptury B. V tabulce 1 jsou uvedené konkrétní kombinace.

Tab. 1 Složení testovaných receptur.

Tab. 1 Mixture designs.

Složka	Množství na 1 m ³ pro jednotlivé receptury [kg]				
	A	B	C	D	E
Cement CEM I 42,5 R	345	345	345	-	-
Cement CEM II/A-S 42,5 N	-	-	-	345	-
Cement CEM I 52,5 R	-	-	-	-	345
Křemičitý Písek Žabčice 0/4 mm	848	934	813	934	934
Hrubé kamenivo Olbramovice 4/8 mm	-	-	1010	-	-
Hrubé kamenivo Olbramovice 8/16 mm	980	521	-	521	521

Hrubé kamenivo Olbramovice 11/22 mm	-	355	-	355	355
Superplastifikátor Sica Viscocrete 2030	2,8	2,5	3,1	3,1	3,1
Záměsová voda*	160	173	176	155	183

Pro výpal zkušebních těles byla využita keramická pec Rhode KE. Zkušební tělesa byla po odebdení ponechána ve vodním prostředí po dobu 28 dnů. Poté byly ponechány 1 týden na vzduchu. Po výpalu byly vychladlá zkušební tělesa umístěny do laboratorních podmínek se vzdušnou vlhkostí v rozmezí 50-60 % a teplotou 19 -21 °C.

5. Použité metody testování

Pro měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu (dále UZ) zkoušenými tělesy byl použit přístroj "Pulse analyser 58-E4900". Při tomto měření se postupovalo dle ČSN 73 1371 (ČSN 73 1371, 1983). Zkušební těleso bylo umístěno na gumových podložkách a měření probíhalo ve třech rovinách kolmo na směr hutnění. Ze získaných tří časů byly zvoleny nejkratší čas, ze kterého byla následně spočtená rychlost průchodu ultrazvuku v_L .

Při měření metodou Impact-Echo (dále IE) byl použit digitální osciloskop "Handyscope HS3" s nastavenou záznamovou frekvencí na 200 KHz a piezoelektrický snímač MIDI 446s12. Mechanický impuls byl vnášen do zkušební tělesa pomocí sférického kladívka vážící 70,5 g. Zkušební těleso bylo poté testováno dle ČSN 73 1372 (ČSN 73 1372, 1993). Byla zjištěna rezonanční frekvence v podélném, příčném a kroutivém směru zkoušení.

Pro porovnání nedestruktivních parametrů byly provedeny kontrolní destruktivní zkoušky na jednotlivých recepturách. Z každé teplotní sady jednotlivých receptury byly vybrány tři trámce pro určení pevnosti v 4bodovém tahu za ohybu dle ČSN EN 12 390-5 (ČSN EN 12 390-5, 2009).

5.1. Výpočet rychlosti

Metoda Impact-Echo ve stavitelství byla původně vyvinuta v roce 1980 pro účely měření tloušťky betonových desek ale postupně našla širší uplatnění. Postup stanovující zjištění rezonanční frekvence a rychlosti mechanické vlny je uveden v americké normě ASTM C1383-15 (ASTM C1383-15, 2015). Detailně popisuje odečítání času ze získaných signálů a určování vrcholů jednotlivých rezonančních frekvencí. Obsahuje též vzorec pro výpočet frekvence z rychlosti podélné P vlny:

$$f = \frac{C_{pp}}{2T} \quad (3)$$

kde:

- f ... rezonanční frekvence [Hz],
- C_{pp} ... rychlost vlny v homogenním materiálu [ms^{-1}],
- T ... tloušťka zkoušeného elementu [m].

V této rovnici se počítá, že mechanická vlna prochází homogenním materiálem prismatického tvaru, což v případě heterogenních materiálů jako je beton neplatí. Je tedy potřeba upravit rychlost vlny C_{pp} o korekční faktor který zohlední testované médium. Ve své publikaci z roku 1997 (Sansalone, Lin, & Street, 1997) uvádí J. M. Sansalone a kolektiv vztah pro výpočet frekvence s bezrozměrným korekčním faktorem 0,93 který byl experimentálně ověřen. Rovnice pak dostává tvar:

$$f = \frac{C_p \cdot 0,93}{2T} \quad (4)$$

Pro účel porovnání akustické impedance v rámci této publikace bude tedy použita rychlost z obou dvou metod testování. V případě metody UZ je vzorek vystaven frekvencím budiče od 20 KHz do 0,1 MHz. V případě metody IE je vzorek vystaven nízkým frekvencím od úderu kladívka v rozsahu od 300 Hz do 20 KHz. Pro výpočet rychlosti C_p ze zaznamenané dominantní frekvence pro danou sadu lze odvodit vzorec:

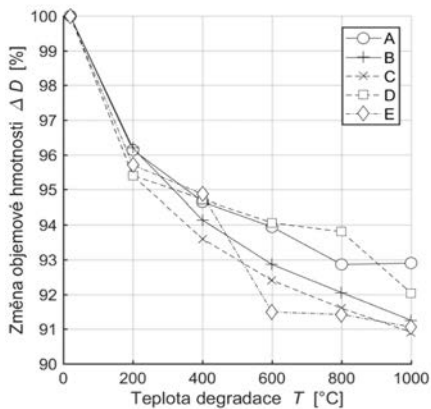
$$C_p = \frac{f \cdot 2T}{0,93} \quad (5)$$

Pro přehlednost tedy zavedeme označení akustické impedance spočtené pomocí rychlosti průchodu ultrazvuku jako Z_{UZ} a akustickou impedanci spočtenou pomocí rychlosti podélné vlny spočtené z rezonanční frekvence Z_{IE} .

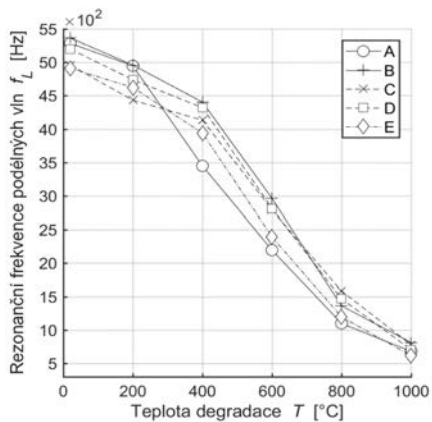
6. Výsledky měření

Objemová hmotnost zkušebních těles ve vyřádlém stavu po 28 dnech dosahovala hodnot v rozmezí 2210–2380 kg·m⁻³. Vývoj změn objemové hmotnosti jednotlivých receptur je uveden na Obrázku č. 4. V průběhu výpalu pak docházelo k postupné ztrátě žháním, a to až o 9 % v případě receptury C a E. Lze zpozorovat výrazný pokles mezi referenčními sadami a sadami exponovanými na 200 °C. Ten je hlavně způsoben odchodem fyzikálně vázané vody a rozkladem ettringitu. Následující poklesy jsou spojeny s odchodem chemicky vázané vody a s počátky rozkladu CSH gelu (Zhang & Ye, 2012).

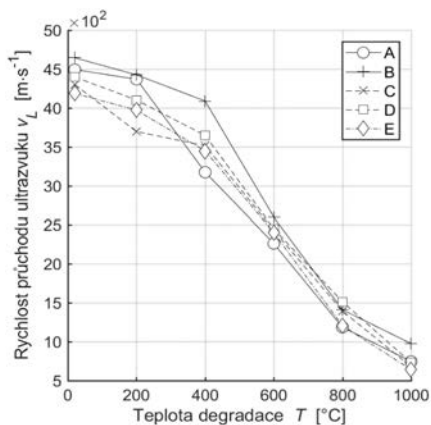
Z pohledu kompozice navržených receptur je zajímavý rozdíl ve vývoji objemových hmotností receptur A, B a C, které mají různou kompozici hrubého kameniva, ale stejný rychlovazný cement CEM I 42,5 R. Změna jejich objemové hmotnosti má s mírnými odchylkami stejný trend. Naopak diametrálně odlišný vývoj v objemové hmotnosti mají receptury C a D. Receptura D s použitým směsným cementem CEM II/A-S s obsahem vysokopecní strusky odolává teplotám až do 800 °C, po které přichází strmý pokles při 1000 °C. Receptura E naopak zažívá strmý pokles mezi 400 a 600 °C. V tomto teplotním rozsahu dochází k rozkladu portlanditu Ca(OH)₂, který je považován za hlavní nosný element pevnosti cementového kamene.



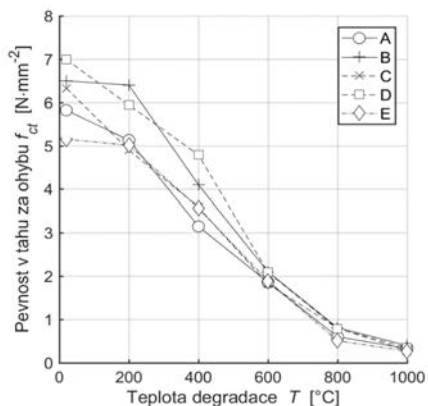
Obr. 4 Relativní změna objemové hmotnosti.
Fig. 4 Relative change of density.



Obr. 5 Rezonanční frekvence podélných vln.
Fig. 5 Resonance frequency of longitudinal waves.

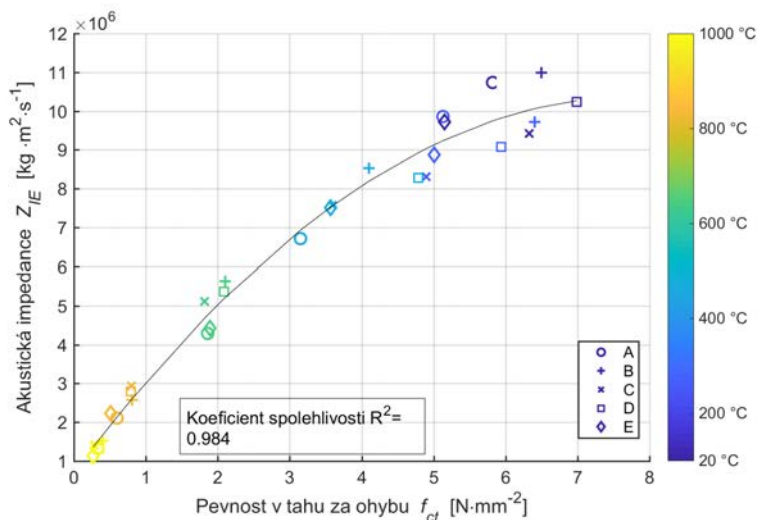


Obr. 6 Rychlost průchodu ultrazvuku.
Fig. 6 Speed of ultrasound.

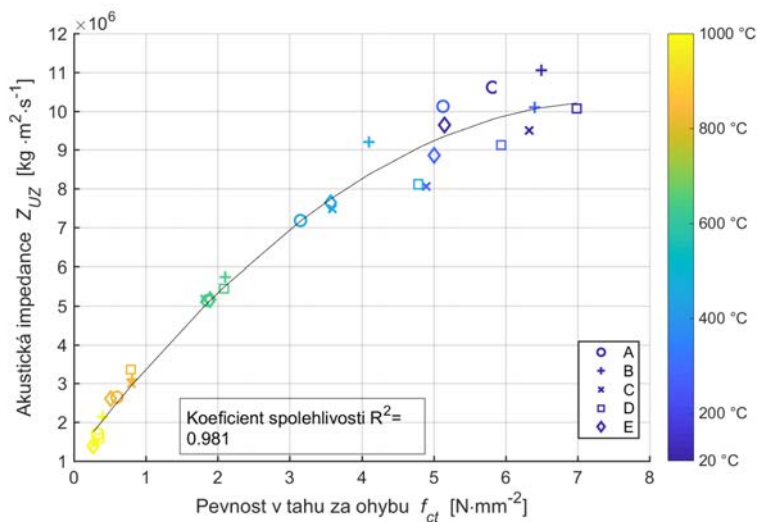


Obr. 7 Pevnost v tahu za ohybu.
Fig. 7 Flexural tensile strength.

Výsledky z měření rezonanční frekvence v podélném směru jsou uvedeny na obrázku č. 5. Frekvence referenčních sad všech receptur se pohybuje v rozmezí od 4,8 do 5,4 KHz.



Obr. 8 Porovnání akustické impedence spočtené pomocí rychlosti podélné vlny C_P .
 Fig. 8 Comparison of acoustic impedance computed by P-wave speed C_P .



Obr. 9 Porovnání akustické impedence spočtené pomocí rychlosti průchodu ultrazvuku v_L .
 Fig. 9 Comparison of acoustic impedance computed by speed of ultrasound v_L .

Nejvyšší referenční frekvence dosahuje receptura B, a to 5,4 KHz. S rostoucí zátěžovou teplotou klesá rezonanční frekvence a všechny receptury vykazují podobný trend.

Rezonanční frekvence všech teplotních sad dosahuje minima v teplotních sadách vypálených na 1000 °C, kde se pohybuje v rozmezí 615-815 Hz. Nejvýraznější pokles ve frekvenci nastává mezi teplotami 400, 600 a 800 °C, který koresponduje se změnami v mikrostruktuře.

Velice podobné výsledky měření vykazuje i měření rychlosti průchodu ultrazvuku, které je znázorněno na Obrázku č. 6. Je zde vidět, že rychlost referenčních sad se pohybuje v rozmezí 4188-4646 m·s⁻¹, což odpovídá zdravému vysoko-pevnostnímu betonu. Vývoj v rychlosti nejvíce koreluje s rezonanční frekvencí, kde se koeficient korelace pohybuje v rozmezí 0,9797-0,9979. Lze tedy prohlásit, že měření v podélném směru rezonanční metodou podává velice podobné výsledky ve srovnání s měření rychlosti průchodu ultrazvuku.

Obrázek 8 a 9 se věnuje porovnání akustické impedance Z_{UZ} spočtené z rychlosti šíření ultrazvuku v_L a akustické impedance Z_{IE} spočtené z rychlosti podélné vlny C_P z měření Impact-Echem. Na grafech jsou uvedené akustické impedance jednotlivých teplotních sad všech testovaných receptur v závislosti na pevnosti v tahu. V obou případech Z_{UZ} i Z_{IE} je datová sada proložena polynomickou křivkou a je spočtený koeficient spolehlivosti R^2 . Počáteční referenční sady dosahují různých tahových pevností v rozptylu 5-7 MPa a akustická impedance dosahuje hodnot v rozmezí 9-11·10⁶ kg·m²·s⁻¹. Při výpalu na 200 °C dochází k mírným změnám v mikrostruktuře, průměrná hodnota akustické impedance všech receptur mírně klesá, ale vlastnosti zkušebních těles nejsou výrazně ovlivněny. Od sady exponované na 400 °C se měřené hodnoty začínají shlukovat do užšího datového svazku, který více odpovídá proložené polynomické křivce. Teplotní sady exponované na 400, 600, 800 a 1000 °C jsou už v jasně rozeznatelných skupinách. Tento vývoj platí pro obě zobrazení Z_{UZ} i Z_{IE} , pro které dosahuje koeficient korelace hodnot vyšších jak 0,98. Tento způsob interpretace tedy dovoluje poměrně spolehlivě posoudit teplotně exponovaný beton dle jeho akustické impedance zjištěné buď pomocí rezonanční metody Impact-Echo nebo pomocí měření rychlosti průchodu ultrazvuku.

Závěr

Prezentované výsledky nedestruktivního měření variace navržených receptur betonu ukázaly zajímavou závislost akustické impedance na pevnosti v tahu a reziduální pevnosti v tahu teplotně exponovaných sad. Hodnota 9-11·10⁶ kg·m²·s⁻¹ běžně uváděná pro beton je tak upřesněna pro účel interpretace nedestruktivního měření teplotně exponovaného betonu. Je jisté, že uvedená závislost bude platit pro charakteristický prostý beton o objemové hmotnosti v daném rozsahu svými vlastnostmi podobnými testovaným recepturám (lehké a těžké betony budou mít pravděpodobně jiný průběh akustické impedance). Tato závislost by se dala použít pro počáteční kategorizaci poškození betonu vysokou teplotou. Při tomto posouzení je potřeba získat rychlost mechanické vlny, a to buď z rezonanční frekvence podélného vlnění, nebo přímo pomocí měření rychlosti průchodu ultrazvuku.

Tato metoda porovnává materiálové vlastnosti zkoušeného celku a tvar prvku není zohledňován. Rezonanční frekvence je totiž přímo závislá na tvaru testovaného tělesa. Právě to je největší nevýhoda použití IE při testování zkušebních těles různého rozměru – například tělesa získané z jádrových vývrtů mají často atypické rozměry. Pro využití v praxi se dále vybízí obdobný postup zjištění akustické impedance testovaného betonu například z ohybového nebo kroutivého vlnění. V případech kdy je zajištěn přístup ke konstrukci pouze z jedné strany je potřeba využít právě tohoto vlnění pro získání rezonanční frekvence prvku.

Poděkování

Tato publikace byla zpracována v rámci projektu „No. LO1408 AdMaS Up - Advanced Materials, Structures and Technologies“, pod projektem GAČR No. 16-02261S a pod projektem FAST-J-18-5275 podporovaným Fakultou stavební VUT Brno.

Bibliografie

- [1] EPASTO, G., E. PROVERBIO a V. VENTURI. Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method. *Materials and Structures* [online]. 2010, **43**(1-2), 235-245 [cit. 2016-12-19]. DOI: 10.1617/s11527-009-9484-0. ISSN 13595997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-009-9484-0>
- [2] MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [3] SAVVA, A., P. MANITA a K.K. SIDERIS. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2005, **27**(2), 239-248. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504000289>
- [4] PINSON, Matthew B., Enrico MASOERO, Patrick A. BONNAUD et al. Hysteresis from Multiscale Porosity: Modeling Water Sorption and Shrinkage in Cement Paste. *Physical Review Applied*. 2015, **3**(6), 17. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.064009. ISSN 2331-7019. Dostupné také z: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.3.064009>
- [5] ZHANG, Q. a G. YE. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. The Netherlands, 2012, 6. DOI: 10.1007/s10973-012-2303-9. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-012-2303-9>
- [6] ZHAO, Jie, Jian-jun ZHENG, Gai-fei PENG a Klaas VAN BREUGEL. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure. *Cement and Concrete Research*. 2014, **65**, 64-75. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.07.010. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884614001501>
- [7] ČSN 73 1371. *Non-destructive testing of concrete – Method of ultrasonic pulse testing of concrete*. Prague: Czech normalization institue, 1983.

- [8] ČSN 73 1372. *Non-destructive testing of concrete: Testing of concrete by resonance method*. 1. Prague: Cesky normalizacni institut, 1993.
- [9] ČSN EN 12 390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10] ASTM C1383-15. *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. 1. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [11] SANSALONE, M., J.M. LIN a W.B. STREET. A procedure for Determining P-Wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-wave Speed Measurement Technique. In: *ACI Materials Journal*. 1997, s. 9.
- [12] ČSN EN 12 390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.



EPITAXIE, SPOJOVÁNÍ A TŘENÍ EPITAXY, JOINING AND FRICTION

Jaroslav FIALA

University of West Bohemia Plzeň CZ

Abstrakt

Na začátku 19. století si mineralogové všimli, že některé nerosty srůstají přednostně v určité vzájemné orientaci. A drží pak spolu tak dobře, jako by to byl jeden krystal, jedna látka a ne konglomerát dvou různých materiálů. Podstatě toho jevu lidé porozuměli až po objevu (s pomocí) rentgenové difrakce r. 1912 a svůj název – epitaxie – získal až roku 1928. Dlouho potom ještě trvalo, než si inženýři uvědomili, že epitaxie může být výhodně využita i v technice: v souvislosti se spojováním a třením. Což je předmětem tohoto příspěvku.

Klíčová slova: epitaxie, strukturní koherence, spojování, tření

Abstract

At the beginning of the 19th century, mineralogists noticed that some minerals grow together preferentially in certain mutual orientations. And hold then together so well, as if they were a homogeneous crystal, a single substance, and not a conglomerate of two different materials. The essence of this phenomenon has been seized only after discovery (and with the help) of x-ray diffraction in 1912 and its name – epitaxy – has been coined only in 1928. Since then engineers have yet long to go to grasp that epitaxy can be to advantage used in technics in connection with joining and friction. Which is the subject of this contribution.

Key words: epitaxy, structural coherency, joining, friction

1. Úvod

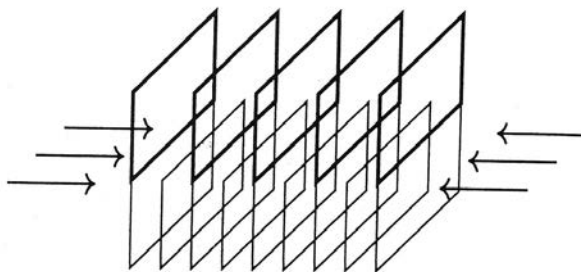
Když r. 1889 postavili Eiffelovu věž (v té době nejvyšší „stavení“ na světě), spojili jejich 15000 dílců 2,5 miliony nýtů. Tehdy to jinak neuměli. A když v letech 1932 – 1934 škodoväcký inženýr František Faltus postavil přes řeku Radbuzu tehdy první svařovaný most na světě, německý spolek inženýrů mu s pohoršením napsal, že je to přece nesoriosní (ten most dodnes stojí a znamenitě slouží přes to, že kromě náteru a vozovky na něm nikdy nic neopravovali). Pro lidi bylo spojování tvrdým oříškem ještě sto let po tom, co si mineralogové všimli, že některé minerály srůstají (v přírodě, bez zásahu člověka, tedy) samovolně v určité zákonité vzájemné orientaci a jejich spojení bývá velice pevné. Difrakce rentgenového záření vysvětlila, že je to způsobeno koherencí mezikrystalového rozhraní [1] a teprve r. 1928 byl tento jev pojmenován jako epitaxie [2]. Ale až v sedmdesátých letech minulého století, hlavně díky pracím Bollmannovy školy [3,4], bylo toto vysvětlení všeobecně akceptováno. Dnes už víme, že většina reakcí v pevných látkách je epitaxiální. A protože epitaxie podmiňuje pevnost (spolehlivost) spojení, jedná se o fenomén, který má pro NDT nemalý význam.

2. Mikrostrukturní podstata

Epitaxiální relace předpokládá strukturní podobnost rovinných motivů dispoice atomů obou krystalů, mezi kterými epitaxiální relace existuje, v rovině, ve které ty dva krystaly epitaxiálně srůstají. Aby ke srůstu došlo, musí ovšem ty dva krystaly býti vůči sobě orientovány zcela určitým zákonitým způsobem. Mluvíme o retikulárně (retikulum = síťka) řízené epitaxiální orientaci, jež je ve většině případů charakterizována dvojrozměrnou strukturní analogií v hraniční rovině [5].

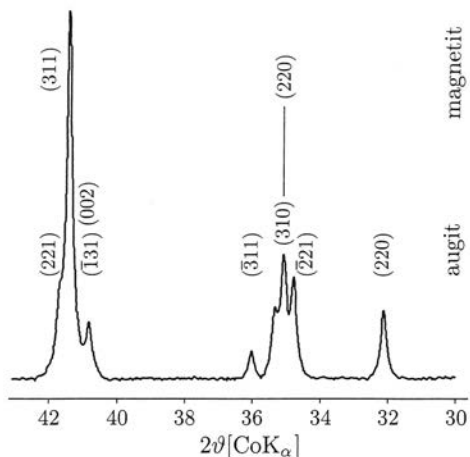
Epitaxie se využívá při výrobě moderní elektroniky (optoelektroniky) v celé řadě technologií, které pak to označení „epitaxie“ nesou ve svém názvu: epitaxie molekulárních svazků, epitaxie z plynné fáze, epitaxie z kapalné fáze, fotoepitaxie, epitaxie v parách organokovových sloučenin, chemoepitaxie, epitaxie z par generovaných pulsním laserem atd. Takovými postupy se dnes nanáší vrstva po vrstvě sendvičové struktury tvořené až několika tisíci monomolekulárními vrstvami libovolného složení a v jakékoli zvolené posloupnosti s obrovskou přesností, kterou předstihuje pouze technika Langmuir – Blodgettových vrstev.

Na druhé straně, epitaxie řídila krystalisaci vůbec první tuhé látky, která se před třemi a půl miliardami let objevila na povrchu této Země: čediče. Ten je tvořen krystaly pyroxenu augitu, pohřženými do skelné aluminosilikátové matrix v poměru asi tak 1:1. A na výbrusu pořízeném z čediče vidíme zřetelně, že trsy jehlicovitých krystalů monoklinického augitu vyrůstají z drobných kostiček krychlového magnetitu, který jako nejvýše tavná akcesorická součást čediče vykrytalizoval z tuhajícího magmatu první, aby pak posloužil jako nukleátor pro hlavní krystalickou složku – augit. Byť se svou strukturou – globálně vzato – od augitu dalekosáhle liší, v určité projekci (totiž při vhodné vzájemné orientaci obou krystalů) je magnetit augitu velmi podobný, a to je pro možnost epitaxiálního srůstu dvou minerálů rozhodující. Jedná se o to, aby se našla nějaká rovinná osnova magnetitu, která by měla stejnou mezirovinovou vzdálenost jako určitá rovinná osnova augitu. Při vhodné vzájemné orientaci krystalů obou minerálů poslouží tato rovinná osnova o společné hodnotě mezirovinné vzdálenosti, „prorůstající“ z magnetitu do augitu, jako vazebné pouto, které snižuje energii mezirovinového rozhraní (obr. 1), a to právě nutí oba krystaly, aby vůči sobě zaujaly onu zcela specifickou vzájemnou orientaci. Zmenšení plošné hustoty energie mezifázového rozhraní σ pak snižuje energetickou bariéru nukleace augitových krystalků na magnetitových zárodcích (která je úměrná σ^3) a urychluje tuhnutí čediče. Opravdu, na rentgenovém difraktogramu čediče (obr. 2) je patrné, že existují tři rovinné osnovy augitu, totiž $(\bar{2}21)$, (310) a $(\bar{3}11)$, jejichž mezirovinné vzdálenosti $(3,00 \text{ \AA} ; 2,96 \text{ \AA} \text{ a } 2,91 \text{ \AA})$ jsou blízké mezirovinné vzdálenosti $2,97 \text{ \AA}$ rovinné osnovy (220) magnetitu (odpovídající difrakční linie jsou od sebe nedaleko a částečně se překrývají), a dále ještě existují tři jiné rovinné osnovy augitu $(\bar{1}31)$, (002) a (221) , jejichž mezirovinné vzdálenosti $(2,57 \text{ \AA}; 2,56 \text{ \AA} \text{ a } 2,53 \text{ \AA})$ jsou blízké mezirovinné vzdálenosti $2,53 \text{ \AA}$ rovinné osnovy (311) magnetitu, takže existuje mnoho způsobů realisace epitaxiální vazby mezi magnetitem a augitem skrze jmenované rovinné osnovy s blízkými hodnotami mezirovinných vzdáleností.



Obr. 1. Podmínkou epitaxie je společná hodnota mezivrstevné vzdálenosti rovinných osnov dotýkajících se krystalů, které pak vlastně „prorůstají“ skrze rozhraní a zprostředkují pevnou vazbu mezi krystaly.

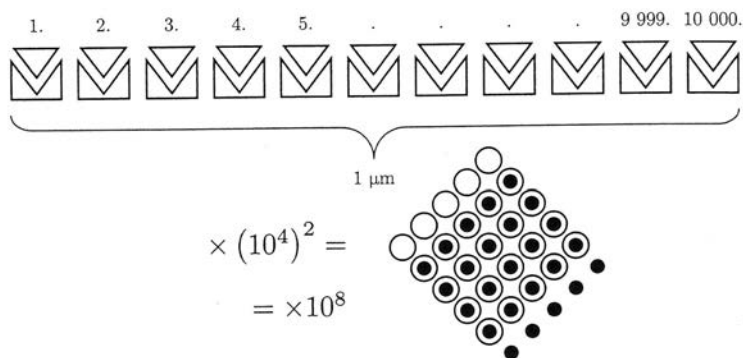
Fig. 1. A necessary condition for epitaxy is a common value of interplanar spacings of some plane families of the contiguous crystals, which, in this way „grow through“ the interface, mediating a strong bond between the two crystals.



Obr. 2. Difraktogram čediče poukazuje na možnost epitaxiální vazby mezi magnetitem a augitem, neboť tyto dva minerály mají určité rovinné osnovy, jejichž mezivrstevné vzdálenosti jsou si blízké (odpovídající difrakční linie jsou nedaleko od sebe a částečně se překrývají).

Fig. 2. Diffraction pattern of basalt points out a possibility that the bound between magnetite and augite is epitaxial as these two minerals have some plane families with near values of interplanar spacings (the corresponding diffraction lines are not far from each other and even partly coincide).

Říkali jsme už, že epitaktické reakce jsou nejrozšířenějším typem reakcí v pevných látkách [6 – 9]. Je to hlavně proto, že jsou energeticky výhodné: strukturální analogie krystalů na jejich rozhraní znamená, že při vhodné vzájemné orientaci bude kontakt ve třech aktivních centrech (atomech) znamenat kontakt v celé síti ekvivalentních bodů – při rozměru koherentních oblastí okolo 1 mikrometru to znamená kontakt v cca $10^4 \cdot 10^4 = 10^8$ bodů (obr. 3).



Obr. 3. Periodicitá dvojmrozměrné struktury rozhraní způsobuje, že kontakt ve dvou bodech znamená kontakt v celé síti ekvivalentních bodů a následně obrovské snížení energie mezifázového rozhraní.

Fig. 3. Periodicity of the two-dimensional structure of the interface implies that a contact in two active centers means automatically a contact in a whole network of equivalent points and, consequently, a huge decrease of interface energy.

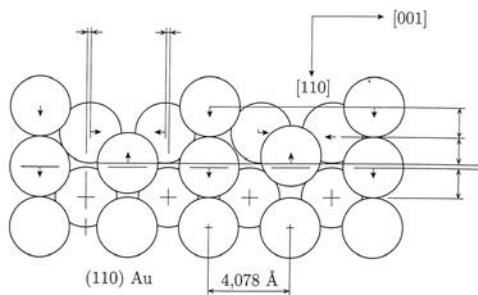
Synergický účinek translační symetrie sníží takto aktivační energii epitaxiální reakce a urychlí ji o mnoho dekadických řádů. Proti tomuto, ryze geometrickému účinku je vliv chemického (prvkového) složení mnohem slabší: úměrný rozdílu silového působení mezi různými páry „partnerských“ atomů na kontaktním rozhraní, řekněme 10-krát nebo 100-krát. To je druhá nejdůležitější příčina toho, že epitaktické kontakty jsou velice rozšířené. A tak se zlato epitaxiálně váže na sůl kuchyňskou a nylon nebo vitamin B₁₂ na křemen (tab.1). ...

Tab. 1. Výběr z tabulek [10]. Označení „Host“ znamená podložku a „Guest“ krystal, který na této podložce epitaxiálně narůstá. Uvedeny jsou krystalografické roviny a směry, které určují vzájemnou orientaci rostlých krystalů, jakož i odpovídající vzdálenost atomů a jejich rozdíly („Misfit“). Z údajů je patrné, že k epitaxiální vazbě dochází i mezi látkami, které jsou chemicky velice odlišné.

Host	Guest	Planes		Directions		Spacings [Å]		Misfit [%]
		Host	Guest	Host	Guest	Host	Guest	
NaCl	Au	(001)	(111)	[110]	[1 $\bar{1}$ 0]	7,98	8,64	8,3
α -Fe	α -Fe ₂ O ₃	(011)	(0001)	[100]	[1 $\bar{1}$.0]	2,87	2,91	1,4
α -Fe	Fe ₃ O ₄	(100)	(100)	[001]	[011]	2,87	2,97	3,5
α -Fe	ϵ -Fe ₃ N	(011)	(0001)	[1 $\bar{1}$ 1]	[10.0]	4,96	4,67	-5,8
Al	AlPO ₄	(001)	(10 $\bar{1}$ 0)	[100]	[21.0]	4,04	4,27	5,7
Ge	GaAs	(111)	(111)	[2 $\bar{1}$ 1]	[2 $\bar{1}$ 1]	6,94	6,92	-0,3
α -křemen	nylon 6,10	(10 $\bar{1}$ 0)	(010)	[01.4]	[001]	22,20	22,40	0,9
α -křemen	vitamin B ₁₂	(01 $\bar{1}$ 0)	(100)	[00.1]	[001]	16,22	15,92	-1,8

Zapomínat nepatří ani na spojení kryptoepitaktická [11]. To jsou spojení pevná tak jako epitaxiální, přes to, že vzájemná orientace krystalů, které spojení tvoří, se od ideální vzájemné orientace krystalů tvořících epitaxiální spojení, mírně liší. Podrobným zkoumáním zjišťujeme, že to souvisí s akomodací, přizpůsobením uspořádání atomů na kontaktním rozhraní, kde se potenciál meziatomového působení mění skokem. Odchyly atomů od ideální polohy (tedy polohy atomu uvnitř krystalu), které tímto způsobem na rozhraní vznikají, činí v průměru asi 15% meziatomové vzdálenosti (obr. 4). Koherence rozhraní je v tomto případě dosažena

lokálně, v zóně široké asi tři atomové vrstvy, na úkor odchylky globální, makroskopické vzájemné orientace těch dvou krystalů od ideální epitaxiální dispozice v případě, že by k lokální akomodaci nedošlo (ale pak by to spojení nebylo pevné tak, jak epitaxiální spojení bývají).



Obr. 4. Akomodace uspořádání atomů na dodekaedrickém povrchu zlata, určená pomocí difrakce pomalých elektronů. Struktura je zakreslena v měřítku a je z ní patrné, jak velice se mohou atomy na povrchu vychýlit ze svých rovnovážných poloh relaxací (rekonstrukci) v důsledku toho, že vně krystalu chybí silové působení sousedních atomů.

Fig. 4. Accomodation of the arrangement of atoms on a dodecahedral surface of gold, as determined by LEED. The structure is drawn in scale, revealing how much the atoms on a surface may deviate from their equilibrium position by relaxation (reconstruction) for lack of the force from the missing near-by atoms.

3. Spojování

Podstatou fenoménu epitaxie je strukturální koherence v pevných látkách. Proto, abychom tento jev mohli racionálně využívat a řídit, potřebujeme nástroj, který by nám strukturální koherenci umožnil snadno kvantifikovat, resp. rozpoznat. Takovým nástrojem je rentgenová difrakce [12]. Jak jsme to ilustrovali na příkladu čediče, látky (augit – magnetit), mezi kterými může dojít k pevné epitaxiální vazbě, mají ve svých difraktogramech silné čáry (difrakční linie), jež se překrývají nebo téměř překrývají (jsou na difraktogramu blízko sebe, mají stejnou nebo blízkou polohu). Každá čára na difraktogramu odpovídá totiž jedné rovinné osnově, jejíž mezivzrostlá vzdálenost d určuje polohu té čáry na difraktogramu (podle Braggova vztahu

$$\lambda = 2d \cdot \sin \vartheta,$$

kde λ je vlnová délka použitého rentgenového záření a 2ϑ je odleskový úhel mezi primárním a difraktovaným svazkem rentgenových paprsků – určující polohu příslušné difrakční čáry na difraktogramu). Aby došlo k epitaxiálnímu spojení dvou krystalů, musí ve své struktuře každý z nich mít určitou rovinnou osnovu s toutéž hodnotou d . Ty krystalové osnovy se potom mohou natočit tak, aby zmíněné rovinné osnovy byly rovnoběžné a „prorůstaly“ rozhraní krystalů, zabezpečující jejich dobrou vazbu. Jedna a tatáž (společná) hodnota d ve spektru mezivzrostlých vzdáleností různých rovinných osnov těch dvou krystalů znamená, že v difraktogramech obou těchto krystalů se musí nacházet linie (čára), která má jednu a tutéž polohu. Čím více je společných čar (čar odpovídajících stejným resp. blízkým hodnotám mezivzrostlých vzdáleností), tím větší je pravděpodobnost, že mezi krystalky těchto látek dojde k epitaxiálnímu srůstu. A ta pravděpodobnost bude zvláště velká, když odpovídající si difrakční linie budou hodně intenzivní. Podle vzorce, známého ze strukturální analýzy, je totiž elektronová hustota ρ v bodě r

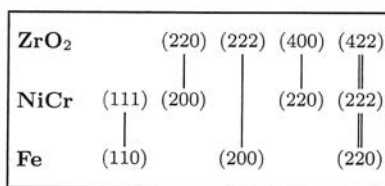
$$\rho(r) = \frac{1}{V} \sum_{hkl} F(hkl) \cdot e^{-2\pi i(r, r_{hkl}^*)}$$

superpozici rovinných vln

$$e^{-2\pi i(r, r_{hkl}^*)}$$

harmonických složek s vlnovými délkami rovnými mezirovinným vzdálenostem d_{hkl} a amplitudami $F(hkl)$ úměrnými (odmocninám intenzit) $I(hkl)$ jednotlivých difrakcí (difrakčních linií); r_{hkl}^* je vektor kolmý k rovinné vlně $\exp[-2\pi i(r, r_{hkl}^*)]$, který má velikost $1/d_{hkl}$; V je objem základní buňky krystalové struktury. Čím větší je amplituda dané rovinné vlny, tím větší je podíl elektronové hustoty, uložené v této harmonické komponentě. Čím více mají dva krystaly společných hodnot d (difrakcí, jež mají stejnou resp. blízkou polohu) a čím větší jsou intenzity těch odpovídajících difrakcí, tím větší bude podíl elektronové hustoty, která se může účastnit na vytváření epitaxiálních (silných, zdravých) vazeb mezi sousedními krystaly „napříč“ jejich rozhraním (obr. 1). Pro účely identifikace krystalických látek se používá database PDF (Powder Diffraction File) Mezinárodního centra pro difrakční data v Pensylvánii. V této databasi jsou shromážděny údaje o polohách (d) a intenzitách (I) difrakčních linií více než 900 000 látek. Mluvíme o (d, I) – údajích, jež pro každou krystalickou látku představují „otisk palce“, na základě kterého se ta látka dá identifikovat.

Podle toho, co jsme právě uvedli, dá se database referenčních difrakčních (d, I) – údajů využít také v inženýrství pevných látek, když hledáme materiál, který by se na nějakou danou látku pevně (epitaxiálně) vázal; bude to materiál, která má s danou látkou co nejvíce společných (blízkých „odpovídajících“) d – hodnot a pro kterou je přitom součet příslušných I – hodnot co největší. Kupříkladu: zirkonoxid, nanesený jako žárový nástřík na ocel, nedrží dobře; mnohem lepší výsledky dostaneme, když na ocel nanese mezikovovou vrstvu NiCr a zirkonoxid stříkáme až na tuto mezikovovou vrstvu. Když porovnáme rentgenové difraktogramy ZrO_2 , NiCr a α -Fe, pochopíme, proč tomu tak je (obr. 5): zirkonoxid má s feritem společně pouze dvě rovinné osnovy, přičemž celková intenzita odpovídajících difrakčních linií je 60, zatímco s chromnikem má zirkonoxid společně tři rovinné osnovy, kterým odpovídá celková intenzita (difrakčních linií) 160. Chromniková mezikovová vrstva tedy zlepšuje pevnost vazby mezi keramickým zirkonoxidovým povlakem a ocelí 2,7-krát.



$$\frac{B_{ZrO_2-NiCr}}{B_{ZrO_2-Fe}} = \frac{I_{(220)} + I_{(400)} + I_{(422)}}{I_{(222)} + I_{(422)}} = \frac{160}{60} = 2,7$$

Obr. 5. Pevnost B epitaxiální vazby mezi dvěma krystaly je úměrná intenzitě I překrývajících se difrakčních linií těchto krystalů.

Fig. 5. Strength B of epitaxial bond between two crystals is proportional to the intensity I of the overlapped diffraction lines of these crystals.

Přidavek 2,5 % Cu do duplexní oceli COR 13-6 (obsahující 13 % Cr a 6 % Ni) způsobí zvýšení podílu austenitu z (25 ÷ 30)% na (30 ÷ 40)%. Příčinou je epitaxie: struktura mědi je totiž více podobná struktuře austenitu než feritu. Svědčí o tom difraktogramy těch tří fází:

nejintenzivnějšímu difrakčnímu maximu mědi odpovídá rovinná osnova (111) s mezivoušnou vzdáleností 2,08 Å, která je bližší mezivoušné vzdálenosti rovinné osnovy (111) odpovídající nejintenzivnějšímu difrakčnímu maximu austenitu (2,09 Å) než mezivoušné vzdálenosti rovinné osnovy (110), která odpovídá nejintenzivnějšímu difrakčnímu maximu feritu (2,03 Å). Měď má mnohem nižší teplotu tání než železo, ve kterém se málo rozpouští. Při krystalisaci taveniny se měď koncentruje v tekuté fázi mezi rostoucími dendrity, takže po utužení ji nacházíme na rozhraní austenitických zrn. Tato zrna pak měď na jejich rozhraní brání před feritizací, neboť rozhranové napětí mezi mědí a austenitem je menší než rozhranové napětí mezi mědí a feritem.

Na epitaxii spočívá také opatření, které umožňuje zlepšit kvalitu povrchu odlitků ze šedé litiny uhlíkatými přísadami do formovací směsi. Účinkem vysoké teploty roztaveného kovu se uhlíkatá přísada rozkládá a vznikající plynné pyrolytické produkty se usazují na inaktivních plochách křemenného zrna, kde vytvářejí tenké blanky tzv. lesklého uhlíku. Lesklý uhlík je nesmáčivý tekutým kovem a brání jeho přímému styku s formou, což vede ke zlepšení povrchové jakosti odlitků [13, 14]. Účinnost tohoto opatření je dána strukturální podobností mezi grafitem (jako ideální aproximantou produktů pyrolýsy uhlíkatých přísad) a křemenem; analogií, která je patrná z porovnání jejich difrakčních údajů – viz tab. 2.

Tab. 2. Difrakční údaje grafitu a α -křemene. Rovinná osnova s indexy (hkl) má mezivoušnou vzdálenost d a odpovídající difrakční linie má relativní intenzitu I/I_1 .

grafit			α -křemen		
$d[\text{\AA}]$	I/I_1	h k l	$d[\text{\AA}]$	I/I_1	h k l
3,38	100	0 0 2	4,26	35	1 0 0
2,139	2	1 0 0	3,34	100	1 0 1
2,039	6	1 0 1	2,458	12	1 1 0
1,807	<1	1 0 2	2,282	12	1 0 2
1,681	4	0 0 4	2,237	6	1 1 1
1,548	1	1 0 3	2,128	9	2 0 0
1,234	3	1 1 0	1,980	6	2 0 1
			1,817	17	1 1 2
			1,801	<1	0 0 3

A ještě jeden příklad praktického využití epitaxiální relace v medicíně: implantáty z austenitické oceli dobře srůstají s kostní tkání, přes dramatický rozdíl v prvokém složení, díky strukturální, tedy geometrické podobnosti austenitu a hydroxylapatitu (minerální složky kostní tkáně) v rovině jejich kontaktu při náležitě vzájemné orientaci. Což je patrné z porovnání jejich difraktogramů – viz tab. 3.

4. Tření

Epitaxiální relace mezi mikrostrukturou dvou krystalů je předpokladem pevnosti jejich spojení. Pro pohyblivé spoje je tudíž epitaxiální relace nežádoucí, neboť zvětšuje tření. Což ilustruje vztah mezi mezivoušnými vzdálenostmi vzájemně si odpovídajících rovinných osnov železa, mědi a hliníku (tab. 4) a adhezní silou třecích párů Fe – Fe (> 4,0 mN), Fe – Cu (1,3 mN) a Fe – Al (2,5 mN) [15].

Tab. 3. Difrakční údaje odpovídajících si rovinných osnov austenitu a hydroxylapatitu. Symbol $2,07^x_{(111)}$ znamená, že mezivětinová vzdálenost rovinné osnovy (111) austenitu je $2,07 \text{ \AA}$ a relativní intenzita difrakční linie, která té rovinné osnově odpovídá, je 100%. Mezivětinová vzdálenost rovinné osnovy (222) hydroxylapatitu je $1,950 \text{ \AA}$ a relativní intenzita odpovídajícího difrakčního maxima je 30 %. Kritická hodnota relativního rozdílu Δ mezivětinových vzdáleností odpovídajících si rovinných osnov jest 15 %.

austenit	hydroxylapatit	Δ [%]
$2,07^x_{(111)}$	$1,950^3_{(222)}$	6
$1,80^5_{(200)}$	$1,842^5_{(213)}$	2

Tab. 4. Difrakční údaje odpovídajících si rovinných osnov železa, mědi a hliníku:

Fe- α	Cu	Al
$2,03^x_{(110)}$	$2,09^x_{(111)}$	$2,03^5_{(200)}$
$1,43^2_{(200)}$		$1,43^2_{(220)}$
$1,17^3_{(211)}$		$1,17^1_{(222)}$
$1,01^1_{(220)}$		$1,01^0_{(400)}$

Tuhá maziva, grafit, molika (molybdenit MoS_2) nebo teflon (C_2F_4)_n jsou látky anisotropní, jejichž mechanické vlastnosti se v různých směrech velice liší. A vnějšímu zatěžování, které je orientováno v určitém směru, těžko odolávají. Vlivem vzájemného pohybu kontaktních povrchů se proto jednotlivé částice tuhého maziva, jež je od sebe odděluje, snadno přemisťují, natáčejí, deformují a lámou. Tak, aby práce s tím spojená byla co nejmenší. Vzniká a stále výraznější se stává textura, přednostní orientace částic tuhého maziva v tom směru, ve kterém je jejich deformace a lom s ohledem na orientaci vnějšího zatěžování co nejsnazší. Vzájemně se pohybující kontaktní povrchy tímto způsobem ovlivňují strukturu tuhého maziva tak, aby se tření mezi povrchy, zprostředkované vnitřním třením maziva, minimalizovalo. Mastek má sice výrazně anisotropní, vrstevní strukturu stejně jako grafit nebo molybdenit, ale jako tuhé mazivo se neosvědčil; pravděpodobně proto, že vůči styčným povrchům (oceli) není dost reaktivní. Nelpí na nich, což je nezbytné pro efektivní náhradu přímého kontaktu nosných ploch kontaktem mezi molekulami maziva. Grafit však lpí na oceli dobře, strukturní koherence mezi grafitem a železem je mnohem lepší než strukturní koherence mezi mastkem a železem – viz tab. 5.

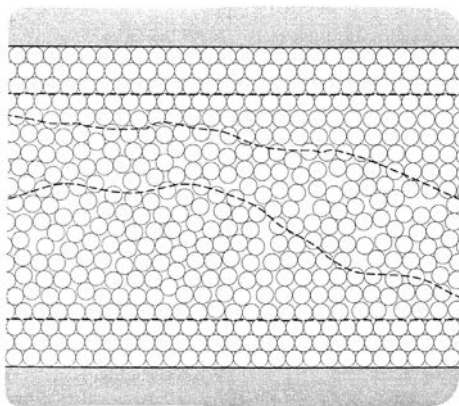
Tab. 5. Strukturní koherence mezi železem (Fe- α) a grafitem je mnohem lepší než strukturní koherence mezi železem a mastkem $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$, jak o tom svědčí difraktogramy těchto látek:

grafit	Fe- α	mastek
$3,37^x_{(002)}$	$2,03^x_{(110)}$	$9,35^x_{(002)}$
$2,13^0_{(100)}$	$1,43^2_{(200)}$	$4,59^4_{(020)}$
$2,04^0_{(101)}$	$1,17^3_{(211)}$	$3,12^4_{(006)}$
$1,80^0_{(102)}$	$1,01^1_{(220)}$	$2,48^3_{(132)}$
$1,68^1_{(004)}$	$0,906^1_{(310)}$	$1,53^6_{(060)}$
$1,54^0_{(103)}$		
$1,23^1_{(110)}$		
$1,16^1_{(112)}$		
$1,12^0_{(006,105)}$		

Vedle objemového mazání, kdy je vrstva maziva podstatně tlustší než nerovnosti povrchů, jež odděluje, mohou výrazně snížit koeficient kluzného tření i velmi tenké vrstvy maziva. Představují více nebo méně uspořádané agregáty amfifilních (difilních) molekul, podobné Langmuirovým vrstvám povrchově aktivních látek na rozhraní voda/vzduch. Jeden konec

(„hlava“) amfifilní molekuly jeví větší afinitu k opěrným plochám než zbytek molekuly („pata“), který má větší afinitu k objemovému mazivu, jež vyplňuje mezeru mezi opěrnými plochami. Špičky „patní části“ difilních molekul maziva se vzájemně odpuzují a proto je smyková pevnost tenké vrstvy, která participuje na přenosu hybnosti mezi opěrnými plochami, malá. Velice se však mazivost tenké vrstvy snižuje rozvětvením molekul, které ji tvoří. Jednak proto, že v důsledku rozvětvení nedokáží tenké vrstvy maziva úplně pokrýt kontaktní plochy a tím je od sebe oddělit. Místy pak dochází k bezprostřednímu kontaktu nosných ploch, čímž tření mezi nimi a jejich následné poškození vzrůstá. A molekuly protilehlých vrstev maziva změní v důsledku rozvětvení také svou vzájemnou polohu: nebudou už namířeny přesně proti sobě, takže se jejich „špičky“ budou méně odpuzovat, čímž se tření zvětší. Strukturální nekoherence je v tomto případě mazacímu účinku tenké vrstvy maziva nepříznivá.

Vydíráním třecích ploch na jejich vyvýšeninách dochází k extrémnímu mechanickému namáhání materiálu a jeho rozdrolení. Uvolněné úlomky jsou velmi malé a tedy (ve smyslu Herringova zákona) také velmi reaktivní. Některá aditiva mazacího media je pak následně napadají. Takto kombinovaným mechanickým a chemickým působením vzniká tixotropní agregát víceméně beztvarych částic. Jeho stavba, hustota a soudržnost (tuhost, viskozita) se velice mění vlivem mechanického zatížení. Je proto strukturalizován (obr. 6): v hraničních partiích je epitaktickým účinkem opěrných ploch uspořádán („krystalizuje“), v středové části je pak jeho stavba nepravidelná (chaotická, „amorfní“) [16]. V závislosti na rostoucím zatížení roste exponenciálně odpor, který klade vrstva maziva sblížení opěrných ploch (v důsledku tixotropního charakteru agregátní struktury maziva [17] přibývá totiž se zatížením jeho „amorfní“ složky – solu, který je řídkší než složka „krystalická“ – gel). Čímž se tření a třecí opotřebení zmenšuje. V tomto případě je tedy ztráta koherence („amorfizace“) mazacímu účinku příznivá.

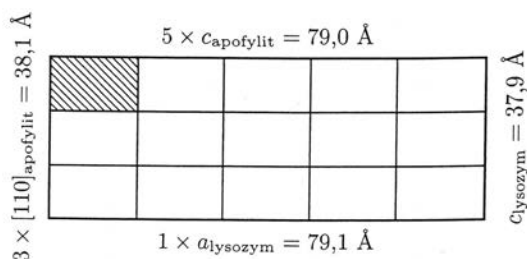


*Obr. 6. Duplexní struktura mazacího media metamorfovaného reakcí jeho aditiv s kontaktními plochami.
Fig. 6. Duplex structure of a lubricant modified by reaction of its additives with contact surfaces.*

5. Biologie

Adhese mezi krystalickými látkami, jejichž prvkové složení je zcela odlišné, schopnost takových látek vytvářet spojení, jehož pevnost si nezadá s kohesí, v důsledku toho, že rozložení atomů těch látek je v kontaktní rovině geometricky shodné, ilustruje universální rozšíření epitaxie. Epitaxií můžeme „roubovat“ látky v nejbizarnějších kombinacích –

a dosahovat neslýchané technologické užité parametry – např. organické polymery na kovový substrát, CoSi_2 a NiSi_2 na křemík, polyetylen na slídu, polyamid na grafit nebo nukleové kyseliny či proteiny na jílové minerály: příroda asi tímto způsobem využila jílové částice jako mikroreaktory prebiotické syntézy biomolekul právě na principu epitaxie. Svědčí o tom to, že mnohé proteiny a nukleové kyseliny tvoří krásné, dobře vyvinuté krystaly na srůstech s jílovými minerály, zatímco jinak se krystaly těchto bioorganických látek dají vypěstovat jen velmi obtížně. Když pak byla pomocí rentgenové difrakce určena struktura proteinů a nukleových kyselin, zjistilo se, že je v určitých řezech podobná struktuře jílových minerálů (obr. 7). V důsledku toho pak ty jílové minerály slouží jako velmi efektivní krystalizační zárodky, na nichž krystalky proteinů a nukleových kyselin vyrůstají epitaxiálně [18]. Původ neskutečně dokonalé shody mezi strukturou těchto bioorganických látek a strukturou jílových minerálů, které jsou s hlediska chemického (prvkového) složení od proteinů a nukleových kyselin diametrálně odlišné, je třeba hledat před třemi a půl miliardami let v pobřežních mělčinách pravěkých moří. Zde došlo k syntéze proteinů a nukleových kyselin z purinových a pyrimidinových basí v mezivrstvách jílových minerálů, jež do takto se formující živé hmoty „otiskly“ svou strukturu [19, 20]. Tímto způsobem epitaxie se hrála klíčovou úlohu v události, o níž hovoří Izaiáš v 8. verši 64. kapitoly svého prorockví slovy „ó Hospodine...my hlína, ty pak činitel náš“ (nejdůležitější součástí hlíny, jakož i jemného bahna v pobřežních vodách, jsou jílové minerály, fylosilikáty).



Obr. 7. Velký obdélník představuje basální řez základní buňkou krystalové struktury lysozymu, což je enzym vyskytující se v lidských slzách. Patnáct malých obdélníčků vkreslených do toho velkého obdélníku představuje řez mřížkou apofyllitu; apofyllit je jílový minerál, na němž lysozym dobře (epitaxiálně) nakrystalovává. Shoda koincidenční mřížky obou řezů je úžasná.

Fig. 7. The large rectangle presents a basal sectional view on the elementary cell of the crystal structure of lysozyme, which is an enzyme occurring in human tears. The fifteen small rectangles drawn inwards the large rectangle displays a section through the lattice of apophyllite; apophyllite is a clay mineral, on the surface of which the lysozyme well (epitaxially) crystallizes. Agreement of the coincidence lattice of both sections is astonishing.

Epitaktickými reakcemi, retikulární adaptací je řízena syntéza strukturně koherentních kompozitních tkání živých organismů, jež svými parametry, láci a složitostí budou ještě asi dlouho výzvou našim „nejinteligentnějším“ materiálům [21,22]. Například ostny a schránky ježovek tvoří několik centimetrů dlouhé, velmi dokonalé monokrystaly kalcitu, interkalované monomolekulárními vrstvami kyselých glykoproteinů v poměru 0,5 mg/g. Kombinace tuhé anorganické složky a tvárné složky organické propůjčuje tomuto kompositu, jenž ježovku spolehlivě chrání před predátory, výjimečně dobré mechanické vlastnosti díky epitaxii, která mineralizaci původně měkké, čisté organické tkáně ostnokožce při jeho růstu řídí. Základem je β -vlákno glykoproteinu, na které se naváží vápenaté kationty z vodního prostředí v místech karboxylových skupin jednotlivých aminokyselin. Ježovka pak překryje tento skelet vrstvou molekul kyseliny fumarové, které se koordinují přes vápenaté kationty se strukturou

glykoproteinu. A posléze CO₂ z vodního prostředí přemění fumarát vápenatý na uhličitán vápenatý. Uvolněná kyselina fumarová je recyklována a vrstva kalcitu se postupně rozšiřuje. Všechny tyto přeměny, odehrávající se „spontánně“ v tělíčku ježovky, jsou epitaxiální: zachovává se při nich orientační vztah mezi produkty a výchozími fázemi s přesností, kterou se při laboratorní simulaci nepodařilo dosáhnout.

6. Závěr

Při nedestruktivním testování hledáme necelistvosti. Což je tím obtížnější, čím jsou ty necelistvosti menší. A tím závažnější, čím více je jich. V technologickém procesu se pak snažíme ty necelistvosti zacelit. A opět, je to tím obtížnější, čím jsou ty necelistvosti menší a častější. Epitaxie je projevem spontánní rekonfigurace atomové struktury směřující k minimalizaci necelistvostí v atomovém měřítku, tedy těch nejmenších, nejpocetnějších a tudíž nejhůře zjištělných a nejobtížněji napravitelných necelistvostí. Znalost atomové struktury fází, které tvoří daný materiál, umožňuje optimalizovat jeho složení a výrobní technologii. Využití lokální meziatomové interakce, které jsou mnohem účinnější než vnější, globální makroskopické zásahy ať mechanické nebo tepelné, které jsou v podstatě „naslepo“. V deseti gramech železa je cca 10²³ atomů. Ale jen nepatrný zlomek z nich jsou ty atomy, které se zúčastní procesu, jenž posléze vyústí v havárii. Práce, kterou je třeba vykonat, abychom přitom změnili vzdálenost dvou sousedních atomů o 10%, je několik elektronvoltů. Kdybychom chtěli podělit všechny atomy v deseti gramech železa takovou energií, musili bychom ten kus železa ohřát na několik desítek tisíc stupňů Celsia...

Literatura

- [1] I. Bonev: On the terminology of the phenomenon of mutual crystal orientation, *Acta Crystallographica A* 28 (1972), 508-512.
- [2] M. L. Royer: Recherches expérimentales sur l'épitaxie ou orientation mutuelle de cristaux d'espèces différentes, *Bulletin de la Société française de Minéralogie et de Cristallographie* 51 (1928), 7-159.
- [3] W. Bollmann: *Crystal defects and crystalline interfaces*, Springer-Verlag, Berlin 1970.
- [4] W. Bollmann: Classification of crystalline interfaces by means of the O-lattice method, *Journal of Microscopy* 102 (1974), 233-239.
- [5] J. Fiala, I. Kraus: *Povrchy a rozhraní*, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2016.
- [6] L. S. Palatnik, I. I. Papirova: *Orijentirovannaja kristallizacija*, Metallurgija, Moskva 1964.
- [7] H. G. Schneider (ed.): *Epitaxie, Endotaxie, Topotaxie*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969.
- [8] K. A. Nikoforov: *Kristallochimičeskije osnovy topotaksičeskich reakcij v tvordych večestvach*, Nauka–Sibirskoje otdělenije, Novosibirsk 1977.
- [9] M. Figlarz, B. Gérard, A. Delahaye-Vidal, B. Dumont, F. Harb, A. Coucou, F. Fievert: *Topotaxy, nucleation and growth*, *Solid State Ionics* 43 (1990), 143-170.
- [10] K. - H. Hellwege, A. M. Hellwege (eds.): *Landolt–Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik–III/8*, Springer-Verlag, Berlin 1972.

- [11] J. Washburn, E. P. Kvam, Z. Liliental-Weber: Defect formation in epitaxial crystal growth, *Journal of Electronic Materials* 20 (1991), 155-161.
- [12] J. Fiala: Application of the Powder diffraction file in surface and interface engineering, *Powder Diffraction* 12 (1997), no. 3, 188.
- [13] P. Jelínek: Slévárenské formovací směsi–III. část, Vysoká škola báňská, Ostrava 1984.
- [14] J. Fiala, P. Jelínek, J. Buchtele: Lustrous carbon and pyrolysis of carbonaceous additions to bentonite sands. In: *Proceedings of the 66th World Foundry Congress*, K. Dal (ed.), The World Foundrymen Organization and The Foundrymen's Association of Turkey, Istanbul 2004, 455-467.
- [15] B. Bhushan: *Introduction to tribology*, John Wiley and Sons, New York 2013.
- [16] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor: *Engineering tribology*, Butterworth Heinemann, Oxford 2014.
- [17] H. Frank, J. Fiala, I. Kraus: *Elektronová struktura a reaktivita povrchů a rozhraní*, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2013.
- [18] A. McPherson, P. Schlichta: Heterogeneous and epitaxial nucleation of protein crystals on mineral surfaces, *Science* 239 (1988), 385-387.
- [19] P. Laszlo: Chemical reactions on clays, *Science* 235 (1987), 1473-1477.
- [20] L. L. Hench: Life and death: the ultimate transformation, *Thermochemica Acta* 280/281 (1996), 1-13.
- [21] G. A. Ozin: Morphogenesis and morphosynthesis of biomimetic forms, *Accounts of Chemical Research* 30 (1997), 17-27.
- [22] R. Pool: Coral chemistry leads to human bone repair, *Science* 267 (1995), 1772.



POROVNÁNÍ PARAMETRŮ SIGNÁLŮ AKUSTICKÉ EMISE ZACHYČENÝCH PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI V TLAKU U JEMNOZRNNÝCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

THE COMPARISON OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL'S PARAMETERS WHICH WERE RECORDED SIMULTANEOUSLY WITH THE COMPRESSIVE STRENGTH TESTS OF THE FINE-GRAINED CEMENT-BASED COMPOSITES

Michaela HODULÁKOVÁ *, Libor TOPOLÁŘ *, Barbara KUCHARCZYKOVÁ *,
Dalibor KOCÁB *

*Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 331/95, Brno,
Czech Republic

Contact e-mail: hodulakova.m@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Počet konstrukcí z betonu (a dalších materiálů na bázi cementu) se po celém světě neustále zvyšuje, tak jako počet konstrukcí, u nichž dochází z různých důvodů ke vzniku vad. Tento článek se zabývá experimentem, jehož cílem je rozšíření znalostí v oblasti vzniku trhlin ve struktuře cementových materiálů. Příspěvek také ukazuje výsledky detailní analýzy signálů akustické emise zachycených při zkouškách pevnosti v tlaku jemnozrnných kompozitů na bázi cementu s různým vodním součinitelem a s/bez plastifikační přísady. Předběžné výsledky ukázaly, že nižší vodní součinitel vykazuje menší množství překmitů signálů akustické emise při stejném zatížení, jak vzorky s vyšším vodním součinitelem.

Klíčová slova: akustická emise, jemnozrnný kompozit, cement, vodní součinitel, pevnost v tlaku

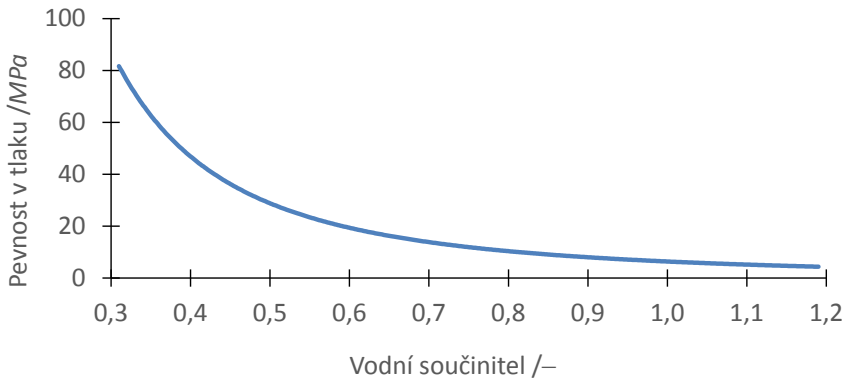
Abstract

The number of concrete structures (and other structures made of cement-based materials) is as constantly increasing all over the world as the number of constructions where are (from different reasons) created some defects. This article discusses an experiment aimed at extending the knowledge in the field of cracks. The paper also shows the results of a detailed analysis of the acoustic emission signals captured in the compression strength tests of fine-grained cement-based composites with different water-cement ratio and with/without plasticizers. Preliminary results have shown that lower water-cement ratio exhibits lower overshoots of acoustic emission signals at the same loading type as specimens with a higher water-cement ratio.

Key words: acoustic emission, fine-grained composite, cement, w/c ratio, compressive strength

1. Úvod

Vodní součinitel neboli poměr vody a cementu (w/c) je, co se týče betonů a dalších kompozitů na bázi cementu, velice důležitý a tvoří základ technologie jejich výroby. Snižováním vodního součinitele lze zpravidla dosáhnout vyšší pevnosti a trvanlivosti materiálu. Tento součinitel přímo ovlivňuje například konečnou objemovou hmotnost, mechanické vlastnosti či pórovitost. Je možné říct, že teoretické minimum vody pro úplnou hydrataci je $w/c = 0,25$ [1, 2].



Obr. 1 Graf závislosti pevnosti v tlaku na vodním součiniteli [3].
Fig. 1 Relationship between compressive strength and w/c ratio [3].

S vodním součinitelem přímo souvisí i použití některých druhů superplastifikátorů, které umožňují výrobu betonu (a dalších kompozitů na bázi cementu) s nižším obsahem vody bez zhoršení zpracovatelnosti. Pevnost v tlaku materiálu, kterou určuje blízkost cementových částic v cementové hmotě, se obecně zvyšuje s poklesem poměru vody a cementu (w/c). S počátečními mechanickými vlastnostmi kompozitů jsou primárně spojeny první vytvořené hydráty, které se vyvíjejí na povrchu částic cementu [1, 2].

Tento článek se zabývá tématem testování několika typů kompozitů na bázi cementu pomocí akustické emise (AE) v průběhu destruktivní zkoušky. AE je metodou nedestruktivní. V praxi je někdy využívána zejména pro sledování daných stavebních objektů v delším časovém intervalu v souvislosti s údržbou těchto konstrukcí. Význam této metody neustále roste [4].

AE lze považovat za metodu s vysokým potenciálem pro monitorování a hodnocení současného stavu konstrukcí. Používá se k detekci vad nejen v raném stádiu konstrukcí, ale také při jejich pozdějším zatěžování, protože díky AE metodě je možné rozpoznat vady konstrukce dlouho předtím, než struktura úplně selže [5]. Tato metoda se někdy používá při zkouškách zatěžování mostů (např. při měření mostních pilířů) [6].

Metoda AE je založena na detekci elastických vln senzory přímo připojenými (s výjimkou bezdotykových senzorů) k povrchu vzorku. Tyto vlny jsou definovány jako vlny AE a jsou generovány v důsledku prudkého uvolnění energie z lokalizovaného zdroje uvnitř

materiálu. Tímto zdrojem AE mohou být deformační procesy, jako je růst trhlin nebo plastická deformace. Vznik a tvorba trhlin jsou ovlivňovány zejména typem a podmínkami zatěžování [7]. Poloha výsledných vad může záviset na vnitřních trhlinách, trhlinách vzniklých během zatěžování a na mechanickém chování vzorků [8, 9]. Zjišťování poškození různých druhů materiálu při tlakovém zatížení pomocí akustické emise je poměrně běžné a populární mezi některými výzkumníky [10, 11, 12, 13].

2. Popis experimentu

Hlavním cílem provedených experimentů bylo porovnání AE signálů při zkoušce pevnosti v tlaku provedené na vzorcích ve stáří 3 dnů. Za tímto účelem byly vyrobeny jemnozrnné cementové kompozity, které se lišily vodním součinitelem a obsahem plastifikátoru. Složení čerstvého kompozitu vycházelo z normy ČSN EN 196-1 [14] pro testování pevnostních vlastností cementu. Kompozity s označením "M" byly vyrobeny z křemenného písku frakce 0-2 mm, z cementu CEM I 42,5 R (Cementárna Mokrá, Česká republika) a vody v poměru 3:1:0,4 a 3:1:0,5 (písek:cement:voda). Složení kompozitů s označením "MP" bylo upraveno přidáním superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu Sika Viscocrete (společnost Sika, Česká republika) v množství 1 % z hmotnosti cementu. Ostatní složky byly stejné. V Tab. 1 je zobrazeno složení kompozitů. Z každé malty byla pro účely experimentu vyrobena tři zkušební tělesa o rozměru 40×40×160 mm [15].

Tabulka 1. Složení čerstvé malty
Table 1. The composition of the fresh mortar

Označení kompozitů	Složení	
	písek:cement:voda	Množství superplastifikátoru na hmotnost cementu [%]
42_M_040	3:1:0.40	-
42_M_050	3:1:0.50	-
42_M_040 + p	3:1:0.40	1
42_M_050 + p	3:1:0.50	1

Všechny tělesa byly po výrobě zakryty PE fólií a uloženy v laboratorních podmínkách při teplotě (21 ± 2) °C a relativní vlhkosti (60 ± 10) % až do doby testování. Při zkoušení pevnosti v tlaku bylo každé těleso umístěno do zatěžovacího lisu FORM + TEST DELTA 6-300 s rozsahem 0–300 kN, jak je znázorněno na Obr. 2. Na každé těleso se potom umístily pomocí včelího vosku 2 snímače akustické emise (typ IDK 09) s 35 dB předzesilovači. Signály AE byly zaznamenávány měřicím zařízením DAKEL-XEDO.



Obr. 2 Vzorky 42_MP_050 (vlevo) a 42_MP_040 (vpravo) po zkoušce
 Fig. 2 The specimens 42_MP_050 (on the left) and 42_MP_040 (on the right) after the test

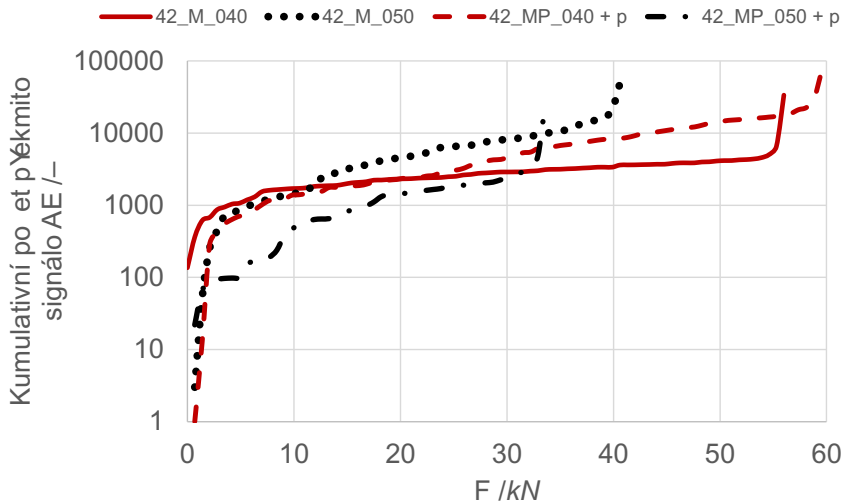
3 Výsledky měření

Pro popis parametrů signálů AE zaznamenaných během testu pevnosti v tlaku byla pozornost zaměřena zejména na kumulativní počet překmitů, dobu trvání, amplitudu a energii těchto signálů.

Je známo, že různé typy trhlin vytvářejí různé typy AE signálů, tyto rozdíly mohou souviset s vlastnostmi materiálu [16, 17]. Doba trvání akusticko-emisního signálu je definována jako časový rozdíl mezi prvním a posledním překročením prahu (prahové napětí bylo nastaveno na 200 mV). Amplituda je největší zaznamenané napětí signálu AE, tento parametr je důležitý při posuzování AE, protože určuje detekovatelnost signálů. Signály s amplitudami, které jsou pod minimálním stanoveným prahem, se nezaznamenávají. Posledním sledovaným parametrem byla AE energie, která je přímo úměrná ploše pod obálkou AE signálu:

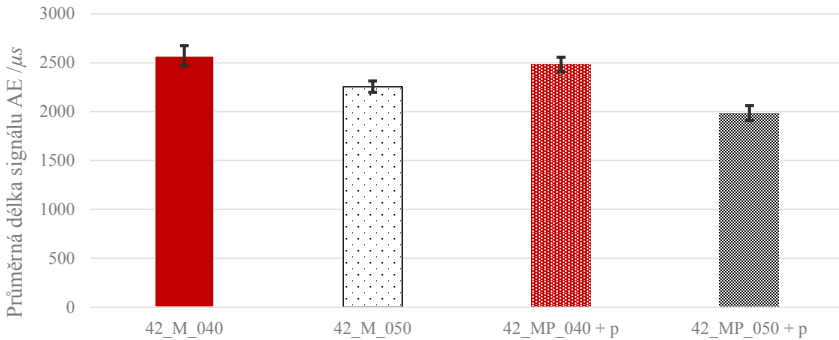
$$AE_{energie_i} = \int_{t_0}^{t_1} V_i(t)^2 dt, \quad (Rc1)$$

kde t_0 je čas příchodu signálu, t_1 je čas konce signálu a V_i je okamžitá hodnota amplitudy.



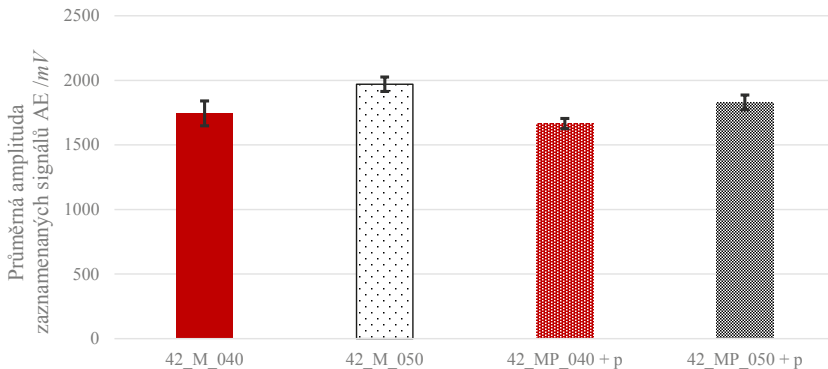
Obr. 3 Závislost kumulativního počtu překmitů signálů AE na zatěžovací síle F
 Fig. 3 The dependence of the cumulative number of AE overshoots on the loading force

Na Obr. 3 je zobrazen kumulativní počet překmitů signálů AE v závislosti na zatěžování u zkoumaných kompozitů. Nejvyšší pevnost v tlaku byla dosažena u vzorků vyrobených ze směsi s $w/c = 0,40$ a s přidáním plastifikátoru. Na druhé straně kompozit s $w/c = 0,50$ s plastifikátorem vykazovala nejnižší stanovenou pevnost v tlaku. Z hlediska výsledků metody AE lze z grafu vyčíst, že nejmenší množství vytvořených trhlin v intervalu 12–30 kN bylo na tělesech s $w/c = 0,50$ s plastifikátorem. Největší množství trhlin pak bylo v tomto intervalu zaznamenáno u vzorků s $w/c = 0,50$ bez plastifikátoru. Výše uvedené skutečnosti jsou pravděpodobně spojeny se silou vazby v cementové matici materiálu. Malty s nižším w/c mají sice pevnější vazbu, ale tato vazba je křehká (k poruchám u malt dochází na rozhraní cementového kamene-kameneiva). Tento účinek je zvláště patrný u kompozitu s $w/c = 0,40$ bez plastifikátoru, kdy vzorky vykazují velmi prudký nárůst počtů překmitů AE v okamžiku selhání. Je ovšem možné, že výsledky jsou ovlivněny i segregací malty po vložení do forem.



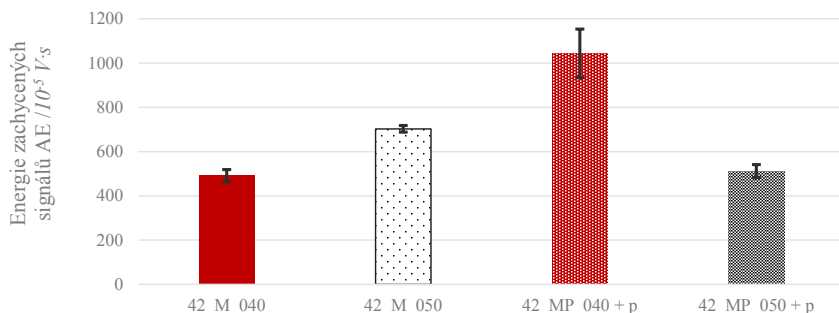
Obr. 4 Průměrná délka signálu AE
 Fig. 4 The duration of AE signals for each specimen

Obr. 4 ukazuje průměrnou délku signálů AE pro jednotlivé malty v průběhu zatěžování. Je zřejmé, že vzorky s nižším w/c vykazují menší útlum signálu AE než vzorky s vyšším w/c. To je pravděpodobně způsobeno celkovou strukturou materiálu (např. hydratovaná cementová zrna jsou těsněji u sebe než v případě vzorků s vyšší hodnotou w/c).



Obr. 5 Amplituda zachycených signálů AE
 Fig. 5 The amplitude of AE signals for each specimen

Obr. 5 znázorňuje velikost průměrných amplitud zaznamenaných signálů AE. Vyšší hodnota amplitudy u vzorků s vyšší hodnotou w/c ukazuje na tvorbu větších (z pohledu velikosti) poruch během zatěžování. To je způsobeno skutečností, že vazba cementové matrice vzorků s vyšším w/c je více náchylná k poškození.



Obr. 6 Energie zachycených signálů AE
 Fig. 6 The energy of AE signals for each specimen

Vypočítané hodnoty energie (dle Rce 1) zachycených signálů AE jsou na Obr. 6. Je zřejmé, že nejvyšší hodnota AE energie byla u vzorků s w/c = 0,40 s plastifikátorem. Tato energie je převážně spojena se způsobem selhání vzorku, kde vzorek s nejvyšší energií selhal "výbušně" na více kusů. Ostatní vzorky se víceméně nerozletěly, pouze se jen rozpadly (viz Obr. 2 vpravo).

4. Závěr

Experimenty ukazují, že metoda akustické emise může významně přispět k podrobnějšímu poznání chování kompozitních materiálů a konstrukcí během jejich životnosti. Zdá se, že tato metoda je zajímavou doplňkovou metodou pro měření chování kompozitů různého složení či celých konstrukcí, jak při jejich výrobě, tak i při jejich zatěžování.

Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že:

- vyšší počet akustických emisních signálů pravděpodobně odpovídá vytvoření většího počtu nových trhlin nebo mikrotrhlin;
- vyšší hodnota amplitudy AE signálů nebo uvolněné energie AE signálů pravděpodobně odpovídají významnějším strukturálním změnám, ke kterým dochází uvnitř materiálu;

Větší (z hlediska velikosti) strukturální změny během testování byly pozorovány u vzorků s vyšším w/c.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu č. FAST-J-18-5369 "Využití metody akustické emise pro experimentální určení vývoje poškození jemnozrnných kompozitů během zatěžování" podporovaného Brno University of Technology.

Použitá literatura

- [1] REINHARDT, H. W.; GROSSE, C. U. Advanced testing of cement based materials during setting and hardening (RILEM Publications S.A.R.L., 2005)
- [2] AITCIN, P.C.; FLATT, R. J. Science and technology of concrete admixtures (Woodhead Publishing, 2015)
- [3] Journal of the Network of African Countries on Local Building Materials and Technologies - Volume 3, Number 2 (HABITAT, 1994, 42 p.): Technology Profile No. 1 - Fibre-concrete Roofing**. New Zealand Digital Library [online]. University of Waikato [cit. 2018-08-27]. Available on: <http://www.nzdl.org/gsdmod?e=d-00000-00--off-0cdl-00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about--00-0-1-00-0-0-11-1-0utfZz-8-00&a=d&cl=CL1.137&d=HASH01f1813030e134a3d7292eca.5>
- [4] OHTSU, M.; SUZUKI, T. Journal of Acoustic Emission, 22 (2005)
- [5] GROSSE, Ch. U.; OHTSU, M. Acoustic Emission Testing (Heidelberg: Springer, 2008)
- [6] OLASZEK, P.; CASAS, J. R.; ŚWIT, G. On-site assessment of bridges supported by acoustic emission, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering, 169(2), 81-92. Thomas Telford Ltd, (2015)
- [7] TSCHEGG, E. K.; SCHNEEMAYER, A.; MERTA, I.; RIEDER, K. A. Cement and Concrete Composites, 62 (2015)
- [8] ALDAHDOOH, M. A. A.; BUNNORI, N. M. Construction and Building Materials, 45 (2013)
- [9] SAGAR, R. V.; PRASAD, B. R. Nondestructive Testing and Evaluation, 27 (2012)
- [10] KOSMANN, N.; KARSTEN, J. M.; SCHUETT, M.; SCHULTE, K.; FIEDLER, B. Determining the effect of voids in GFRP on the damage behaviour under compression loading using acoustic emission. Composites Part B: Engineering, 70, 184-188, (2015)
- [11] TOPOLÁŘ, L.; PAZDERA, L.; CIKRLE, P. Acoustic emission monitoring during static modulus elasticity test of concrete specimen. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 486, pp. 267-272). Trans Tech Publications (2014)
- [12] PASIOU, E. D.; TRIANTIS, D. Correlation between the electric and acoustic signals emitted during compression of brittle materials. Frattura ed Integrità Strutturale, (40), 41 (2017)
- [13] MENG, Q.; ZHANG, M.; HAN, L.; PU, H.; NIE, T. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(10), 3873-3886, (2016)
- [14] EN 196 – 1: Methods of testing cement (2005)

- [15] TOPOLÁŘ, L.; PAZDERA, L.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; SMUTNÝ, J.; MIKULÁŠEK, K. Applied Sciences, 7 (2017)
- [16] OHNO, K; OHTSU, M. Construction and Building Materials, 24 (2010)
- [17] LI, Z.; XI, Y. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (1995)



ANALÝZA PŘESNOSTI LOKALIZACE ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE PRO OBECNÉ KONFIGURACE SENZORŮ

ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCATION PRECISION FOR GENERAL SENSOR CONFIGURATIONS

Milan CHLADA*, Petr GÁLIS**, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ*

* NDT Laboratoř, Ústav termomechaniky AVČR, v.v.i.

**Katedra matematiky, FJFI ČVUT

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

Abstrakt

Vhodné rozmístění snímačů je klíčovým krokem a zároveň předpokladem pro dostatečně přesný odhad polohy zdroje akustické emise (AE). Optimální konfigurace senzorů v případě složitých tvarů konstrukcí je jedním ze stěžejních úkolů expertů v oblasti AE. Řešení problému vede k numerické analýze závislosti mezi chronologií příchoďů signálu ke snímačům a souřadnicemi emisního zdroje. Pomocí algoritmu pro hledání nejkratších cest v diskrétně zadaných tělesech je možné navrhnout tři paralelní nástroje pro vyhodnocování problematických oblastí, jmenovitě mapy citlivosti, podobnosti a nejednoznačnosti, které lze určovat i pro nesouvislá nebo anizotropní tělesa. Analogicky ke globálnímu polohovému systému se při lokalizaci emisních zdrojů setkáváme s efektem tzv. snížení přesnosti vlivem geometrie (GDOP). Podobně jako GDOP parametr ukazují nedávno zavedené citlivostní mapy oblasti se silnou citlivostí lokalizačních výsledků na změnu časů příchoďů nebo chyby v měření. Další dvě zmiňované metody ilustrují topologii prostoru časových diferencí a možné nejednoznačnosti lokalizace emisních zdrojů. Pro ověření numerických předpovědí lokalizačních možností byly teoretické výsledky srovnány s daty naměřenými na reálném zásobníku páry.

Klíčová slova: Akustická emise, lokalizace zdrojů AE, geometrické vlivy.

Abstract

Proper sensor placement is the crucial step and a premise for precise acoustic emission (AE) source location estimate. Optimal sensor configuration in cases of complex structure shapes is one of AE expert challenges. It leads to numerical analysis of relations between the signal arrival chronology and the coordinates of emission sources. Using the algorithm for finding the shortest ways in discretely defined bodies it is possible to design three parallel tools how to evaluate problematic areas, namely the location sensitivity, similarity and ambiguity maps, available even for discontinuous or anisotropic bodies. Analogically to Global Positioning System, localization of AE sources meets the geometrical dilution of precision (GDOP) phenomena. Similarly to GDOP parameter, recently introduced sensitivity map shows critical regions characterized by strong sensitivity of localization results to signal arrival time changes or errors. Remaining two mentioned methods illustrate the topology of arrival time differences space and possible ambiguities of source location. To check the numerical forecast of localization capabilities for given sensor configuration, theoretical results were compared with the data measured on the real steam pressure vessel.

Key words: Acoustic emission, AE source location, geometrical effects

1. Úvod

Rozmístění snímačů akustické emise (AE) předurčuje možnosti této metody lokalizovat potenciální defekty ve sledované konstrukci. Nevhodné polohy senzorů mohou v jistých částech tělesa znemožňovat určení místa emisního zdroje, zejména pokud vlivem změny jeho souřadnic nedochází ke změně chronologie příchodu elastické vlny k jednotlivým snímačům. Takové konfigurace vedou k numerické nestabilitě lokalizačního algoritmu, zvýšené citlivosti na chybu při určování začátků signálů a v neposlední řadě k nejednoznačnému odhadu polohy emisního zdroje.

Problém nestability lokalizace zdroje plynoucí z geometrie rozmístění snímačů má svou analogii např. v oblasti satelitní navigace. Zavádí se zde parametr zvaný „snížení přesnosti vlivem geometrie“ (GDOP–geometrical dilution of precision) [1, 2], který vyjadřuje, do jaké míry ovlivňuje chyba měření odhad zeměpisné polohy:

$$GDOP = \frac{\Delta(\text{výsledná lokalizace})}{\Delta(\text{naměřená data})} \quad (1)$$

Obdobně pokud při sledování AE malá změna naměřených dat (např. časové diference) nezpůsobí velkou změnu výsledných souřadnic zdroje, pak metoda není citlivá vůči chybám měření, tj. určení začátků signálů nebo rychlosti elastické vlny apod. Hodnota parametru GDOP závisí pouze na rozmístění snímačů a pozici zdroje. V oblastech s vysokými hodnotami GDOP tedy nelze očekávat stabilní lokalizaci emisních zdrojů. Především v částech tělesa mimo konvexní obal poloh snímačů.

Dalším indikátorem očekávané přesnosti lokalizace může být parametr nejistoty polohy (LUCY - Location Uncertainty) [3]. Popisuje, jak dobře odpovídá vypočítaná poloha zdroje naměřeným časovým diferencím příchodů signálů. Může být použit jako výběrové kritérium pro rozlišení zdrojů podle míry lokalizační přesnosti.

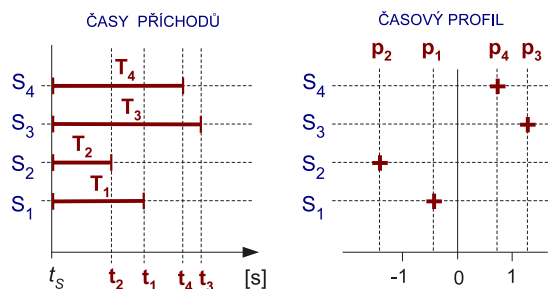
Výše zmiňované přístupy jsou teoreticky připraveny k aplikaci pro obecné tvary konstrukcí. Jejich nasazení je nicméně v praxi omezeno zásadním požadavkem znalosti nejkratších cest mezi emisním zdrojem a snímači. Následující kapitoly se zabývají výpočtním aparátem potřebným pro analýzu přesnosti lokalizace pomocí dané experimentální konfigurace a konfrontují numerické předpovědi s výsledky na reálně naměřených datech.

2. Parametrizace chronologie příchodů elastické vlny ke snímačům

Za nejčastěji používanou metodu určení polohy emisního zdroje lze považovat analýzu časového zpoždění příchodů elastické vlny k jednotlivým snímačům. Tato chronologie může být kromě nejčastěji používaných časových diferencí parametrizována více způsoby. Bez újmy na obecnosti demonstrováme nově navrženou analýzu lokalizačních možností dané konfigurace N snímačů na tzv. časových profilech (ATP), definovaných jako vektor čísel p_i :

$$p_i = \frac{T_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j}{T} = \frac{t_i - t_s - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_j - t_s)}{T} = \frac{t_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j}{T} \quad (2)$$

Časový profil $P=(p_{1..N})$ relativizuje (viz obr. 1) chronologii příchodů elastické vlny představovanou začátky signálů odhadnutými jakožto časy t_i přičemž čas iniciace zdroje t_s není nutné znát. Naopak je pro tuto verzi časových profilů potřeba určit kalibrační dobu T , po kterou se elastická vlna šíří mezi dvěma pevně danými body, např. snímači. Snadnou numerickou úpravou lze dále ukázat, že časový profil nabývá stejných hodnot i při dosažení vzdáleností d_i (tj. zdroj-snímač) namísto T_i (čas šíření vlny od zdroje ke snímači) a příslušné vzdálenosti D za T , přičemž se nemění ani vlivem změny rychlosti šíření vlny. Dostáváme tak užitečnou univerzálnost, kdy mohou být předpočítané vektory P v bodech adekvátně pokrývajících těleso srovnávány s reálně naměřenými hodnotami. Výslednou lokalizaci pak udává bod na tělese, jehož časový profil určený na fyzickém, či numerickém modelu, je nejbližší k předloženému reálnému.



Obr. 1 Relativizace chronologie příchodů elastické vlny časovým profilem.
Fig. 1 Relativisation of arrival-times by arrival-time profile.

3. Numerická analýza lokalizačních možností dané konfigurace senzorů

Pro potřeby dalších výpočtů je nutné znát trajektorii šíření nejrychlejší vlny. Pokud se v tělese tato (nejkratší) cesta nerealizuje jako přímá spojnice zdroje a snímače (zejména v případě otvorů v materiálu), je nutné aplikovat algoritmus pro hledání nejkratších cest, jako např. metodu vycházející z Huygensova principu, optimalizovanou pro diskretizovaná tělesa [4].

Citlivostní mapa

Analogicky ke $GDOP$ lze definovat parametr citlivosti lokalizace (SM). Kvůli numerické nestabilitě v oblastech kritických pro lokalizaci, kde při změně souřadnic zdroje dochází jen k nepatrné změně příslušného časového profilu, je výhodnější brát převrácenou hodnotu $GDOP$. Pro každý „pixel“ X_A představující materiál diskretizovaného tělesa a jeho okolí N_A zavedeme míru $SM(X_A)$ - viz obr. 2. Schéma v pravé části obrázku znázorňuje vybraný detail tělesa s možným tvarem výpočetního okolí N_A . Vzdálenosti pixelů k i -tému snímači jsou spočteny algoritmem pro hledání nejkratších cest. Hodnoty parametru SM pro všechny „pixely“ materiálu tělesa vytvářejí dohromady tzv. citlivostní mapu. Vysoké hodnoty na této mapě vyjadřují potenciálně dobrou přesnost lokalizace, zatímco v oblastech s malými hodnotami, způsobenými

vyšším rozptylem polohy zdrojů ve srovnání s variabilitou časových profilů, lze očekávat horší přesnost lokalizace.

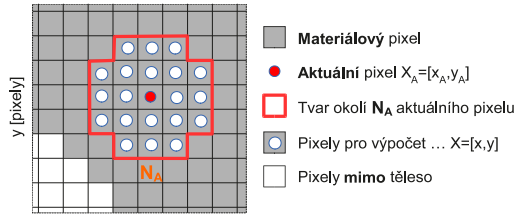
$$SM(X_A) = \text{mean}_{X \in N_A} \left\{ \frac{d_E(P(X_A), P(X))}{d_E(X_A, X)} \right\} \quad (3)$$

kde

$P(X_A)$ – ATP pro pixel X_A

$P(X)$ – ATP pro pixel X

$d_E(\dots, \dots)$ – Eukleidovská vzdálenost



Obr. 2 Definice citlivostního parametru SM.
Fig. 2 Definition of sensitivity parameter SM.

Podobnost časových profilů

Důležitou informací z hlediska posuzování možností lokalizace jsou rovněž změny chronologie příchoďů elastické vlny (parametrizovaná např. časovými profily) vzhledem k poloze zdroje. Topologie prostoru časových profilů může být velmi komplikovaná, jak dokládá obr. 6, kde každá barva zvyrazňuje oblast zdrojů s téměř shodnými chronologiemi. Podlouhlé oblasti v tzv. podobnostní mapě charakterizují zóny s omezenými, či až neexistujícími možnostmi jednoznačné lokalizace.

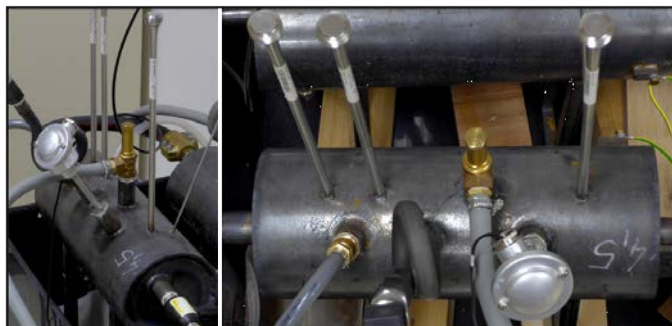
Mapa nejednoznačností

Patrně nejvíce vypovídající úhel pohledu na problematiku určování polohy zdroje vychází z aspektů hledání průsečíků dvou hyperbol při lokalizaci na základě časových diferencí mezi třemi snímači. Tyto křivky se mohou protínat ve dvou bodech, což předesílá možnou nejednoznačnost, kdy dvě různé polohy zdroje generují identickou chronologii příchoďů vln ke snímačům. Tato nejednoznačnost je obecně způsobena nedostatečným počtem senzorů a při návrhu konfigurace emisní aparatury je nutné brát v úvahu reálné možnosti konkrétního rozmístění snímačů na daném tělese. Pro detekci ve výše uvedeném smyslu kritických oblastí je potřeba nalézt takové relativně vzdálené body, které jakožto emisní zdroje generují téměř stejnou chronologii příchoďů elastické vlny, potažmo časový profil. Pro každý pixel $X = (x, y)$ v tělese jsou hledány pixely X_i , které sice nejsou jeho nejbližšími sousedy, ale mají v jisté toleranci shodné časové profily. Míra lokalizační nejednoznačnosti $LAM(X)$, která svými malými hodnotami detekuje problematické oblasti, je pomocí Eukleidovské vzdálenosti $d_E(\dots)$ definována následovně:

$$LAM(X) = \text{MEAN} \left\{ \frac{d_E(P(X), P(X_i))}{d_E(X, X_i)} \mid d_E(P(X), P(X_i)) < \text{tol.} \right\} \quad (4)$$

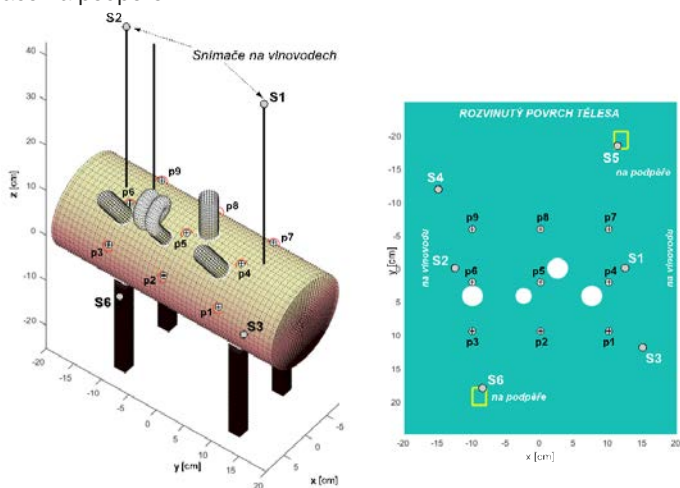
3. Výsledky na reálném tělese

Pro ověření metodologie byly provedeny experimenty s buzením AE na reálném složitém tělese, konkrétně laboratorním zásobníku páry se zabudovanými měřidly tlaku a teploty, vlnovody a podpěrami (viz obr. 3). Numerická předpověď přesnosti lokalizace měla být konfrontována s výsledky určování poloh devíti sad pen-testů na povrchu hlavní části zásobníku.



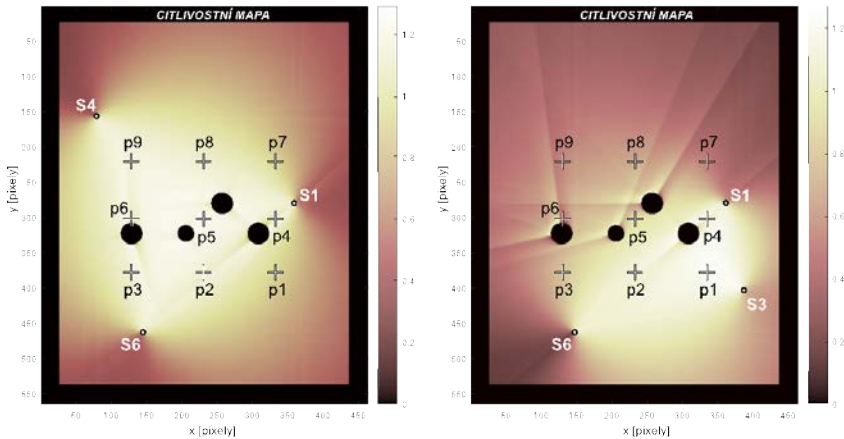
Obr. 3 Experimentální těleso.
Fig. 3 Experimental body.

Po dvou snímačích bylo umístěno na vlnovodech, povrchu tělesa a podpěrách. Schéma rozmístění senzorů a míst provádění pen-testů ve 3D spolu s rozvinutým 2D zobrazením uvádí obr. 4. Všechny podpůrné výpočty nejkratších cest byly provedeny na rozvinutém povrchu tělesa s případným přičtením konstantní délky vlnovodů nebo pozice snímače na podpěře.



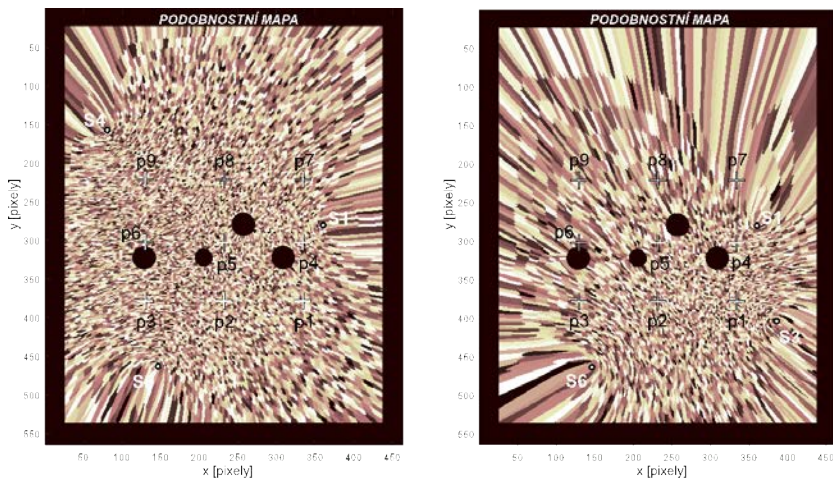
Obr. 4 Schéma konfigurace experimentu.
Fig. 4 Experimental setup scheme.

Pro demonstraci ilustrativnosti výše zavedených metod byly vybrány dvě záměrně rozdílné skupiny tří senzorů, které byly použity při lokalizaci pen-testů. O vhodnosti volby usuzujeme na následujících obrázcích. Oblasti s menší přesností lokalizace jsou patrné již na citlivostních mapách – viz tmavé oblasti zobrazující malé hodnoty a linie ostrých přechodů na obou částech obr. 5.



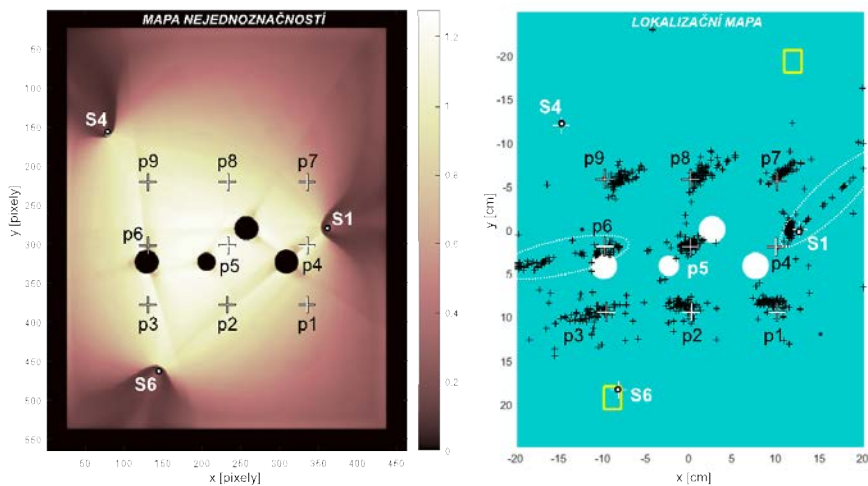
Obr. 5 Citlivostní mapy pro dvě vybrané kombinace tří senzorů.
 Fig. 5 Sensitivity maps for two selected combinations of three sensors.

Podle očekávání jsou oblasti s možností nejstabilnější lokalizace v konvexním obalu umístění snímačů, přičemž dílčí singularita a problémy s numerickou stabilitou mohou být způsobeny složitějším šířením elastických vln kolem děr v materiálu.

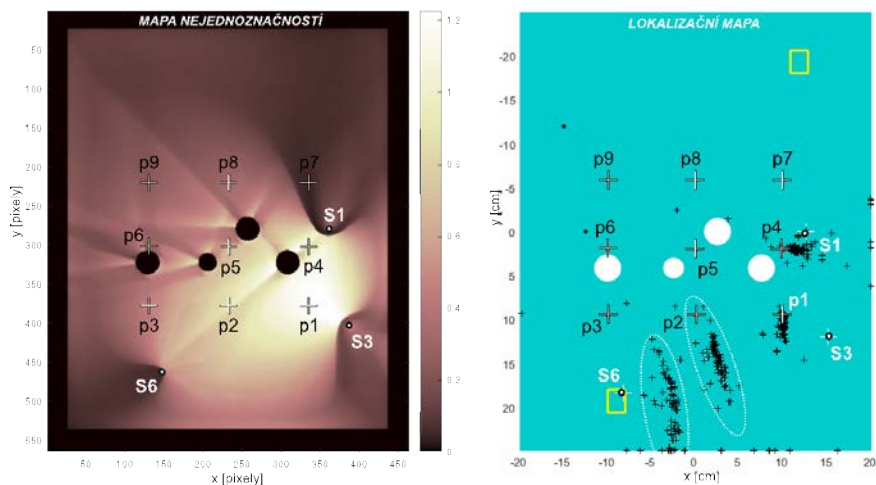


Obr. 6 Podobnostní mapy pro dvě vybrané kombinace tří senzorů.
 Fig. 6 Similarity maps for two selected combinations of three sensors.

Finální srovnání možností obou konfigurací snímačů přináší velmi ilustrativní mapy sestavené z hodnot míry lokalizační nejednoznačnosti a určené odhady pozic pentestů na základě porovnání skutečných a modelových časových profilů (obr. 7 a 8).



Obr. 7 Mapa nejednoznačností versus lokalizační výsledky pro snímače 1-4-6.
 Fig. 7 Location Ambiguity Map versus location results for sensor group 1-4-6.



Obr. 8 Mapa nejednoznačností versus lokalizační výsledky pro snímače 1-3-6.
 Fig. 8 Location Ambiguity Map versus location results for sensor group 1-3-6.

4. Závěry

Po záznamu devíti sad přibližně padesáti pen-testů šesti kanály emisní aparatury bylo klíčovým krokem určit odhad začátků signálů. Během testování se jako nejstabilnější osvědčila expertní metoda detekce prvního nasazení [6]. Dalším problémem bylo nastavení rychlosti šíření vln v různých komponentách tělesa, vyrobených z různých materiálů, na kterých byly připevněny snímače. Rychlosti byly oproti reálnému měření korigovány tak, aby nejvíce souhlasila výsledná poloha pen-testu s příslušnou nejlepší hodnotou mapy nejednoznačností (tj. poloha 1 pro konfiguraci 1-3-6 a poloha 5 pro skupinu 1-4-6). Optimální rychlosti se poté pohybovaly kolem 5km/s.

Srovnáním obrázků 7 a 8 lze říci, že věrohodnost lokalizace emisních zdrojů je velmi dobře ilustrována mapami nejednoznačností, nebo podobností. Zejména v případě konfigurace senzorů 1-3-6 odpovídá výsledný rozptyl odhadnutých souřadnic zdroje vývoji hodnot míry lokalizační nejednoznačnosti (*LAM*). Dostačující přesnost nastává jen v poloze 1, zatímco v polohách 2 a 3 lokalizace postupně selhává. Výsledný malý posun na pozici 4 je zřejmě způsoben lokální citlivostí detekovanou jistými ostrými přechodovými liniemi procházející odpovídajícími pixely mapy nejednoznačností. Výsledky pro zbývající polohy nejsou zobrazeny kvůli příliš velkému rozptylu a posunu. Závěrem lze říci, že uvedené mapy citlivostí, podobností a nejednoznačností velmi dobře předznamenávají lokalizační možnosti dané konfigurace snímačů.

Poděkování

Práce vznikla v rámci grantového projektu GAČR č. 17-22615S a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998.

Literatura

- [1] R. Zekavat and R. M. Buehrer, 'Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances', Vol. 27. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Y. B. Ar-Shalom, X. R. Li and T. Kirubarajan, 'Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software', John Wiley&Sons, 2004.
- [3] T. Thenikl, D. Altmann, H. Vallen, 'Quantifying Location Errors', Proc. of EWGAE 2016. Prague, Czech Society for Nondestructive Testing, ISBN 978-80-214-5386-9, pp. 495-502.
- [4] M. Chlada and Z. Převorovský, 'Shortest Ways Finding in Discrete Bodies', Proc. of NDT in Progress 2015. Prague, Czech Society for Nondestructive Testing, ISBN 978-80- 214-5262-6, pp. 69-74.
- [5] M. Blaháček, 'Time Differences Uncertainty Influence on Acoustic Emission Source Location Accuracy', Proc. of NDT in Progress 2007. Prague, Czech Society for Nondestructive Testing, ISBN 978-80- 214-3505-6, pp. 15-22.
- [6] M. Chlada, Z. Prevorovsky, 'Expert AE signal arrival detection', International Journal of Microstructure and Materials Properties 6(3/4), pp. 191-205



PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PŘI HODNOCENÍ STAVU POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

OVERVIEW OF METHODS USED IN ASSESSING ROAD CONDITIONS

Michal JANKŮ *, Ilja BŘEZINA *, Josef STRYK *

* Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Contact e-mail: michal.janku@cdv.cz

Abstrakt

Jen stěží se najde řidič motorového vozidla, který by se nikdy nevyjadřoval ke stavu té či oné pozemní komunikace. Nejčastěji si pak všímáme množství a velikosti výtluků na vozovce. Ač se to možná někomu nezdá, pravidelné kontroly stavu vozovky zabezpečuje i vlastník nebo správce dotčené komunikace a o jejím výsledku vede záznam. Tyto prohlídky mají většinou charakter vizuální kontroly a podle rozsahu se dělí do čtyř kategorií. Nejkratší interval mají běžné prohlídky, na dálnicích se provádí každý pracovní den, na silnicích I. třídy 2x týdně, na silnicích nižších tříd již méně často. Běžnou prohlídkou se zjišťuje hlavně správná funkce dopravního značení, bezpečnostního zařízení a závady ve sjízdnosti. Naopak podrobnější diagnostický průzkum zpravidla předchází plánované opravě či rekonstrukci vozovky a slouží jako podklad pro přípravu projektové dokumentace. Některá měření se také provádí před uvedením nové vozovky do provozu. K tradičním zkoumaným parametrům patří měření protismykových vlastností vozovky, měření průhybů a hodnocení únosnosti prostřednictvím rázového zařízení FWD, či odběr jádrových vývrtů a jejich analýza v laboratoři. Mezi novější metody lze zařadit georadar, s jehož pomocí je možné stanovit tloušťky vrstev vozovky. Laserové skenování umožňuje měřit proměnné parametry, jako je příčná a podélná nerovnost a díky termokameře lze mimo jiné určit teplotu asfaltové směsi při pokládce vrstev asfaltových vozovek.

Klíčová slova: prohlídky silnic, georadar, termokamera, rázové zařízení FWD

Abstract

It is hard to find a driver of a motor vehicle who would have never commented on conditions of this or that road. Most often we notice the amount and sizes of potholes on roads. Even if it may seem strange, regular inspections of road condition is performed by the owner or administrator of the road and the results are recorded. These inspections are mostly visual and divided into four categories. General inspections are performed on shortest intervals, every working day on motorways, twice a week on first class roads, and less often on lower class roads. General inspection is mainly focused on the right operation of road signing and marking, safety devices and defects on road pavements. In contrast, a more detailed diagnostic survey usually precedes a planned road reconstruction and is used as a basis for the project documentation. Some measurements are also performed before a new road is put into operation. Typical measured parameters include anti-skid properties of road pavement, deflection measurement and the evaluation of bearing capacity using a Falling Weight Deflectometer, and extraction of drill cores and their analysis in the laboratory. Regarding

more recent methods, a georadar can be used to determine thicknesses of pavement layers. Laser scanning allows for variable parameter measurements, such as transverse and longitudinal unevenness. In addition, it is possible to determine the temperature of hot asphalt mixture when laying asphalt pavement layers thanks to the thermal camera.

Key words: road inspections, georadar, thermal camera, Falling Weight Deflectometer

1. Úvod

Tento článek popisuje procesy a metody sloužící k monitorování stavu či k diagnostice pozemních komunikací. Autoři článku se osobně přes 3,5 roku podíleli na provádění běžných prohlídek silnic I. třídy v Jihomoravském kraji a provedli mnoho diagnostik na pozemních komunikacích v České republice. V první části článku jsou charakterizovány typy jednotlivých prohlídek prováděných na pozemních komunikacích v České republice. Následuje přehled tradičních diagnostických metod a dále i těch novějších.

2. Prohlídky pozemních komunikací

Vykonávání prohlídek nařizuje a upravuje zákon o pozemních komunikacích č. 13/1997 Sb. V něm se mimo jiné píše, že vlastník nebo správce pozemní komunikace zajišťuje její prohlídky. Prohlídka se zaměřuje na posouzení dopadů zejména stavebních, technických a provozních vlastností pozemní komunikace na její bezpečnost. Vyhláška č. 104/1997 Sb. rozlišuje čtyři kategorie prohlídek podle rozsahu a frekvence provádění: běžné, hlavní, mimořádné a bezpečnostní inspekce komunikací zařazených do transevropské silniční sítě

Z výše zmíněných, jsou nejčastěji prováděny běžné prohlídky, které se soustředí především na správnou funkci dopravního značení, bezpečnostního zařízení a závady ve sjízdnosti. Na dálnicích jsou vykonávány každý pracovní den, na silnicích I. třídy 2x týdně, na silnicích II. třídy 2x měsíčně a na silnicích III. třídy 1x měsíčně.

Běžné prohlídky jsou vykonávány z jedoucího vozidla. V případě, že inspektor zahlédne nějakou poruchu, odstaví bezpečně vozidlo a jde ji zaznamenat. V době, kdy zaměstnanci Centra dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV) prováděli běžné prohlídky silnic I. třídy v Jihomoravském kraji, byl záznam poruch prováděn pomocí chytrého mobilního telefonu. Při pořízení fotografie poruchy došlo zároveň k automatickému zaznamenání polohy díky GPS. Po doplnění komentáře byly záznamy odesílány odpovědným osobám na Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD).

Mezi nejčastěji zaznamenané poruchy patřily výtluky, vytržené nebo poničené směrové sloupky, vyvrácené značky a poškozená svodidla. Rychlost opravy se lišila podle typu poruchy a střediska či cestmistrovství, ke kterému náležel úsek silnice, na němž se nacházela porucha. Dle našich zkušeností byla většina výtluků obratem opravena. Horší situace panovala v případě poškozených svodidel, ty často čekaly na opravu několik týdnů až měsíců.

Cílem hlavní prohlídky je zjištění stavebně technického stavu komunikace, včetně jejích součástí a příslušenství. Hlavní prohlídka se provádí nejméně jednou za 5 let,

jinak vždy při uvedení nového nebo rekonstruovaného úseku komunikace do provozu a před skončením záruční doby. Hlavní prohlídka se provádí formou pochůzky a je při ní sledován stav vozovky a tělesa komunikace včetně krajnice. U poruch se zjišťuje jejich rozsah (plocha, délka) a umístění na vozovce. Jevy zjištěné v průběhu hlavní prohlídky jsou doplněny o dostupné údaje proměnných parametrů (drsnost, podélná a příčná nerovnost, zbytková životnost), změřené a vyhodnocené na základě příslušných ČSN.

Mimořádnou prohlídku zajišťuje vlastník nebo správce mimo termíny běžných a hlavních prohlídek, a to zejména při náhlém poškození vozovky (např. dopravní nehodou, živelní pohromou), při výrazné změně dopravního zatížení (např. v důsledku nařízení objíždky) nebo při nutnosti získat vstupní data pro systémy hospodaření s vozovkou. Jak u hlavních, tak i u mimořádných prohlídek silnic bývají často použity některé z níže uvedených diagnostických metod.

3. Protismykové vlastnosti vozovky

U většiny dopravních nehod je za viníka označován řidič dopravního vozidla. Jako příčina nehody se v takových případech často uvádí nepřiměřená rychlost. V lepších případech končí nehody jen pomačkanými plechy, v těch nejhorších naopak až těžkým zraněním nebo smrtí. Otázkou je, jestli tato daň není až příliš vysoká, obzvlášť, pokud zraněný ani nebyl viníkem nehody. Nekvalitní vozovka se špatnými protismykovými vlastnostmi zvyšuje riziko smyku a prodlužuje brzdovou dráhu až o desítky metrů.

Protismykové vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují bezpečnost silničního provozu. Prokázaly to různé výzkumné projekty, které porovnávaly počty dopravních nehod se stavem protismykových vlastností povrchu vozovky. Z porovnání vyplynulo, že na úsecích silnic I. třídy s hodnocením protismykových vlastností povrchu vozovky klasifikačním stupněm 5 – havarijní stav je 16x více nehod než na úsecích s hodnocením klasifikačním stupněm 1 – velmi dobré protismykové vlastnosti. V současnosti se často používá termín „odpouštějící silnice“, což znamená, že pokud řidič udělá chybu, tak by silnice měla být v takovém stavu, aby řidič měl možnost svoji chybu napravit, případně aby následky dopravní nehody byly minimalizovány [1].

Zhoršený stav vozovky hodnotí běžný řidič většinou podle nerovností či množství výtluků. Špatné protismykové vlastnosti naopak často pozná, až když je pozdě. V praxi se k měření užívá vozidlo TRT (obr. 1).



Obr. 1 Měřicí vozidlo TRT [2]

Pro zjištění kontinuálního průběhu součinitele podélného tření se používá jednokolový závěs s měřicím kolem rovnoběžným se směrem pojezdu umístěným v levé jízdni stopě. Hydraulicky ovládané brzdění měřicího kola umožňuje při měření na pozemních komunikacích nastavení poměru skluzu na 25 %, což odpovídá systémům ABS v automobilech. Snímače měří rychlost vozidla a rychlost měřicího kola. Stálý kontakt měřicí pneumatiky se zkoušeným povrchem lze nastavit v rozmezí 700 - 1300 N. Řídící a regulační technika ve vozidle umožňuje automatický provoz měřicího zařízení ve zvoleném režimu, výpočetní technika se stará o záznam a vyhodnocování měřených veličin v reálném čase. Měření se provádí na vodním filmu tloušťky 0,5 mm, proto je vozidlo vybaveno dávkovacím zařízením a nádrží s vodou.

4. Diagnostika a hodnocení únosnosti vozovky

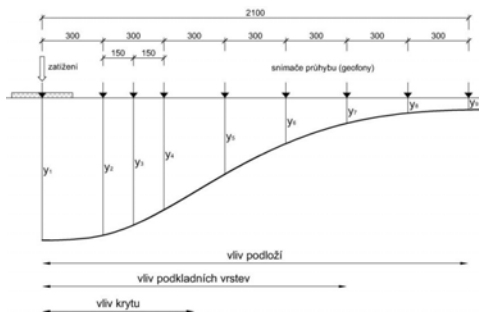
Diagnostika a hodnocení vozovky z hlediska jejich únosnosti se obvykle provádí měřením průhybů povrchu vozovky rázovým zařízením FWD, které zatěžuje vozovku stacionárním impulzním zatížením. Rázové zařízení FWD umožňuje nastavit parametry zatížení tak, aby se blížily reálnému zatížení kol pohybujících se vozidel. Skutečnému průhybu však nejvíce odpovídá průhyb měřený při pohyblivém dynamickém zatížení. Nejnovějším zařízením splňujícím toto kritérium je zařízení TSD (Traffic Speed Deflectometer), které umožňuje měřit při rychlosti provozu na pozemní komunikaci.

Rázové zařízení FWD (Falling Weight Deflectometer, obr. 2) je tradiční zařízení používané pro měření průhybů, které zatěžuje povrch vozovky tlumeným rázem odpovídajícím zatížením kolem nápravy nákladního vozidla (je generováno pádem břemene na gumové tlumiče a přenáší se přes kruhovou zatěžovací desku na povrch zkoušeného místa vozovky), zároveň měří odezvu vozovky na toto dynamické zatížení. Omezením pro měření zařízením FWD jsou především teplotní podmínky. Teplota povrchu vozovky při měření musí být v rozsahu 5 – 30 °C.

Výstupem z měření na diagnostikovaných bodech (obvykle s odstupem 25 m mezi jednotlivými body) jsou hodnoty průhybu v různých vzdálenostech od osy zatížení tvořící průhybovou křivku (obr. 3).



Obr. 2: Rázové zařízení FWD pro měření průhybů vozovek, zdroj: CDV



Obr. 3: Průhybová křivka vynesená z výsledků měření rázovým zařízením FWD při použití 9 snímačů průhybu, zdroj: CDV

Cílem měření je vyhodnotit únosnost konstrukčních vrstev vozovky a jejího podloží na základě změřených dat. Na hodnocení únosnosti vozovek se používají komplexní výpočtové programy. Zjišťuje se zbytková životnost vozovky a tloušťka potřebného zesílení, přičemž se počítá s rázovými moduly pružnosti vrstev určenými zpětným výpočtem z průhybové křivky změřené na povrchu vozovky.

Zesílení, případně rekonstrukce vozovky, se navrhuje v případě, že je vozovka hodnocena jako neúnosná. Tloušťka zesílení se odvíjí od předpokládaného dopravního zatížení, kvality materiálu zesilující vrstvy, únavových procesů ve vozovce apod.

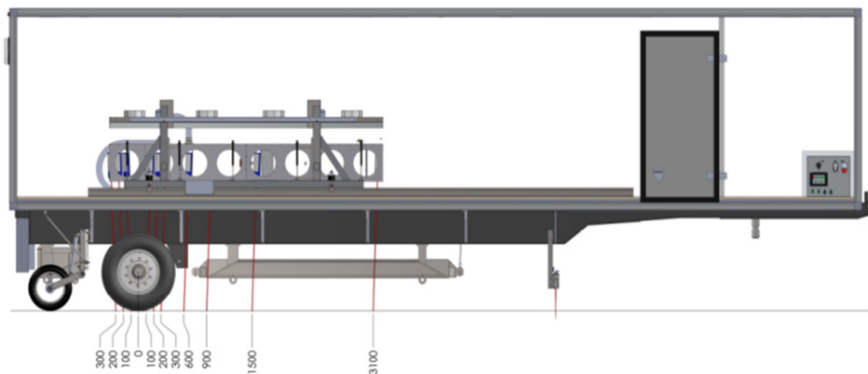
Pro hodnocení únosnosti z měření průhybů vstupují do výpočtu rázových modulů pružnosti tloušťky vrstev vozovky. Ty se obvykle zjišťují odběrem jádrových vývrtů po pravidelných vzdálenostech (např. po 250 m). Tento přístup však nemůže zaručit optimální výsledky, neboť vnitřní skladba konstrukce vozovky je známa pouze v místě odebrání jádrového vývrtu.

Současná praxe ukazuje na nezbytnost doplnění informací z jádrových vývrtů o kontinuální měření georadarem (kapitola 6) pro průběžné stanovení tlouštěk vrstev vozovky a nalezení jejich případných anomálií, což pozitivně ovlivní výpočet rázových modulů pružnosti, optimalizaci návrhu a snížení finančních nákladů na opravu konstrukce vozovky.

Traffic Speed Deflectometer (obr. 4) slouží k zjišťování průhybů povrchu vozovky při rychlosti 40 – 80 km/h. Průhyb, získaný při pohyblivém (dynamickém) zatížení, vyvolaný pohybujícím se kolem vozidla, nejvíce odpovídá skutečnému průhybu při zatížení nákladními vozidly pohybujícími se rychlostí dopravního proudu. Zařízení TSD tak vnáší do konstrukce vozovky během jízdy podobné dynamické zatížení (velikost, doba trvání) jako ostatní nákladní vozidla pohybující se v reálném provozu.

Výhodou je také možnost zaznamenat průhyb vozovky v celé linii průjezdu vozidla, což neomezuje pouze na měření lokálních míst, jako je tomu u rázového zařízení FWD.

Z výsledků zařízení TSD získá uživatel kompletní informaci o únosnosti vozovky v celém měřeném úseku. Odpadá také problém s omezováním provozu na pozemních komunikacích jako při měření zařízení FWD, které může v případě vysokých intenzit dopravy způsobit značné dopravní problémy. Zvyšuje se bezpečnost účastníků silničního provozu a posádky měřicího zařízení během měření. Velkou výhodou je rovněž vysoká kapacita měření, která umožňuje měřit až několik set kilometrů vozovek denně. Kvůli laserovým snímačům nelze měření provádět za deště nebo na mokré vozovce.



Obr. 4 Schéma návěsu zařízení TSD s tuhým nosníkem a Doppler-laser snímači [3]

Zařízení tvoří jízdní souprava těžkého nákladního vozidla skládající se ze standardního tahače návěsů a z modifikovaného návěsu. V klimatizovaném návěsu je umístěn tuhý nosník s příslušným počtem laserových snímačů pracujících na bázi Dopplerova jevu, které snímají povrch vozovky pravé stopy vozidla v ose dvojmontáže návěsu.

5. Jádrové vývrty

Odběr vzorků vrstev vozovky umožňuje vysvětlit příčiny poruch vozovky a získat doplňující informace pro návrh opravy. Slouží ke zjištění stavu konstrukce vozovky, jejího krytu, podkladních vrstev a podloží. Jádrové vývrty jsou odebírány za účelem zjištění typu, tloušťky a stavu porušení stmelených vrstev konstrukce vozovky a zároveň pro potřebu získání dostatečného množství materiálu asfaltových vrstev pro jeho laboratorní posouzení. V silniční laboratoři lze zjišťovat například kvalitu spojení jednotlivých vrstev, obsah asfaltového pojiva a zrnitost směsi kameniva, mezerovitost asfaltové směsi, míru zhutnění a mezerovitost vrstvy, odolnost asfaltové směsi proti trvalým deformacím či vlastnosti zpětně získaného asfaltového pojiva.

Na jádrových vývrtech odebraných z cementobetonového krytu a lze určit pevnost betonu v tlaku a v tahu za ohybu. V CDV jsme dále schopní nad rámec stanovení fyzikálně mechanických vlastností provádět analýzu vzorků polarizačním mikroskopem

(petrografie kameniva), skenovacím elektronovým mikroskopem, energiově disperzním analyzátozem a petrografickým či chemickým rozbozem.

Jádrové vývrty jsou nejběžněji odebírány prostřednictvím silniční vrtačky postavené na podvozku přívěsu. Součástí je nádrž s vodou o objemu 200 l na chlazení jádrové korunky při vrtání. Pro pohon vrtačky se používá benzínový motor o výkonu 5 kW, který je také součástí soupravy (obr. 5).



Obr. 5 Odběr jádrového vývrty, zdroj: CDV



Obr. 6 Jádrový vývrt, zdroj: CDV

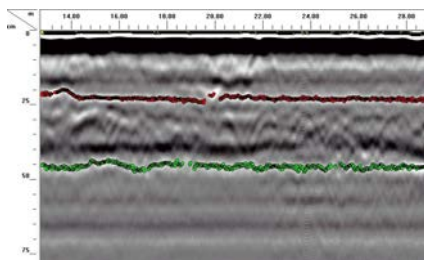
6. Georadar

Tato metoda je založena na opakovaném vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického (EM) signálu v rozsahu od několika set MHz do několika GHz do zkoumaného prostředí a záznamu odrazu části energie tohoto signálu od rozhraní vrstev a různých materiálů [4]. Nejčastější aplikace v oblasti dopravní infrastruktury jsou následující stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovek, detekce dutin pod krytem vozovky, detekce nadměrného obsahu vody v konstrukčních vrstvách vozovek apod.

Tloušťky konstrukčních vrstev vozovky se počítají ze změřeného času průchodu signálu konstrukčními vrstvami vozovky a z určené rychlosti šíření EM signálu. Obvykle se pro účely stanovení rychlosti šíření EM signálu jednotlivými konstrukčními vrstvami vozovek provádí minimálně jeden jádrový vývrt. Tímto způsobem se kalibrují stanovené tloušťky vrstev. Přesnost při stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovek se pohybuje v rozsahu 3–15 %, v závislosti na porušení vrstev, druhu materiálu jednotlivých vrstev a požadovaném hloubkovém dosahu použité antény. Dle našich zkušeností jsou pro účely kontinuálního měření tloušťek krytových vrstev vozovek vhodné trychtýřové antény s centrální vysílací frekvencí 1 až 2 GHz (obr. 7). Pro účely měření tloušťek podkladních vrstev vozovek je vhodné použití antény s centrální vysílací frekvencí 400 až 900 MHz, ideálně v kombinaci s měřením trychtýřovou anténou. Měření je možné provádět za vysokých rychlostí až 80 km/h s krokem měření od 5 cm, viz záznam z měření na obr. 8.



Obr. 7 Příklad zařízení pro měření tloušťek vrstev vozovky, zdroj: CDV



Obr. 8 Záznam tloušťek konstrukčních vrstev vozovky - radargram, zdroj: CDV

7. Laserové skenování

Moderní měřicí vozidla jsou vybaveny technikou pro zaznamenávání proměnných parametrů vozovek a snímání jejich povrchu - například systém RST snímá podélný profil a makrotexturu ve třech stopách. Systém LCMS dokáže skenovat povrch ve 3D s rozlišením lepším, než jeden milimetr, přičemž zvládá jeden příčný sken každých 5 mm i při rychlosti 90 km/h. Vozidla také mohou disponovat systémem automatického rozpoznávání a klasifikace poruch vozovky (především trhlin). Výhodou je, že všechna měření mohou probíhat současně, jsou synchronizována a georeferencována. Systém funguje při běžných rychlostech silničního provozu, není proto potřeba nijak omezovat dopravu na měřené komunikaci. Laserová měření nejsou závislá na světelných podmínkách, avšak nelze měřit na mokré vozovce.

Automatizované zpracování dat poskytuje objektivní informace o stavu silniční sítě. Měřicí vozidlo vybavené laserovým systémem dokáže v krátkém čase poskytnout zásadní informace pro vlastníky a správce komunikací pro oblast kontroly a plánování běžné údržby a systémy hospodaření s vozovkou.

V praxi se měření provádí zejména u nových vozovek před jejich převjímkou, opakovaně se kontrolují parametry vozovek v průběhu záručních lhůt. Díky rychlosti měření lze kontrolovat stav vozovek během jejich životnosti i u rozsáhlých sítí komunikací [5].



Obr. 9 Multifunkční měřicí systém - CleveRa Car [5]

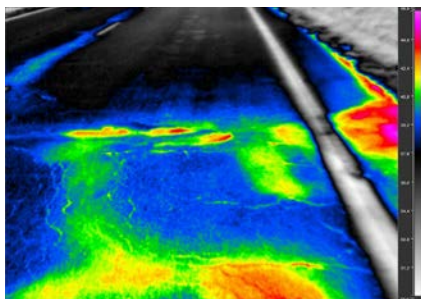
8. Termografie

V CDV se zabýváme výzkumem v oblasti použití termografie při diagnostice vozovek pozemních komunikací. Při měření používáme jak ruční termokameru, tak i termokameru připevněnou na měřicí vozidlo. Výsledkem měření jsou termogramy znázorňující povrchové rozložení teplot na vozovce. Ukazuje se, že na některých termogramech jsou například trhliny ve vozovce (obr. 10) lépe rozeznatelné, než na běžné kameře.

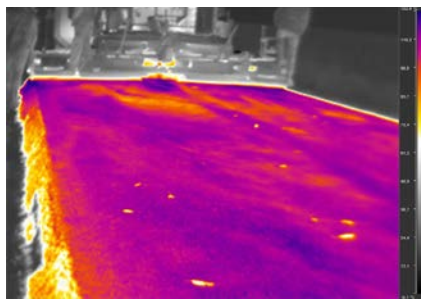
Asi více praktické je využití termokamery při pokládce nových asfaltových vrstev vozovek (obr. 11). V této aplikaci se již termokamera v některých zemích používá. Při pokládce asfaltových vrstev je důležité, aby asfaltová směs měla správnou teplotu. Příliš studená směs zhoršuje zpracovatelnost, snižuje se schopnost asfaltovou vrstvu dostatečně zhutnit. Výsledkem je zvýšená mezerovitost, která potenciálně může vést k budoucí tvorbě poruch. Případně může docházet k problémům spojených s přítomností vlhkosti v konstrukci.

Hlavní příčiny nadměrného vychladnutí směsi jsou příliš dlouhý časový interval mezi naložením a vykládkou, nesprávné naložení nákladu a absence plachty či jiných prostředků určených k omezení nadměrného ochlazování směsi během přepravy.

Termokameru lze využít jako nástroj pro ověření správné teploty asfaltové směsi při její pokládce a tedy i pro kontrolu kvality práce. Termografie může do jisté míry přispět k prodloužení životnosti asfaltových vozovek a zároveň pomoci snížit náklady na budoucí opravy.



Obr. 10 Termogram povrchu vozovky, zdroj: CDV



Obr. 11 Termogram pořízený při pokládce asfaltové vozovky, zdroj: CDV

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci programu Národní program udržitelnosti I, projektu Dopravní VaV centrum (LO1610) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Literatura

- [1] NEKULA, L. Skutečně děláme vše pro to, aby silnice byly „odpouštějící“? In: *Konference asfaltové vozovky 2015: 24. - 25. 11. 2015, České Budějovice*. Praha: PRAGOPROJEKT, 2015. ISBN: 978-80-903925-7- 1.
- [2] NEKULA, L. Technická specifikace zařízení TRT. Vyškov: Měření PVV, 2012.
- [3] BECKEDAHL, H. J., KRARUP, J., FERNE, B. 2015. Optimierung der Erhaltungsplanung durch den Einsatz des Tragfähigkeitsmesssystems Traffic Speed Deflectometer (TSD) für die Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB). In *Straße und Autobahn*. 2015, no. 3, p. 202 - 209. ISSN 0039-2162.
- [4] STRYK, J. Uplatnění nových diagnostických metod při hodnocení stavu vozovek PK. In: *Silniční konference 2017: sborník příspěvků*, Brno, 18. - 19. 10. 2017, s. 107 - 111.
- [5] VARS, 2018 [online] VARS Brno a.s. [Cit. 29. 9. 2018]. Dostupné z: <http://www.vars.cz/clevera-car-zakladni-informace-o-multifunkcnim-vozidle>
- [6] JANKŮ, M. a STRYK, J. Metodika pro termografické měření objektů dopravní infrastruktury. In: *Defektoskopie 2017, 47. mezinárodní konference: 7. – 9. 11. 2017, Chomutov, Česká republika*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2017, 97 - 108. ISBN 978-80-214-5592-4.
- [7] JANKŮ, M. a STRYK J. Využití infračervené termografie při pokládce asfaltových vrstev vozovky. In: *Konference Asfaltové vozovky 2017: 28. - 29. listopadu 2017, České Budějovice*. Praha: PRAGOPROJEKT, 2017. ISBN 978-80-906809-0-6.
- [8] STRYK, J., JANKŮ, M., GROŠEK, J., BŘEZINA, I. Diagnostika objektů dopravní infrastruktury nedestruktivními metodami. *Silniční obzor*, 2017, roč. 78, č. 12, s. 323-327. ISSN 0322-7154.



KOERCITIVNÍ SÍLA A ÚNAVA FEROMAGNETICKÉHO MATERIÁLU

COERCIVE FORCE AND FATIGUE OF FERROMAGNETIC MATERIALS

Štěpán JÍRA^{*}, Jaroslav FIALA^{**}, Pavel MAZAL^{***},
František VLAŠIC^{***}, Vendula SKŘIVÁNKOVÁ^{***},

^{*} Čermákova 46 Plzeň CZ, ^{**}University of West Bohemia Plzeň CZ,
^{***} Brno University of Technology CZ

Abstrakt

Koercitivní síla zkoumaných vzorků oceli 15CH2NMFA se vlivem jejich cyklického zatěžování až na počáteční exkurs moc neměnila. Což potvrdilo výsledky našich dřívějších měření, která byla prováděna jiným způsobem. Domníváme se, že neměnnost koercitivní síly během cyklického zatěžování je stejně jako neměnnost mechanických vlastností projevem rovnováhy mezi dvěma procesy: strukturalizací pole dislokací a parakrystalickou distorzí.

Klíčová slova: únava, koercitivní síla, dislokace, parakrystalické distorze

Abstract

With the exception of an initial excursion, coercive force of the examined samples of steel 15CH2NMFA has not changed much in the course of cyclic loading. Which confirmed the results of our previous measurements that were executed in a different way. We suppose that the invariability of the coercive force during cyclic loading, similarly as the constancy of the mechanical properties, reflects the equilibrium between two processes which are effective during cyclic loading: differentiation of the dislocation field and paracrystalline distortion.

Key words: fatigue, coercive force, dislocations, paracrystalline distortions

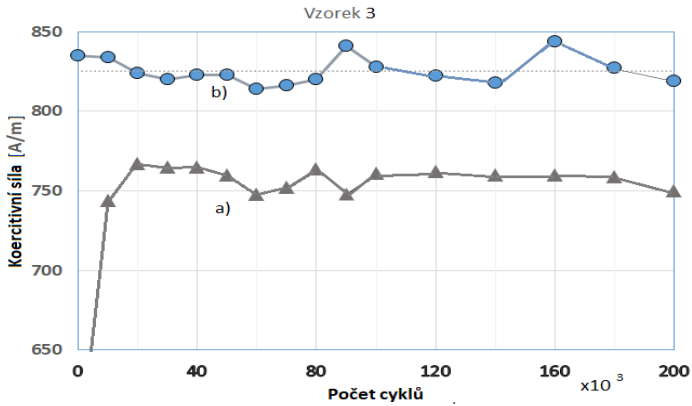
1. Úvod

Koercitivní síla feromagnetika je velice citlivá na jeho strukturu [1]. Když jsme ji však měřili během cyklického zatěžování, měnila se málo [2]. A proto jsme provedli další, jinak uspořádané měření. Výsledky tohoto experimentu a jejich diskuze jsou předmětem předkládaného příspěvku.

2. Výsledky měření

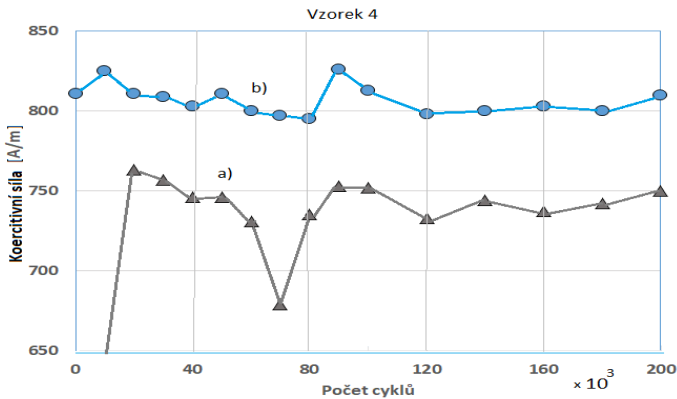
Koercitivní sílu jsme měřili u čtyř vzorků oceli 15CH2NMFA, které byly (všechny stejně) cyklicky zatěžovány v ohybu až do 200 000 cyklů. Zatěžování bylo přerušováno po každých 10 000 cyklech až do 100 000 cyklů, následně pak po každých 20 000 cyklech až do 200 000 cyklů. Během každého přerušování byla změřena koercitivní síla (v A/m); pak byl vzorek zmagnetován a koercitivní síla změřena ještě jednou. Na obrázcích 1 – 4 jsou zakresleny

pro každý vzorek hodnoty koercitivní síly bez zmagetování (a) a po zmagetování (b). Vzorky jsou označeny čísly 3, 4, 5 a 6. Celé měření bylo provedeno během dvou dnů.



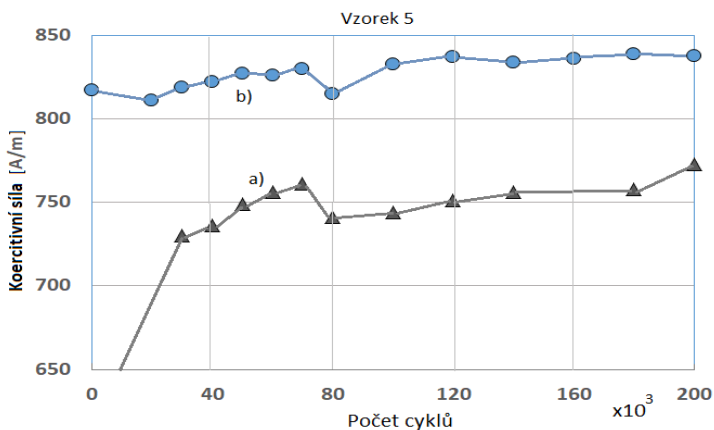
Obr. 1. Koercitivní síla nezmagetovaného a zmagetovaného vzorku (a) a (b) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek 3.

Fig. 1. Coercive force of non-magnetized and magnetized sample (a) and (b) as a function of the number of loading cycles for the sample 3.



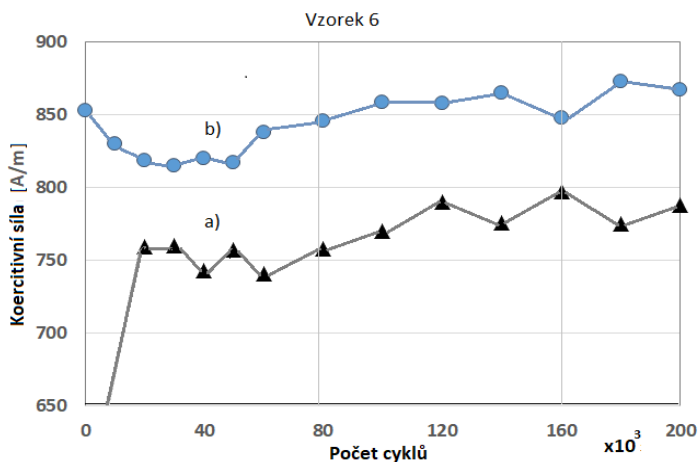
Obr. 2. Koercitivní síla nezmagetovaného a zmagetovaného vzorku (a) a (b) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek 4.

Fig. 2. Coercive force of non-magnetized and magnetized sample (a) and (b) as a function of the number of loading cycles for the sample 4.



Obr. 3. Koercitivní síla nezmagnetovaného a zmagnetovaného vzorku (a) a (b) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek 5.

Fig. 3. Coercive force of the non-magnetized and magnetized sample (a) and (b) as a function of the number of loading cycles for the sample 5.



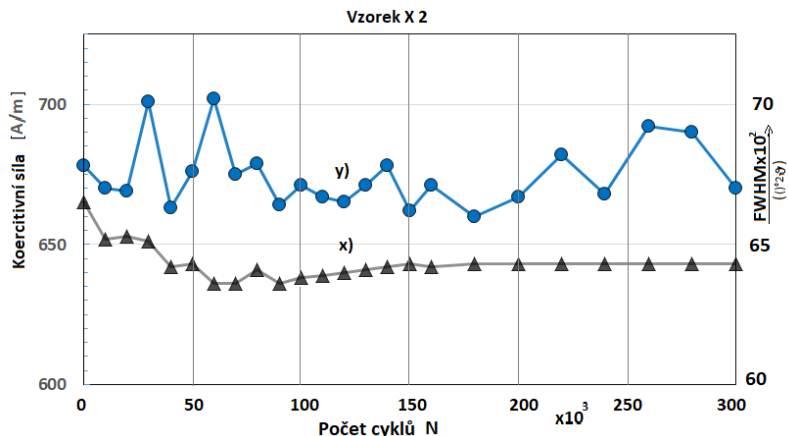
Obr. 4. Koercitivní síla nezmagnetovaného a zmagnetovaného vzorku (a) a (b) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek 6.

Fig. 4. Coercive force of non-magnetized and magnetized sample (a) and (b) as a function of the number of loading cycles for the sample 6.

3. Porovnání s předchozím měřením

Koercitivní sílu jiných šesti vzorků oceli 15CH2NMFA jsme při cyklickém zatěžování v ohybu měřili již dříve [2]. Tehdy bylo zatěžování přerušováno po každých 10 000 cyklech až do 160 000 cyklů a pak po každých 20 000 cyklech až do lomu. Během každého přerušování byla změřena koercitivní síla (v A/m) a kromě toho také šířka rentgenové difrakční linie (211) feritu

v polovině její výšky (FWHM) pomocí záření CoK_α (v úhlových stupních odleskového úhlu 2θ). Na obr. 5 jsou pro jeden z těchto vzorků (X2) zakresleny změřené hodnoty koercitivní síly (spodní křivka x) a šířky difrakční linie (211) feritu (horní křivka y) v závislosti na počtu zátěžných cyklů. Závislosti změřené na ostatních pěti vzorcích měly podobný průběh. Celé měření trvalo $2\frac{1}{2}$ roku. Koercitivní síla byla tehdy měřena pomocí téhož přístroje a tímž člověkem jako v případě měření, jež jsme popsali v minulém odstavci.



Obr. 5. Koercitivní síla (x) a šířka difrakční linie (211) feritu v polovině její výšky (y) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X2.

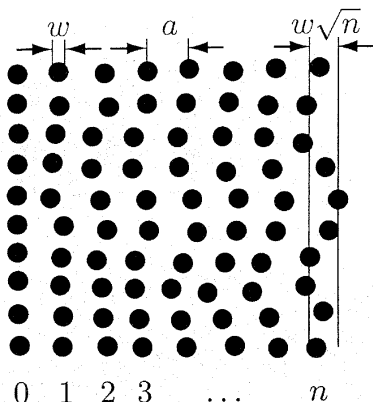
Fig. 5. Coercive force (x) and full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite (y) as a function of the number of loading cycles for the sample X2.

Z porovnání obr. 1–4 a obr. 5 je patrné, že závislost koercitivní síly na počtu zátěžných cyklů, změřená v obou pokusech (dvoudenním a $2\frac{1}{2}$ ročním) je podobná: po jistém počátečním počtu zátěžných cyklů se koercitivní síla už příliš nemění. Na rozdíl od rentgenové difrakce, která se po celou dobu cyklického zatěžování mění rytmicky.

4. Diskuze

Mechanickým zatěžováním tělesa se mění jeho mikrostruktura. Zvláště se to týká dislokací [3–5] a parakrystalických distorsí [6–9]. Pokud jde o dislokace, může energie vnášená mechanickým zatěžováním aktivovat jejich vznik, ale stejně tak i zánik anebo různé změny v uspořádání dislokačního pole (shlukování dislokací, tvorbu vrstevných poruch jakož i rozhraní mosaikových bloků a krystalitů). Parakrystalické distorze představují objemovou poruchu ideální struktury, která vzniká paradoxně jako kontraproduktivní účinek rekrystalisace, tedy spontánního procesu, jimž se má ideální krystalová struktura, deformovaná zejména dislokacemi, restituovat (obr. 6). Je to Sisyfova práce: při nápravě jedněch poruch vznikají poruchy jiné, jejichž kombinací se tvoří opět ty poruchy původní, aby byly napraveny procesem, který však zároveň produkuje ty produkty dříve jmenované atd. Když přibývá dislokací, struktura tělesa se zjemňuje; ale tím se zvětšuje jeho mezipovrchová energie, což vede ke hrubnutí struktury. Když však struktura tělesa hrubne, zvětšuje se jeho parakrystalická energie a to pak způsobí rozpad velkých mosaikových bloků a následné zjemnění struktury. Z tohoto začarovaného kruhu je jedinou únikovou cestou únavový lom: podobně jako při tuhnutí odlitku, uzavřou mezi sebou mosaikové bloky, rostoucí při rekrystalizaci, necelistvost,

kteřá je nadkritická; což jest jev náhodný, jehož pravděpodobnost roste s počtem zátěžných cyklů [10].



Obr. 6. Při růstu krystalu dochází občas k chybě, odchylce od pravidelného uspořádání atomů. Pokud se taková chyba neodstraní, dokud je ještě na krystalizační frontě, kde je struktura rozvolněná a náprava defektu snadná, zůstane v krystalu prakticky navždy. Strukturální poruchy tohoto druhu nazýváme parakrystalické distorze. Jejich tvorba je nevratná; pouze přibývají.

Fig. 6. Sometimes an error, departure from the regular arrangement of atoms arises during growth of a crystal. If such an error is not removed while it is still at the crystallization front where the structure is loose and its rectification easy, it remains in crystal virtually for ever. Structural defects of this kind are called paracrystalline distortions. Their formation is irreversible; their number only increases.

Hnací silou střídavého hřubnutí a zjemňování mikrostruktury tělesa, které pozorujeme na základě sledování rentgenové difrakce a elektrochemického potenciálu [11, 12], je elastická deformační energie, která se v tělese hromadí následkem jeho cyklického zatěžování. To, že se přitom mez kluzu ani koercitivní síla (feromagnetika) nemění, dokazuje, že celkový sumární termodynamický potenciál všech mechanicky a magneticky aktivních strukturálních defektů tělesa zůstává během cyklického zatěžování, při neustálých, rytmických změnách jejich konfigurace, (po počátečním náběhu) konstantní. (Když je pak dosažen mezní limit strukturálních defektů, je disipace deformační energie, přiváděné do tělesa jeho cyklickým zatěžováním, přeměňována jinam.)

5. Závěr

Na rozdíl od rentgenové difrakce a měření elektrochemického potenciálu se koercimetrie pro monitorování procesů, které probíhají ve struktuře cyklicky zatěžovaného feromagnetika, nehodí.

Výsledky prezentované v této práci jsou součástí výsledků projektu VUT v Brně FSI na podporu studentů DS č. FV18-54 „Přehled NDT metod a jejich využití“ a projektu VUT v Brně FSI číslo FSI-S-17-4428 “Development of technology for the production of fast magnetoreological valves”

Literatura

- [1] Š. Jíra, J. Fiala: Hysteresní smyčka feromagnetik. In: Proceedings of NDE for Safety/DEFEKOSKOPIE 2016, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2016, 37–51.
- [2] J. Fiala, M. Kolega, Š. Jíra, P. Mazal, F. Vlašic, V. Kratochvílová: Sledování strukturních změn, vyvolávaných cyklickým zatěžováním oceli 15CH2NMFA, pomocí rentgenové difrakce a měření koercitivní síly. In: Proceedings of NDE for Safety/DEFEKOSKOPIE 2017, L. Pazdera, P. Mazal, M. Kořenská (eds), Brno University of Technology, Brno 2017, 63–70.
- [3] J. P. Hirth, J. Lothe: Theory of dislocations, McGraw–Hill Book Company, New York 1968.
- [4] A. S. Nowick: The golden age of crystal defects, Annual Reviews of Materials Science 26 (1996), 1–19.
- [5] J. Pokluda, F. Kroupa, L. Obdržálek: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek, PC-DIR, Brno 1994.
- [6] A. M. Hindeleh, R. Hosemann: Paracrystals representing the physical state of matter, Journal of Physics C: Solid State Physics 21 (1988), 4155–4170.
- [7] W. Wilke: The model of the paracrystal and its application to polymers. In: Defect and Microstructure Analysis by Diffraction, R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge (eds), Oxford University Press for International Union of Crystallography, Oxford 1999, 247–263.
- [8] H. Bradaczek, Paracrystallinity. In: Defect and Microstructure Analysis by Diffraction, R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge (eds), Oxford University Press for International Union of Crystallography, Oxford 1999, 234–246.
- [9] J. Fiala: Parakrystaly, Ceramics–Silikáty 36 (1992), 49–57.
- [10] J. Fiala, I. Kraus: Povrchy a rozhraní, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2016.
- [11] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega, F. Vlašic, P. Liškutín: Mechanismus únavových procesů. In: Proceedings of NDE for Safety/DEFEKOSKOPIE 2013, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2013, 17–22.
- [12] E. M. Gutman: Mechanochimija metallov i zaščita ot korosii, Metallurgia, Moskva 1981.



TAJEMNÝ, FASCINUJÍCÍ A NEPŘEDVÍATELNÝ ULTRAZVUK

A MYSTERIOUS, FASCINATING AND UNPREDICTABLE ULTRASOUND

Bernard KOPEC

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

Abstrakt

Neobvyklý pohled do historie využití ultrazvuku a ultrazvukového zkoušení materiálů a výrobků od antiky po dnešek. Zamyšlení a připomenutí dávných, zapomenutých objevů, které měly vliv na vývoj ultrazvukových metod a jejichž souvislosti se v odborné literatuře objevují zřídka. Přiblížení velikánů filozofie a fyziky po nichž jsou nazvány některé pojmy, používané v ultrazvukové defektoskopii.

Klíčová slova: historie, nedestruktivní zkoušení, ultrazvuk, zkoušení materiálů a výrobků, akustika, fyzika

Abstract

An unusual look at the history of ultrasound and ultrasonic testing of materials and products from antiquity to today. Reflections and reminders of ancient, forgotten discoveries that had an impact on the development of ultrasound methods and whose connections are rare in the literature. Approaching the Greats of Philosophy and Physics, which are called some terms used in ultrasonic defectoscopy.

Key words: history, non-destructive testing, ultrasound, testing of materials and products, acoustics, physics

Historie klasické akustiky – základní kámen teorie ultrazvuku

Významným objevům často předcházela geniální idea. Nejinak tomu bylo i při objevování v oblasti ultrazvuku. Ultrazvuk patří do vědního oboru akustiky, jedné z nejstarších fyzikálních disciplín. Historie klasické akustiky se datuje už od antických časů. Její význam spočíval od samého počátku ve spojení s naukou o slyšení a hudbou. Dlouhou dobu, tj. až do konce 19. století, se považovala akustika a optika za velmi blízká odvětví fyziky, protože se soudilo, že světlo jsou pružné vlny hypotetického éteru. Zákony objevené v akustice se proto automaticky přenášely na optiku a naopak.

Nejstarší poznatky o výšce tónu ve vztahu k délce struny a jejímu napětí pocházejí z antiky od PYTHAGORASE ZE SAMU (570-510 BC), legendárního řeckého filosofa, matematika a astronoma. Pythagoras již v 6. století BC věděl, že výška tónu je nepřímo úměrná délce struny. ARISTOTELES ZE STAGIERY (384-322 BC) byl filozof vrcholného období řecké filozofie, nejvýznamnější žák Platonův a vychovatel Alexandra Makedonského. Aristoteles ve 4. století BC se správně domníval, že zvuk se šíří pohybem vzduchu, ale mylně tvrdil že vysoké tóny se šíří rychleji než hluboké. Aristotelova filozofie – hypotéza ze 4. století BC se uplatnila v řadě pozdějších fyzikálních experimentů. MARCUS VITRUVIUS POLLIO (70–25 BC), římský architekt, autor slavného díla „Deset knih o architektuře“ správně popsal mechanismus šíření zvuku a významně přispěl ke stavební akustice divadel. ANICIUS MANLIUS TOQUATUS SEVERINUS BOËTHIUS (480–525 AD), křesťanský teolog a filozof, někdy označovaný jako „poslední Říman“ a zároveň „první filozof středověku“ zdokumentoval několik myšlenek, týkající se hudební vědy, včetně tvrzení, že lidské vnímání zvuku závisí na velikosti frekvence.

Princip nezávislosti zvuků od jednotlivých zdrojů, jako součást principu superpozice, pochází od LEONARDA DA VINCIHO (1452–1519), geniální renesanční osobnosti. Roku 1638 objevil GALIELO GALILEI (1564–1642), často uváděn jako „otec moderní astronomie“, „otec moderní fyziky“ a dokonce „otec vědy“, že výška tónů je dána jeho frekvencí a intenzita tónů jejich amplitudou. MARIN MERSENNE (1588– 1648), francouzský matematik, hudební teoretik, fyzik a filozof studoval vibrace z napjatých strun, výsledky těchto studií shrnul ve třech Mersenniových zákonech. Mersenne zjistil, že frekvence tónu struny je přímo úměrná odmocnině z napínací síly a nepřímo úměrná odmocnině z lineární hustoty struny. Objevil také existenci vyšších harmonických složek vydávaných současně se základním tónem struny. Byl rovněž první, kdo se pokusil změřit rychlost zvuku ve vzduchu. Pokusy s kanónem naměřil rychlost 428 m/s. Mersennovo dílo „Harmonie universelle“ (Paris, 1636) se stalo v té době základem pro moderní hudební akustiku.

Rychlost zvuku ve vodě poprvé poměrně přesně změřili JEAN DANIEL COLLADON a CHARLES STURM. Na Ženevském jezeře postavili v roce 1827 dvě lodky do vzdálenosti 13487 m. Speciální zařízení uhodilo do zvonu, ponořeného do vody a odpálilo nálož střelného prachu. Pozorovatel na druhé lodi naměřil rozdíl mezi akustickým a optickým signálem 9,4 s, což odpovídá 1435 m/s.

Vědci, po nichž jsou pojmenovány některé základní pojmy v teorii ultrazvuku

Rayleighův rozptyl - složka útlumu ultrazvuku, využívána k hodnocení struktury. LORD RAYLEIGH – John William Strutt (1842-1919), anglický fyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku (1904), objevil argon, se zabýval akustikou, optikou, elektromagnetickým rozptylem světla, objevitel jednoho z vyzařovacích zákonů. Rayleigh svoji teorii rozptylu publikoval v roce 1871. Vyšel z předpokladu, že světlo rozptyluje přímo molekuly vzduchu a vypočítal, že intenzita rozptýleného světla závisí

na jeho vlnové délce. Součástí této teorie je vysvětlení, proč je obloha modrá. Modré světlo má nejkratší vlnovou délku. Původní Rayleighova myšlenka byla ověřena experimenty na kovech.

Rayleighova vlna - povrchová vlna.

Rovněž tato vlna, která nese název pro lordu Rayleighovi hraje dnes významnou úlohu při zkoušení ultrazvukem i při analýze seismických jevů. Teoretické základy akustiky a ultraakustiky popsal lord Rayleigh ve své obsáhlé dvojdílné knize „Theory of Sound“ v roce 1877.

Snellův zákon lomu – základní zákon, popisující šíření vlnění, které přechází lomem z jednoho prostředí do jiného prostředí.

WILLEBORD SNELLIUS (1580-1626) byl nizozemský matematik a astronom. Navrhl a uvedl do praxe novou metodu výpočtu poloměru země. Nejznámější je svým zákonem lomu světla (obecněji elektromagnetického záření) na rozhraní dvou prostředí o různých indexech lomu. Později však bylo zjištěno, že zákon lomu již znal muslimský matematik IBN SAHL (940-1000) z Bagdádu, jehož nalezené manuskripty z roku 984 dokazují jeho objev.

Huygensův princip – zákon vlnění, odvozen z myšlenky, že z každého bodového zdroje vlnění se šíří elementární kulová vlna a obálka těchto elementárních kulových vln vytváří výslednou vlnoplochu.

CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695) byl významný holandský matematik, fyzik, astronom i autor rané science fiction. K jeho zásluhám patří teleskopická pozorování vesmírů, díky nimž vysvětlil povahu prstenců kolem Saturnu a objevil jeho měsíc Titan, dále pokusy, týkající se měření času, vynález kyvadlových hodin či výzkumy optiky a odstředivé síly. Jeho myšlenka, že světlo je tvořeno vlněním, byla klíčová pro pochopení duality částice a vlnění.

Fresnelova zóna – blízké pole vyzařovaného ultrazvukového svazku, vyznačující se maximy a minimy akustického tlaku.

AUGUSTIN JEAN FRESNEL (1788-1827) byl francouzský fyzik, jenž významně přispěl k ustanovení teorie vlnové optiky. Vyvinul speciální čočku dnes zvanou Fresnelova, jako náhradu za zrcadla, která se používá dodnes. Byl členem Francouzské akademie a jeho jménem je pojmenována řada aplikací, které vytvořil (Fresnelův hranol, Fresnelovo číslo, Fresnelova difrakce, Fresnelova lampa aj.).

Fraunhoferova zóna – vzdálené pole vyzařovaného ultrazvukového svazku vyznačující se pozvolným klesáním tlaku.

JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787-1826) byl německý optik, fyzik a astronom. Byl objevitelem spektrální analýzy. Ve spektrech vesmírných objektů objevil tmavé čáry, které se dnes nazývají jeho jménem. Teoretické vysvětlení původu Fraunhoferových čar podal později německý fyzik GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824-1887), který má rovněž významné místo v historii ultrazvuku svým vysvětlením šíření příčných i podélných vln v tyčích.

Besselova funkce – matematická funkce pro výpočet akustického tlaku mimo osu kruhového měniče.

FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846) byl německý astronom, matematik, geodet. Jako první člověk změřil paralaxu hvězdy a vypočítal její vzdálenost od země. Vypočítal rovněž dráhu Halleyovy komety.

Fourierova transformace - obraz komplexního spektra ultrazvukového impulsu.

JOSEPH FOURIER (1768-1830) byl francouzský matematik a fyzik. Nejvíce se proslavil zkoumáním matematických řad, které byli nazvány jeho jménem a jejich aplikacemi k problémům toků tepla. Je rovněž objevitelem skleníkového efektu (1824). Byl členem Francouzské akademie.

Objevil se pojem ULTRAZVUK

Jako počátek objevu ultrazvuku lze snad datovat rok 1794. Tehdy významný italský biolog a psycholog LAZZARO SPALLANZANI (1729-1799) si povšimnul při studiu letu netopýrů v kostelních věžích, že se ve tmě zcela bezpečně vyhýbají zvonům a nejrůznějším překážkám v kopolích. Ve své knize „Opuscoli di fisica“ uvedl, že tento jev nesouvisí se zrakovými vjemy, ale dosud neznámými, lidským uchem neslyšitelnými zvukovými vibracemi, které netopýři za letu trvale vydávají. Po odrazu od překážky je zpětně vnímají a podle nich se orientují i v nejčlenitějším prostoru. Obdivuhodný předpoklad tohoto vědce potvrdily svými výzkumy u netopýrů zoologové GALAMBOS (1942) a GRIFFIN (1944) až o 250 let později.

V roce 1830 FELIX SAVART určil rozsah slyšitelnosti lidského ucha od 14 – 16 Hz do 24 kHz, tj. asi 11 oktáv. Pojem ultrazvuk se pak ustálil u frekvence zvuku nad 16 případně 20 kHz. Éra moderního ultrazvuku začala kolem roku 1917 s využitím vysokofrekvenčních akustických vln Langevinových křemenných rezonátorů pro detekci ponorek.

Často oslavován jako otec ultrazvukového zkoušení, SERGĚJ Y. SOKOLOV, slavný sovětský vědec, působící v Elektrotechnickém institutu V. I. Uljanova (Lenin) v Leningradě (nyní zase St.Petersburg) se narodil v roce 1897 rovněž v St. Petersburgu.

První jeho nápad využít ultrazvuku k detekci vad se zrodil již v roce 1920, ale v této době ještě neexistovala potřebná technologie. V roce 1928 podal v Německu patent, který je možno označit jako první patent z oboru ultrazvukové defektoskopie. O několik let později prokázal průchodovou technikou možnost zjištění vad v kovech. V roce 1935 Sokolov zveřejnil podrobnosti o experimentech s křemennými generátory a o různých metodách generování ultrazvukové energie ve zkušebních vzorcích. Navrhl rovněž první ultrazvukový mikroskop, jehož rozlišení bylo stejné jako u optického mikroskopu.

Historie vývoje na tomto fascinujícím poli vědy, snad i umění, je velmi bohatá a mnohokrát by její popis překonal určený rozsah tohoto článku. Historický vývoj od roku 1830 do současnosti alespoň některých důležitých objevů (*významnější jsou označeny kurzívou*) na tomto poli uvádím pouze v přehledu a odkazují na výběr z literatury.

Některé významné události v novodobé historii ultrazvukového zkoušení

- 1830 Savart vyvinul velké ozubené kolo pro generování frekvencí 24 kHz – první ultrazvukový generátor.
- 1842 Joule objevil magnetostrikční jev umožňující generaci ultrazvuku do 200 kHz.
- 1845 Stokes zkoumal vliv viskozity na útlum.
- 1860 Tyndall vyvinul citlivý plamen k detekci vysokofrekvenčních vln.
- 1866 Kundt použil prachu v tubě k měření rychlosti zvuku.
- 1876 Galton vynalezl ultrazvukové píšťalky o frekvenci 80 000 Hz.
- 1877 Rayleighova „*Theory of Sound*“ stanovila základ pro moderní akustiku.
- 1880 Bratři Curieovi objevili přímý piezoelektrický jev.
- 1881 Lippmann teoreticky zdůvodnil piezoelektrický jev, bratři Curieovi objevili nepřímý piezoelektrický jev
- 1890 Koenig studoval limity slyšitelnosti, vyrobil vibrace až 90 000 Hz.
- 1903 Lebeděv a spolupracovníci vyvinuli kompletní ultrazvukový systém pro studium absorpce vln.
- 1912 Potopení Titaniku vedlo k návrhům na využití akustických vln k detekci ledovců.
- 1912 Richardson podal první patent pro detekci podvodních ech od ponořené části ledovce
- 1914 Fessenden postavil první sonar systém pro odhalení ledovců ze vzdálenosti dvou mil.
- 1915 Langevin dal vznik moderní vědě o ultrazvuku vývojem křemenných měničů pro detekci ponorek.
- 1921 Cady objevil křemenný stabilizovaný oscilátor.
- 1922 Hartmann vyvinul ultrazvukový generátor proudu vzduchu.
- 1925 Pierce vyvinul ultrazvukový interferometr.
- 1926 Boyle a Lehmann objevili vliv bublinek a kavitaci v kapalinách pomocí ultrazvuku.
- 1927 Wood a Loomis popsali účinky intenzivního ultrazvuku.
- 1928 Pierce vyvinul magnetostrikční měnič.
- 1928 Herzfeld a Rice vyvinuli molekulární teorii disperse a absorpce zvuku v plynech.
- 1928 Sokolov navrhl využití ultrazvuku k detekci vad – základ ultrazvukové defektoskopie.
- 1930 Debye, Sears, Lucas a Biquard objevili difrakci světla pomocí ultrazvuku.

- 1930 Harvey podal zprávu o fyzikálních, chemických a biologických účincích ultrazvuku v makromolekulách, mikroorganismech a buňkách.
- 1931 Mülhauser získal patent na použití dvou ultrazvukových měničů pro detekci vad v pevných látkách.
- 1937 Sokolov provedl ultrazvukový obraz trubky.
- 1938 Pierce a Griffin detekovali ultrazvukové skřeky netopýrů.
- 1939 Pohlman zkoumal terapeutické využití ultrazvuku.
- 1940 *Firestone, ve Spojených státech a Sproule, v Británii, objevili nezávisle na sobě ultrazvukovou impulsní detekci vad*
- 1940 Sproule položil základy ke konstrukci dvojité sondy
- 1940 Troost sestavil zařízení, přivádějící kontinuálně kapalinu na sondy – základ immersních metod
- 1940 Sonar extensivně využíván k detekci ponorek.
- 1941 *Firestoneův Reflectoscope - mezník využívání ultrazvuku v NDT*
- 1942 Bratři Dussikové provedli první pokus o lékařské zobrazování pomocí ultrazvuku.
- 1944 Lynn a Putnam úspěšně použili ultrazvukové vlny ke zničení mozkové tkáně zvířat.
- 1945 Objeveny nové piezoelektrické keramiky (titaničitan barnatý).
- 1945 Začátek vývoje silových ultrazvukových procesů.
- 1946 Branson a Bloch vyrobili první ultrazvukový tloušťkoměr
- 1947 *Mason a McSkimin určili závislost útlumu ultrazvuku na frekvenci*
- 1949 *J. a H. Krautkrämerovi vyvinuli první moderní ultrazvukový defektoskop pro rutinní průmyslové použití*
- 1950 *Kaiser objevil základy akustické emise.*
- 1954 Jaffe objevil nové piezoelektrické keramiky (titaničitan-zirconat olovnatý).
- 1959 *J. Krautkrämer uveřejňuje AVG diagram – základ rutinního kvantitativního hodnocení vad ultrazvukem.*
- 1961 Pappadakis zkoumal vliv ultrazvuku na hodnocení struktury - základ NDE (hodnocení materiálu ultrazvukem, použití ultrazvuku nejen k dosavadnímu účelu vyhledávání vad, ale i k hodnocení materiálových vlastností ocelí).
- 1962 *Krautkrämer vyrobil první ultrazvukový tranzistorový bateriový přístroj.*
- 1963 V Anglii začal vycházet ULTRASONICS – dodnes nejvýznamnější periodikum všech oborů využití ultrazvuku.
- 1973 Bienále ULTRASONICS INTERNATIONAL se stávají nejvýznamnějším vědeckým fórem všech ultrazvukových oborů.
- 1974 *Macovski podává patent na phased array.*

Literatura

- [1] KOPEC, B.: Historický přehled ultrazvukových zkoušek In: Defektoskopie 1995, Tábor, sborník, str. 135-140
- [2] GRAF, K. F.: Historical Highlights in Ultrasonic. In: Ultrasonics International 1979, Graz, proceedings, p. 176-184
- [3] KOPEC, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. ČNDT, Cerm, Brno 2008



NOVÁ CERTIFIKAČNÍ NORMA SYSTÉMŮ ISO 9001:2015 A CO DÁLE?

NEW CERTIFICATION STANDARD FOR SYSTEMS ISO 9001: 2015 AND WHAT ELSE?

Bernard KOPEC

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

Abstrakt

ISO 9001, jedna z nejznámějších a nejužívanějších certifikačních norem v Česku i ve světě v září 2018 plně nahradila rozsáhlá revize, která se dotkne v celé oblasti výroby a poskytování služeb. Rovněž NDT v oblasti jak zkoušení, tak personální certifikace, tak akreditace zkušeben nedestruktivního zkoušení ovlivní postupy mandatorního prokazování shody. Co zavádění této významné revize přinesla a v budoucnu přinese je předmětem diskuze a výměny zkušeností s implementací na řadě vědeckých i populárních konferencí a seminářů v celém světě. Příspěvek zhodnotí některé zkušenosti a kritiku praktického zavádění především na úseku destruktivního a nedestruktivního zkoušení materiálů, výrobků a konstrukcí.

Abstract

ISO 9001, one of the most well-known and most widely used certification standards in the Czech Republic and the world in September 2018, has fully replaced the extensive revision that will affect the whole area of production and service delivery. Also NDT in the area of both testing and personnel certification as well as the accreditation of non-destructive testing laboratories will influence mandate compliance procedures. What the introduction of this significant revision has brought, and in the future will bring them the subject of discussion and exchange of experience with implementation at a number of scientific and popular conferences and seminars around the world. The paper will evaluate some experience and criticism of the practical implementation, especially in the field of destructive and non-destructive testing of materials, products and constructions.

Historie managementu systému dle ISO 9001

Původní verze normy z počátku 90. let obsahovala 20 popisných kapitol. Její aplikace do praxe byla poměrně složitá a procesní přístup se v ní hledal těžce. Revize z roku 2008 již plně "vsadila" na procesní přístup. Norma obsahovala 8 kapitol, z toho 5 prověřovaných během auditů. Pokud organizace správně nastavila své popisy do procesů, jasně definovala odpovědnosti za jejich řízení a definovala metriky pro

sledování jejich výkonnosti, přechod na nové požadavky normy ISO 9001:2015 by měl být plynulý.

Hlavní rozdíly proti dosavadní normě ISO 9001:2008

Nová norma ISO 9001:2015 obsahuje již 10 kapitol, z toho 7 prověřovatelných. Když se hlouběji podíváme na strukturu jednotlivých kapitol, tak zjistíme, že se proti dosavadní normě v realizačních procesech příliš neliší, hlavní změny, dodatky jsou v řídicích a podpůrných procesech. Některé požadavky jsou rozmělněny a zdůrazněny ve vícero kapitolách, na některé bude kladen větší důraz. Objevují se v ní sice nové pojmy, jako např. „dokumentovaná informace“ nebo „externě poskytované služby“, ale osobně si myslím, že se není čeho obávat.

Problémy mohou nastat u dokumentovaných systémů, které jsou popsány klasicky v Příručce kvality a dále jen textově rozepsány do směrnic a dokumentovaných postupů nižší úrovně. Tady se obávám, že pokud firmy budou chtít zachovat strukturu dokumentace v této formě, tak budou muset zřejmě své dokumentované postupy upravit a to se týká i firem, poskytující služby nedestruktivního zkoušení, školení a zkoušení personálu nedestruktivních metod.

Tato rozsáhlá aktualizace stávajících pravidel spatřila světlo světa v září 2015. Oproti té staré klade nová verze větší důraz na rizikový management a procesní přístup, je obecnější a snáze aplikovatelná.

Nová podoba normy zavedla oproti té stávající dva významné požadavky ke kontextu organizace: Pochopení organizace a jejího kontextu a Pochopení potřeb a očekávání zainteresovaných stran. Předpokládá se totiž, že dlouhodobý úspěch podniku lze docílit jedině při zohlednění požadavků všech relevantních subjektů, které mohou mít vliv na určité rozhodnutí nebo činnost organizace nebo jimi může být organizace sama ovlivněna nebo se jimi cítí být ovlivněna.

Co to znamená? Mimo jiné například to, že povinností organizace/podniku bude posoudit potřeby a očekávání těchto stran a vyhodnotit a vypořádat se s vnitřními a vnějšími strategickými otázkami.

Na rozdíl od normy ISO 9001:2008, v normě ISO 9001 zdůrazňuje velká aktualizace z roku 2015 přijetí „výraznějšího“ procesního přístupu při vývoji, implementaci a zlepšování efektivity systému managementu kvality. Dbá zejména na definování, měření a správné posouzení vstupů a výstupů každého procesu, především však definování, měření, monitorování kritérií výkonnosti každého identifikovaného procesu organizace.

Nedestruktivní zkoušení patří do kategorie speciálních procesů, kde požadavky na dostupnost kalibrovaných zařízení, na používané externě nakupované materiály a služby, odbornou způsobilost personálu, včetně řízení a uchování dokumentovaných informací (zkušebních protokolů) jsou náročnější než u standardního výrobního procesu. Sledovat je třeba nejen výrobky, ale také informace a specifikace, které se výrobního procesu týkají.

Co by měla nová norma přinést dle zpracovatelů (technická komise ISO/TC 176 *Management kvality a prokazování shody*)?

Čas a peníze navíc (snad?! – díky zvýšení efektivity, produktivity a ziskovosti podniku

Menší rizika (ideální stav) – všechny vaše produkty a služby budou mít úroveň kvality, kterou zákazníci očekávají

Vyšší konkurenceschopnost (diskutabilní, certifikát má více než 1 milión firem) – certifikovaný management kvality je konkurenční výhodou v soutěžích
Certifikát ISO 9001:2015 by neměl být jen „razítkem“, ale cestou, jak svůj byznys udělat ještě lepší.

Nová verze oproti té staré vypouští specifické požadavky na „preventivní opatření“
Jaký je důvod? Systém managementu kvality by měl totiž fungovat jako prevence sám o sobě. Novinka naopak klade důraz na identifikaci a hodnocení rizik. Důrazně doporučuje, aby podnik využil analýzu rizik vztahujících se k celému obchodnímu procesu. **A tím i identifikaci rizik v oblasti nedestruktivního zkoušení.**

Toto umožní společnosti nejen určit faktory, které mohou způsobit odchylky systému řízení kvality od plánovaných cílů, ale také preventivně reagovat na negativní jevy.

ISO 9001 jako interaktivní model podnikání

Moderně popsaný systém řízení firmy vyžaduje využít SW prostředků. Zpracování je pak výrazně rychlejší a umožňuje systém „prolinkovat“ hypertextovými odkazy. Používání systému, hledání informací a realizace změn je pak velmi snadná a rychlá. Takový systém se i velmi snadno používá na tabletu nebo i v chytrém telefonu. Firma pak šetří dny v roce a tím náklady.

Ve firmách se takto popsané systémy velmi osvědčují a se systémem je schopen velmi dobře pracovat každý pracovník na různých stupních řízení firmy. Je pravda, že certifikační auditoři s takovými systémy zatím nemají mnoho zkušeností a může jim činit problémy nalézt při certifikačním nebo dozorovém auditu hledané informace. Auditoři doposud byli zvyklí se "prohrabovat" ve stozích dokumentace, a když jim předložíte jasně a stručně zdokumentovaný systém, tak mají pocit, že to nemůže být všechno, že tam musí něco chybět. Prostě se jim to nějak nezdá. Tady je však důležitá role poradce nebo představitele managementu, aby jim požadované informace předložil.

Už jsem zažil překvapení auditora, který místo několika tlustých šanonů dostal tenký sešit a jeden pdf soubor. V prvním momentu komentoval, že něco takového nemůže splnit požadavky na systémy managementu ISO. Po ukončení auditu odcházel bez jedině připomínky a systém pochválil. Systém musí prostě plně respektovat podnikatelský záměr klienta a pomáhat mu jednoduše dosahovat podnikatelských cílů. Systém není určený pro „ISO čtenáře“.

Abychom mohli procesy efektivně řídit, tak je nutné nastavit kritéria a ukazatele pro jejich hodnocení. Sledované výstupy jsou pak vyhodnocovány a pravidelně sledovány

v rámci přezkoumání systému vedením. Procesy, které mi fungují a vykazují rostoucí znaky výkonnosti, tak dále sleduji a řídím. Naopak procesy, u kterých se projeví problémy, na ně se zaměřím a ověřuji jejich činnosti např.: formou interních auditů, aplikací nápravných nebo preventivních opatření apod.

Jaká je dnes situace v oblasti certifikací, resp. nepřerostla nám certifikace managementu kvality i jiných systémů, mírně řečeno, přes hlavu?

V začátcích zavádění certifikací ISO: 9001, 9002, 9003, tj. před jednatřiceti lety, musela firma, která chtěla mít certifikát, nejprve projít tzv. předcertifikačním auditem. Tím si certifikační společnost ověřovala, zda je firma dostatečně připravená. A ne každá byla nakonec k certifikačnímu procesu připuštěna. Vlastnictví certifikátu bylo proto prestiží pro kvalitní a velké firmy. A to i díky tomu, že zde v této době v Československu působily převážně jen velké a renomované zahraniční certifikační společnosti, jako např. RW TÜV, LRQA, DNV a další.

Posléze přišli „chytří“ lidé na to, že se z certifikací může stát dobrý byznys. Certifikační a poradenské společnosti se množily jako houby po dešti, především po vstupu do EU. Vzniklo něco, čemu se v hantýrce říká „krabicové“ ISO za jednotnou cenu. Způsob „krabicového“ ISO představuje kopírování dokumentace z firmy do firmy, kdy se jen prostě vymění loga. Ale také nekvalitní poradce, a tedy i nevhodné či smyšlené audity. Mimochodem, v té době se stal certifikát ISO podmínkou výběrových řízení. Stačilo se potom domluvit s poradenskou firmou, ta s certifikační společností – a certifikát byl na světě. Docházelo pak k situacím, kdy se najatí obchodníci (většinou to nejsou poradci), aby získali zakázky a splnili limity „obratu“, začali podbízet cenou. Mám-li tedy odpovědět na otázku, zda nám certifikace ISO nepřerostla přes hlavu, tak odpověď je ano! Přerostla a hodně dávno. Vždyť dnes mají akreditovaný certifikát managementu i firmy s jedním člověkem, což je absurdní. Ale zákazníci v EU všech oborů podnikání certifikát managementu akreditovanou organizací, příp. certifikát laboratoří NDT dle EN ISO/IEC 17025 (v automobilovém a železničním průmyslu zvláště) stále vyžadují a tento vžitý systém jim nikdo nevymluví.

Neměl být zárukou kvality certifikačních firem Český institut pro akreditaci (ČIA)?

Vstupem do EU ČIA udělila akreditaci pro certifikaci systému většímu počtu certifikačních společností než je akreditovaných certifikačních orgánů v Německu. K tomu není třeba komentáře. Ano, ČIA chodí na audity, ale je otázkou, zda za existujících podmínek kontroluje skutečné výsledky práce, nebo jen papíry. Také proto se dnes potkávám s majiteli firem, kteří nevyvázejí do EU a certifikaci managementu systému, především environmentu a bezpečnosti ruší. Nenašli nic, co by jim přinesla. Zejména, když na jednu stranu vah dají cenu certifikace, dohledové audity a cenu za poradce, a na druhou přínosy této investice, kdy jim i po zavedení systému stále nefunguje obchod, marketing, vypořádání se s environmentální zátěží apod.

Splňují tedy vůbec udělované standardy kvality ISO svůj původní cíl – deklarovat spolehlivost a důvěryhodnost, společně s neustálým zlepšováním poskytovaných služeb?

Podle mě, kdy jsem zažil vůbec první certifikace v této republice dle ISO 9001 a 48 let pracuji v oblasti systému kvality a NDT, má ISO:9001 stále smysl, jen by prokazování shody systémů potřebovalo transformaci a odstranění byrokracii EU při tomto prokazování shody. V těchto normách totiž najdete to, jak řídit projekt, lidské zdroje, efektivně analyzovat neshodné procesy a produkty, řídit outsourcing, hodnotit spokojenost zákazníků, jak zavést konfigurační management a řadu dalších postupů, získaných ze zkušeností, které jinde běžně nezískáte. Je však třeba transformovat poradce, poradenské společnosti, certifikační společnosti a domnívám se, že i samotnou ČIA. Výsledkem by bylo víc úspěšných firem, majitelé firem by neřešili tolik reklamací a neshod a měli by také víc času na své zákazníky i zaměstnance.

Poznámka: Názory uvedené v tomto článku nejsou pouze mé vlastní, ale většinové názory z mezinárodních i tuzemských setkání s lidmi odpovědnými za zavádění a udržování systémů managementu.



LOKALIZACE MÍSTA ZDROJE AKUSTICKÉ EMISE ACOUSTIC EMISSION SOURCE POSITION LOCATION

Vojtěch MAXERA, Luboš PAZDERA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Contact e-mail: vojtech.maxera@vut.cz

Abstrakt

Velkou výhodou metody akustické emise je to, že umístění zdroje akustické emise může možné lokalizovat. Tyto metody určení polohy zdroj akustické emise jsou podobné metodám pro určení střediska zemětřesení. V reálném případě však není tak snadné jako v teoretické oblasti. V tomto článku je napsáno několik slov o poloze akustického zdroje emisí polohy.

klíčová slova: akustická emise, lokalizace, zdroj, snímač, vlnění

Abstract

A great advantage of the acoustic emission method is that the location of the acoustic emission source can be possible mainly on the theoretical idea. Those location methods are similar as methods for determining an earthquake center. However, in real it is not so easy as in theoretical area. In this article, a few words about a location of position acoustic emission source is described.

Key words: acoustic emission, location, source, sensor, wave

1. Úvod

Teoreticky je lokalizace místa zdroje akustické emise jednoduchá. Lze použít stejné lokalizační metody, které se používají pro lokalizaci centra výbuchu například sopek či zemětřesení. Nejčastěji používané metody využívají znalosti příchodu signálu k snímači při známé rychlosti šíření vlnění. Jestliže signál akustické emise přicházející ze zdroje je čistý, je snadné určit rozdíl časů příchodu k jednotlivým snímačům. Proto pro lokalizaci zdroje v jednorozměrném případě stačí dva snímače, pro dvojrozměrné tři snímače a prostorové čtyři snímače. V tomto teoretickém případě je nejvhodnější sledování příchodu podélné vlny. Jelikož v praktických aplikacích toto bývá velmi obtížné, lze sledovat příchod Rayleigh (povrchové) nebo Lamb (deskové) vlny. Další důležitou podmínkou je znalost rychlosti šíření vlnění v daném prostředí. K získání počátečních informací je vhodné provedení takového buzení, které vyvolá signál podobný signálu akustické emise. Provádí se často použitím Pen-testu nebo generátorem.

2. Lokalizace zdroje akustické emise

Jak bylo dříve uvedeno pro lokalizaci v tělese, které můžeme považovat za jednorozměrné, stačí použít dvou snímačů. Pak při znalosti rychlosti šíření vlnění c , polohy snímačů x_1 a x_2 lze polohu identifikovat z rozdílu časů příchodů Δt_{12} můžeme z následující rovnice získat polohu x zdroje akustické emise

$$(x - x_1) - (x - x_2) = c \cdot \Delta t_{12}$$

Ve všech případech budeme předpokládat, že na první snímač (poloha x_1 pro lineární lokalizaci, (x_1, y_1) pro rovinnou a (x_1, y_1, z_1) pro prostorovou lokalizaci).

Obdobným způsobem můžeme určit polohu zdroje akustické emise v případě rovinného vzorku, tj. takového, jehož dva rozměry jsou mnohem větší, než je rozměr třetí např. deska. Umístíme snímače do poloh (x_1, y_1) , (x_2, y_2) a (x_3, y_3) . Polohu zdroje předpokládáme v bodě (x, y) . Rozdíl časů příchodu mezi prvním a druhým snímačem je Δt_{12} a mezi prvním a třetím Δt_{13} . Pro řešení tedy dostaneme soustavu dvou rovnic

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = (c \cdot \Delta t_{12})$$

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = (c \cdot \Delta t_{13})$$

Analogické řešení bude v případě prostorového tělesa. Souřadnice jednotlivých snímačů budou (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) a (x_4, y_4, z_4) . Rozdíly příchodů časů k prvním snímači budou Δt_{12} , Δt_{13} a Δt_{14} obdobně jako v případě plošné lokalizace. Opět budeme pro zdroj akustické emise v poloze (x, y, z) řešit tři rovnice

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} = (c \cdot \Delta t_{12})$$

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} = (c \cdot \Delta t_{13})$$

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} = (c \cdot \Delta t_{14})$$

Řešení těchto nelineárních rovnic bude numerické.

Přesnost lokalizace zdroje bude v tomto případě záviset na přesnosti určení rozdílů časů příchodů, určení rychlosti šíření, velikosti snímačů, vzdálenosti a rozmístění snímačů. Významným prvkem bude také počet snímačů.

Pro eliminaci některých šumových signálů lze použít další ochranný (guard) snímač. Např. pro lineární lokalizaci je vhodné použít dva snímače. Předpokládáme, že zdroj akustické emise bude mezi snímači v polohách x_1 a x_2 . Ochranné snímače pak umístíme do poloh x_0 a x_3 tak, že pořadí snímačů je v polohách $x_0 < x_1 < x_2 < x_3$. Pokud je signál nejdříve zaznamenán na kterémkoliv ochranném snímači znamená to, že zcela určitě přišel vně sledované oblasti.

Tab. 1 Teoretické rychlosti šíření vlnění ve vybraných materiálech

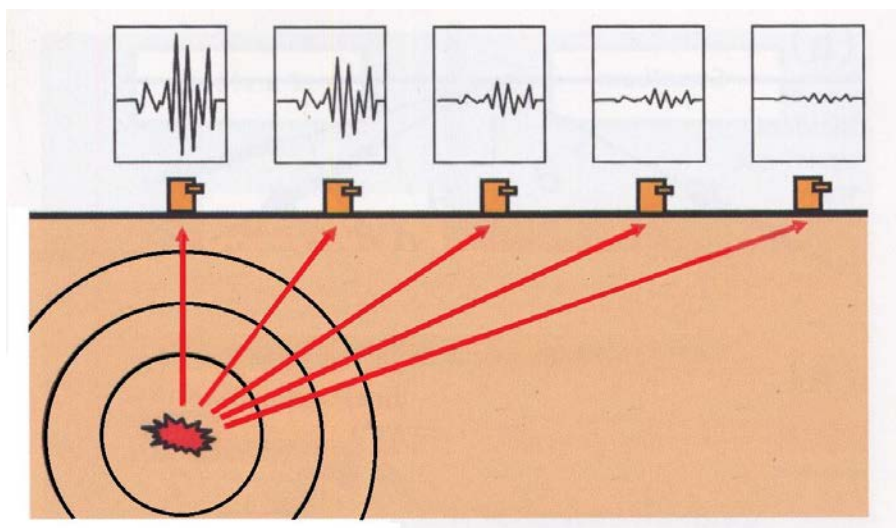
Tab. 1 Theoretical velocity of propagation in different materials

	Rychlost podélné vlny [mm/ μ s]	Rychlost příčné vlny [mm/ μ s]
Hliník	6,4	3,1
Ocel	5,9	3,2
Beton	4,0	2,6
Voda	1,4	

V případě dostatečného množství snímačů, případně při požadavku menší přesnosti lokalizace, lze použít tzv. zónovou lokalizaci. V tomto případě se počítá pouze kolik signálů akustické emise bylo zaznamenáno prvním snímačem. První snímač je myšlený ten, který ze zdroje zaznamenal první signál.

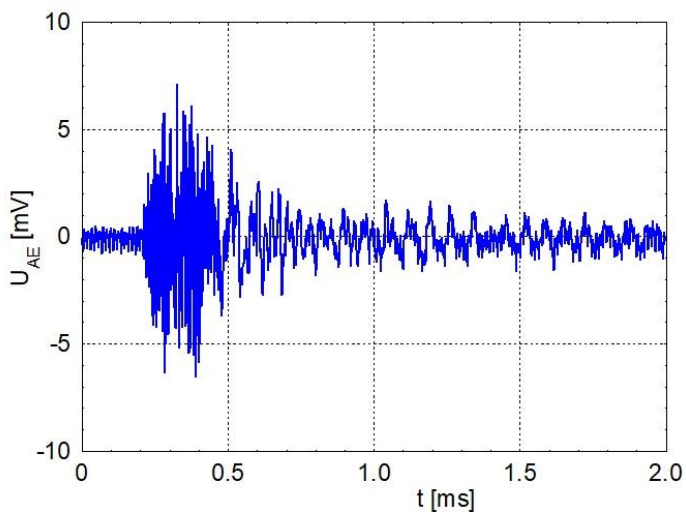
3. Šíření vlnění s pohledu lokalizace

Jak je zřejmé z obr. 1 je teoreticky možné určit vzdálenost zdroje také pomocí útlumu vlnění v průběhu jeho průchodu sledovaným vzorkem. Komplikací je, že různé frekvence mají různou velikost útlumu. Vlna o velké frekvenci je utlumena více než vlna menší frekvence.

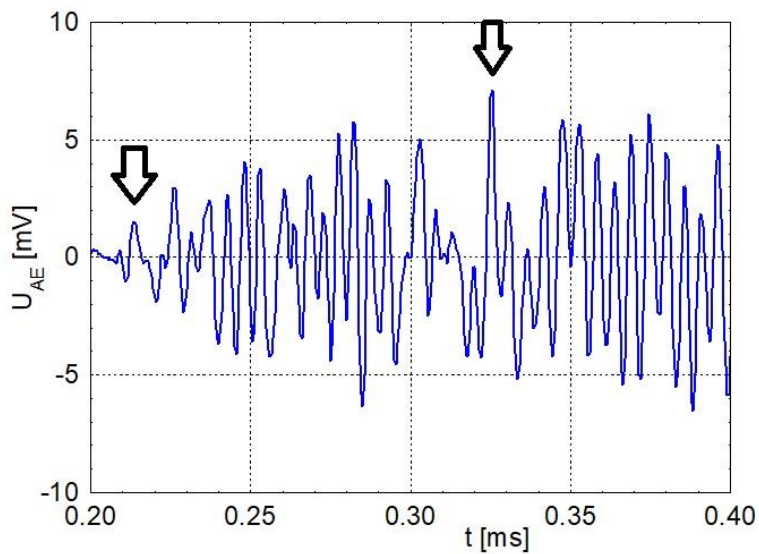


Obr. 1 Útlum vlnění (signálu akustické emise) se vzdáleností od zdroje [1]

Fig. 1 Attenuation waves (acoustic emission signal) with distance from the source [1]



Obr. 2 Skutečný signál akustické emise z betonového vzorku
 Fig. 2 Real acoustic emission signal of a concrete specimen



Obr. 3 Výřez z obr. 2
 Fig. 3 The detail of Fig. 2

Obr. 2 ukazuje skutečně změřený signál akustické emise. Zřejmý je šum předcházející vlastní děj akustické emise (do 0,21 ms). Tento signál je velmi pěkný – dle detailu na obr. 3 lze rozlišit příchod podélné vlny (první šipka) a příčné vlny (druhá šipka).

Zde se nabízí lokalizace pomocí rozdílu příchodu těchto vln. Avšak detekce podélné vlny není až tak přesná.

4. Realita lokalizace

V reálném experimentu je vhodné si uvědomit zejména rychlosti šíření vlnění. Z tabulky 1 je zřejmé, že u betonu při chybě určení počátku příchodu vlnění 1 μ s odpovídá vzdálenosti 4 mm pro podélnou a 2,6 mm pro příčnou vlnu. Přičemž nezapomeňme, že rychlost šíření byla vybrána z literatury. Dle obr. 3 lze odhadnout polohu podélné vlny s přesností 3 μ s, tedy 12 mm. V tomto případě, bylo vzorkování provedeno frekvencí 2 MHz, tedy s konstantním časovým krokem 0,2 μ s .

Dále je nutné uvažovat přesnost synchronizace jednotlivých kanálů měřícího zařízení, tedy jak přesně určit zaznamenání digitálního signálu akustické emise v celkovém času.

V článku se nezabýváme nutností nastavení stejného zesílení signálu. Tedy pen-test u snímačů by měl dát stejné signály jak z hlediska amplitudy, tak z hlediska času. To znamená stejná úprava řetězce od snímače přes předzesilovače, zesilovače, kabely až do záznamového zařízení.

5. Literatura

- [1] Manabu Enoki, Practical Acoustic Emission Testing, AE Source Location, ISBN 978-4-431-55071-6, 2006, pp. 29-34
- [2] Pazdera L., Smutny J, Janostik D. Korenska, M. Prouzova, P. Study of metal timber join by acoustic emission method, proc. of 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering 2005, Pages 299-307
- [3] Pospisil K, Stryk J, Korenska M, Pazdera L., Acoustic Emission as a tool for non-destructive diagnostics of bridges, Proceedings of the 4th International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance 2006, Pages 323-332
- [4] Topolář L., Pazdera L., Bílek V., Dědečková, L., Acoustic emission method applied on four point loading of concrete structures with and without small wires, Proceedings of the 50th Annual Conference on Experimental Stress Analysis 2012 50th Annual Conference on Experimental Stress Analysis, EAN 2012; Tabor; Czech Republic; 4 June 2012 through 7 June 2012



ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA TUHOSTI DOSADACEJ DOSKY HLAVY VALCOV TEDOM Z LIATINY S LUPIENKOVÝM GRAFITOM PRED A PO PREVÁDZKE. ULTRASONIC DIAGNOSTIC THE RIGIDITY OF CONTACT PLATE OF TEDOM CYLINDER HEAD OF CYLINDERS MADE OF CAST - IRON BEFORE AND AFTER RUNNING

MRÁZ Jakub, SKRBK Břetislav

Fakulta strojní, katedra materiálů Technická univerzita Liberec
jakub.mraz@tedomengines.com, bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt:

Táto práca pojednáva o zisťovaní skutočných hodnôt modulu pružnosti, medze pevnosti a tvrdosti na dosadacích doskách hláv valcov TEDOM. Parametre boli zisťované na novej hlave valcov, ktorá nikdy nebola v prevádzke a hlave, ktorá je v prevádzke od roku 2014. Modul pružnosti zásadne ovplyvňuje deformácie hlavy valcov v prevádzke, čo má vplyv na životnosť dielov použitých v hlave ako napríklad sedlá ventilov a ventily. Pomocou ultrazvukovej metódy, meraním ultrazvukovej a skutočnej hrúbky dosadacej dosky, sa z nameraných hodnôt dopočítal modul pružnosti. Vo vybraných miestach sa zmerala tvrdosť a matematicky sa odvodila medza pevnosti vo vybraných častiach. Na záver sa vypočítal Eichebergov faktor na zistenie odolnosti voči tepelnej únave.

Kľúčové slová: *Nedeštruktívne testovanie, modul pružnosti, tepelná únava, hlava valcov, liatina s lupienkovým grafitom*

Abstract:

Dad work handle about investigate with real values modulus flexibility, purview strongholds and hardness on contact boards heads cylinders TEDOM. Characteristics were investigate with on new head cylinders which will never wasn't into service and head which is into service since 2014. Modulus of elasticity in principle works deformation head cylinders into service, what has influence over service life part used in head such as saddle valves and valve. By the help of ultrasonic method, metering ultrasonic and real thickness about portfolio, from measured values keep count of modulus of elasticity. In choice, seats measure hardness and mathematically derive strength. Lastly calculated Eichelerguv factor on found out immunity in face of heat fatigue.

Key words: *Non-destructive testing, Young's modulus, thermal fatigue, head of cylinder, cast-iron with lamella's graphite*

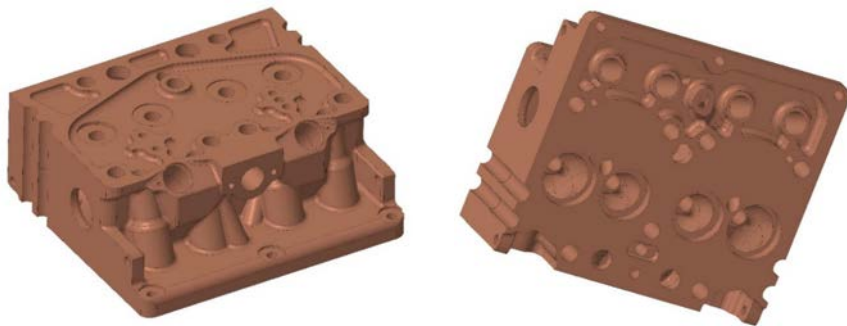
1. Úvod

Hlavu valcov tvorí veko valca a zároveň časť spaľovacieho priestoru. Prenáša plný spaľovací tlak plynov, je tepelne namáhaná a má tlakové predpätie, vyvolané spojovacími skrutkami. Hlavy valcov sú z hľadiska konštrukcie a technológie výroby veľmi zložitou časťou.

Za behu motora sú rôzne časti hlavy valcov namáhané rozdielne, čo v tak zložitom odliatku pôsobí veľmi nepriaznivo. Steny hláv, ktoré tvoria spaľovací priestor sú vystavené okamžitej teplote až 2000°C a na druhej strane je stena vystavená vplyvu chladiacej kvapaliny s teplotou 30 – 90°C. Ostatné steny sú jednak v styku s chladiacou kvapalinou a na druhej strane s teplotou okolitého vzduchu. Steny výfukových kanálov sú vystavené teplote až 1000°C. Nerovnomerné rozdelenie teplôt jednotlivých stien hlavy spôsobujú vnútorné namáhanie, ktoré pri nevhodnom chladení vedie k prasknutiu steny.

1.1. Konštrukčný prehľad hlavy valcov

Hlava valcov TEDOM sa používajú pre plynové aj naftové motory (Obr. 1). Hlava je spoločná pre dva valce. Na každý valec pripadá jeden sací a jeden výfukový ventil. Spaľovací motor využíva rozvodový mechanizmus typu OHV. Rozmery hlavy sú 320x280x120 mm.



Obr. 1 3D model hlavy valcov TEDOM

2. Materiál hlavy

Ako materiál sa používa liatina s lupienkovým grafitom ČSN 42 2425. Štruktúra je tvorená perlitom (s malým množstvom feritu) a lupienkovým grafitom. Stredná hodnota stupňa eutektickosti sa vypočíta podľa známeho vzťahu (1).

$$S_e = \frac{\% C}{4,23 - 0,3 (\% Si + \% P)} = 0,87 - 0,93 \quad (1)$$

Stanovenie reálnej hodnoty stupňa eutektickosti S_e

$$S_e = \frac{3,4}{4,23-0,3(1,9+0,055)} = 0,93 \quad (2)$$

Hodnoty do vzťahu (2) sú vybrané z Tab. 4. kde sú vypísané aritmetické priemery jednotlivých prvkov z taviieb za rok 2017.

Tab. 1 Vybrané mechanické vlastnosti LLG pre štandardné rozmery 15 – 30 mm

Teplota [°C]	-60	-40	-20	0	100	200	300	400	500	600
Medza pevnosti R_m [MPa]	207	263	258	254	242	232	241	246	199	126
Vrubová húževnatosť KC [J.cm ⁻²]	5,9	6,2	6,7	7,2	7,8	8,1	8,1	7,9	7,4	7,0

Tab. 2 Vybrané mechanické vlastnosti LLG

Priemer skúšobnej tyče [mm]	15	20	30	45	60	90
Hrúbka steny odliatku [mm]	4 - 8	8 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 80	80 -120
Modul pružnosti E_0 [GPa]	144	134	125	119,9	110	103,5
Pevnosť v ťahu R_m [MPa] min	300	280	250	220	195	170
Tvrdosť HB	220 - 280	200 - 260	180 - 240	170 - 230	160 - 220	150 - 210

Tab. 3 Vybrané mechanické vlastnosti LLG pre štandardné rozmery 15 – 30 mm

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500
Modul pružnosti E [GPa]	125,9	123,8	121,3	118,9	116,5	114,2
Hustota ρ [kg.m ⁻³]	7230	7210	7180	7150	7120	7090
Merná tepelná kapacita c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	*	473	490	511	532	561
Teplotný súčiniteľ rozťažnosti α [K ⁻¹]	*	$12,6 \cdot 10^{-6}$	$12,3 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$13,4 \cdot 10^{-6}$	$13,6 \cdot 10^{-6}$
Tepelná vodivosť λt [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	49,4	47,3	44,4	41,9	38,9	36,4
Konduktivita λe [MS.m ⁻¹]	-					
Lineárne zmrštenie pri tuhnutí [%]	1,2					

*platí v rozmedzí teplôt od 20°C do uvedenej teploty

Tab. 4 Aritmetický priemer hodnôt jednotlivých prvkov z taviieb za rok 2017

Prvok [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Sn	Cu
	3,4	1,9	0,645	0,055	0,06	0,08	0,08	0,9

2.1. Teplotná odolnosť

Mechanické prútia vytvorené pri nerovnomernom ochladzovaní (alebo brzdených tepelných dilatáciách) a ohrevu rôznych častí jednej súčasti, môžu viesť k trvalým deformáciám za danej teploty a k tepelnej únave. Odolnosť voči tomuto namáhaniu

charakterizuje Eichelbergův faktor EF (3).

$$EF = \left(\frac{Rm \cdot \lambda_T}{\alpha \cdot E_0} \right) \cdot 1000 \quad [\text{W/m}] \quad (3)$$

Čím vyššia je hodnota EF, tým je materiál odolnejší voči tepelnej únave (kokily, hlavy valcov, výfukové potrubia, skrine turbodúchadiel, brzdové a spojkové kotúče). U hlavy valcov je kritickým miestom mostík medzi ventilmi, kde dochádza k najväčšiemu tepelnému namáhaniu [1].

2.2. Akustické vlastnosti liatin

Akustické vlastnosti materiálov popisujú rýchlosti šírenia pružného priečného alebo pozdĺžneho kmitania atómov (molekúl) okolo rovnovážnej polohy a ich útlm. Rýchlosť šírenia akustickej vlny c zvuku je funkciou modulu pružnosti E , mernej hmotnosti ρ a Poissonovho čísla μ . Pre pozdĺžnu rýchlosť zvuku platí vzťah (4).

$$C_L = \sqrt{\frac{(E/\rho) \cdot (1-\mu)}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Čím viac útvary grafitu matricu oslabujú (čím sú štihlejšie a dlhšie, tým väčšia je hodnota akustickej dráhy L_U v porovnaní s priamou dráhou (hrúbka prezvučenej steny) L_S . Rýchlosť zvuku C_L tak klesá podľa vzťahu (5).

$$C_L = C_{L_0} \cdot \frac{L_S}{L_U} = 5920 \cdot \frac{L_S}{L_U} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

C_{L_0} ...rýchlosť zvuku ocelevej matrice liatiny.

Úpravou (3) je možné získať zjednodušený výraz

$$E = \left(K \cdot \left(\frac{L_S}{L_U} \right) \right)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Hodnotu K je možné vypočítať z výsledkov akustických meraní na štíhlych tyčiach [1].

3. Experiment

Meranie ultrazvukovej hrúbky sa uskutočnilo v bodoch vyznačených na Obr. 2. Na novej hlave bola hustota meraných bodov nižšia ako na hlave z prevádzky (60 bodov). Pričom k stanoveniu relatívnej rýchlosti šírenia ultrazvuku $V_R = L_S/L_U$ je potrebné zmerať hrúbku materiálu posuvným meradlom v meranom mieste L_S a dobu návratu vyslaného signálu po odraze, vyjadrenú hodnotou hrúbky L_U . Meranie ultrazvukovej hrúbky sa uskutočnilo ultrazvukovým defektoskopom DIO562 s dvojitou sondou 5 MHz a priemerom meniča 10 mm.

Po zmeraní ultrazvukovej hrúbky sa zmerala skutočná hodnota hrúbky pomocou klieštinnového mikrometra. Následne sa vo vybraných bodoch merala tvrdosť HB. Tvrdomer bol nastavený na 187,5 [kp] a indentor bola kalená guľička s priemerom 5 mm. Namerané hodnoty sú štatisticky spracované do Tab. 4 a v Tab. 5.

Vzťahy použité na výpočet:

Stanovenie hodnoty modulu pružnosti v ťahu E_0

$$E_0 = \left(453,2 \cdot \left(\frac{L_S}{L_U} \right) \right)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Stanovenie hodnoty pevnosti liatiny v ťahu R_m

$$R_m = 1,37 \cdot \left(\left(7,211 \cdot \left(\frac{L_S}{L_U} \right)^{2,278} \right) \cdot (HB)^{0,75} \right) - 64,25 \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

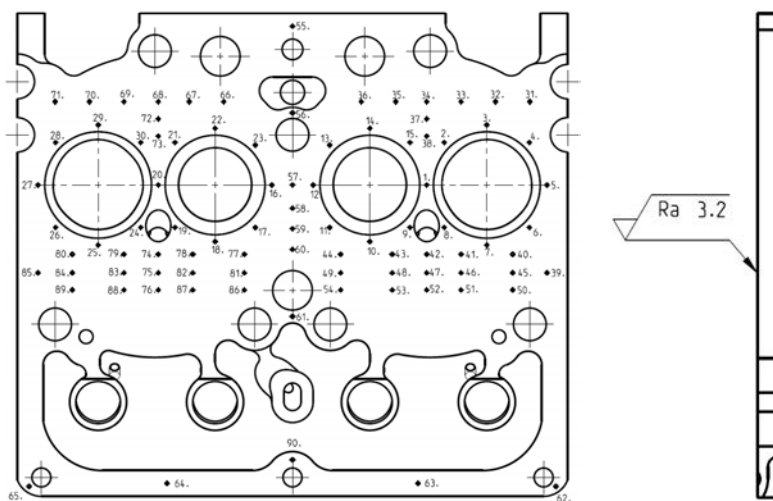
L_U – Ultrazvuková dĺžka

L_S – Skutočná dĺžka

HB – Tvrdosť podľa Brinella

λ_T – Tepelná vodivosť [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

α – Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti [K^{-1}]



Obr. 2 Rozloženie meraných bodov

Namerané hodnoty:

Tab. 4 Namerané hodnoty dosadacej dosky hlavy valcov z prevádzky

BOD	L _u [mm]	L _s [mm]	E _o [MPa]	HB	R _m [Mpa]	EF [W/m]
1	17,49	13,84	128609	213	258,92	11,324
2	18,88	15,50	138433	217	292,12	11,870
3	18,40	15,18	139794	209	286,10	11,512
4	16,56	13,95	145750	221	318,87	12,306
5	15,36	12,28	131279	224	279,31	11,968
6	14,15	11,46	134721	216	280,06	11,694
7	13,69	11,06	134055	220	282,87	11,869
8	14,90	11,68	126210	210	248,72	11,085
9	15,25	11,84	123807	218	250,64	11,388
10	14,25	11,58	135634	217	283,93	11,775
11	15,36	12,10	127458	218	261,24	11,529
12	17,58	13,92	128772	215	261,66	11,430
13	15,58	16,76	237680	210	579,34	13,711
14	19,99	16,64	142318	217	303,54	11,997
15	19,06	15,48	135480	217	283,48	11,770
16	17,76	13,98	127265	216	258,44	11,423
17	14,99	12,00	131625	215	269,90	11,534
18	14,25	11,48	133301	204	261,66	11,041
19	15,27	11,98	126420	210	249,31	11,093
20	17,39	13,96	132358	212	268,50	11,411
21	19,99	15,80	128312	211	255,80	11,214
22	20,91	17,10	137361	207	276,70	11,331
23	19,06	15,82	141497	215	298,59	11,870
24	14,99	11,78	126843	206	246,00	10,909
25	13,61	11,20	139091	210	285,35	11,540
26	14,15	11,78	142350	213	298,53	11,797
27	15,56	12,72	137257	217	288,68	11,830
28	17,39	14,52	143190	207	293,23	11,519
29	19,24	15,94	140976	205	284,39	11,347
30	19,43	15,58	132059	211	266,47	11,350
31	17,58	14,64	142437	213	298,79	11,799
32	11,66	9,65	140682	213	293,69	11,743
33	12,58	9,90	127201	212	253,77	11,222
34	11,84	9,92	144178	209	298,65	11,652

35	12,21	10,28	145591	209	302,70	11,695
36	12,21	10,56	153630	210	327,27	11,982
37	11,84	9,90	143597	214	303,45	11,887
38	12,03	9,98	141354	219	303,22	12,066
39	12,95	10,26	128924	215	262,10	11,436
40	12,30	10,04	136848	211	280,16	11,516
41	13,32	10,98	139565	216	294,20	11,857
42	13,02	11,02	147137	221	323,02	12,349
43	13,69	10,98	132123	220	277,18	11,801
44	12,77	10,72	144740	215	308,08	11,973
45	12,12	10,18	144901	215	308,55	11,978
46	13,14	10,68	135685	216	282,87	11,727
47	13,32	10,68	132043	218	274,61	11,698
48	12,77	10,60	141517	222	307,48	12,222
49	12,40	10,90	158705	211	343,48	12,174
50	12,40	10,38	143923	211	300,51	11,745
51	12,21	10,30	146158	216	313,55	12,067
52	12,77	10,64	142587	216	303,05	11,955
53	12,40	10,36	143369	222	313,02	12,281
54	12,77	10,40	136227	207	273,50	11,293
55	24,80	20,42	139248	215	292,03	11,797
56	22,21	18,15	137163	211	281,06	11,526
57	17,39	14,45	141813	217	302,05	11,981
58	15,91	13,18	140952	211	291,95	11,651
59	14,62	11,98	137911	202	272,03	11,095
60	13,60	11,18	138799	205	278,27	11,277
61	12,21	10,16	142212	211	295,58	11,691
62	12,58	10,55	144452	230	326,51	12,714
63	12,75	10,27	133260	226	287,56	12,138
64	12,58	10,28	137153	222	294,45	12,076
65	12,40	10,40	144478	226	321,48	12,516
66	12,21	10,08	139981	205	281,59	11,315
67	12,21	9,96	136668	215	284,52	11,710
68	12,03	9,96	140789	207	286,41	11,443
69	12,21	10,42	149584	210	315,54	11,866
70	12,49	10,20	136979	215	285,43	11,721
71	19,60	15,40	126797	217	258,21	11,455
72	11,47	9,80	149936	219	328,74	12,333
73	12,21	10,30	146158	215	312,24	12,017

74	14,34	11,04	121736	211	237,18	10,959
75	13,51	10,82	131742	218	273,73	11,688
76	13,22	10,66	133546	219	280,19	11,802
77	12,95	10,76	141796	215	299,47	11,880
78	14,25	11,24	127786	205	247,49	10,894
79	13,32	10,80	135026	215	279,75	11,654
80	12,58	10,30	137687	207	277,62	11,342
81	12,77	10,68	143662	205	291,97	11,432
82	13,51	10,86	132718	213	270,71	11,473
83	12,95	10,44	133488	211	270,54	11,400
84	12,40	10,28	141164	211	292,56	11,658
85	13,14	10,76	137725	219	292,49	11,946
86	12,95	10,54	136057	208	274,24	11,338
87	12,77	10,50	138860	217	293,37	11,884
88	12,77	10,24	132068	211	266,49	11,350
89	12,95	10,54	136057	207	273,02	11,287
90	12,77	10,29	133361	219	279,65	11,795

Tab. 5 Namerané hodnoty dosadacej dosky novej hlavy valcov

BOD	L _u [mm]	L _s [mm]	E _o [MPa]	HB	R _m [Mpa]	EF [W/m]
1	20,54	16,54	133183	205	262,53	11,088
2	20,36	16,38	132939	208	265,42	11,230
3	19,24	15,76	137810	204	274,25	11,194
4	17,76	14,94	145343	199	288,77	11,176
5	17,39	13,94	131979	201	254,42	10,843
6	17,76	14,44	135778	207	272,23	11,278
7	18,69	15,02	132648	209	265,78	11,271
8	19,99	15,92	130269	204	253,23	10,934
9	20,73	17,12	140084	206	283,15	11,370
10	21,56	17,46	134701	207	269,19	11,241
11	22,21	17,80	131924	210	264,90	11,295
12	22,58	18,20	133437	208	266,82	11,248
13	22,39	17,96	132155	208	263,20	11,203
14	21,84	17,58	133080	203	259,85	10,983
15	21,47	17,14	130899	205	256,15	11,007
16	15,73	12,34	126402	202	240,26	10,692
17	14,99	12,14	134714	201	261,95	10,938
18	14,80	11,96	134128	203	262,75	11,019

19	15,00	12,28	137656	207	277,53	11,341
20	17,95	14,42	132551	207	263,13	11,167
21	15,17	12,26	134150	209	270,04	11,323
22	15,73	12,62	132203	205	259,79	11,054
23	20,54	16,50	132540	195	248,77	10,558
24	15,73	13,08	142016	198	278,28	11,022
25	16,28	13,22	135436	198	260,26	10,809
26	22,76	18,36	133654	200	257,82	10,851
27	15,07	12,44	139957	226	307,76	12,369
28	20,36	16,70	138184	209	281,51	11,459
29	22,66	18,36	134836	207	269,57	11,246
30	22,58	18,28	134612	208	270,15	11,289
31	22,21	17,92	133708	206	265,19	11,157
32	22,21	17,68	130151	207	256,39	11,081
33	21,55	17,38	133593	204	262,47	11,052
34	21,84	17,72	135208	206	269,41	11,208
35	21,65	17,88	140087	206	283,16	11,370
36	20,20	18,16	166000	206	357,24	12,105
37	21,28	16,98	130771	208	259,30	11,154
38	20,36	16,28	131321	205	257,33	11,022
39	18,87	15,60	140374	204	281,43	11,277
40	18,69	14,96	131590	207	260,43	11,133
41	18,97	15,04	129104	208	254,61	11,093
42	19,80	16,14	136476	206	272,97	11,251
43	20,91	16,90	134167	202	261,65	10,970
44	18,87	15,26	134321	202	262,08	10,975
45	14,62	12,02	138833	200	272,08	11,023
46	14,25	11,66	137514	199	267,19	10,929
47	14,25	11,58	135634	198	260,80	10,816
48	14,90	12,00	133220	202	259,04	10,937
49	16,10	13,06	135149	203	265,59	11,054
50	15,91	12,88	134608	202	262,87	10,985
51	20,91	16,82	132900	202	258,15	10,926
52	15,36	12,34	132565	204	259,61	11,016
53	14,99	11,88	129006	205	250,88	10,939
54	14,06	11,30	132668	219	277,61	11,771
55	15,36	12,35	132780	211	268,52	11,375
56	16,19	12,77	127781	205	247,47	10,894
57	22,39	18,04	133335	207	265,34	11,194

58	21,65	17,50	134196	208	268,97	11,274
59	22,58	18,34	135497	201	264,11	10,964
60	22,58	18,15	132704	202	257,61	10,919

3.1. Diskusia výsledkov

- Kritické miesto z pohľadu relatívne nízkeho modulu pružnosti v mieste mostíku medzi ventilmi bližšie k zapaľovacej sviečke, kde lokálne minimum modulu pružnosti dosahuje hodnotu 121,7 GPa.
- Meraním tvrdosti bolo dokázané, že nenastávajú zmeny tvrdosti materiálu vplyvom prevádzky.
- Rozptyl modulu pružnosti v novej hlave valcov sa pohybuje 126,4 do 145,3 GPa.
- Rozptyl modulu pružnosti v hlave valcov z prevádzky sa pohybuje 121,7 do 158,7 GPa.
- Grafické znázornenie modulu pružnosti na novej hlave je na Obr. 3.
- Grafické znázornenie modulu pružnosti na používanej hlave je na Obr. 4.
- Hodnota Eifelbergovho faktora je najnižšia v miestach vystavených najvyššej tepelnej záťaži a to na mostíku medzi ventilmi, pri zapaľovacej sviečka a pri výfukovom ventile.
- Vizuálne zobrazenie Eichelbergovho faktora je na Obr. 5 a na Obr. 6.

4. Záver

Meranie dokázalo že prevádzka má vplyv na mechanické vlastnosti dosadacej dosky hlavy valcov TEDOM. Namerané výsledky budú použité pre počítačové simulácie deformácie celej hlavy valcov.

Meranie modulu pružnosti pred a po prevádzke v súčasnej dobe nie je možné pretože na meranie je nutné odfrézovať dosadaciú dosku čo kompletne znehodnotí hlavu. Preto bude meranie opakované na štatisticky významnom množstve hláv.

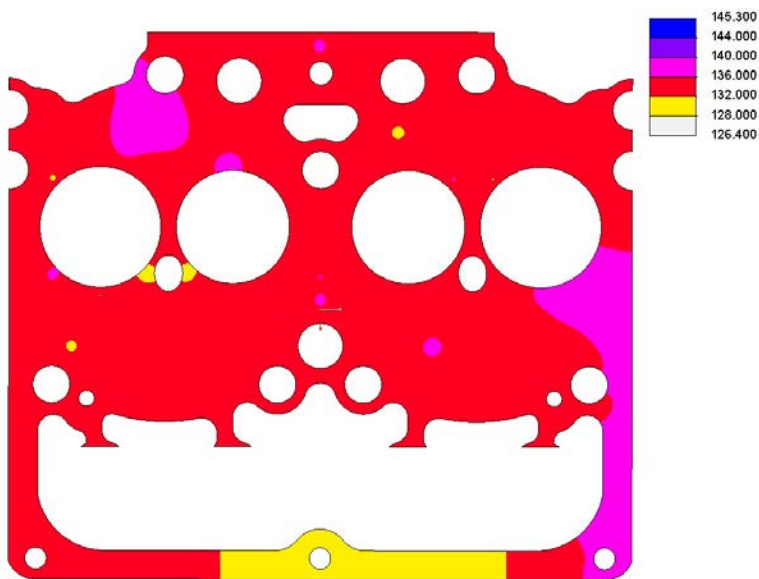
Podakovanie

This publication was written at the Technical University of Liberec as part of the project "The study and evaluation of the material's structure and properties" with the support of the Specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2018.

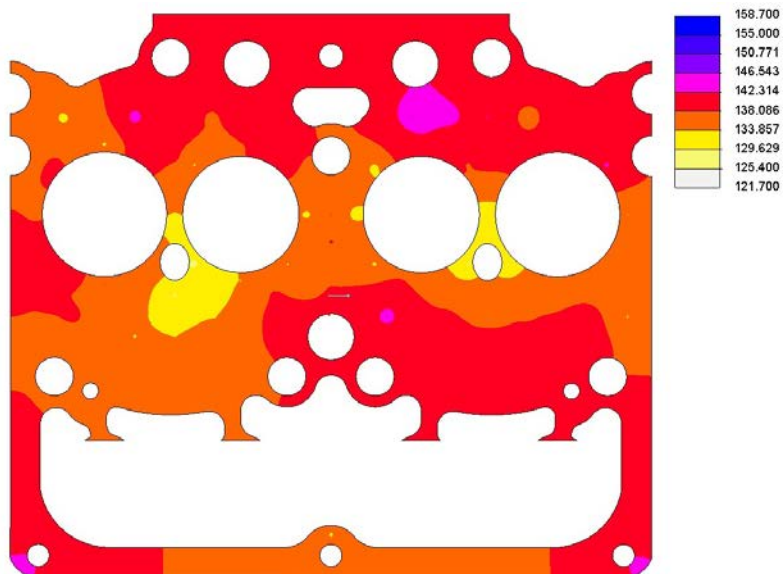
Literatúra:

- [1] SKRBEK, B., NOSEK, V.: *Srovnávací nedestruktivní testy materiálů autodílů*. DEFEKTOSKOPIE 2011, Ostrava, sborník konference s.163 – 168, ISBN 978-80-214-4358-7.
- [2] Kolektiv VÚNM a ČKD Praha, 1964. *Naftové motory čtyřdobé II. Díl. 2. vyd.* Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 588s. L13-B3-IV-41/2491-VI
- [3] NOVÁ, Iva. 2006. *Teorie slévání 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. 163s. ISBN 80-7372-149-X
- [4] NOVÁ, Iva. 2007. *Teorie slévání 2*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 169s. ISBN 80-7372-185-5
- [5] ROUČKA, Jaromír. 1998. *Metalurgie litin*, 1vyd. Brno : Fakulta strojní VUT v Brně, 1998. 166s. ISBN 80-214-1263-1
- [6] ČSN 42 2425. LITINA 42 2425 s lupínkovým grafitem. Praha: Československá státní norma, 1999.

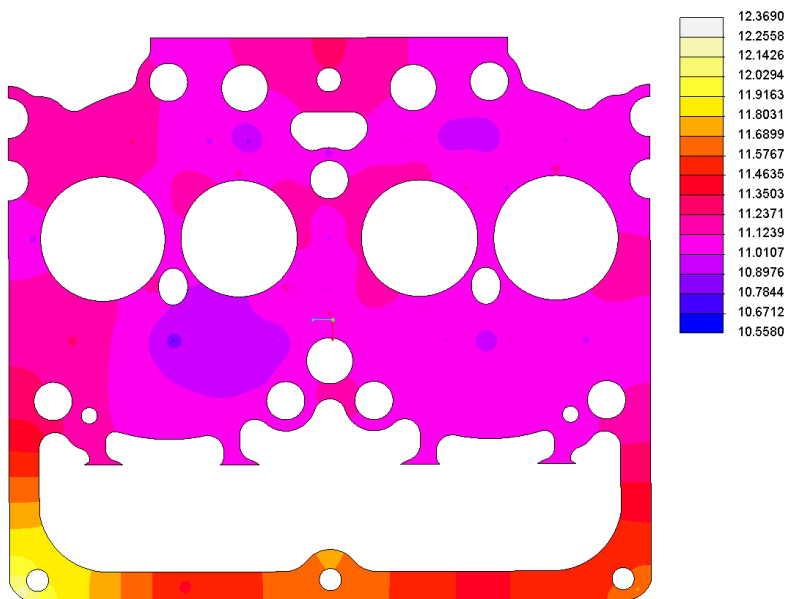
Obrazová příloha:



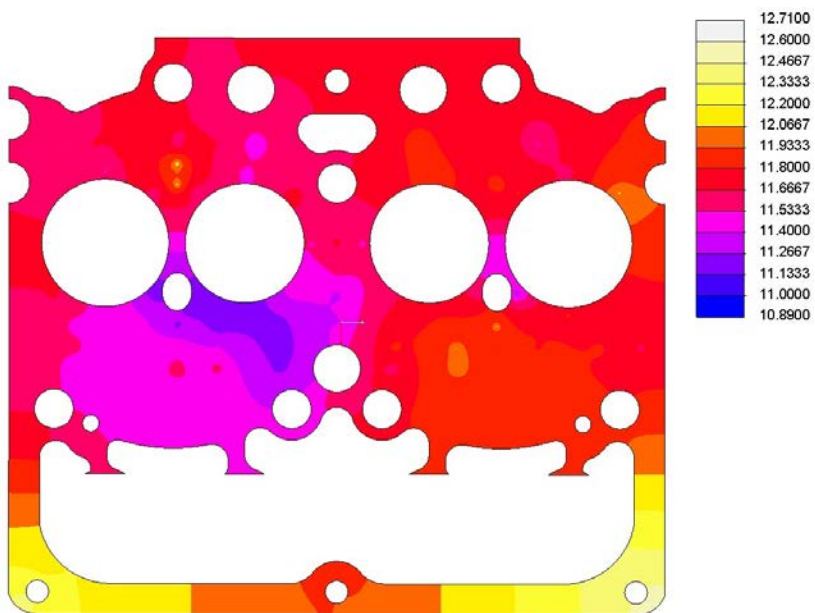
Obr. 3 Grafické znázornění rozptylu modulu pružnosti na nové hlavě valcov



Obr. 4 Grafické znázornenie rozptylu modulu pružnosti na používanej hlave valcov



Obr. 5 Grafické znázornenie Eichelbegoveho faktoru na novej hlave valcov



Obr. 6 Grafické znázornenie Eichelbegoveho faktoru na používanej hlave valcov



VYUŽITÍ LMS PŘI ZKOUŠENÍ PERSONÁLU DEFEKTOSKOPIE

USE OF THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS AT EXAMINATION OF NDT PERSONNEL

Josef NEUGEBAUER

TÜV NORD Czech, s.r.o.

Contact e-mail: neugebauer@tuev-nord.cz

Abstrakt

Tento článek pojednává o možnostech LMS (Learning Management Systems) při zkoušení personálu NDT. Konkrétně se zabývám možností využití těchto systémů při provádění obecné a specifické části zkoušky podle ČSN EN ISO 9712 bez ohledu na požadovaný stupeň. V článku uvádím požadavky na tyto systémy. Požadavky jsou rozděleny do několika kategorií. Příprava před zkouškou (tah otázek) – konkrétní provedení zkoušky, vyhodnocení písemné části zkoušky a její statistické zpracování. Nároky na statistické zpracování jsou rozděleny podle potřeb Zkušebního střediska a podle potřeb Certifikačního orgánu. Na závěr je nastíněna možnost provádění zkoušek na dálku pouze za přítomnosti pracovníka dohledu u zkoušky.

Klíčová slova: ISO 9712, LMS, zkoušky pracovníků NDT, statistika zkoušek pracovníků NDT

Abstract

This article discusses the possibilities of Learning Management Systems (LMS) in examination NDT personnel. Specifically, the possibility of using these systems to perform the general and specific part of the examination according to ČSN EN ISO 9712, regardless of the level required. The article describes the requirements for these systems. Requirements are divided into several categories. Pre-test preparation (pull of questions) - concrete implementation the examination, evaluation of the written part of the examination and its statistical processing. The statistical processing is divided according to the needs of the Examination Centre and according to the needs of the Certification Body. In conclusion, it is described the possibility of implementation the examination at a distance only in the presence of the invigilator of the exam.

Key words: ISO 9712, examination NDT personnel, examination statistic NDT personnel

1. Úvod

V dnešní době, kdy je digitalizace na postupu a prosazuje se ve všech oborech lidské činnosti, je vhodná doba začít uvažovat i o možném nasazení výpočetní techniky při provádění zkoušek personálu defektoskopie.

Mezinárodní norma ČSN ISO EN 9712 je na vstup počítačů do hájemství zkoušek personálu malinko připravena.

LMS – Learning Management System. Jde obecně o systémy sloužící k řízení a organizaci výuky. Součástí těchto systémů je i modul určený k ověřování znalostí uchazečů. A právě o tomto modulu bude v následujícím článku řeč.

2. Možnosti elektronického ověřování znalostí z pohledu ČSN EN ISO 9712

Co vlastně tato norma říká o možnostech elektronického přezkušování?

Tak v čl. 8.2.4.1: „Podle volby certifikačního orgánu mohou být použity elektronické hodnotící systémy, které automaticky sčítají body za odpovědi uchazeče podle uložených dat a oznámují dokončenou písemnou zkoušku podle připravených algoritmů.“

Dále pak v čl. 8.4.4. „Pokud se použijí elektronické hodnotící systémy, které vybírají otázky představující „písemnou zkoušku“ s jejich zobrazením uchazeči na počítači a následně hodnotí zkoušky, musí být tyto elektronické hodnotící systémy validovány a schváleny certifikačním orgánem.“

A na konec v čl. 8.4.5: „Písemné (elektronické nebo konvenční) a praktické zkoušky musí být dozorovány zkušebním komisařem ...“

Jak je uvedeno, norma ČSN EN ISO 9712 nám narýsovala půdorys pro zavádění výpočetní techniky do praxe zkušebních středisek.

Pokusím se nyní definovat základní požadavky, které musí systém určený k ověřování teoretických znalostí uchazečů o certifikaci v oblasti NDT splňovat.

3. Požadavky na zkušební LMS

Co vlastně od písemného ověřování znalostí (testů) a jejich provádění vyžadujeme? Především nestranné ověření znalostí v celé šíři požadovaných vědomostí. A samozřejmě při hodnocení nestranný, nezávislý a spravedlivý přístup ke všem uchazečům.

Naplnění těchto požadavků začíná u tvorby a struktury databáze zkušebních otázek.

3.1 Požadavky na databázi uvažovaného LMS

Uvažovaný LMS by měl při tvorbě databáze otázek minimálně umožňovat:

- a) zadávat otázky jednotlivě či po dávkách (v obecně dostupném formátu např. docx nebo xlsx)

- b) editaci již vložených otázek, změny textů u odpovědí, změny správné odpovědi
- c) každou otázku/otázky je nutno opatřit jednoznačným identifikátorem (manuálně/automaticky), tento identifikátor následně slouží pro statistickou analýzu
- d) každou otázku/otázky opatřit volitelným klíčem, tento klíč slouží k tvorbě tahů testů

Zastavme se krátce u jednotlivých položek.

ad a) tento bod nestojí ani za diskuzi. Bud' již existující databázi doplňujeme po jedné či dvou otázkách. Nebo ji plníme sadou mnoha otázek. Obojí by mělo být možné.

ad b) zde platí totéž co u bodu a), možnost editace otázky i odpovědí je zásadní

ad c) identifikátory slouží, jak již bylo řečeno, pro potřeby statistiky. Statistickým funkcím bude věnován samostatný odstavec tohoto článku. Statistika zkoušek pokročilejší úrovně (nejen kolik bylo daný den úspěšných/neúspěšných) je nezbytnou součástí práce zkušebního střediska ale také zpětná vazba pro školení.

ad d) pro tvorbu tahů testů potřebujeme klíč, podle kterého tyto testy volíme. Databáze musí umožnit vkládat množiny a podmnožiny otázek, které budou určeny jednoznačným klíčem. Tento klíč by měl obsahovat alespoň tyto informace:

1. typ testu (obecný, specifický, základní zkouška)
2. metoda (UT, UT-PA, MT, RT...)
3. požadovaný stupeň (L1, L2, L3)
4. sektor (w, f, t, MS,...)
5. typ otázky (výpočtová, obecná)
6. rozlišení obtížnosti

Jako samozřejmé považuju možnost vkládat a volit otázky obsahující obrázky. Další nezbytností je možnost vkládat a volit tzv. scénáře. Tedy otázky dotazující se na zadanou modelovou situaci. Tyto otázky musí být pevně svázány s příslušným scénářem.

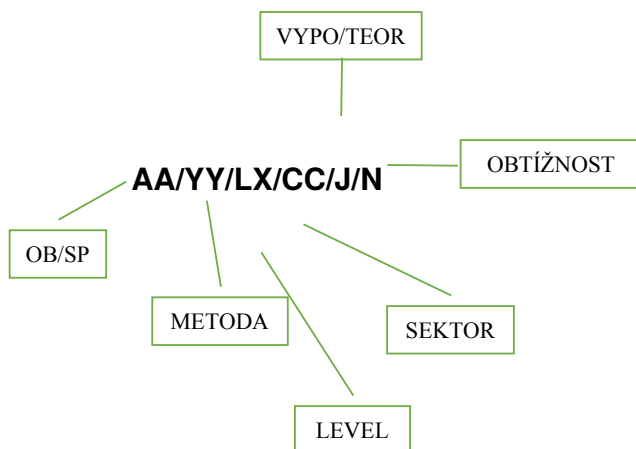
Po naplnění (vytvoření) požadované strukturované databáze můžeme náš systém začít používat.

3.2 Požadavky na tvorbu testů

Před zahájením zkoušek je nutné provést tah testu. Jsou systémy, které umožní podle zadaných požadavků vytvořit jedinečný test pro každého uchazeče. Jsou systémy, které udělají jeden tah pro danou zkušební skupinu. Zde záleží na vkusu každého Certifikačního orgánu nebo Zkušebního střediska. Pro zvolenou variantu tahu testu slouží výše jmenovaný klíč. Tento klíč jednoznačně definuje množinu otázek, ze které bude tah prováděn a měl by ideálně obsahovat šest zakódovaných požadavků.

Výběr otázek musí být náhodný. Modelově si můžeme uvést příklad tahu testu pro obecný test, metodu UT, multisektor, stupeň 2.

Kódování klíče může vypadat např. takto:



Pak by zadání pro volbu výše uvedeného testu vypadalo následovně:

OB/UT/L2/MS/V/3

Přeloženo: obecný test ultrazvuku pro stupeň 2, multisektor, výpočtová otázka vysoké obtížnosti.

Po zadání tohoto požadavku doplněného počtem otázek musí být používaný LMS schopen vytvořit náhodný tah testu.

Takto vytvořený tah testu musí být systémem archivován s dalšími určujícími údaji, aby bylo možno jej během desetiletého archivačního období, kdykoliv vyvolat, vytisknout, ale především ztotožnit s konkrétním uchazečem.

4. Provedení zkoušky uchazeče pomocí LMS

Test vytvořený podle požadavků uvedených v předchozí kapitole může být tedy zobrazen na monitorech uchazečů. Přístup k zahájení testu je vhodné ošetřit pomocí jedinečného přístupového hesla. Toto heslo pak slouží k dohledání všech testů, které uchazeč v daném období vykonal.

Některé LMS umožňují zkoušení na tzv. zabezpečené obrazovce. Při zahájení testu systém neumožní jakékoliv jiné „brouzdání“ a hledání v počítači. Navíc jakýkoliv pokus ohlásí zkušebnímu komisaři nebo dozoru zkoušek.

Uchazeč má na obrazovce námi vybraný test, kromě otázky a možných odpovědí, musí být informován, kolik času mu ještě zbývá. Je vhodné, aby systém dokázal poskytnout i informaci o počtu nezodpovězených otázek.

Po uplynutí času musí systém test uzavřít a znemožnit tak jakékoliv úpravu.

Zkušební komisař musí mít na svém počítači možnost nahlédnout na test každého uchazeče. O tom, že má k dispozici správné odpovědi není třeba diskutovat. Nemůže však žádným způsobem ovlivnit výsledek či hodnocení testů.

Po ukončení testů, ať již uchazečem (odpověděl na všechny otázky a vybral možnost ukončit test), nebo vypršením časové lhůty, musí se zkušebnímu komisaři zobrazit procentuální výsledky jednotlivých uchazečů.

Pokud se vyskytnou během testu jakékoliv dotazy a zkušební komisař je vyhodnotí jako relevantní, měl by systém umožnit připojit k dané otázce poznámku pro další posouzení.

Testy jsou ukončeny, můžeme přistoupit k jejich hodnocení.

5. Vyhodnocení provedených testů a statistika

Je samozřejmostí, že všechny LMS dokáží podle předem stanovených kritérií vyhodnotit test VYHOVĚL/NEVYHOVĚL plus uvést procentuální ohodnocení podle požadavků ČSN EN ISO 9712.

Moderní LMS by měl umět zaznamenat a archivovat celkový čas trvání testu každého účastníka zkoušky.

Pro zhodnocení obtížnosti konkrétní otázky je výhodné zaznamenávat i čas, který uchazeč potřeboval k odpovědi.

Zajímavé možnosti nabízejí komerční LMS.

Jako zpětná vazba pro Školící středisko i pro certifikační orgán je vhodná funkce tzv. mortalita otázky. Jde v podstatě o jednoduchou funkci, kdy na základě zvolených kritérií dostávám přehled o procentuální neúspěšnosti jednotlivých otázek doplněný o počet, kolikrát na danou otázku bylo odpovídáno.

Při podezření z neetického jednání je zase výborný údaj nejen o celkové době, za kterou uchazeč test ukončil, ale také doba, kterou věnoval té které otázce.

Údaje o celkovém čase testu jsou vhodným doplněním k procentuální úspěšnosti uchazeče.

6. Závěr

Tento článek nemá za cíl doporučit konkrétní LMS. Ani rozhodnout, zda je lepší na míru vytvořený LMS nebo komerční. Každá varianta má svá pro a proti.

V tomto článku jsem se pokusil nastínit hlavní funkce, které by měl zvolený LMS splňovat. Definoval jsem požadavky na databázi otázek, její strukturu a kódování. Dále jsem popsal způsob tahu testů a samotné provádění testování. Zde je zmíněna i možnost „zabezpečené obrazovky“.

V samotném závěru jsou popsány pouze nezákladnější statistické a vyhodnocovací funkce, které by měl zvolený systém splňovat.



NEDESTRUKTIVNÍ METODY PRO STANOVENÍ STUPNĚ DEGRADACE BETONU

NON-DESTRUCTIVE METHODS OF ASSESSING DEGRADATION OF CONCRETE

Jan PATERA*, Zbyněk HLAVÁČ*, Jindřich JANSA*

*Centrum Výzkumu Řež s.r.o.

Contact e-mail: Jan.Patera@cvez.cz

Abstrakt

Pro účely testování metod byla vyrobena sada homogenních betonových trámečků, jejich vzorky byly vystaveny různému stupni tepelného poškození. Na vyrobených vzorcích byly testovány jak konvenční metody nedestruktivního zkoušení – měření doby průchodu signálu či rezonanční frekvence – tak metody nelineární spektroskopie elastických vln – nelineární rezonanční metoda a metoda dvoufrekvenčního směřování. Nelineární rezonanční metoda spočívá v měření frekvenční charakteristiky zkušební vzorku při nestejné budící amplitudě, zatímco metoda dvoufrekvenčního směřování je založena na vyhodnocení intermodulačního zesílení v testovaném trámečku.

Konvenční nedestruktivní metody podávají informaci o elastických vlastnostech materiálu, metody nelineární spektroskopie jsou založeny na měření elasticko-plastické odezvy zkoušeného materiálu, jejíž plastickou složku způsobují mikrotrhliny. Část této odezvy může být způsobena nehomogenitou samotného materiálu či nelinearitou použitého zkušebního zařízení, kterou bylo potřeba při měření minimalizovat. Celková nelineární odezva se během tepelné degradace zvýšila, což odpovídá nárůstu počtu mikrotrhin.

Naměřená data z nedestruktivních metod byla porovnána s výsledky destruktivních zkoušek na vzorcích bez tepelného poškození a na vzorcích vystavených teplotám 500°C a 600°C po dobu cca 2 hodin. Cílem tohoto příspěvku je výběr optimální metody či kombinace metod pro kontrolu degradace betonu v provozu.

Klíčová slova: beton, stárnutí betonu, degradace betonu, nedestruktivní zkoušení betonu, nelineární spektroskopie elastických vln

Abstract

For the purpose of testing the non-destructive methods, a set of homogeneous concrete prisms was produced, whose samples were subjected to different thermal damage. Conventional non-destructive testing methods – determination of ultrasonic transmission time and fundamental frequency – as well as non-linear elastic wave spectroscopy – non-linear resonance acoustic spectroscopy and non-linear wave modulation spectroscopy methods

were tested on the produced samples. The non-linear elastic wave spectroscopy consists of measuring the frequency characteristics of the test specimen at unequal excitation amplitude while non-linear wave modulation spectroscopy is based on evaluation of the intermodulation distortion in the test specimen.

Conventional non-destructive methods provide information only about the elastic properties of the material, non-linear spectroscopy methods are based on the elastic-plastic response of the material whose plastic component is caused by microcracks. Part of this response may be caused by inhomogeneity of the material itself or the non-linearity of the test system used, which was to be minimized in the measurement. The total non-linear response increased in thermal damage, which corresponds to the increase in the number of microcracks.

Measured data from non-destructive methods were compared with the results of destructive tests on test specimens without thermal damage and on samples exposed to temperatures of 500°C and 600°C for about 2 hours. The aim of this paper is to seek an optimal method or a combination of methods for testing concrete degradation in service.

Key words: concrete, concrete aging, concrete degradation, non-destructive testing of concrete, non-linear elastic wave spectroscopy

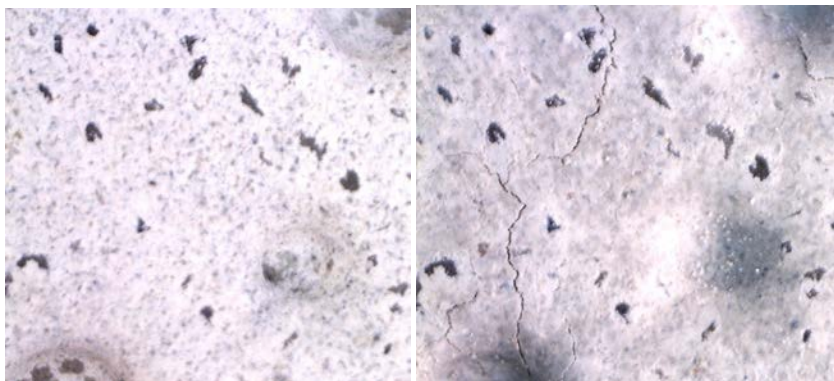
1. Úvod

Zvyšování bezpečnosti a prodloužování životnosti struktur je jedním ze základních cílů výzkumu a vývoje nedestruktivního zkoušení betonu. Mezi hlavní oblasti zkoumání patří hodnocení integrity, změna mechanických vlastností a stárnutí. Stav betonu lze zkoumat tradičními objemovými metodami, např. měřením doby průchodu a rezonanční frekvence, které poskytují osvědčené výsledky. Velmi perspektivní se zdá být rovněž ovšem skupina metod založená na hodnocení nelineární ultrazvukové odezvy, tzv. nelineární spektroskopie elastických vln (NEWS).

Vykazuje-li materiál nelineární chování, znamená to, že nemá odezvu přímo úměrnou buzení. Odchylna od ideální lineární závislosti se pak označuje jako nelinearita. Na elementární úrovni je nelineární chování materiálu způsobeno superpozicí mikrotrhlin, které se vlivem akustického tlaku zavírají a otvírají. Pokud harmonická vlna přijde do styku s mikrotrhlinou, způsobí změnu její kontaktní plochy – při růstu akustického tlaku kontaktní plocha roste a při poklesu akustického tlaku klesá. Tento jev mění fázi a amplitudu signálu [1].

Pro účely porovnání metod byla vybetonována sada 9 betonových trámečků o rozměrech 40×40×160 mm z cementu CEM II 32,5, vody a normovaného křemičitého písku frakce 0÷2,5 mm. Vyrobene trámečky byly prozkoušeny metodami a následně rozděleny na 3 skupiny. První trojice vzorků byla ponechána nepoškozená jako reference, druhá skupina byla v peci vystavena teplotě 500°C po dobu 3 h a třetí skupina byla vystavena teplotě 600°C po dobu 2 h (viz obr. 1). Po vystavení tepelné degradaci byly vzorky opět prozkoušeny a následně byla

provedena destruktivní zkouška pevnosti v tahu ohybem a v tlaku na lisu Controls 50-C9030.



Obr. 1: Detail zkušebního vzorku B2 – povrch před zahřátím (vlevo), povrch po zahřátí na 600°C (vpravo)
Fig. 1: Detail of the test specimen B2 – surface before heating (left), surface after 600°C heating (right)

Po tepelné degradaci zůstala skupina vzorků vystavená 500°C kompaktní s vláseničnými trhlinami o maximální šířce 0,1 ÷ 0,2 mm. Vzorky vystavené 600°C byly méně kompaktní, často se objevovaly otevřené trhliny o šířce 0,2 mm a na nejvíce poškozeném vzorku B2 až 0,3 mm.

2. Měření rychlosti průchodu

Jednou z měřených veličin je rychlost procházejících ultrazvukových (UZ) vln. Rychlost šíření UZ vln závisí na elastických konstantách prostředí a také na rozměrech prostředí. V trojrozměrném prostředí, jaké představuje těleso trámečku 40 x 40 x 160 mm, je rychlost šíření podélných vln dána vztahem:

$$v_L = \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot \frac{E_{bu}}{\rho}} \quad (1)$$

kde E_{bu} – dynamický modul pružnosti betonu stanovený dle rychlosti ultrazvuku, ρ – hustota prostředí, μ – Poissonův poměr příčné a podélné deformace.

Modul pružnosti E_{bu} lze vyjádřit ze vztahu (1) rovnicí:

$$E_{bu} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \cdot \rho \cdot v^2, \quad (2)$$

Modul pružnosti E_{bu} určený pomocí ultrazvuku byl porovnán s moduly E_{brL} a E_{brf} stanovenými rezonanční zkouškou v další kapitole.

3. Měření rezonanční frekvence

Pro porovnání účinků tepla je vhodné použít princip rezonanční metody impakt-echo. Jedná se o poměrně nový přístup k měření rezonančních kmitočtů pevných těles o definovaných rozměrech.

Betonový trámeček 40 x 40 x 160 mm byl podepřen zhruba v polovině své délky měkkým polystyrenem, aby bylo zaručeno jeho volné kmitání. Následně byla v čele trámečku na jeho povrch umístěna akustická sonda s rozsahem měřicí frekvence 0 – 20 kHz. Na opačném konci trámečku bylo vybuzeno kmitání pomocí kladívka s tuhým těžkým zakončením. Trámeček se volně rozkmital svou vlastní frekvencí. Tímto způsobem byla změřena podélná rezonanční frekvence f_L .

Obdobně bylo vybuzeno i torzní kmitání a určena tzv. kroutivá frekvence f_t .

Při podepření ve čtvrtinách délky trámečku bylo možné naměřit příčnou frekvenci f_f .

Způsob buzení a umístění sond odpovídal kýžené frekvenci. Pro podélný kmitočet stálo kladívko i senzor proti sobě, na obou koncích trámečku. Při torzních kmitcích byly využívány protější rohy trámečku. Příčné kmitání bylo vybuzeno a snímáno na obou volných koncích trámečku, kolmo na jeho podélnou osu.

Z každé z naměřených frekvencí bylo možno stanovit dynamický modul trámečku.

Dynamický modul pružnosti lze stanovit z podélné frekvence jako E_{brL} .

$$E_{brL} = 4 \rho \cdot L^2 f_L^2, \quad (3)$$

kde L – délka trámečku, ρ – hustota prostředí, f_L – podélná rezonanční frekvence.

Dynamický modul pružnosti trámečku lze stanovit také z příčné frekvence jako E_{brf}

$$E_{brf} = 5,90 \rho \cdot L^2 f_f^2 \cdot \left(1 + 0,166 \frac{L^2}{h^2}\right), \quad (4)$$

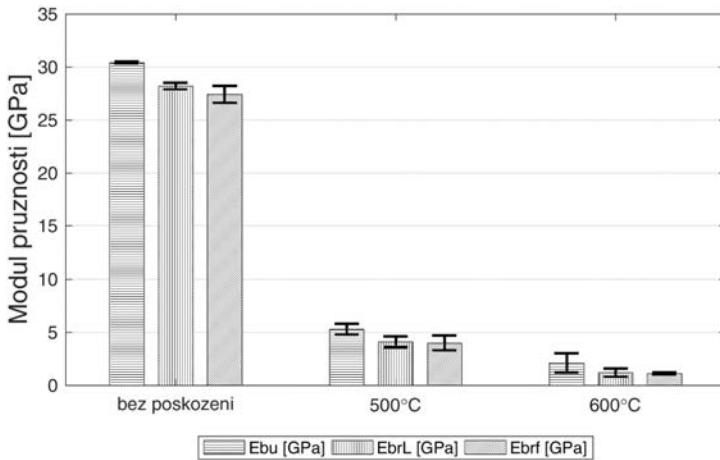
kde h – výška trámečku, f_f – příčná rezonanční frekvence.

Dynamický modul ve smyku G_{br} lze stanovit z rovnice (5),

$$G_{br} = 4 \rho \cdot 1,187 \cdot L^2 f_t^2, \quad (5)$$

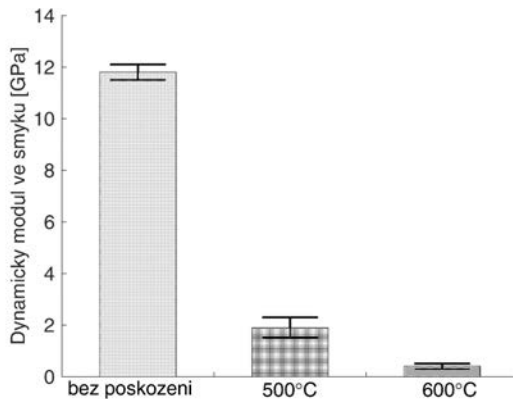
kde f_t – kroutivá (torzní) rezonanční frekvence.

Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamických modulů pružnosti E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro referenční vzorky je na obrázku 2. Dynamický modul ve smyku G_{br} je pro stejné případy znázorněn obrázkem 3.



Obr. 2: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamických modulů pružnosti E_{bu} , E_{brL} a E_{brf} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 2: Mean values and mean square errors of dynamic moduli E_{bu} , E_{brL} and E_{brf} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples



Obr. 3: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek dynamického modulu ve smyku G_{br} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 3: Mean values and mean square errors of dynamic modulus G_{br} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Všechny měřené moduly jsou po poškození teplem 500°C resp. 600°C – 6× resp. 20× nižší oproti původním či referenčním hodnotám (obr. 2 a 3).

4. Metoda dvoufrekvenčního směšování

Principem metody dvoufrekvenčního směšování (NWMS) je míchání dvou různých budících signálů o frekvencích f_1 a f_2 uvnitř zkoušeného materiálu. Nelineární chování se při tomto typu zkoušení projevuje vznikem intermodulačního produktu f_{12} o součtové a rozdílové frekvenci $f_1 \pm f_2$. Při zkoušení bývá často zkoumán poměr amplitud vzniklého intermodulačního produktu a obou budících frekvencí, který je označován jako nelineární parametr β [2] daný vzorcem:

$$\beta = \frac{A_{12}}{A_1 \cdot A_2} [V^{-1}], \quad (6)$$

kde A_{12} – amplituda intermodulační frekvence $f_{12} = f_1 \pm f_2$ [V], A_1 – amplituda odpovídající budící frekvenci f_1 [V], A_2 – amplituda odpovídající budící frekvenci f_2 [V].

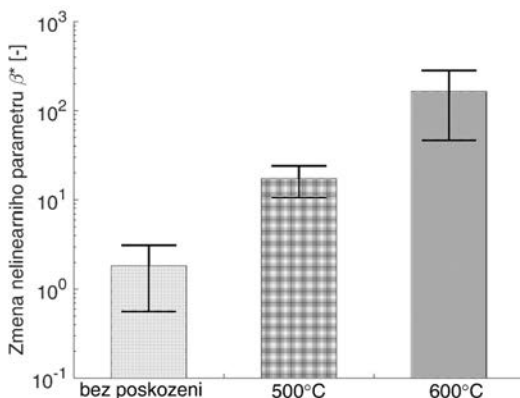
Nedostatkem vztahu (6) je závislost nelineárního parametru β na budícím napětí a rovněž nepřenositelnost naměřených výsledků na jiný měřicí systém. Nicméně je-li při následných měřeních téhož vzorku používán též měřicí systém s tímž rozmístěním piezoměničů, lze porovnáním dvou naměřených hodnot β a β' získat hodnotu změny nelineárního parametru β' , která je bezrozměrná a nezávislá na měřicím systému:

$$\beta^* = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{A_{12}' \cdot A_1 \cdot A_2}{A_{12} \cdot A_1' \cdot A_2'} [-]. \quad (7)$$

Experimentálně byl parametr β stanoven zvyšováním amplitudy budícího signálu o frekvenci $f_1 = 153$ kHz v rozmezí 7,5–225 V na generátoru PXI-5421, který byl zesilován pomocí zesilovače AR-150A100B. Napětí na druhém budiči o $f_2 = 180$ kHz bylo generováno konstantní na 225 V stejným přístrojovým vybavením. Každý ze signálů byl samostatně zesilován a přeměňován pomocí piezoměničů Dakel MDK-13 na akustickou energii a ke směšování docházelo až v testovaném vzorku. Odezva obsahující případné intermodulační produkty byla sbírána pomocí 24 bitového osciloskopu PXI-5922 a z diskrétní Fourierovy transformace jejího průběhu bylo určeno amplitudové spektrum. Ve spektru byly hledány intermodulační produkty druhého řádu způsobem, při kterém je hledáno maximum v intervalu ± 20 vzorků v okolí jejich předpokládaného výskytu $f_{12} = f_1 + f_2 = 333$ kHz.

Pokud měla závislost amplitudy intermodulačního produktu A_{12} na budící amplitudě A_1 monotónně rostoucí průběh, byla odečtena hodnota nelineárního parametru β na základě vztahu (6); byl-li pozorován pouze šum, bylo nutné měření zopakovat. Celý tento postup byl proveden 4× před poškozením a 4× po poškození vzorků v peci. Z výsledných průměrných hodnot β a β' byla podle vztahu (7) získána změna nelineárního parametru β' .

Zkušební vzorek B2, vystavený teplotě 600°, vykazoval poškození takového rozsahu, že jej nebylo možné testovat v celém objemu, nýbrž pouze na méně poškozené polovině. Naměřená změna nelineárního parametru β^* proto mohla být u tohoto vzorku podhodnocena. Průměrná změna nelineárního parametru β^* pro skupiny podle stupně poškození je vynesena v obrázku 4.



Obr 4: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek změny nelineárního parametru β^* pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig 4: Mean values and mean square errors of non-linear parameter change β^* for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

5. Nelineární rezonanční metoda

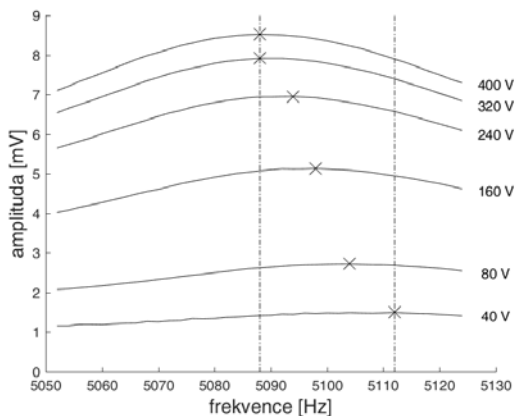
Principem nelineární rezonanční metody (NRUS) je měření frekvenčních charakteristik vzorku v určitém frekvenčním intervalu [3]. Při tomto typu zkoušení se nelineární chování projevuje poklesem rezonanční frekvence Δf_r vzorku při rostoucí budící amplitudě:

$$\Delta f_r = f_{r,max} - f_{r,min} \text{ [Hz]}, \quad (8)$$

kde $f_{r,max}$ – rezonanční frekvence při nízké budící amplitudě [Hz], $f_{r,min}$ – rezonanční frekvence při vysoké budící amplitudě [Hz].

Při experimentu byl posun rezonanční frekvence měřen na intervalu 5–20 kHz zvyšováním amplitudy budícího signálu v rozmezí 40–400 V pomocí generátoru PXI-5421. Budící signál byl zesilován pomocí zesilovače AR-150A100B a přeměňován piezoměničem Dakel DK15kryo na akustickou energii.

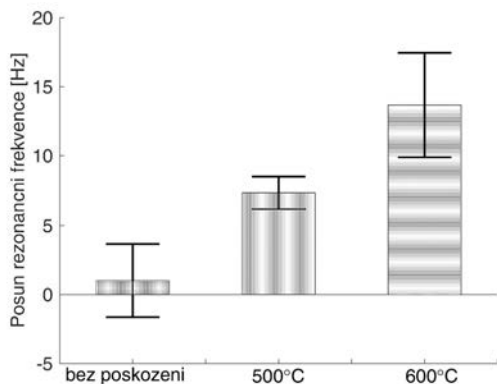
Pro měření frekvenčních charakteristik vzorků bylo použito 6 různých hodnot budícího napětí – 40, 80, 160, 240, 320 a 400 V. Pro každou z nastavených amplitud budícího signálu bylo generováno napětí harmonického průběhu kmitočtové rozmítané v diskretních krocích o velikosti 2 Hz. Během každého kmitočtového kroku byla zaznamenána odezva. Pro každou odezvu byla vypočítána efektivní hodnota jejího průběhu a z těchto hodnot bylo zkonstruováno frekvenční spektrum odezvy (viz obr. 5). Pro každý vzorek bylo měření provedeno 4× a z výsledných průměrných hodnot $f_{r,max}$ a $f_{r,min}$ byla získána hodnota poklesu rezonanční frekvence Δf_r podle vztahu (8).



Obr. 5: Posun rezonanční frekvence vzorku B2 pro budící napětí 40–400 V (označena křížkem)

Fig. 5: Resonant frequency shift at the excitation voltages 40–400 V (marked with a cross)

Trámečky bez tepelné degradace nevykazovaly prakticky žádný posun rezonanční frekvence Δf_r ; průměrná hodnota posunu činila 1 ± 2 Hz, což lze interpretovat jako šum. Po zahřátí na 500°C se objevila změna rezonanční frekvence 7 ± 1 Hz, po zahřátí na 600°C činil tento posun v průměru 13 ± 3 Hz. Velký rozptyl pro skupinu 600°C je způsoben nehomogenitou skupiny, jejíž vzorky vykazovaly nestejnou úroveň poškození; u nejvíce poškozeného vzorku B2 byl naměřen posun 18 Hz. Průměrné hodnoty posunu rezonanční frekvence Δf_r jsou vyneseny v obr. 6.



Obr 6: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek posunu rezonanční frekvence Δf_r pro vzorky poškozené 500°C , 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig 6: Mean values and mean square errors of resonant frequency shift Δf_r for damage caused by the heat 500°C , 600°C and for the reference samples

6. Destruktivní zkoušky

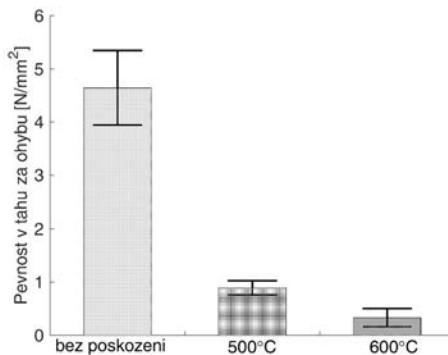
Všechny sledované trámečky byly po nedestruktivních zkouškách nejprve zlomeny třibodovým ohybem. Vzniklé zlomky byly rozmačkány v hydraulickém lisu.

Výsledkem třibodového ohybu je zvyšování napětí na krajních tažených vláknech betonového trámečku dokud nedojde k jeho porušení. Získaná hodnota je maximální síla F_{bt} . Pevnost v tahu R_{bt} je vypočítána podle vztahu (9),

$$R_{bt} = \frac{3F_{bt} \cdot L_{eff}}{2bh^2}, \quad (9)$$

kde L_{eff} – rozpětí obou podpěr trámečku při třibodovém ohybu, F_{bt} – maximální síla vyvozená uprostřed rozpětí trámečku, b a h – šířka a výška trámečku.

Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tahu R_{bt} pro případy poškození betonu 500°C, 600°C a pro referenční vzorky je na obrázku 7. Výsledky pevnosti v tlaku pro betonové trámečky poškozené teplem 500°C a 600°C jsou v obrázku 8 porovnány k referenčním hodnotám vzorků bez poškození.



Obr. 7: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tahu R_{bt} pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

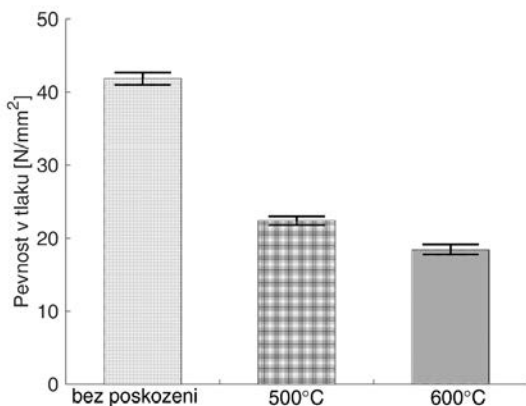
Fig. 7: Mean values and mean square errors of tensile strength R_{bt} for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Z obrázku 7 je zřejmé, že po zahřátí na 500°C, resp. 600°C dosahuje pevnost v tahu zhruba pětinu, resp. desetinu původní pevnosti.

Pevnost v tlaku na zlomku R_b se vypočítá jako poměr maximální síly F_b a tlačné plochy A_{eff} .

$$R_b = \frac{F_b}{A_{eff}}, \quad (10)$$

kde F_b – maximální síla před porušením vzorku, A_{eff} – tlačná plocha vzorku.



Obr. 8: Porovnání středních hodnot a směrodatných odchylek pevnosti v tlaku R_b pro vzorky poškozené 500°C, 600°C a pro vzorky bez poškození

Fig. 8: Mean values and mean square errors of compressive strength R_b for damage caused by the heat 500°C, 600°C and for the reference samples

Hodnoty pevnosti v tlaku po 500°C, resp. 600°C jsou zhruba 2×, respektive 2,5× nižší oproti hodnotám nepoškozených vzorků.

7. Srovnání výsledků nelineárních a konvenčních metod

Výsledky modulů pružnosti z ultrazvukové zkoušky E_{bu} , z podélné respektive příčné rezonanční zkoušky E_{brL} resp. E_{brf} a smykového modulu G_{br} z torzní rezonanční zkoušky jsou shrnuty v tabulce 1. Porovnání výsledků nelineární spektroskopie NRUS, resp. NWMS (Δf_r , resp. β^*) s výsledky destruktivních zkoušek (pevnost v tahu R_{bt} a pevnost v tlaku R_b) jsou v tabulce 2.

Tab. 1: Porovnání středních hodnot dynamických modulů E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} a G_{br} pro vzorky bez poškození (28°C) se vzorky poškozenými 500°C a 600°C

Tab. 1: Mean values of dynamic moduli E_{bu} , E_{brL} , E_{brf} and shear modulus G_{br} of reference samples compared with samples damaged by the heat 500°C, 600°C

T [°C]	E_{bu} [GPa]	E_{brL} [GPa]	E_{brf} [GPa]	G_{br} [GPa]
28	30,4	28,2	27,4	11,6
500	5,3	4,1	4,0	1,9
600	2,1	1,2	1,1	0,4

Tab. 2: Porovnání výsledků nelineárních nedestruktivních metod NRUS, resp. NWMS s výsledky destruktivních metod – s pevností v tahu R_{bt} a pevností v tlaku R_b pro vzorky bez poškození (28°C) se vzorky poškozenými 500°C a 600°C

Tab. 2: Results of non-linear non-destructive methods NRUS (Δf_i) and NWMS (β^*) compared to the results of destructive methods – tensile strength R_{bt} and compressive strength R_b for reference samples and samples damaged by 500°C or 600°C

T [°C]	Δf_i [Hz]	β^* [-]	R_{bt} [MPa]	R_b [MPa]
28	1	2	4,6	42
500	8	17	0,9	22
600	13	164	0,3	18

Metoda NWMS vykazuje recipročně-exponenciální závislost na pevnosti v tahu či tlaku, stejně jako na ostatních mechanických parametrech betonu (s klesajícími hodnotami běžně měřených mechanických vlastností betonu exponenciálně roste koeficient β^*). Zdá se být tedy velmi citlivým ukazatelem stavu materiálu. Šum je relativně malý, což umožňuje používat poměrně nízká budicí napětí řádově v jednotkách voltů. Na druhou stranu tento typ zkoušení umožňuje hodnotit stav betonu pouze při kontinuálním měření; jediné měření má malou výpovědní hodnotu, neboť může být ovlivněno lokálními nehomogenitami.

Metoda NRUS koreluje s naměřenými hodnotami pevnosti nepřímou úměrou a jeví se být relativně málo citlivým ukazatelem změny struktury betonu. Nízká citlivost je způsobena i poměrně vysokým šumem při stanovení frekvenčního spektra odezvy, kvůli čemuž není možné používat budicí napětí menší než desítky voltů. Výhodou této metody je, že při nízkém stupni poškození ukazuje nulovou změnu rezonanční frekvence a pro prokázání změny struktury tedy odpadá potřeba srovnávacích měření. Kromě toho je tento typ zkoušení relativně málo ovlivněn lokálními nehomogenitami.

8. Závěr

Byla vybetonována sada 9 trámečků z křemičitého písku, cementu a vody, na kterých byla testována nelineární rezonanční metoda (NRUS), metoda dvoufrekvenčního směšování (NWMS), ultrazvuková průchodová metoda a rezonanční metoda. Tyto nedestruktivní metody byly porovnány pomocí destruktivních zkoušek v tahu a v tlaku.

Na základě výsledků obou nelineárních i všech konvenčních metod je možno prokázat degradaci materiálu tepelným poškozením. Výhodou nelineárních metod oproti konvenčním metodám je vysoká citlivost na změny struktury zkoušeného materiálu. Jejich nedostatkem je vysoký šum, který omezuje dynamický rozsah

měřicího systému zdola. Shora je dynamický rozsah limitován použitými piezoměniči, které lze budít napětím maximálně ve stovkách voltů. Zvýšit dynamický rozsah systému je ovšem možné použitím předzesilovače či výkonnějších piezoměničů typu Langevin. Nasazení metod nelineární spektroskopie v širším měřítku prozatím brání komplikovaný sběr dat a jejich další zpracování.

Tento příspěvek byl vytvořen s finanční pomocí projektu VI20152018016 z Programu bezpečnostního výzkumu České republiky 2015 - 2020 Ministerstva vnitra.

Práce byla realizována na velké infrastruktuře SUSEN, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LM2015093, vybudovaná v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Literatura

- [1] MCCALL, K., GUYER R. (1996). A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock. *Nonlinear Processes in Geophysics*, roč. 3, č. 2, s. 89–101.
- [2] VAN DER ABEELE, K., JOHNSON, P., SUTIN, A. (2000a). Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, roč. 12, č. 1, s. 17–30.
- [3] VAN DER ABEELE, K., JOHNSON, P., SUTIN, A. (2000b). Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, roč. 12, č. 1, s. 31–42.



MOŽNOSTI ZKOUŠENÍ TRUBEK MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU METODOU – SOUHRN

POSSIBILITIES OF MAGNETIC PARTICLE TESTING OF TUBES – SUMMARY

Ing. Miroslav ROXER,

ATG s.r.o., roxer@atg.cz

Abstrakt

Článek se zabývá technikami zkoušení magnetickou práškovou metodou (MT). Je výsledkem období vývoje magnetizérů pro zkoušení čel, konců a vnějšího povrchu trubek práškovou metodou. Zaměřuje se magnetizační techniky a kombinace magnetizačních technik, kterými lze dosáhnout všesměrové magnetizace zkoušeného povrchu, nebo žádané oblasti. Většina zmíněných technik byla ověřena přímým experimentem. Článek dělí oblasti zájmu na vnější povrch trubky, svar a TOZ (Tepelně Ovlivněná Zóna), konec trubky včetně vnitřního povrchu konce. Dalším úhlem pohledu je průměr trubky. Článek se věnuje trubkám o průměru od 40 mm do 1,5 m a to samostatným trubkám před svařením do potrubního systému.

Klíčová slova: Magnetická prášková metoda, trubky, konce trubek, techniky zkoušení

Abstract

This article deals with various techniques used for magnetic particle testing. It is a result of long period of development of magnetic particle benches for testing of tube bodies and tube ends. It is focused on magnetization technics and combination of techniques which result into combined magnetization of required surfaces or areas. Most of the techniques were verified by direct experiment. The article divides the areas of interest to outer surface, weld and HAZ (Heat Affected Zone), end of the tube including the inner surface. The other point of view is the diameter of the tube. It shows techniques for automated testing of single tubes from 40 mm up to 1.5 m in diameter before welding with other tubes.

Key words: Magnetic particle method, tubes, tube ends, test techniques

1 Úvod

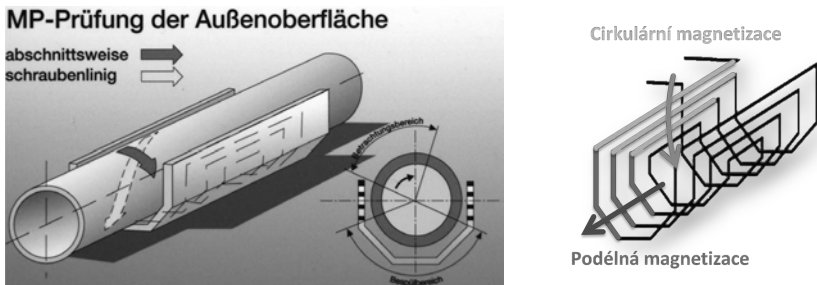
Většina požadavků na zkoušení MT vychází přímo z požadavků výrobců trubek a trub, kteří se buď přímo snaží následovat pokynů norem [1] [2] [3] [4], nebo vytvářejí své vlastní. Vedle zkoušení polotovarů pro výrobu trubek a konců hotových trubek pomocí ultrazvuku a radiografického zkoušení svarů na trubkách větších

průměrů, je magnetická prášková zkouška hojně užívána pro nedestruktivní zkoušení povrchů, konců se závity, nebo ploch před svařením.

Všechny hodnoty intenzity proudu a magnetického pole jsou uváděny jako efektivní hodnoty. Mnoho ze zmíněných technik používá dvě ze tří fází distribuční sítě. Tato nevyvážená zátěž může v síti způsobovat nežádoucí fázové posuvy, které je třeba při velkých výkonech kompenzovat.

2 Zkoušení vnějšího povrchu trubek

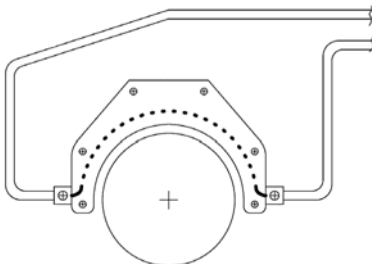
2.1 Cívka ve tvaru koryta



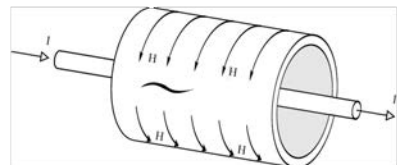
Obrázek 1 - Cívka ve tvaru U [4].

Korytová cívka s několika paralelními podélnými segmenty a několika segmenty kolmými na osu trubky lze použít pro zkoušení vnějšího povrchu. Trubka je unášena podél své osy a současně okolo ní rotuje. Během tohoto pohybu je polévána detekční suspenzí. Segmenty cívky paralelní s osou trubky způsobují cirkulární magnetizaci. Zbývající segmenty slouží k podélné magnetizaci. Takovéto rozložení je vhodné pro trubky v rozsahu průměrů od 20 do 700 mm. Maximální příkon je 90 kW [5].

2.2 Otevřená cívka a pomocný vodič

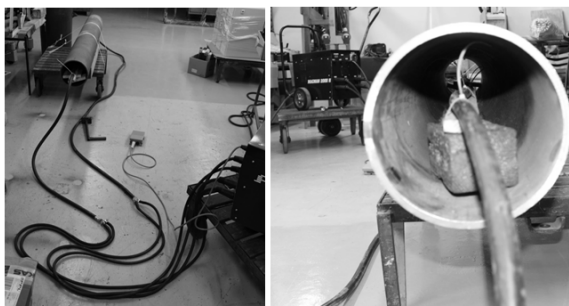


Obrázek 2 – Otevřená (poloviční) [8].



Obrázek 3 – Pomocný vodič [9].

Kombinací zmíněných technik lze dosáhnout všesměrové magnetizace povrchu trubky. Zkoušená oblast je omezena prostorem pod a v těsné blízkosti závitů poloviční cívky. Centrální vodič magnetuje cirkulárně povrch po celé délce trubky. Pro snížení potřebného výkonu lze použít i vodič umístěný k horní části vnitřního povrchu. Proudů pro napájení obou magnetizačních prvků musí být fázově posunuty. V tomto případě je dostačující rozdíl fází poskytovaný sítí, tedy 120° . Například trubka o průměru 220 mm a tloušťce stěny 8 mm vyžaduje minimální proud 1,5 kA do pomocného vodiče a alespoň 3 kA do otevřené cívky. S takovými proudy lze dosáhnout na zkoušeném povrchu intenzity mag. pole 2 kA/m. Tedy minimální hodnoty vyžadované v Obecných principech pro MT [6].

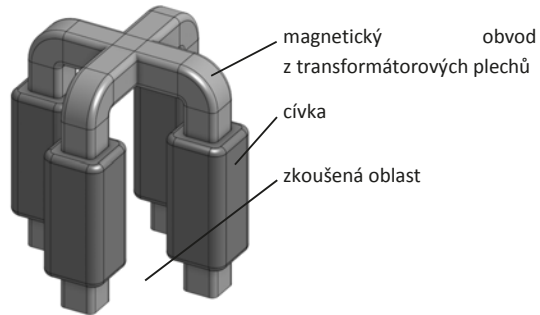


Obrázek 4 - Experiment s pomocným vodičem [7].

3 Zkoušení svaru

Pokud není trubka tažená, tedy bez svaru je třeba ji vyrobit z polotovaru plechu. Obdélníkový plech je v lisu ohýbán na kruhový profil a následně podélně svařen. První druh svaru je tedy rovný, podélný. Druhým způsobem jsou spirálové svary, které se používají pro výrobu trubek větších průměrů z plechového svitku. Následující techniky jsou určeny pro lokální zkoušení. Lze je proto použít pro oba dva zmíněné typy svarů. Rozdíl je pouze v manipulaci s trubkou. Pro spirálové svary je kromě pohybu v ose (pohybuje se trubka, nebo magnetizér) nutná i rotace.

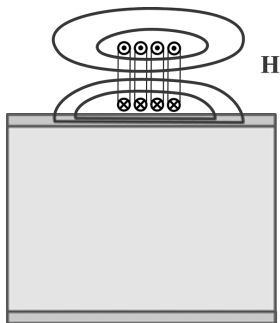
3.1 Křížové jho



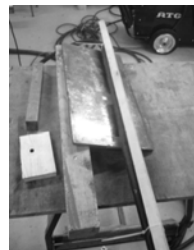
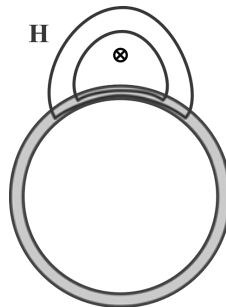
Obrázek 5 – Křížové jho.

Pravděpodobně nejjednodušší cestou zkoušení svaru, kterou lze také snadno automatizovat je použití křížového jha. Jedná se o kombinaci dvou jednoduchých jeh a dvou párů cívek napájených fázově posunutým střídavým proudem. Ačkoli výrobci uvádějí střídavé proudy s fázovým posunem 90° , konstrukce s přijatelnými náklady vede k použití dvou síťových fází, tedy posunu o 120° .

3.2 Příložný vodič a příložná cívka



Obrázek 6 – Podélná magnetizace příložnou cívkou [7].

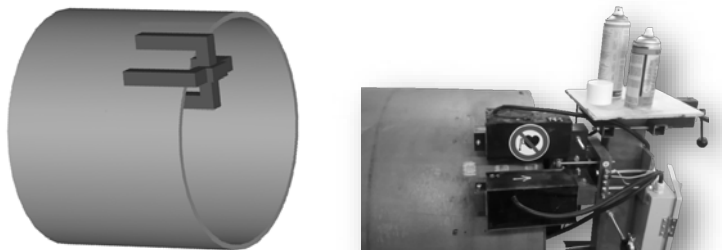


Obrázek 7 – Církulární magnetizace příložným vodičem [7].

4 Zkoušení konců trubek

Polotovary plechů pro výrobu trubek jsou obvykle zkoušeny pomocí ultrazvuku. Tato technika však není vhodná pro konce plechů. Po svinutí a svaření je na konci trubky často obrobena fazeta. Všechny zmíněné procesy mohou dát vzniknout novým vadám materiálu. Na oblast budoucího svaru jsou kladeny zvláštní nároky. Minimálním požadavkem je zkoušení návarové plochy (čela trubky) na obvodové vady, které mohou vzniknout odhalením laminarit plechu při obrobení fazety. Rozšířeným požadavkem je kontrola budoucí tepelně ovlivněné oblasti a přilehlých ploch, tedy vnějšího povrchu trubky do vzdálenosti několika centimetrů od okraje (podle průměru trubky). Maximálním požadavkem bývá zkoušení konců trub na vnitřním povrchu do vzdálenosti až několika desítek mm, obvykle do hloubky shodné s požadavkem na vnější povrch. U trubek malého průměru je logické požadavek na hloubku zkoušení vnitřního povrchu omezit polovinou vnitřního průměru. Ve větší hloubce je vizuální kontrola případných indikací obtížná.

4.1 Křížové jho s amplitudově regulovanými zdroji s fázovým posunem



Obrázek 8 – Křížové jho s fázovými posuny, numerický model a experiment [7].

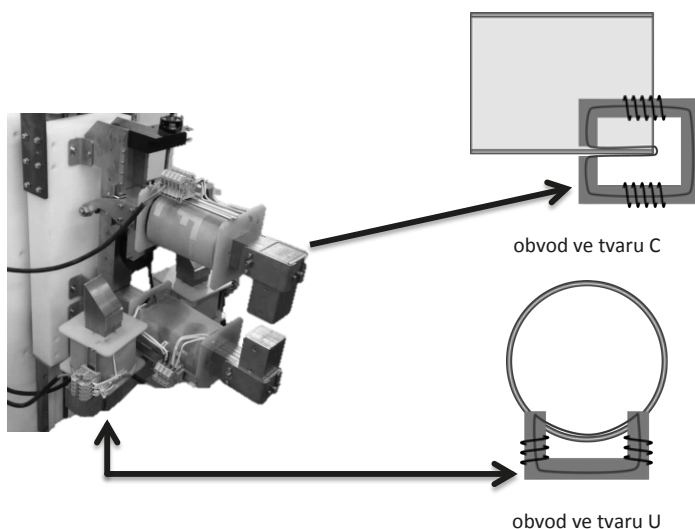
Křížové jho tohoto typu se skládá z magnetického obvodu obdobného jako v (4.1) a ze čtyř samostatných cívek napájených čtyřmi zdroji s nezávislým fázovým posunem a amplitudou. Kombinace fázových posunů a amplitud je navržena tak, aby na zkoušeném povrchu došlo k všesměrové magnetizaci. K navržení vhodných fázových posunů pro daný typ trubky (průměr a tloušťka stěny) bylo použito optimalizačních algoritmů v numerickém modelu.

Standardním křížovým jhem (4.1) lze dosáhnout všesměrové magnetizace na povrchu čela, nikoli však současně na čele a vnitřním a vnějším povrchu. Zkoušená oblast je omezena mezi póly jha. Pro možnost zkoušení během rotace, ježto je podmínkou dodržení požadovaného výrobního taktu, je třeba, aby mělo jho dostatečné rozměry. Zkoušená oblast (oblast aktivního rotujícího pole) musí být vzhledem k rychlosti rotace trubky dostatečně rozsáhlá, aby mohla případná indikace

na povrchu vzniknout ještě v aktivním poli a přebytek suspenze v tomto poli ještě stačil odtéci. Při malé oblasti aktivního pole hrozí smytí vytvořené indukace, nebo s nutným zpomalením rotace nedodržení výrobního taktu.

Vlivem elektromagnetické vazby dochází, podobně jako u transformátoru, k indukci proudů z jednotlivých cívek do ostatních větví. Navržení fázových posuvů a amplitud tedy není triviálním úkolem. Protože křížové jho zasahuje do apertury trubky, je použitelné pouze pro průměry přibližně od 200 mm, podle velikosti jha. Vizuální kontrola se provádí těsně po výstupu oblasti z aktivního pole, například přenosem obrazu z řádkové kamery na monitor operátora.

4.2 Křížové jho - klešťové

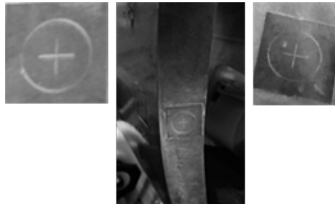


Obrázek 9 – Klešťové křížové jho [7].

Křížové klešťové jho má výrazně jednodušší řízení než jho s čtyřmi zdroji (5.1). Jedná se o dva modifikované magnetické obvody, každý s párem cívek. Obvod ve tvaru U vytváří cirkulární (obvodovou) magnetizaci a pole efektivně zasahuje přibližně do hloubky rovné polovině vzdálenosti pólových nástavců. Pólové nástavce je třeba přizpůsobit tvaru čela, například zkosením v případě fazety, jak je vidět na obrázku (Obrázek 9).

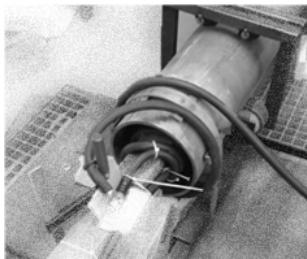
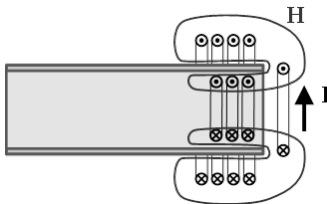
Magnetizace podélná s osou trubky je realizována magnetickým obvodem ve tvaru písmene C. Pro minimalizaci vzduchové mezery je třeba umožnit pohyb jednoho pólu ve svislém směru. Hloubka je pak omezena délkou ramene mag. obvodu.

Jho je napájeno ze dvou fází síťového napětí. Cívky na jednotlivých mag. obvodech jsou zapojené do série. Obvod tvaru C opět zasahuje do apertury trubky a proto je vhodný od průměru 300 mm. Velikost maximálního průměru není omezena.

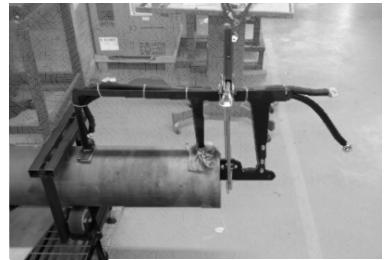
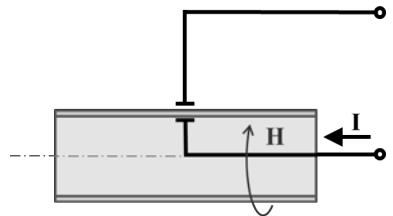


Obrázek 10 – Indikace na měrkách SHIMS na vnějším povrchu, čele a vnitřním povrchu [7].

4.3 Cívka a pomocný vodič



Obrázek 11 – Podélná magnetizace vnitřní a vnější cívkou.



Obrázek 12 - Cirkulární magnetizace pomocným vodičem.

Spojením magnetizačních technik pomocí cívek a pomocného vodiče je zkouška celého povrchu realizována v jednom kroku. Tvar intenzity magnetického pole (H) je pro obě techniky zvláště v řezu patrný na výše uvedených obrázcích. Podélná magnetizace může být pro zvýšení efektivity doplněna o čelní závit, který je znázorněn pouze ve schematické části obrázku (Obrázek 11). Cívka je tvořena jedním vodičem a lze ji navinout i z pevného materiálu. Taková cívka je pak samonosná. Nevýhodou je nízký rozsah zkoušených průměrů vzhledem k rigidnímu

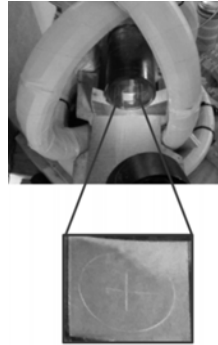
sadou cívek pro různé průměry. Protože ale magnetuje celý obvod naráz bez nutnosti rotace, lze tímto způsobem dosáhnout krátkého taktu.

Při cirkulární magnetizaci prochází proud stěnou trubky. Je proto nutné zajistit dobrý elektrický kontakt, aby nedocházelo k opalům. Pro zachování zkoušení celého povrchu konce trubky v jednom kroku, je třeba umístit vnitřní vodič jako centrální.

4.4 Soustava cívek



Obrázek 13 - Numerický model soustavy cívek s trubkou [7].



Obrázek 14 - Indikace na měřce SHIM při experimentu [7].

Magnetizace pomocí soustavy cívek je vhodná pro zkoušení konců trubek v celém rozsahu zmíněného v úvodu kapitoly 5, tedy vnějšího i vnitřního povrchu a čela současně. Celý díl je zkoušený v jednom kroku bez nutnosti rotace. Při posunu trubky v její ose je tento způsob vhodný i pro zkoušení vnějšího povrchu po celé jeho délce, tedy i svaru podélného i spirálového.

Soustava sestává z tří až čtyř cívek, kde dvě jsou ve svislé poloze kolmé na sebe navzájem. Další cívka je umístěna vodorovně. Tato může být doplněna o další vodorovnou cívku uloženou symetricky vzhledem ke středu soustavy. Soustava je podobně popsána i v patentu [8]. Každá cívka je napájena jednou fází síťového napětí. Vodorovné cívky, jsou-li použity obě, jsou podle možností vinutí v sérii, nebo paralelně na společné fázi. Pro úplnost zmiňme, že směr intenzity mag. pole ve středu cívky je rovnoběžný s její osou. V tomto rozložení tedy kombinujeme tři směry intenzity mag. pole s vzájemným fázovým posunem.

Pro tento případ je plocha apertury soustavy cívek (otvor, kterým prochází trubka) přibližně poloviční vůči apertuře jedné z cívek soustavy. Poměr průřezu trubky a plochy apertury soustavy cívek musí být v rozsahu 0,2 - 0,7. Pro poměr menší než 0,2 není díl řádně všesměrově zmagnetován, pro větší poměr neprojde aperturou

soustavy (není kruhová). Soustava je vhodná pro kontrolu vnitřního povrchu, neboť jej žádná z částí mag. obvodu nezakrývá.

5 Závěr

Z uvedených magnetizačních technik se, s přihlédnutím ke všem úrovním požadavků, jeví jako nejuniverzálnější technika s použitím soustavy cívek, která je s určitými omezeními použitelná pro všesměrové zkoušení celého povrchu trubky vyjma ploch vnitřního povrchu ve vzdálenosti větší, než 20 cm od konce trubky. Pro průměry trub od 1 m by rozměry cívek a požadavky na zdroj významně vzrostly, proto je výhodnější lokální magnetizace pomocí některého z typů křížového jha.

- [1] API, *API 5L - Specification for Line Pipe*, API, 2000.
- [2] ISO, *ISO 10893-5 - Non-Destructive testing of steel tubes, Part 5: Magnetic particle inspection of seamless and welded ferromagnetic steel tubes for the detection of surface imperfections*, ISO, 2011.
- [3] A. International, *ASTM E 1444:16 - Standard Practice for Magnetic Particle Testing*, ASTM International, 2016.
- [4] API, *API 7-1 - Specification for Rotary Drill Stem Elements*, API, 2006.
- [5] M. Schoenen, „Magnetic particle flaw detection apparatus“. Federal Republic of Germany Patent GB 2278 449 A, 30. 11. 1994.
- [6] ISO, *Non-destructive testing - Magnetic particle testing - Part 1: General Principles*, Geneva: ISO, 2015.
- [7] M. Roxer, „R&D notes“, Prague, 2011 - 2018.
- [8] H. GmbH, „Gebrauchsmusterschrift“. Patent DE 20 2016 101 253 U1, 28. 4. 2016.
- [9] Krejča, Josef; Roxer, Miroslav, *Magnetická metoda prášková stupeň I, II, podklady pro školení dle ISO9712, SNT-TC-1A a EN4179 / NAS410*, Praha: ATG - Advanced Technology Group s.r.o., 2012.
- [10] "Deutsches Patent und Markenamt," 2018. [Online]. Available: <https://depatisnet.dpma.de>.
- [11] „www.helling.de,“ [Online]. Available: www.helling.de. [Přístup získán 12. 9. 2018].



VÝROBA RADIONUKLIDOVÝCH ZDROJŮ PRO GAMAGRAFII

PRODUCTION OF RADIONUCLIDE SOURCES FOR GAMMA RADIOGRAPHY

Radek ŘEZÁČ

radek.rezac@isotrend.cz

Abstrakt:

v dnešní době se stále více užívají alternativní metody k metodám prozařování pomocí radionuklidů. V průmyslu jsou však stále ještě oblasti, ve kterých je metoda prozařováním nejvhodnějším řešením. Gamagrafie využívající radionuklidů jako je Ir-192, Se-75 nebo Co 60 spojují výhody jednoduché manipulace, které nevyžadují komplikované nastavení, jak je tomu u složitějších přístrojů nebo systémů. Navíc energie vyzařujících gama kvant umožňuje prozařovat tlustší materiály, než jaké dovolí například rentgenografie. Prozařování pomocí radionuklidů nabízí sama příroda na základě přirozené radioaktivity některých prvků. V příspěvku nastíníme úvodní informace nezbytné pro pochopení vlastností subatomárních částic. Následně se zaměříme na výrobu různých radionuklidových zdrojů pro účely gamagrafie.

Klíčová slova: *prozařování, rentgenografie, gamagrafie, radionuklidy, radioaktivita*

Abstract:

Nowadays alternative methods to radionuclide's penetrating radiation are increasingly being used. However there are still areas in industry where the method of penetrating radiation is the most appropriate solution. Gamma radiography typically uses radionuclides like Ir-192, Se-75 or Co-60 to combine the advantages of simple handling with no requirement of complicated set up as it is in more sophisticated devices or systems. In addition energy of gamma quantum allows to go through thicker materials than it is provided by roentgenography. The radionuclide radiation is based on the natural radioactivity of some elements. In the paper we will outline the introductory information necessary to understand the properties of subatomic particles. Consequently we will focus on the production of various radionuclides used for gamma radiography.

Key words: *penetrating radiation, roentgenography, gamma radiography, radionuclide, radioactivity*

1. Úvod

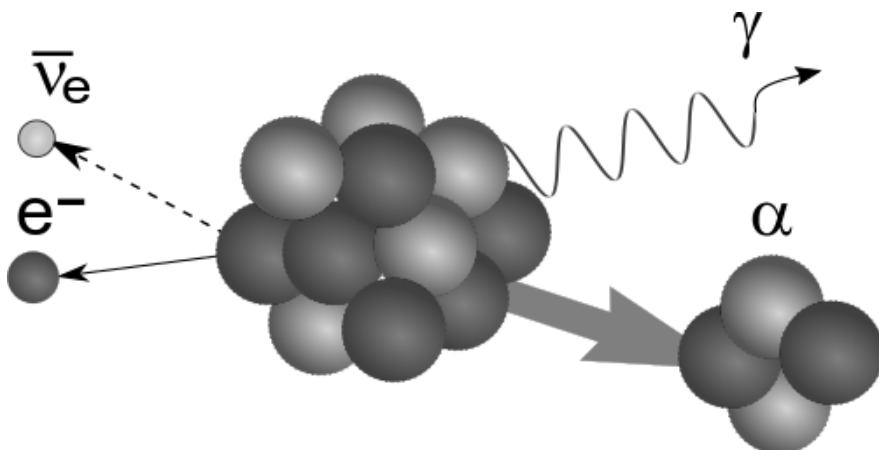
Radionuklidové zdroje jsou vyráběny aktivací vhodných materiálů v reaktoru, popřípadě v urychlovači nabitých částic. Pro výrobu uzavřených radionuklidových zdrojů je pak aktivovaný radionuklid zavařen do pouzdra. Tato pouzdra jsou využívána jako zdroje gama záření v projektorech pro účely prozařování.

2. Fyzikální princip

Podobně jako u planetárního modelu atomu, kde se elektrony vyskytují na určitých drahách kolem jádra atomu, si lze představit, že v jádře atomu se nacházejí neutrony a protony též na určitých energetických hladinách připomínající slupky. Neutrony a protony jsou na těchto hladinách vázány silnými interakcemi. Pokud se jádru dodá energie, mohou být nukleony (protony a neutrony) excitovány na vyšší energetické hladiny, nebo mohou uniknout z jádra, pokud je energie dostatečná. Excitované nukleony se vrátí na nižší volnou hladinu za současného vyzáření částic tak, aby byly zachovány příslušné zákony zachování. Samovolný proces přeměny, který v jádře u některých nuklidů nastává, se nazývá přirozená radioaktivita. Ta je způsobena několika následujícími mechanismy.

U těžkých jader, kdy silná interakce již nedokáže kompenzovat odpudivé elektromagnetické síly mezi protony, dochází k „odlomení“ alfa částic. Dalším typem radioaktivity je radioaktivní přeměna beta. Ta nastává pod vlivem slabé interakce, při které dochází k přeměně kvarků „u“ a „d“ v nukleonech. To má za následek, že se neutron může přeměnit na proton, elektron a elektronové antineutrino. Proton v jádře zůstává a elektron je emitován z jádra jako beta mínus částice spolu s elektronovým antineutrinem. Další možností je, že i jinak stabilní volný proton, se ve vázaném stavu v jádře může přeměnit na neutron, pozitron (antičástice k elektronu) a elektronové neutrino. Pozitron je pak emitován z jádra jako beta plus částice tentokrát s elektronovým neutrinem. Poslední možností beta radioaktivity je elektronový záchyt.

Nejdůležitější radioaktivní přeměna pro účely NDT je přeměna gama. V podstatě se nejedná o přeměnu, ale o deexcitaci jádra, při které se vyzáří foton ve formě gama kvant. Radioaktivita gama je vždy následována po přeměně alfa nebo beta.



Obr. 1 Radioaktivní přeměna
Fig. 1 Radioactive decay

3. Postup výroby radionuklidových zdrojů

Radionuklidy nacházíme v přírodě, nebo je možné je vyrábět v jaderných reaktorech a urychlovačích nabitých částic. Pro účely NDT jsou radionuklidy, jako je Ir-192, Se-75 nebo Co-60 vyráběny v jaderném reaktoru aktivací neutrony. Proces je následující.

Stabilní izotop, jakým je například iridium, se vloží do reaktoru, kde je následně bombardován tokem neutronů o příslušné energii. Pokud jádro stabilního izotopu zachytí jeden nebo více neutronů, vznikne tak nový izotop, který má sice stejný počet protonů, tedy stejné atomové číslo, ale více nukleonů (protony + neutrony), tedy větší nukleonové číslo. Efektivita tohoto záchytu je úměrná účinnému průřezu reakce a hustotě neutronového toku.

Nově vzniklé izotopy mohou být stabilní nebo radioaktivní. V případě iridia se používá pro aktivaci přírodní iridium, které obsahuje 37% Ir-191 a 63% Ir-193. Pro výrobu Ir-192 je důležité pouze Ir-191, které se záchytem jednoho neutronu přemění na Ir-192. Záchytem dalších neutronů v Ir-191 nebo v Ir-193 vzniknou nechtěné radionuklidy, které mají naštěstí krátký poločas radioaktivní přeměny a brzy se vyzáří. Jak již bylo řečeno, jedním z parametrů, který ovlivňuje efektivitu záchytu neutronu v daném izotopu, je účinný průřez reakce. Ten se dá ovlivnit například optimalizací energie bombardujících neutronů, upravením tvaru a rozměru bombardovaného terčíku, nebo zejména zvýšením obsahu žádaného izotopu. Tedy pokud chceme, aby se co největší množství iridia přeměnilo na požadované Ir-192 je nutné přírodní iridium izotopicky obohatit, aby obsahovalo více Ir-191. Toto je dosti komplikovaná a drahá procedura, která se ale samozřejmě používá, pokud chceme vyrobit zdroje o malých

ohniskách s relativně vysokou aktivitou. Pro výrobu standardních zdrojů postačuje přírodní iridium bez isotopického obohacení.

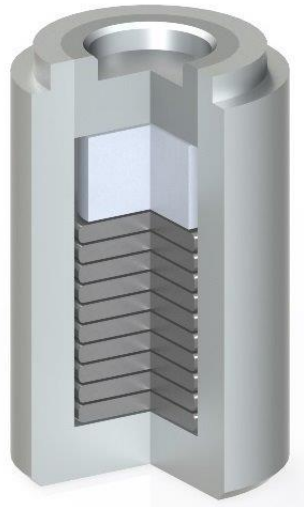
Jiná situace je u selenu. Pro výrobu Se-75 je prakticky nemožné využít přírodní selen, neboť obsahuje pouze 0,89 % Se-74. Tedy je nutné ho před aktivací v reaktoru isotopicky obohatit. U kobaltu je naopak téměř veškerý přírodní kobalt složen z Co-59, tím pádem je možné ho přímo aktivovat v reaktoru podobně jako přírodní iridium.

V našich horkých komorách vyrábíme zejména iridiové zdroje tím způsobem, že aktivované iridiové disky zavařujeme do nerezových pouzder. Finální zdroje prochází kontrolou kvality, během které jsou testovány na těsnost a povrchovou kontaminaci.

Ir-192 má poločas radioaktivní přeměny 74 dní a energii emitovaných gama kvant v rozsahu 206-612 KeV. Při prozařování je vhodné ho využít pro materiály o ekvivalentu tloušťky oceli od 12 do 70 mm. Se-75 má delší poločas radioaktivní přeměny, který je 120 dní. Energie gama kvant je měkčí a je v rozsahu 97-401 KeV. Z důvodu nižší energie gama je jeho využití zhruba obdobné, jako u rentgenografických systémů, avšak na rozdíl od nich, nepotřebuje vnější zdroj elektrického napájení a není potřeba žádné dodatečné nastavení. Prozařovat lze ocel od 8 do 30 mm. Ze zdrojů, které se standardně používají pro defektoskopii má Co-60 nejdelší poločas radioaktivní přeměny. Ten je 5,27 roku. Zároveň má i nejvyšší energii emitovaných gama kvant v rozsahu 1173-1333 KeV. Vysoká pronikavost záření gama umožňuje prozařovat ocel o tloušťce od 50 do 120 mm.

4. Závěr

Stále jsou ještě oblasti, ve kterých je metoda prozařováním pomocí radionuklidů nejhodnějším řešením a jiné dostupné metody, neposkytují v těchto případech uspokojivé výsledky. Zejména se to týká prozařování tlustších vrstev materiálů. Ukazuje se, že výroba radionuklidů pro gamagrafii je stále perspektivní, neboť poptávka po těchto produktech trvá. Z tohoto důvodu proces výroby iridiových zdrojů neustále zefektivňujeme a po více než desetiletých zkušenostech jsou naše zdroje využívány v oblasti gamagrafie po celém světě. V současnosti pracujeme rovněž na výzkumu a vývoji s cílem vyrábět vlastní selenové zdroje.



Obr. 2 Radionuklidové zdroje
Fig. 2 Radionuclide sources ecay

Reference:

Ullmann, V. Jaderná a radiační fyzika, Ostravská univerzita, 2009

Žáček, J. Úvod do fyziky elementárních částic, Univerzita Karlova v Praze, 2009



ODEZVA AKUSTICKÉ EMISE NA ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ ADITIVNĚ VYROBENÉHO A ODLITÉHO MATERIÁLU

ACOUSTIC EMISSION RESPONSE TO FATIGUE DAMAGE OF ADDITIVELY PRODUCED AND CAST MATERIALS

Vendula SKŘIVÁNKOVÁ*, František VLAŠIC*, Pavel MAZAL*

* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Contact e-mail: xkrato04@vutbr.cz

Contact e-mail: cndt@cndt.cz

Abstrakt

Aditivně vyráběné materiály se stále častěji používají v různých typech inženýrských aplikací. Poslední práce z této oblasti se zaměřovaly především na zlepšení kvality takto vyráběných materiálů. Cílem bylo dosáhnout stejnou nebo lepší kvalitu jako je u materiálů konvenčně vyráběných. To přináší potřebu efektivního testování.

Prezentovaná práce vyhodnocuje a srovnává únavové procesy aditivně vyrobeného a odlitého materiálu využitím metody akustické emise. Použitou aditivní technologií je selective laser melting (SLM). Testovaným materiálem je hliníková slitina AISi9Cu3. Oba materiály byly testovány v litém resp. v „as-built“ stavu bez jakékoliv tepelné úpravy. Všechny vzorky byly podrobeny zkouškám únavy v ohybu ve vysokocyklové oblasti a výsledky byly vyhodnocovány pomocí metody akustické emise. Hlavním cílem práce je analyzovat odezvu akustické emise na únavové poškození a tak srovnat únavové chování litého a aditivně vyráběného materiálu.

Výsledky ukazují, že únavová životnost SLM materiálu je lepší, než u materiálu odlitého s blízkým chemickým složením. Akustická emise umožňuje detekovat fáze únavového poškození.

Klíčová slova: *únava materiálu, akustická emise, hliníkové slitiny, selective laser melting*

Abstract

Additively manufactured (AM) parts are more and more used in different types of engineering applications. The latest studies were mainly aimed at improving the quality of the material produced by AM in order to achieve the same or better quality as conventional materials, resulting in the need for testing these materials.

Presented study evaluates and compares the fatigue processes of AM and cast materials using acoustic emission method. The used additive technology is selective laser melting (SLM). Tested material is aluminium alloys AlSi9Cu3. Both materials were tested in as-cast or as-built condition without any heat treatment. All samples were subjected to fatigue bending tests in high-cycle regime and the results were evaluated by acoustic emission measurement. The main goal is to analyse the acoustic emission response to fatigue damage and to compare fatigue behaviour of cast and AM material.

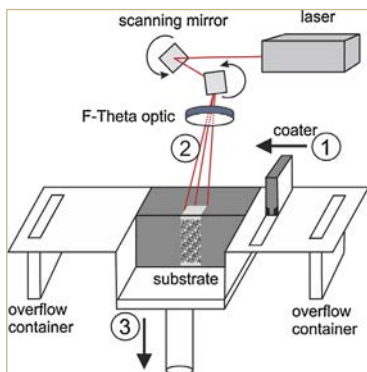
Results show that fatigue life of SLM material is better than casting material with similar chemical composition. Acoustic emission detects stages of fatigue process.

Key words: material fatigue, acoustic emission, aluminum alloys, selective laser melting

1. Úvod

Technologie additive manufacturing (AM) nebo rapid prototyping (RP) se pomalu začínají řadit mezi běžné výrobní technologie. Hlavní výhody jsou zřejmé, rychlá výroba komplikovaných dílů v relativně krátkém čase a za výhodou cenu. Tu se podařilo snížit díky intenzivnímu výzkumu a rozvoji těchto technologií v posledních letech. Selective laser melting (SLM) se řadí mezi technologie AM, které umožňují vyrábět kovové díly.

Princip SLM je ukázán na Obr. 1 [1]. Tenké vrstvy kovového prášku jsou roztaveny a spojeny pomocí laserového paprsku. To umožňuje vyrábět díly komplikovaných tvarů, nicméně kvalita výsledného materiálu může být relativně nízká. To je spojeno především s výskytem vnitřních vad, jako jsou především dutiny způsobené nedostatkem materiálu [2], nebo trhliny, které vznikají vlivem velkého teplotního gradientu během výroby. Tyto defekty je možné eliminovat optimalizací výrobního procesu [3,4] nebo tepelným zpracováním [5,6]. Brandl a kol. ve své práci [5] zpracovává slitinu AlSi10Mg. Bylo ukázáno, že při použití optimálních výrobních parametrů je možné dosáhnout lepší odolnosti vůči únavě, než má standardní (lity) materiál.

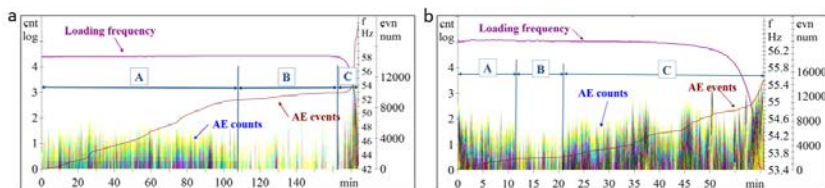


Obr. 1 Princip technologie SLM [1]

Fig. 1 SLM principle [1]

Naše poslední studie [6] ukázala, že technologií SLM není možné zpracovávat všechny slitiny hliníku (Al). Únavová odolnost SLM materiálu AlCuMg1,5Ni byla nesrovnatelně nižší než u extrudovaného materiálu s blízkým chemickým složením. Srovnání výsledků stejných testů slitiny AlSi10Mg ukázalo, že technologie SLM je vhodnější pro slitiny, jejichž chemické složení se blíží k eutektickému.

Metodu akustické emise [AE] lze použít pro on-line monitorování procesu únavového namáhání a růstu praskliny [7,8]. Bylo dokázáno, že lze identifikovat 3 únavová stádia – kumulace poškození, iniciace a růst trhliny a tím popsat postup únavy. Srovnání signálu AE během únavového zatížení SLM a extrudovaného materiálu ukázalo, jak moc se liší [6]. Hlavní rozdíly lze pozorovat v poměru jednotlivých stádií. Zatímco u SLM materiálu je nejdelším stádiem růstu trhliny, zatímco stádium kumulace poškození je relativně krátké, v případě extrudovaného materiálu toto stádium zabírá největší část životnosti vzorku, viz obr. 2 [6].



Obr. 2 Záznam AE z únavového zatížení extrudovaného (a) a SLM materiálu (b), slitina AlCu2Mg1,5Ni. A – kumulace poškození, B – iniciace, C – růst trhliny [6]

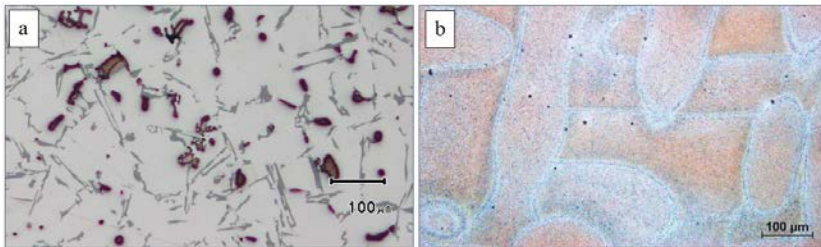
Fig. 2 AE record of extruded (a) and SLM material (b), alloy AlCu2Mg1.5Ni. A – pre-initiation stage, B – initiation stage, C – post-initiation stage [6]

2. Materiál a metody

2.1 Materiál

Na základě předchozí studie [6] byla pro testování vybrána slitina AlSi9Cu3. Tato slitina se běžně používá pro odlévání a její chemické složení se blíží k eutektickému. Referenčním materiálem byl gravitačně odlitý vzorek ze stejného materiálu. Pevnost v tahu byla 485 MPa u SLM a 177 MPa u litého materiálu.

Srovnání mikrostruktury obou materiálu je ukázáno na obr. 3. Mikrostruktura litého materiálu obsahuje významné množství fází s ostrými okraji. U materiálu SLM se tyto materiálové fáze nevyskytují, vidíme zde pouze malé kulaté póry a hranice výrobních vrstev.



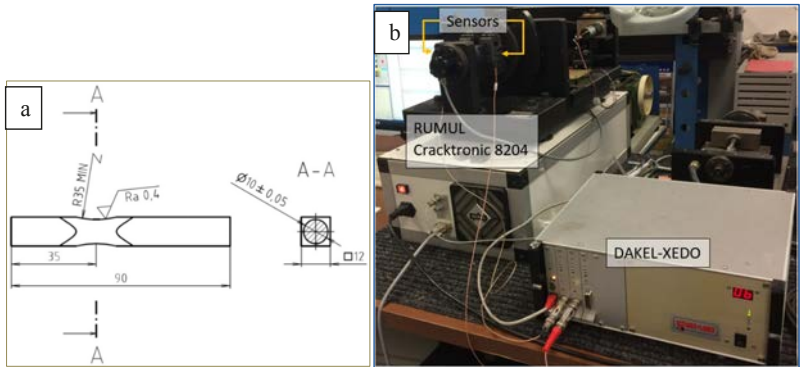
Obr. 3 Mikrostruktura litého (a) a SLM materiálu (b)

Fig. 3 Microstructure of cast (a) and SLM (b) material

2.2 Testování únavy a měření AE

Oba materiály byly testovány v litém stavu, resp. ve stavu as-built, bez jakéhokoliv tepelného zpracování. Celkem bylo testováno 11 vzorků z SLM a 12 vzorků z litého materiálu. Všechny vzorky byly obrobeny do tvaru dle geometrie na obr. 4a a testovány na odolnost vůči únavě. Zkoušky byly provedeny na elektro-rezonančním zařízení RUMUL Cractronic 8204 za pokojové teploty. Únavový cyklus byl sinusový s koeficientem nesouměrnosti $R = -1$.

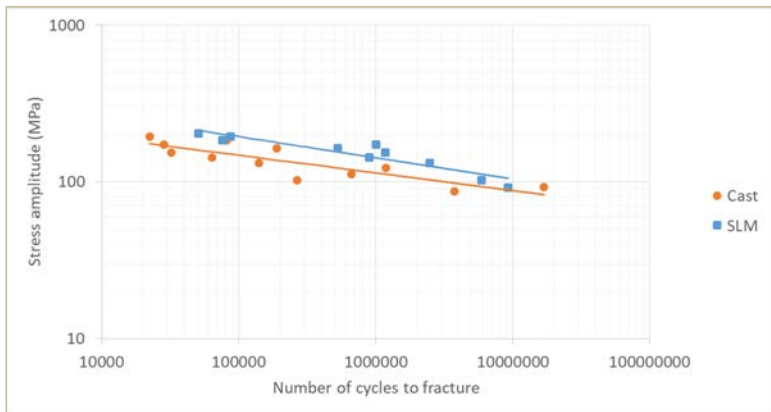
Pro snímání AE byl použit monitorovacím systémem DAKEL-XEDO se dvěma piezoelektrickými snímači DAKEL MIDI s 35 dB předzesilovači. Systém XEDO umožňuje 12-bitové synchronní vzorkování s frekvencí 2 MHz. Sensory byly přilepeny na obou koncích vzorku. Celá měřicí stanice je na obr. 4b.



Obr. 4 Geometrie obrobeneho vzorku (a) a měřicí stanice (b)
 Fig. 4 Geometry of machined sample (a) and measuring station (b)

3. Výsledky a diskuse

Výsledky zkoušek únavy byly srovnávány pomocí S-N křivek v souřadnicích log-log, viz obr. 5. Odolnost vůči únavě SLM materiálu je o trochu lepší. To je pravděpodobně způsobeno ostrými fázemi, kterou byly pozorovány pouze v mikrostruktuře litého materiálu.

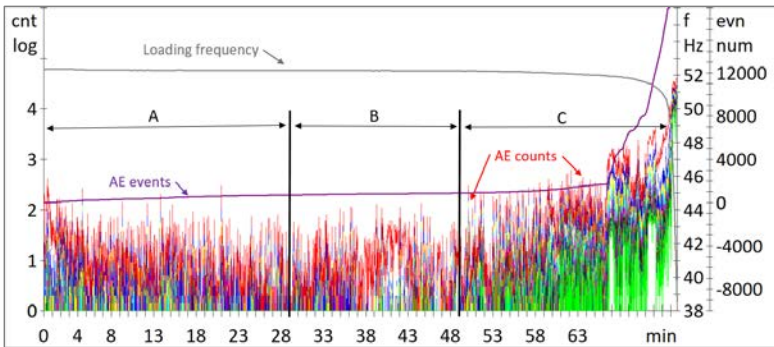


Obr. 5 S-N křivky SLM a litého materiálu
 Fig. 5 S-N curves of SLM and cast materiál

Záznamy signálu AE jsou zobrazeny na obr. 6 a 7. V obou případech jsou jasně viditelná 3 typická stádia únavy. Stádium kumulace poškození – je charakterizováno výraznou aktivitou AE, která je způsobena mikrostrukturními změnami. Potom aktivita

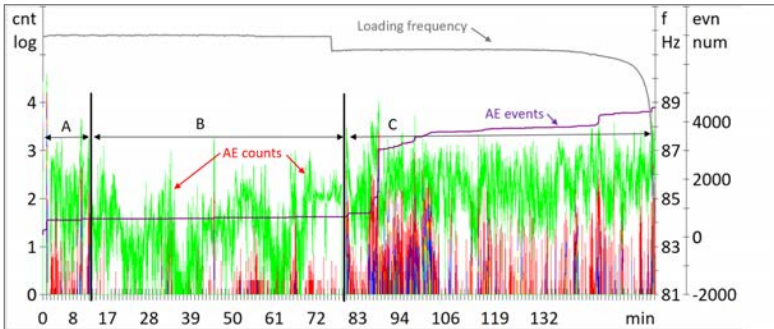
AE klesá, začíná stádium iniciace – B a vznikají mikrotrhliny. Aktivita AE opět narůstá ve stádiu růstu trhliny – C.

Hlavní rozdíly můžeme pozorovat v poměru jednotlivých stádií. Zatímco u litého materiálu jsou stádia téměř rovnoměrně rozdělena na celou dobu únavové životnosti, délka stádií u SLM se liší. Stádium A je nejkratší a C nejdelší, to zabírá téměř půlku z celkové životnosti. To naznačuje, že únavový proces se u obou materiálu liší mechanismem růstu a šíření trhliny. U litého materiálu je hlavní trhlina iniciována především mikrostrukturními změnami, u SLM materiálu jsou póry spojovány pomocí mikrotrhlin.



Obr. 6 Záznam AE u litého materiálu, amplituda zatížení 132 MPa

Fig. 6 AE records of cast materiál, stress amplitude 132 MPa.

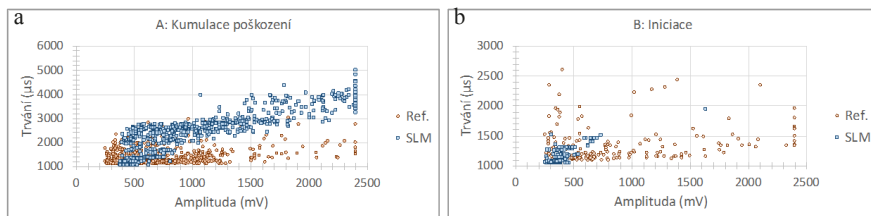


Obr. 7 Záznam AE u SLM materiálu, amplituda zatížení 142,6 MPa

Fig. 6 AE records of SLM materiál, stress amplitude 142.6 MPa

Detailnější analýza signálu AE je ukázána na obr. 8. Mezi SLM a litým materiálem lze pozorovat jasný rozdíl. U stádia A litého materiálu se čas trvání událostí AE pohybuje

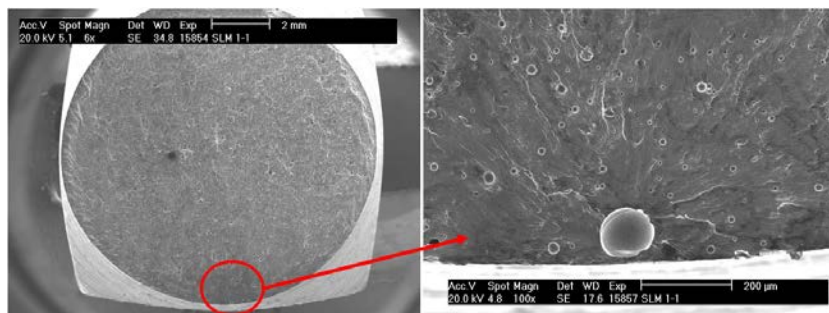
většinou mezi 1000 a 2000 μs , v případě SLM materiálu to je mezi 1000 a 4000 μs . U stádia B je rozdíl v amplitudě událostí. U SLM materiálu se tato hodnota většinou pohybuje mezi 200 a 500 mV. U litého materiálu je rozptýl těchto hodnot daleko větší, ale většina událostí je mezi 200 a 1000 mV. To podporuje hypotézu o rozdílném mechanismu iniciace a růstu trhlin.



Obr. 8 Čas náběhu (μs) a amplituda (mV) událostí AE, (a) stádium A, (b) stádium B

Fig. 8 Rise time (μs) and amplitude (mV) of AE events. (a) pre-initiation, (b) initiation stage

Testování únavy a měření AE bylo doplněno fraktografií lomových ploch u SLM materiálu. Fotografie ze skenovací elektronového mikroskopu jsou zobrazeny na obr. 9. Místo iniciace trhliny je lokalizováno v defektu těsně pod povrchem vzorku (červený kroužek na obr. 8). Na povrchu trhliny lze pozorovat velké množství pórů, některé z nich jsou propojeny mikrotrhlinami.



Obr. 9 Lomová plocha SLM materiálu

Fig. 9 Fracture surface of SLM material

4. Závěr

Byly prezentovány výsledky testů únavy s měřením akustické emise u materiálů vyráběných technologií SLM a gravitačním odléváním. Chemické složení obou

materiálů odpovídají standardu AISi9Cu3. SLM materiál má o trochu lepší únavovou životnost než materiál odlitý.

Výrazné rozdíly byly pozorovány v záznamu signálu AE. Oba materiály mají 3 typická stádia únavy – kumulace poškození, iniciace a růst magistralní trhliny, ale liší jejich poměrem k celkové životnosti. Toto pozorování společně s fraktografií lomových ploch SLM materiálu naznačuje rozdílný mechanismus v iniciaci a růstu hlavní trhliny. U litého materiálu je hlavní trhlina primárně iniciována změnami v mikrostrukturu materiálu, u SLM materiálu je prostřednictvím spojování výrobních vad mikrotrhlinami.

Poděkování

Autoři práce by chtěli poděkovat Vysokému učení technickému v Brně za finanční podporu projektů č. FV 17-54 „Přehled NDT metod a jejich využití“.

Tato studie byla za podpory ČNDT prezentována v anglické verzi na konferenci 12th ECNDT v Göteborgu.

Literatura

- [1] LÖBER, Lukas, Frank Peter SCHIMANSKY, Uta KÜHN, Florian PYCZAK a Jürgen ECKERT. Selective laser melting of a beta-solidifying TNM-B1 titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, (214), 1852-1860. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.04.002.
- [2] LIU, Qian Chu, Joe ELAMBASSERIL, Shou Jin SUN, Martin LEARY, Milan BRANDT a Peter Khan SHARP. The Effect of Manufacturing Defects on the Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated Using Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research*. 2014, 891-892, 1519-1524. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.1519.
- [3] VANDENBROUCKE, Ben a Jean-Pierre KRUTH. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, 13(4), 196-203. DOI: 10.1108/13552540710776142. ISSN 1355-2546.
- [4] SONG, Bo, Shujuan DONG, Sihao DENG, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics*. 2014, 56, 451-460. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.09.017. ISSN 00303992.
- [5] BRANDL, Erhard, Ulrike HECKENBERGER, Vitus HOLZINGER a Damien BUCHBINDER. Additive manufactured AISi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Material and Design*. 2012, 34, 159-169. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.067.

- [6] KRATOCHVILOVA, Vendula, Frantisek VLASIC, Pavel MAZAL a David PALOUSEK. Fatigue Behaviour Evaluation of Additively and Conventionally Produced Materials by Acoustic Emission Method. *Procedia Structura Integrity*. 2017, 5, 393-400. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.187.
- [7] HAN, Zhiyuan, Hongyun LUO, Chuankai SUN, Junrong LI, Mayorkinos PAPAELIAS a Claire DAVIS. Acoustic emission study of fatigue crack propagation in extruded AZ31 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2014, (597), 270-278. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.083.
- [8] MENTL, Vaclav, Frantisek VLASIC, Denisa BARTKOVA a Pavel MAZAL. Application of Acoustic Emission for Identification of Differences in Fatigue Damage of Selected Materials for Power Plants. *Key Engineering Materials*. 2015, 627, 313-316. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.627.313.

APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE NÁDOBY Z AUSTENITICKÉ OCELI

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION DURING PRESSURE TEST OF AUSTENITIC STEEL VESSEL

Václav SVOBODA¹, František ŽEMLIČKA¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

Abstrakt:

V příspěvku je popsán způsob tlakové zkoušky nádoby vyrobené z austenitické oceli typu AISI 304. Jako nedestruktivní kontrolní inspekce byla použita metoda akustické emise. Na vnějším povrchu nádoby byla rozmístěna síť snímačů AE zahrnující celý objem nádoby. V normálním provozu tato tlaková nádoba pracuje v kryogenních podmínkách (-160 °C). Při vlastní tlakové zkoušce dusíkem byla registrována zvýšená emisní aktivita, zejména ve válcové části nádoby. Jednotlivé emisní události nebyly lokalizovány do dílčích zdrojů (klastřů), ale rozloženy v celém objemu pláště. Toto způsobilo komplikaci při hodnocení stavu tlakové nádoby dle stávajících platných norem pro hodnocení signálů AE. Další analýzou bylo zjištěno, že se jedná o registrované AE signály vyvolané fázovou transformací austenitu na deformační indukovaný martenzit, včetně reverzního procesu v lokálních místech.

Klíčová slova: Tlaková zkouška, Akustická emise

Abstract:

The paper describes a method of pressure testing of a vessel made from austenitic steel type AISI 304. The method of acoustic emission was used as a non-destructive inspection tool. On the outer surface of the vessel was placed a network of AE sensors comprising the entire volume of the vessel. In normal operation, this pressure vessel operates under cryogenic conditions (-160 °C). During the pressure test with nitrogen, increased emission activity was registered, especially in the cylindrical part of the vessel. The individual emission events were not located in sub-sources (clusters), but were distributed throughout the shell volume. This caused a complication in evaluation of the pressure vessel according to the current valid standards for the evaluation of the AE signals. By further analysis has been found that the registered AE signals were induced by phase transformation of austenite to deformation-induced martensite, including the reverse process at local sites.

1. Úvod

Bylo provedeno měření akustické emise, které bylo realizováno při náhradní tlakové zkoušce dusíkem.

Cílem měření akustické emise bylo posouzení integrity tělesa tlakové nádoby a identifikace případných emisních zdrojů, které by svoji charakteristikou odpovídaly aktivním defektům a které mohly vzniknout v důsledku působení provozních zatěžovacích parametrů během

dlouhodobého provozu. Zvýšená pozornost byla věnována především tlakové nádobě, kde byla opakovaně za provozu detekována netěsnost, a existovalo podezření, zda tato netěsnost není způsobena průchozím defektem typu trhliny v materiálu tělesa tlakové nádoby, k jejímuž rozevírání dochází v průběhu změny zatěžovacích parametrů při náběhu na provozní parametry – tlak do 3,3 MPa, teplota cca -160°C).

2. Průběh

Na tlakovou nádobu bylo na válcovou část instalováno **celkem 12 sond AE + 1 sonda** na přívodní potrubí u dolního půlkulového dna, které byly rozmístěny v trojúhelníkové měřicí síti (4 řady sond po 3 sondách po obvodu) a pokrývaly celou plochu tělesa tlakové nádoby a umožňovaly plošnou lokalizaci zdrojů emisních signálů nejen z válcové části, ale i z obou půlkulových dnů. Vzdálenost jednotlivých řad byla 1 000 mm, vzdálenost sond v řadě po obvodu 1 090 mm. Kalibrační měření potvrdilo vysokou citlivost měření a optimální lokalizaci zdrojů AE v souladu s normou ČSN EN14584.

Použitá měřicí technika:

- 2 x 20 kanálový měřicí systém AE ACES IDT04
- piezoelektrické sondy AE typ PET04, $f_{rez} = 250$ KHz s integrovaným předzesilovačem
- řídicí počítače s procesorem Pentium 4, 1,8 GHz
- propojovací signálové PETK kabely

Analogový signál ze sondy AE je uveden propojovacím kabelem do měřicí aparatury AE IDT 04, kde je dále zesílen a je provedena obálková analýza signálu.

U měření v režimu plošné nebo lineární lokalizace je zaznamenána posloupnost příchodu signálu k jednotlivým sondám měřicí sítě, včetně Δt časů a na základě znalosti podmínek šíření signálu a na základě znalosti geometrie rozmístění sond AE je provedena v reálném čase lokalizace zdroje signálu.

Kalibrační měření bylo prováděno za účelem:

- a) kalibrace jednotlivých sond – zjištění citlivosti a nastavení korekce zesílení jednotlivých měřicích kanálů
- b) stanovení rychlosti šíření
- c) ověření přesnosti lokalizace.

Kalibrace sond AE byla prováděna pomocí zlomení mikrotuhy tvrdosti 2H (pentest) u jednotlivých měřicích míst, kde byly naměřeny hodnoty amplitudy v rozmezí 92 až 95 dB. Korekce zesílení jednotlivých měřicích kanálů byla nastavena na střední hodnotu 93 dB. Prahová hodnota pro detekci diskretních emisních signálů byla nastavena na 30dB. Hodnoty amplitudy na vzdálených sondách v sousední řadě byly u nádoby v rozmezí 71 až 74 dB. Rozmístění sond AE, resp. max. vzdálenost mezi jednotlivými sondami, je **v souladu s normou ČSN EN14584**.

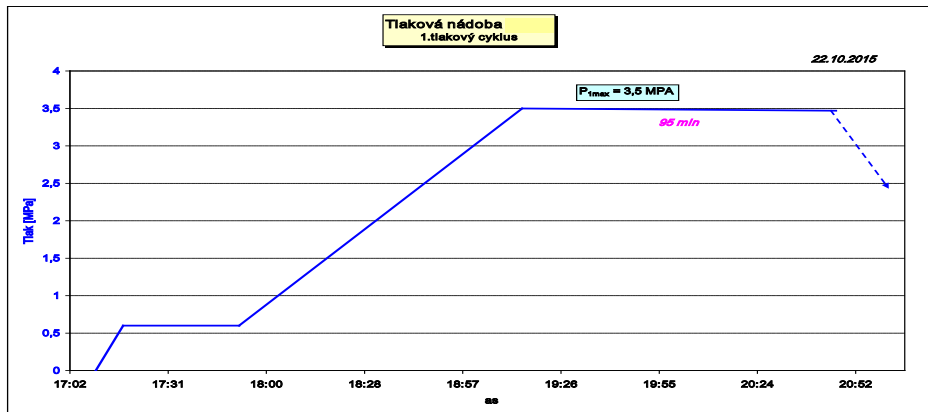
Pro ověření lokalizace byl proveden pentest v několika bodech měřicí sítě. Podle výsledků lokalizace a výsledků měření rychlosti šíření byly pro vyhodnocení zvoleny následující rychlosti šíření:

Nádoba - 3 420 m/s

3. Měření AE

Měření AE bylo realizováno na tlakové nádobě FA309 v průběhu dvou tlakových cyklů. Tlakové médium byl dusík.

Časový průběh 1. Tlakového cyklu na tlakové nádobě, včetně vyznačení délky prodlev na maximálním tlaku je na obr. 3.1.



Obr. 3.1 – Časový průběh 1. tlakového cyklu na tlakové nádobě

4. Vyhodnocení výsledků

V rámci hodnocení naměřených dat byly z celkového počtu naměřených emisních událostí (EU) odfiltrovány ty, jejichž původ lze považovat za rušivý. Jednalo se především o rušivé elektrické signály a dále signály od fluktuujícího pozadí, jehož špičky krátkodobě překročily nastavenou prahovou hodnotu pro detekci diskretních emisních signálů. Z naměřených dat pak byly dále vyloučeny emisní události, kde hodnoty vnitřních parametrů jako počet překmitů – Nc, šířka pulsu – Width, doba náběhu – R.time a amplituda – Ampl, neodpovídají reálným emisním událostem ve formě ostrých diskretních signálů tvaru tlumených kmitů.

Rovněž byly z naměřených dat vyloučeny emisní události, které se nepodařilo na základě změřených Δt časů, posloupnosti příchodů k jednotlivým sondám měřící sítě a její konfiguraci lokalizovat.

Výsledky měření jsou zpracovány pro tlakovou nádobu ve formě mapy plošné lokalizace emisních událostí na rozvinutém plášti a časových průběhů emisní aktivity, amplitudy EU a tlaku.

Mapy zobrazují body - lokalizované události AE, kde barvy od

modré > **světle modré** > **zelené** > **oranžové** > **po červenou** vyjadřují závažnost bodů dle:

- buď vysoké lokální aktivity událostí (hustoty bodů-událostí)
- nebo vysoké intenzity událostí

Případné shluky událostí AE (především pak ty s červeným či oranžovým jádrem) jsou vybrány a označeny jako lokálně koncentrované zdroje událostí AE a jsou v mapách lokalizace označeny jako emisní zdroje Z1 až Zn. Fialové jsou označena místa s instalovanými snímači AE.

Pro v/v potrubí jsou výsledky zpracovány ve formě grafů lineární lokalizace emisních událostí, resp. rozložení četnosti emisních událostí po délce měřeného úseku potrubí a časových průběhů emisní aktivity, amplitudy EU a tlaku.

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

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

Klasifikaci je prováděna podle celkové aktivity, trendu aktivity, intenzity, trendu intenzity, dle znalosti rušivého původu zdrojů AE a především porovnáním s časovým průběhem stimulu porušení, kterým je v tomto případě nárůst tlaku a prodlevy na maximálním tlaku.

Při vyhodnocování naměřených dat bylo vzato v úvahu, že **na nádobě byl již v krátkém časovém horizontu před měření AE aplikován N počet zatěžovacích tlakových cyklů** na tlak 3,5 a 4.0 MPa při těsnostních tlakových zkouškách, souvisejících s opakovaným naběhem po identifikaci netěsnosti a při jejím hledání pomocí heliového testu. **To má zásadní vliv na posuzování závažnosti detekované a lokalizované emisní aktivity na obou tlakových nádobách.**

Tlaková nádoba

Na válcové části tlakové nádoby byla v obou tlakových cyklech detekována poměrně vysoká emisní aktivita. Jak je patrné z níže uvedených map lokalizace a časových průběhů emisní aktivity, **emisní události jsou v obou tlakových cyklech lokalizovány po celém povrchu válcové části, s větší hustotou v horní polovině. Výsledky lokalizace v obou tlakových cyklech ale nepotvrdily koncentraci emisních událostí do ostrých lokálních emisních zdrojů se zvýšenou četností a intenzitou emisních událostí, které by ukazovaly na možný lokální pevnostní problém materiálu tělesa tlakové nádoby, tj. přítomnost aktivních defektů typu trhliny.**

Z časových průběhů emisní aktivity je patrné, že zvýšená četnost emisní aktivity nastává po překročení tlaku 2,8 až 3,0 MPa. Kontinuální nárůst emisní aktivity byl zaznamenán i v obou časových prodlevách, přičemž s nárůstem času není, zejména ve druhém tlakovém cyklu, patrný pokles četnosti emisní aktivity v prodlevě.

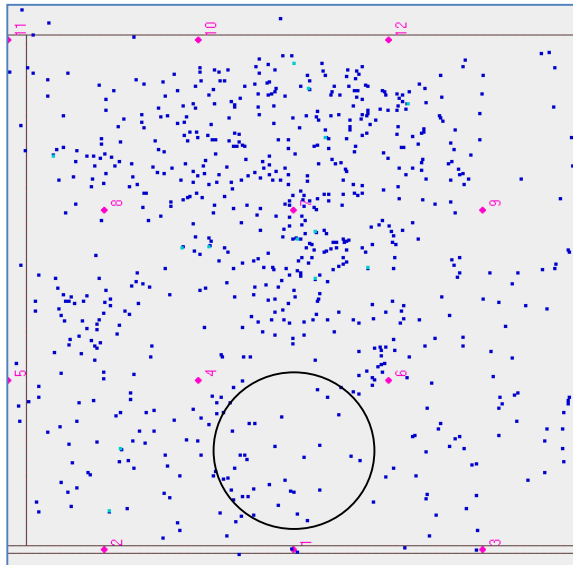
Většina emisních událostí vykazuje nízkou až střední intenzitu, nízký počet intenzivních emisních událostí s amplitudou nad 60 dB není koncentrován do emisních zdrojů. Kompletace zvýšeného počtu emisních událostí z hitů nízké a střední intenzity je umožněna z důvodu většího počtu sond AE, menší vzdálenosti mezi sondami a tím i nižšího útlumu signálu AE a také z důvodu velmi nízkého šumového pozadí během zkoušky. Tyto skutečnosti přispěly k tomu, že měření bylo prováděno s vysokou citlivostí detekce emisních signálů.

Přestože výsledky obou tlakových cyklů nepotvrdily lokalizaci lokálních emisních zdrojů, je **vysoká emisní aktivita v obou tlakových cyklech a její nárůst i v obou prodlevách porušením Kaisera efektu, který představuje významné kritérium pro posuzování závažnosti emisní aktivity a lokálních emisních zdrojů, zejména s ohledem na již dříve**

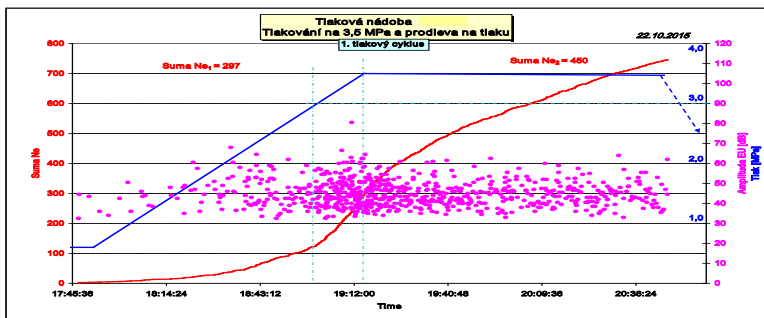
aplikované tlakové cykly. Očekávaný výsledek by proto byl, že v obou tlakových cyklech bude emisní aktivita minimální.

Na základě výše uvedených skutečností je, i přes absenci lokálních emisních zdrojů, emisní aktivita na válcové části klasifikována v souladu s normou ČSN EN 14548 jako **závažná**, resp. podle četnosti a intenzity emisní aktivity v obou prodlevách **klasifikována stupněm 3 - „Kriticky závažná“**. Z této klasifikace vyplývá i doporučení na provedení dodatečných NDT kontrol.

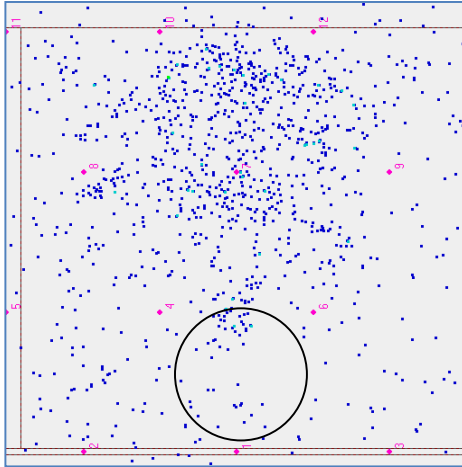
V oblasti obou půlkulových den byla v obou tlakových cyklech detekována minimální emisní aktivita bez koncentrace do emisních zdrojů



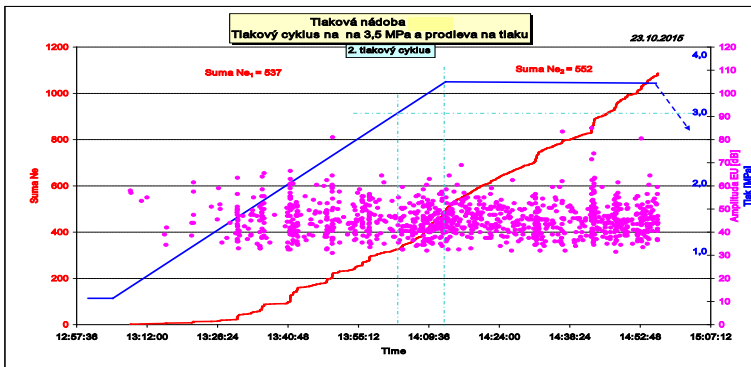
Obr. 4.1.1 – Mapa lokalizovaných emisních událostí – válcová část-- tlakování a prodleva na max. tlaku – 1. tlakový cyklus



Obr. 4.1.2 – Časový průběh emisní aktivity, amplitudy EU a tlaku – válcová část, 1. tlakový cyklus



Obr. 4.1.3 – Mapa lokalizovaných emisních událostí – válcová část- tlakování a prodleva na max. tlaku – 2. tlakový cyklus



Obr. 4.1.4 – Časový průběh emisní aktivity, amplitudy EU a tlaku – válcová část, 2. tlakový cyklus

5. Závěr

1. Na válcové části tlakové nádoby byla v obou tlakových cyklech zaznamenána poměrně vysoká emisní aktivita a to jak ve fázi zvyšování tlaku, tak i v časovém prodlevách na maximálním tlaku, kdy s nárůstem času v prodlevě nedochází k poklesu emisní aktivity. Většina emisních událostí vykazuje nízkou až střední intenzitu. Nízký počet intenzivních emisních událostí s amplitudou nad 60 dB není koncentrován do emisních zdrojů.
2. Emisní události v obou tlakových cyklech jsou lokalizovány po celé válcové ploše, s vaší hustotou v horní polovině nádoby, ale bez koncentrace do lokálních emisních zdrojů, které by signalizovaly **možný lokální pevnostní problém materiálu tělesa tlakové nádoby, tj. přítomnost aktivních defektů typu trhliny.**

3. **Vysoká emisní aktivita v obou tlakových cyklech a její nárůst i v obou prodlevách je porušením Kaiserova efektu, který představuje významné kritérium pro posuzování závažnosti emisní aktivity, zejména z ohledem na již dříve aplikované tlakové cykly.**
4. **Přestože výsledky lokalizace nepotvrdily přítomnost lokálních emisních zdrojů, je emisní aktivita na válcové části podle četnosti a intenzity emisní aktivity v obou prodlevách klasifikována v souladu s normou ČSN EN 14548 stupněm 3 - „Kriticky závažná“.**
5. **Z výše uvedené klasifikace vyplynul jednoznačný požadavek na zjištění příčiny této kriticky závažné emisní aktivity pomocí vhodných NDT kontrol, aplikovaných především na vnitřním povrchu, včetně provedení metalografického šetření.**
6. **NDT kontroly, které provedl VÚZ-PI SR, nezjistily žádné trhliny ani jiné nepřípustné defekty v materiálu tělesa tlakové nádoby.**
7. Metalografickým šetřením byly zjištěny známky plastické deformace za studena a také deformačně indukovaný martenzit.
8. **Zdrojem zvýšené emisní aktivity na tlakové nádobě FA309 je tak s největší pravděpodobností detekce lokálních fázových transformací martenzitu v objemu materiálu tělesa tlakové nádoby v průběh aplikovaného tlakového zatížení a ne indikace trhlín a jiných aktivních defektů.**
9. Z výzkumných prací je známo, že metoda AE je schopna zaregistrovat fázovou transformaci austenitu na deformačně indukovaný martenzit a i reverzní proces.
10. **To že byl tento proces detekován i při tlakových zkouškách v provozním prostředí bylo způsobeno zvolenou konfigurací měření (větší počet sond AE, menší vzdálenost mezi sondami a tím nízký útlum signálu AE) a příznivými podmínkami během zkoušky (nízká hladina šumového pozadí), což umožnilo provádět měření s vysokou citlivostí. Při měření za reálných podmínek při náběhu nebo odstavení nelze ale takové podmínky očekávat.**

Zdroje:

- [1] ŽEMLIČKA, F., SVOBODA, V. **VÝSLEDKY MĚŘENÍ akustické emise na tělese nádoby během tlakové zkoušky. PREDITEST s.r.o., Praha: 2015**
- [2] ČSN EN14584 Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení akustickou emisí - Zkoušení kovových tlakových zařízení během přejímací zkoušky - Planární lokalizace zdrojů akustické emise



SOUČASNÉ BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ TLOUŠŤKY FUNKČNÍCH POVLAKŮ A ZAJIŠTĚNÍ JEJICH SPOLEHLIVOSTI

PRESENT CONTACTLESS METHODS OF FUNCTIONAL COATINGS THICKNESS MEASUREMENT AND THEIR RELIABILITY PROVISION

Vladimír SYASKO¹, Sergei GOLUBEV², Adam POLÁČEK³

1, 2, 3 NDT1 KRAFT s.r.o., Praha, Česká republika,
e-mail: 9334343@gmail.com

Abstrakt

Byla provedena analýza úkolů měření tloušťky současných a vyvíjených kovových a dielektrických funkčních povlaků používaných v leteckém, kosmickém a strojírenském průmyslu.

V příspěvku jsou zkoumány fyzikální principy bezkontaktních aktivních termografických, vířivoproudých a rentgenových metod, zajišťujících měření tloušťky, vodivosti, magnetických vlastností a také kontrolu souvislosti povlaků ve výrobních podmínkách s normovanými metrologickými charakteristikami a potlačení vlivu interferenčních parametrů výrobků a vnějších faktorů.

Příspěvek obsahuje příklady přístrojů a technologií, realizujících zkoumané metody a výsledky jejich použití ve výrobních se špičkovými technologiemi.

Klíčová slova: *funkční povlaky, tloušťka povlaku, elektrofyzikální vlastnosti povlaků, souvislost povlaků*

Abstract

An analysis of the tasks of thickness measurement of current and developed metallic and dielectric functional coatings used in aviation, aerospace and engineering industries was carried out.

The proceeding examines the physical principles of contactless active thermographic, eddy current and radiographic methods to measure coating thickness measurement, conductivity, magnetic properties and also continuity inspection of coatings in manufacturing conditions with normative metrological characteristics and the suppression of interfering parameters of products and external factors.

The proceeding contains examples of devices and technologies that implement the examined methods and results of their application in high technology manufacturing plants.

Key words: *functional coatings, coating thickness, electrophysical properties of coatings, coatings continuity*

V posledních letech se v předních průmyslových odvětvích výrazně rozšířil sortiment používaných povlaků a materiálů výrobků, na které se tyto nanáší. Také se zvýšily požadavky na kvalitu.

Jak je známo, povlaky jsou vrstvy, uměle získané na povrchu kovových a nekovových výrobků, chránící před korozí, opotřebením nebo jim přidávají zadané funkční vlastnosti: pevnost, oděruvzdornost, tepelnou ochranu, radioabsorpci, snížení tření a další. V závislosti na materiálu povlaku je možné je rozdělit na několik základních skupin: kovové, nekovové, neorganické, barvy a laky, plastové, kompozitní, povlaky ze speciálních materiálů.

Jeden z hlavních parametrů kvality povlaku je tloušťka T , která se předepisuje pro konkrétní typy výrobků a je jedním z hlavních měřených parametrů při nedestruktivním testování (NDT) jejich kvality.

Pro úlohy měření T je možné zformulovat následující kombinace povlak/podklad:

- 1) feromagnetické vodivé povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 2) neferomagnetické vodivé povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 3) dielektrické povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 4) feromagnetické vodivé povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 5) neferomagnetické vodivé povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 6) dielektrické povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 7) feromagnetické vodivé povlaky na dielektrických podkladech;
- 8) neferomagnetické vodivé povlaky na dielektrických podkladech;
- 9) dielektrické povlaky na dielektrických podkladech.

Je známa velká skupina úloh měření tloušťky povlaků, nedovolujících nebo výrazně limitujících možnost mechanického kontaktu primárních měřicích sond s povrchem výrobku v procesu kontroly. V souvislosti s tím se v současné době stále více rozvíjejí metody bezkontaktního režimu měření T , jako vířivoproudá fázová metoda, aktivní termografická metoda, rentgenová (radiometrická) fluorescenční a metody β zpětného rozptylu.

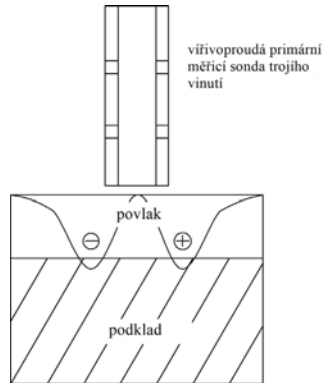
Uvedeme krátkou charakteristiku těchto NDT metod, které se aplikují na výše uvedené úlohy měření tloušťky.

Vířivoproudá metoda NDT je založena na analýze interakce vlastního elektromagnetického pole vířivoproudé sondy s elektromagnetickým polem vířivých proudů indukovaných v objektu kontroly (v objektu a povlaku) a závislejících na elektrofyzikálních a geometrických parametrech hlavního kovu a povlaku. V závislosti na úloze měření a vlastnostech materiálu podkladu a povlaku se mohou aplikovat různé funkce změny elektromagnetického pole v čase (zkušební energie) a různé primární informativní parametry, definované způsobem získání primární informace. Do praxe bezkontaktního měření T pevně vstoupily vířivoproudé tloušťkoměry realizující fázovou metodu měření, jež má řadu výhod.

S použitím fázové metody vířivoproudého NDT je možné provádět bezkontaktní měření T :

- vodivých neferomagnetických povlaků na vodivých feromagnetických podkladech;
- vodivých feromagnetických povlaků na vodivých feromagnetických podkladech;
- vodivých neferomagnetických povlaků na vodivých neferomagnetických podkladech.

Na obr. 1 je zobrazen model citlivého elementu vířivoproudé transformátorové primární měřicí sondy trojího vinutí s feritovým jádrem nad dvouvrstvou strukturou kovový povlak - kovový podklad, jež realizuje fázovou metodu měření tloušťky kovových povlaků, včetně feromagnetických na kovových podkladech.



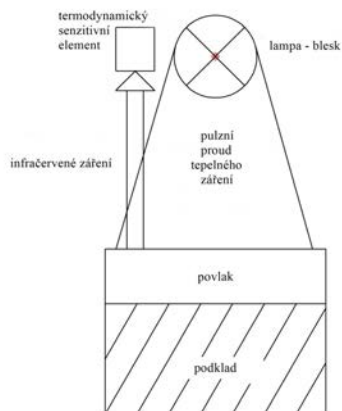
Obr. 1. Model citlivého elementu vířivoproudé transformátorové primární měřicí sondy trojího vinutí nad dvouvrstvou strukturou

Hlavní výhodou vířivoproudé fázové metody je možnost vývoje sondy s frekvencí excitačního proudu od desítek Hz do desítek MHz pro měření tloušťky povlaků v rozsahu od jednotek mikrometrů do desítek milimetrů s možností potlačení vlivu mezery, drsnosti povrchu povlaku a podkladu a také poloměru podkladu. Nedostatky zahrnují závislost údajů na řadě interferenčních parametrů: vodivost σ a permeabilita μ podkladů a povlaků. Také je řada omezení v možných kombinacích povlak - podklad.

Tepelná metoda NDT je založena na analýze parametrů tepelných polí kontrolovaných objektů.

Aktivní synchronní termografická metoda, jejíž obecné schéma je uvedeno na obr. 2, umožňuje provádět měření T :

- dielektrických povlaků na kovových podkladech;
- dielektrických povlaků na dielektrických podkladech.

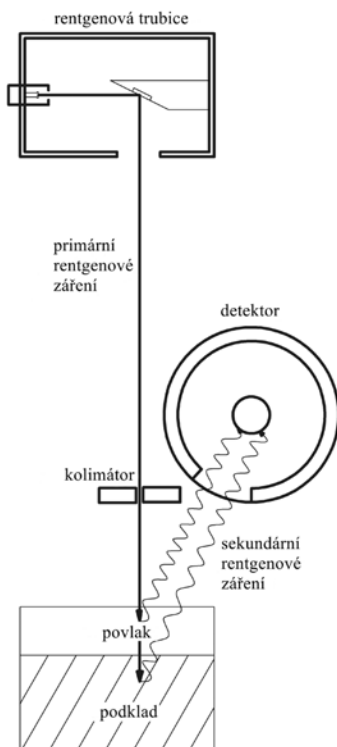


Obr. 2. Obecné schéma měřicího konvertoru, realizující aktivní synchronní termodynamickou metodu měření tloušťky dielektrických povlaků na kovových a nekovových podkladech

Výhodou metody je možnost bezkontaktního měření v rozsahu tlouštěk od několika mikrometrů do 1 mm. Nedostatkem je závislost výsledků měření na termofyzikálních (součinitel tepelné vodivosti λ , tepelná vodivost C , hustota ρ , koeficient teplotní vodivosti $a = \lambda/\rho C$, tepelná setrvačnost $e = \lambda(C\rho)^{1/2}$, odrazná schopnost povlaku) a geometrických (především drsnost povrchu Rz) parametrů povlaku a podkladu a také adheze povlaku k podkladu.

Radiační metoda NDT zejména využívá fotonové (včetně rentgenového), neutronové a elektronové záření.

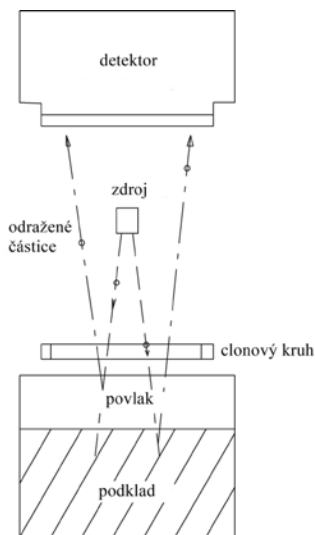
Rentgenová fluorescenční metoda je radiometrická metoda nedestruktivního testování, určená k měření T kovových tenkých a ultratenkých povlaků na kovových a dielektrických podkladech, zejména malé velikosti. Také se používá pro měření vícevrstvých povlaků. Na obr. 3 je uvedeno obecné schéma měřicího konvertoru realizujícího rentgenovou fluorescenční metodu měření tloušťky povlaku.



Obr. 3. Obecné strukturální schéma měřicího konvertoru realizujícího rentgenovou fluorescenční metodu měření tloušťky povlaků

Pomocí *radiometrické metody β zpětného rozptylu*, jejíž konvertor má obecné schéma zobrazeno na obr. 4, je možné měřit T :

- dielektrických povlaků na kovových a dielektrických podkladech;
- kovových (včetně vícevrstvých) povlaků na kovových a dielektrických podkladech.



Obr. 4. Obecné strukturální schéma primární měřicí sondy, realizující metodu beta zpětného rozptylu při měření tloušťky povlaků

Metoda umožňuje provádět měření v rozsahu od setin do stovek mikrometrů.

Interferenční parametry pro radiometrické metody jsou hustota ρ a atomové číslo Z materiálu povlaků a podkladů, drsnost Rz .

Všechny výše uvedené bezkontaktní metody měření T ochranných a funkčních povlaků uvažovaných druhů NDT jsou nepřímými metodami. To znamená, že nastavení, ověření a kalibrace měřicích prostředků se musí provádět za použití etalonových měrek tloušťky, imitujících měřený fyzikální parametr v rozsahu jeho změny při známých stabilních interferenčních parametrech. Také je třeba brát v úvahu, že každá zvlášť popsaná metoda uvažovaných druhů NDT řeší omezený okruh úloh měření a je charakterizována různými interferenčními parametry.

V souladu s většinou vytvořených schémat návaznosti (schémat ověření) se jako pracovní prostředky měření používají měřky tloušťky a tloušťkoměry povlaků, uskupené podle použití v závislosti na druhu materiálů povlaků a podkladů měřených objektů.

Na obr. 5 je uvedeno devět typů tloušťkoměrů a schémat návaznosti (schémat ověření).

<p>Tloušťkoměry polovodičových povlaků na dielektrických podkladech</p> <p>5 ÷ 30 μm Δ = 0,4 ÷ 1,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry dielektrických povlaků na polovodičových podkladech</p> <p>1 ÷ 5 μm Δ = 0,4 ÷ 1,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na magnetických podkladech</p> <p>4 ÷ 1000 μm Δ = 1,5 ÷ 100,0 μm</p>
<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 500 μm Δ = 0,4 ÷ 20,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetických povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 0,4 ÷ 10,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetických povlaků na magnetických podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 0,5 ÷ 10,0 μm</p>
<p>Tloušťkoměry vířivoproudě pro dielektrické povlaky na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 20000 μm Δ = 1 ÷ 200 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetické pro dielektrické povlaky na magnetických podkladech</p> <p>2 ÷ 20000 μm Δ = 1 ÷ 200 μm</p>	<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na dielektrických podkladech trubkových (průměr 0,6 ÷ 1,5 mm)</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 5,0 μm</p>

Obr. 5. Pracovní měřicí prostředky podle platného schématu ověření

Výše byly zformulovány kombinace povlak/podklad, jejichž analýza ukazuje, že v platném schématu ověření nejsou následující tloušťkoměry:

- dielektrických povlaků na dielektrických podkladech;
- feromagnetických povlaků na dielektrických podkladech.

V souladu s platným schématu ověření jsou základním prostředkem ověření tloušťkoměrů povlaků etalonové měřky tloušťky povlaků a zařízení pro ověření magnetických a vířivoproudých tloušťkoměrů dielektrických povlaků, jejichž příklady jsou uvedeny na obr. 6.

<p>Měřky tloušťky nemagnetických vodivých povlaků na magnetických podkladech</p> <p>4 ÷ 1000 μm δ = (0,1+0,025h) μm</p>	<p>Měřky tloušťky nemagnetických vodivých povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 500 μm δ = (0,3+0,025h) μm</p>	<p>Měřky tloušťky magnetických povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm δ = (0,1+0,025h) μm</p>
---	---	--

Obr. 6. Etalony druhé kategorie podle platného schématu ověření

Výše uvedené bezkontaktní metody tří druhů NDT, použité při vyvíjení měřicích sond tloušťkoměrů ochranných a funkčních povlaků mají základ v závislosti některého informativního parametru na T . Ovšem výše bylo uvedeno, že informativní parametry závisí nejen na měřené veličině, ale i na celé řadě interferenčních parametrů, které jsou uvedeny pro každou z výše uvažovaných metod NDT. Zároveň v souladu s platnou normativní dokumentací při výrobě, kalibraci a ověření existujících měrek tloušťky se kontrolují pouze jejich geometrické parametry: tloušťka povlaku, rozdílná tloušťka, drsnost povrchu, neberou

se v úvahu interferenční parametry, které mají přímý vliv na výsledek měření bezkontaktními tloušťkoměry a určují přitom skutečnou hodnotu T a nejistotu výsledku měření. V tomto ohledu se zdá být nezbytné vytvořit nové normy na měřky tloušťky a také zdokonalení schématu ověření nebo vytvoření několika lokálních schémat ověření.

Analýza současné standardizace NDT kvality povlaků bezkontaktními metodami ukázala, že dnes existují normativní dokumenty na druhy a metody NDT, které definují požadavky k termínům a definicím, ale nejsou uvedeny požadavky k měřicím prostředkům a ověření. Proto je nutné vyvinout normativní dokumenty na bezkontaktní metody, které budou určovat požadavky k tloušťkoměrům, měrkám tloušťky a také požadavky jejich ověření a kalibrace. Analogicky s mezinárodními normami, např. ISO 16859 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Leeba, vytvořené v třech částech: 1 - Zkušební metoda; 2 - Ověřování a kalibrace zkušebních přístrojů; 3 - Kalibrace referenčních zkušebních destiček, se nabízí následující struktura norem:

1. Bezkontaktní metoda NDT tloušťky povlaků. Základní ustanovení.

- 1 Oblast použití
- 2 Normativní odkazy
- 3 Termíny a definice
- 4 Metoda měření
- 5 Tloušťkoměry
- 6 Požadavky k objektům měření
- 7 Měření tloušťky povlaků
- 8 Hodnocení nejistoty měření
- 9 Protokol měření

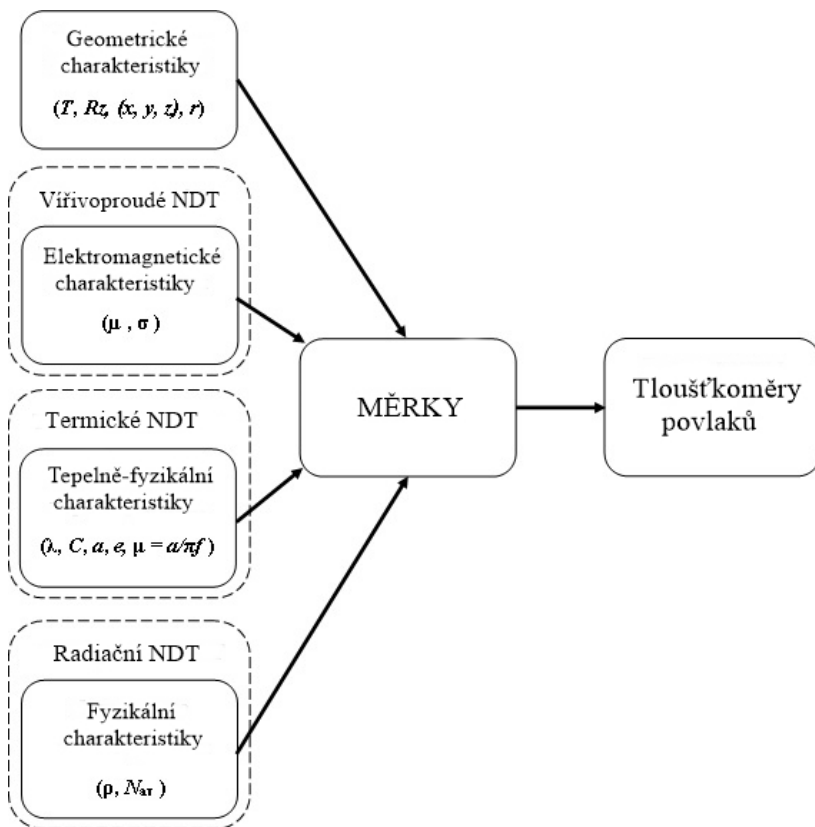
2. Tloušťkoměry, ověření, kalibrace

- 1 Oblast použití
- 2 Normativní odkazy
- 3 Základní podmínky
- 4 Ověření tloušťkoměrů
 - Obecná ustanovení
 - Variační koeficient
 - Odchylka tloušťkoměrů
 - Nejistota měření
- 5 Interval mezi ověřeními
- 6 Kalibrační list

3. Měrky tloušťky, ověření a kalibrace

- 1 Oblast použití
- 2 Základní podmínky
- 3 Výroba etalonových měrek tloušťky
- 4 Ověření etalonových měrek tloušťky
 - Obecné požadavky
 - Metrologická návaznost
- 5 Postup ověření
- 6 Počet měření
- 7 Nejistota měření
- 8 Značení
- 9 Doba použitelnosti

Interferenční parametry pro každou bezkontaktní metodu jako i tloušťka povlaku se musí kontrolovat ve fázích výroby a ověření měřicích prostředků, jak je uvedeno na obr. 7, v takovém případě bude zajištěna metrologická návaznost a jednotka měření.



Obr. 7. Schéma přenosu velikosti jednotky od měrek k tloušťkoměrům povlaků s ohledem na kontrolu interferenčních parametrů pro každou bezkontaktní metodu NDT

Použití přístrojů, jež realizují uvažované metody měření a také navrhované principy metrologického zajištění, umožní provádět bezkontaktní techniky měření při zajištění jednoty měření a také zvýšit spolehlivost výsledků.



DEFEKTOSKOPIE U SPRÁVY ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY

DEFECTOSCOPY FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE ADMINISTRATION

Ing. Matouš VAZAČ

SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY státní organizace,

Technická ústředna dopravní cesty

Contact e-mail: matous.vazac@tudc.cz

1. Úvod

Správa železniční dopravní cesty, státní organizace (dále jen SŽDC) v rámci zvyšování technické úrovně diagnostiky železniční dopravní cesty, v loňském roce dokončila přípravu nového systému defektoskopie kolejnic. V rámci tohoto záměru byla u SŽDC pořízena diagnostická jednotka pro nedestruktivní kontrolu kolejnic (dále jen DJ NDT), měřící vozík systému vířivých proudů a další technické prostředky lokální diagnostiky kolejnic. Všechny tyto měřící systémy jsou provozovány Technickou ústřednou dopravní cesty v Hlavním defektoskopickém středisku SŽDC se sídlem v Pardubicích. V průběhu roku 2018 došlo k zahájení plného provozu jednotky DJ NDT a následně i ke změně v systému defektoskopické kontroly kolejnic na všech úrovních jejího zajištění.

2. Systémová opatření

Pro zavedení pravidelného měření jednotkou DJ NDT na tratích SŽDC bylo nutné zpracovat a provést opatření, spočívající v úpravách interních předpisů tak, aby byly splněny veškeré náležitosti týkající se základní defektoskopické kontroly kolejnic stanovené Vyhláškou č. 177/195 Sb. Vydáním Pokynu SŽDC PO-13/2018-GŘ „Zásady pro zajištění základní kontroly kolejnic diagnostickou jednotkou DJ NDT“ a Výnosu č. 3 k předpisu SŽDC (ČD) S 3/4 „Nedestruktivní zkoušení kolejnic“ byly stanoveny základní podmínky, za kterých je jednotka DJ NDT provozována.

3. Stávající kontrola pomocí ručních defektoskopických přístrojů

Doposud nedestruktivní testování kolejnic bylo u SŽDC zajišťováno výhradně pochůzkovou kontrolou pomocí ručních defektoskopických přístrojů. V praxi vykonávají defektoskopickou kontrolu obvykle dvoučlenné skupiny vyškolených a certifikovaných pracovníků. Kontrola je vykonávána ve dvou stupních. Při stupni „**základní kontrola**“ se pomocí jednoúčelových kolejnicových defektoskopů kontinuálně prověřují kolejnice, srdcovky a jazyky výhybek, přičemž nedílnou součástí kontroly je i podrobná vizuální prohlídka všech svarů. Pokud je při základní kontrole přístrojem indikována přítomnost vady, podrobí se místo důkladné vizuální prohlídce. Takto jsou zjištěny všechny vady, které již vyběhají na povrch zkoušené součásti. Jestliže není vizuálně zjištěna žádná vada, přistupuje se ke druhému stupni „**podrobná kontrola**“. Při ní se univerzálním ultrazvukovým defektoskopem prověřují všechna místa se skrytými vadami bez ohledu na délku indikace při základní kontrole u srdcovek a jazyků výhybek, v kolejnicích pak všechna místa delší než 1 m. Je-li vada potvrzena, upřesní se její typ a rozsah.

U SŽDC se v současné době používají digitální přístroje české firmy Starmans. Již od roku 1998 je to defektoskopický duální defektoskop DIO 562 - 2CH a od poloviny roku 2018 nový přístroj druhé generace DIO 1000-SFE-2CH.



*Pochůzková kontrola ručními defektoskopickými přístroji
Hand inspection by hand defectoscopy devices*

4. Diagnostická jednotka DJ NDT

Kompaktní diagnostická jednotka DJ NDT je složena ze tří vozidel – hnacího vozidla, řídicího a měřícího vozu.



*Diagnostická jednotka pro nedestruktivní kontrolu kolejnic
Diagnostic unit for non-destructive control of rails*

Hnací vůz - základem vozu je původní čtyřnápravový motorový vůz řady 851, který byl kompletně modernizovaný. Kabina strojvedoucího je konstruována pro práci 3 osob (strojvedoucí, pilot a obsluha lokalizačního systému HOST). Na řídicím stanovišti je umístěno centrální ovládání vozidla s vícenásobným řízením a diagnostikou vozidla, včetně vlakového zabezpečovače a radiostanice sítě TRS a GSM-R. Je zde zabudován systém snímání obrazu tratě s jeho přenosem do kabiny strojvedoucího a na stanoviště měřičů. Obytný prostor je umístěn ve střední části.

Skládá se ze dvou jednolůžkových kupé a sociálního zařízení, zasedací místnosti, kuchyně a jídelního koutu.

Měřící vůz je rozdělen na měřící místnost a prostory pro pomocná zařízení, tj. elektrocentrálu, nádrže na technologickou vodu (8 x 1 000 litrů), sklad a dílnu.

Řídicí vůz - na čele vozu je umístěno řídicí stanoviště strojvedoucího. Ve voze jsou dále tři obytná kupé, sociální zařízení, obytný prostor pro pěti členou osádku. V zadní části vozu jsou osazeny další nádrže s technologickou vodou (4 x 1 000 litrů).

Základní technické údaje jednotky DJ NDT:

nejvyšší přepravní rychlost	110 km.h ⁻¹
rychlost soupravy při měření	až 70 km.h ⁻¹
celková hmotnost soupravy	150,36 t
celková délka soupravy přes nárazníky	73,80 m
brzda	DAKO-P
motor HV	Caterpillar C27
výkon motoru	655 kW
hydrodynamická převodovka	H750M
radiostanice	T-CZ V67
rychloměrná souprava	UniControls TRAMEX RE1
návěstní opakovač	Mirel VZ1
teplovodní nezávislé topení	Hydronic D16WN, elektrický kotel
klimatizace	RA C40 a EK 14 000-30 07

5. Diagnostické systémy DJ NDT

Diagnostická jednotka DJ NDT je určena pro nedestruktivní defektoskopické měření vad kolejnic a to pomocí následujících diagnostických systémů:

- systému ultrazvukové kontroly kolejnic s podporou vizuálního snímání (dále jen UT);
- systému kontroly kontaktně únavových vad vířivými proudy (dále jen ET).

Diagnostické systémy jsou umístěny v rámci DJ NDT na měřicím voze. Tento vůz je vybaven speciálním měřicím podvozkem, na kterém jsou osazeny měřicí komponenty.

Součástí jednotky jsou nádrže s 12 tisíci litry technologické vody pro zajištění vazby UT systému, tak aby bylo možno provádět kontinuální UT měření v rozsahu týdenního měření bez nutnosti tankování vody.

Naměřená data jsou přenesena na vyhodnocovací pracoviště HDS. Po zpracování a vyhodnocení jsou archivována v centrálním úložišti dat. V případě potřeby je možno výsledky měření vyhodnotit i přímo na jednotce. Při nejednoznačnosti rozhodnutí o klasifikaci vady ve vyhodnocovacím středisku HDS jsou tyto vady dohledávány přímo v trati dohledacími čety HDS. Tyto čety jsou pomocí softwaru informovány o potřebě dohledání vad, Po editaci jednotlivých nezatříděných vad tyto informace zašlou zpět do databáze, kde jsou již připraveny k vložení do hlášenek v informačním systému provozního stavu sítě tratí.

Technický popis měřících systémů

Diagnostické systémy jsou umístěny v rámci DJ NDT na měřícím voze. Sondy a snímače měřících systémů jsou zabudovány na měřícím podvozku vyrobeném společností MAV KFV Ft.

Technické údaje měřícího podvozku:

Rozchod	1 435 mm
Průměr kol	460 mm
Celková délka	2 488 mm
Celková šířka	1 970 mm
Rozvor	1 900 mm
Minimální poloměr oblouku	150 m
Hmotnost (včetně měřících systémů)	2 200 kg

Systém ultrazvukové kontroly kolejnic

UT systém se skládá ze dvou ližin, které jsou namontovány na měřícím podvozku. Na každé ližině je umístěno celkem 9 ultrazvukových sond pro každý kolejnicový pas. Sondy jsou prostřednictvím kabelů spojeny s ultrazvukovým defektoskopem. Poloha a natočení UT sond umožňuje kontrolu kolejnicových pásů nejen v ose kolejnic ale i v celé šířce hlavy kolejnice.



*Systém ultrazvukové kontroly kolejnic na měřícím podvozku
Ultrasound track inspection system on the measuring chassis*

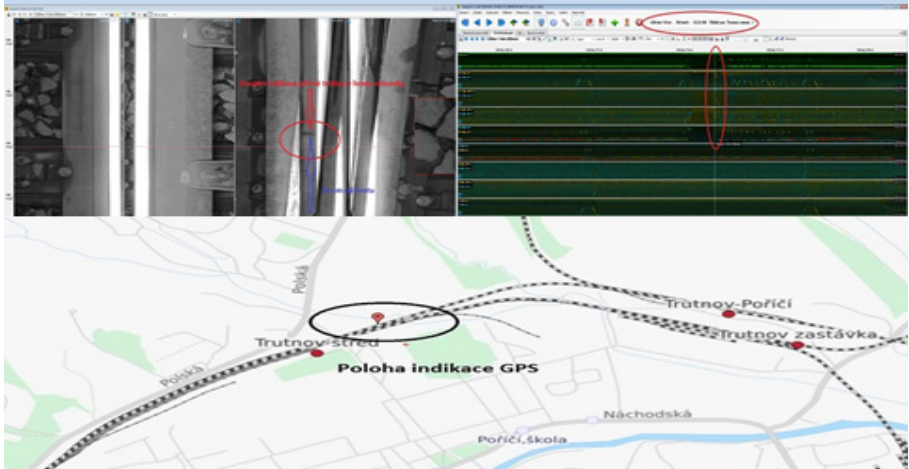
Technické parametry UT:

Rychlost měření (bezstyková kolej)	0 – 70 km.h ⁻¹
Rychlost měření (styková kolej)	0 – 30 km.h ⁻¹
Rychlost měření (jízda do odbočky ve výhybce)	0 – 30 km.h ⁻¹
Metody kontroly	Odrazová impulzní a průchodová
Typ ultrazvukové vlny	Podélná a příčná
Jmenovitá frekvence	2,5 MHz
Opakovací kmitočet sledu impulsů	100-4800 Hz
Rozsah nastavení zesílení	min. 96 dB
Dynamický rozsah registrovaných signálů	min. 48 dB
Rozsah provozních teplot při měření	-5°C až + 55°C
Kapacita paměťových disků (běžné měření)	4 týdny

Vizuální snímání kolejnic

Systém pro vizuální kontrolu kolejnic je umístěn na běžném podvozku měřicího vozu. Tento optický systém je podpůrným prostředkem při vyhodnocování vad zjištěných ultrazvukovou kontrolou. Vysokorychlostní, bezkontaktní systém je tvořen čtyřmi řádkovými kamerami s LED osvětlením, které zajišťuje dostatečné množství světla pro krátké expoziční doby. Je určený pro trvalý záznam snímků povrchu obou stran kolejnic. Na základě vizuálního snímání je možné ve většině případů rozeznat vizuální projev vady a tím podpořit správné přiřazení kódu vady podle předpisu SŽDC S67, zároveň slouží pro ruční odfiltrování kolejnicových styků, svarů a otvorů pro spojkový šroub. Systém tedy zajišťuje podporu práce hodnotitele při zpracování výsledků měření a interpretaci naměřených dat z UT systému.

Zjišťování a klasifikace vad vada č. 211 A – „příčná trhlina v hlavě kolejnice“



*Příklad – zjištění vady č. 211 A - „Příčná trhlina v hlavě kolejnice“
Example - Fault finding 211 A - "Transverse crack in the rail head"*

Měřicí systém vířivých proudů

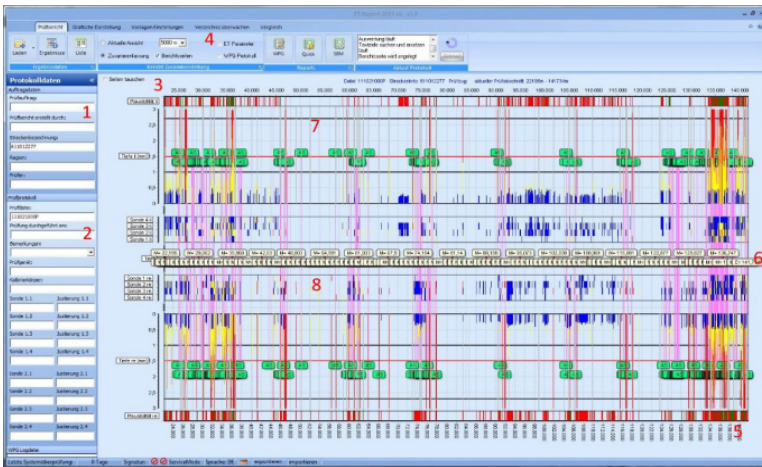
Metoda zkoušení pomocí ET je primárně určena pro zjišťování povrchových vad. U SZDC je systém optimalizován pro vyhledávání vad 2221 Head Checking. Hodnocení této vady je možno provádět až do hloubky 3 mm.

ET systém je mechanicky uchycen k rámu měřicího podvozku a napojen na pneumatický systém vozu, který umožňuje automatické zvedání (např. ve výhybkách a výhybkových konstrukcích).

Ke kontrole poježděných ploch kolejnic slouží vždy 4 snímače vířivých proudů na každé kolejnici.



Měřicí systém vířivých proudů
Eddy Current Measurement System



Grafický výstup ze systému ET
Graphic output from the ET system

6. Měřicí vozík systému vířivých proudů

Pro měření v oblastech přejezdů a výhybkových konstrukcích, kde je systém ET na DJ NDT pro eliminaci rizika jeho poškození automaticky zvedán, využije v odůvodněných případech SŽDC měřicí vozík ET. Vozík byl například v loňském roce využit pro diagnostiku výhybek jako podklad pro zadání strojního opravného broušení kolejnic ve výhybkách.



*Ruční vozík pro měření systémem ET
Hand-held trolley for ET measurement*



*ET – umístění měřících snímačů
ET - location of measuring sensors*

7. Ruční diagnostické prostředky pro expertní měření vad kolejnic

Pro činnost expertních měření vad kolejnic bylo pořízeno několik ručních přístrojů. Jedním z nich je Olympus Omniscan MX2, který umožňuje měření jak konvenčním ultrazvukem, tak i metodou Phased Array (PA). Technologie PA využívá více ultrazvukových měničů a elektronické časové zpoždění pro vytváření paprsků, kterým lze řídit, skenovat zadané rozpětí úhlů a elektronicky zaměřit (fokusovat) do určité hloubky materiálu a plně ukládat data spolu s protokolem o měření.

Technologie PA poskytuje pomocí naměřených dat vizualizaci zjištěné vady materiálu přímo v přístroji nebo na počítači pomocí k tomu určenému softwaru.



*Přístroj Olympus Omniscan MX2
Olympus Omniscan MX2*

8. ZÁVĚR

Zavedením nového systému základních kontrol kolejnic s využitím jednotky DJ NDT dochází zásadním způsobem ke zvýšení efektivity diagnostiky vad kolejnic u SŽDC. Stávající systém je rozšířen o systém diagnostiky kolejnic s využitím vířivých proudů ET, rozšíření ultrazvukového systému UT (ze stávajících 3 na 9 sond) a umožňuje snížení vlivu lidského faktoru při vlastním identifikaci defektoskopických vad.

Rozšířením současných technických možností v odhalování vad kolejnic došlo zároveň i ke zvýšení bezpečnosti železničního provozu u SŽDC.

Následnou a včasnou údržbou je zároveň docíleno vyšší efektivity využití finančních prostředků a snížení nákladů na opravné a údržbové práce po dobu životnosti koleje.

NEDESTRUKTIVNÍ A DESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ KOROZNÍHO POŠKOZENÍ A ROZVOJE TRHLIN VZORKŮ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ

NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE EVALUATION OF CORROSION DAMAGE AND PROGRESS OF CRACKS OF DISSIMILAR JOINT SPECIMENS

Jana VESELÁ*, Pavel MAREŠ*, Jiří HODAČ*

*Centrum Výzkumu Řež, s.r.o.

Contact e-mail: jana.vesela@cvrez.cz

Abstrakt

Korozní poškození je jednou z hlavních příčin porušení heterogenních svarových spojů v oblasti energetiky. Cílem nedestruktivního zkoušení je zjistit vady vzniklé působením koroze pod napětím v raném stádiu a umět je odlišit od vad způsobených únavovým namáháním. Cílem experimentu bylo vytvořit dostatečně agresivní prostředí v kombinaci s aplikovaným namáháním, které povede k rozvoji korozního poškození na iniciačních vrubech vzorků. Jednotlivé druhy vzorků z pohledu materiálů a výrobního zpracování byly exponovány v roztoku nebo solné mlze. Exponované vzorky lze dále dělit z pohledu zatížení na vystavené ohybovému napětí v přípravku, nebo bez vnějšího zatížení.

Pro nedestruktivní hodnocení vzniku a rozvoje korozní vady byla využívána technika Phased Array ultrazvukového zkoušení. Destruktivně byly vzorky podrobeny metalografickému hodnocení struktury a rozvoje vady typu trhliny z iniciačního vrubu EDM vyrobeného jiskřením.

Klíčová slova: heterogenní svarové spoje, koroze pod napětím, ultrazvukové zkoušení, Phased Array technika, EDM vrub

Abstract

Corrosion damage is one of the main causes of failures of dissimilar metal welds in the energy sector. The goal of non-destructive testing is to identify defects caused by stress corrosion cracking at an early stage and to be able to differentiate them from defects caused by fatigue stress. The aim of the experiment was to create a sufficiently aggressive environment in combination with the applied stress that will lead to the development of corrosion damage at the initiation notches of specimens. Individual types of specimens from the point of view of materials and production were exposed in solution or salt spray. The exposed specimens can be further subdivided from the point of view of the load on the exposed bending stress in the jig or without external load.

Non-destructive evaluation of corrosive defects was developed using Phased Array ultrasonic testing. Destructively, the specimens were subjected to a metallographic evaluation of the structure and expansion of a crack-type flaw pattern from the initial notch produced by sparking (EDM).

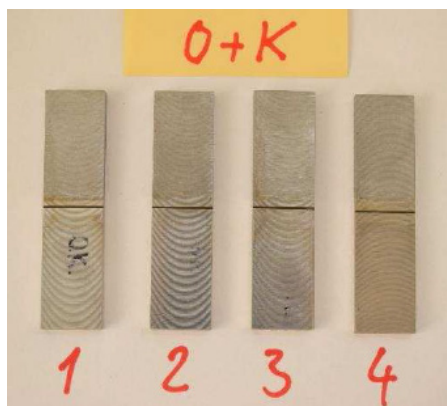
Key words: *dissimilar welding joints, stress corrosion cracking, ultrasonic testing, Phased Array technique, EDM notch*

1. Úvod

Mezi vhodné metody, které jsou schopny v dostatečném předstihu před porušením komponenty odhalit korozní porušení materiálu, patří i ultrazvuková metoda. Pro svarové spoje zejména v energetice je v poslední době s výhodou využívána technika Phased Array (PAUT). Je známo, že korozní namáhání společně s únavovým namáháním svarových spojů vedou nejčastěji k porušení za provozu. Cílem experimentu bylo u heterogenních svarových spojů vytvořit vhodné podmínky k rozvoji koroze pod napětím a využít PAUT pro zjišťování tohoto rozvoje očekávaného v oblasti umístění výchozího vrubu EDM (Electric Discharge Machining) za daných korozních podmínek a stavu vnějšího mechanického namáhání.

2. Zkušební vzorky

Základní rozměry vzorků jsou 80x20x5 mm se značením umístěným z čela vzorků. Značení obsahuje písmeno vztahující se k typu oceli a pořadové číslo 1 až 4. Vzorky lze rozdělit do 2 základních skupin, homogenní a heterogenní vzorky. Ve skupině homogenních vzorků byly testovány 4 sady po 4 vzorcích v sadě, jedná se o sady označené písmeny K, L, O a S bez svarových spojů. Hlavní pozornost byla soustředěna na 2 sady heterogenních vzorků označených LS a OK se svarovým spojem. EDM vrub tvaru V o hloubce 1 mm přes celou šířku vzorku a vrcholovém úhlu 45° byl u heterogenních vzorků vyjiskřený v kořeni svaru, obr. 1.



Obr. 1 Výchozí stav vzorků označených OK
Fig. 1 Initial status of specimens marked OK

Každá sada vzorků byla dále rozdělena na polovinu pro rozdílné korozní zatížení a v každé polovině vzorků byl jeden vystaven současně mechanickému zatížení, blíže tabulka 1.

Tab. 1 Zkušební vzorky

Table 1 Testing specimens

Označení vzorku	Materiál	Korozní zatížení		Mechanické zatížení
		korozní cela	mlžná komora	
K1	22K	x		
K2	22K	x		x
K3	22K		x	
K4	22K		x	x
L1	304L	x		
L2	304L	x		x
L3	304L		x	
L4	304L		x	x
LS1	304L + S235	x		
LS2	304L + S235	x		x
LS3	304L + S235		x	
LS4	304L + S235		x	x
O1	08Ch18N10T	x		
O2	08Ch18N10T	x		x
O3	08Ch18N10T		x	
O4	08Ch18N10T		x	x
OK1	08Ch18N10T + 22K	x		
OK2	08Ch18N10T + 22K	x		x
OK3	08Ch18N10T + 22K		x	
OK4	08Ch18N10T + 22K		x	x
S1	S235	x		
S2	S235	x		x
S3	S235		x	
S4	S235		x	x

V každé sadě vzorky označené číslem 1 a 2 byly vystaveny působení korozního roztoku v cele a vzorky s číslem 3 a 4 korozní mlze v komoře. Dále vzorky s čísly 2 a 4 byly v průběhu korozního zatížení ještě vystaveny působení mechanického ohybového namáhání. Vzorky byly pomocí přípravků předepnuty šroubem na průhyb 0,25 mm, v souladu s normou ČSN ISO 7539-2. Strana s EDM vrubem tak byla vystavena tahovému zatížení.

3. Parametry korozního a mechanického namáhání

Pro korozní zatěžování vzorků byla použita korozní cela a mlžná komora. Parametry korozního prostředí byly shodné pro obě korozní zařízení:

- roztok 5 % hm. NaCl v destilované vodě, pH 6,5 – 7,2
- doba působení – 1. etapa = 264 hodin, 2. etapa = 816 hodin
- umístění vzorků – vrubem V nahoru, pod sklonem umožňující odtok korozního média

Pro zvýšení agresivity korozního prostředí byla doplněna kuchyňská sůl (NaCl) a postupovalo se v souladu s ČSN EN ISO 9727.

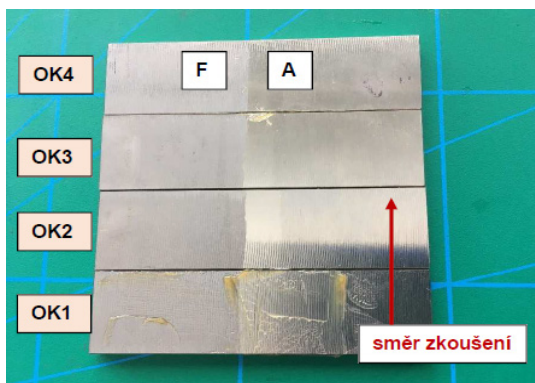
Korozní cela byla naplněna vodným roztokem s nucenou cirkulací a nuceným oksyličováním roztoku. Průtok čerpadla 500 litrů / hod a teplota roztoku $26 \pm 2^\circ\text{C}$.

Mlžná komora byla uzavřena bez nucené cirkulace se vzdušnou atmosférou. Spad roztoku na sběrači o ploše 80 cm² byl 1,5 ml/hod a teplota korozního média $35 \pm 2^\circ\text{C}$.

4. Nedestruktivní hodnocení vzorků

Základní metodou hodnocení stavu vzorků po první i druhé etapě korozního i korozně/mechanického namáhání byla vizuální kontrola. Po očištění vzorků byl hodnocen celý povrch s ohledem na typ korozního napadení, tj. zda došlo k plošné nebo bodové korozi, rovnoměrnost koroze, stav povrchu, úbytek hmotnosti. Výsledky těchto hodnocení nejsou předmětem tohoto článku.

Hlavní NDT metodou hodnotící případný rozvoj korozních trhlin byla ultrazvuková zkouška s využitím techniky Phase Array. Vznik a rozvoj trhlin byl předpokládán v místě EDM vrubu. Všechny vzorky byly podrobeny PAUT ve výchozím stavu a po 1. i 2. etapě zatížení. První etapa trvala 264 hodin (11 dní), druhá etapa celkem 816 hodin (34 dní). Měření bylo provedeno na přístroji Dynaray 128/128 PR firmy Zetec a byla použita PA sonda označená AS-10 MHz. Kontrola PAUT se vždy provedla na všech 4 vzorcích současně se záznamem polohy pomocí enkóderu. Zkoušení bylo provedeno z povrchu bez EDM vrubu a z obou stran svarového spoje, nebo podélné osy vrubu. Při zkoušení homogenních vzorků byly strany označeny L a P (levá a pravá) vůči směru zkoušení a pro heterogenní vzorky byly označeny F a A (uhlíková ocel a A – nerezová ocel), obr. 2.



Obr. 2 Vzorky OK1 až OK4 výchozí stav – označení strany a směru zkoušení

Fig. 2 Specimens OK1 up to OK4 initial state – mark of sides and testing direction

Souhrnné výsledky PAUT všech sad vzorků, včetně metody hodnocení, jsou uvedeny v tabulce 2. V tabulce je uvedena strana, u které byla hodnocená výška EDM vrubu vyšší. Většinou se jednalo o levou stranu, nebo stranu značenou F (uhlíková ocel). Výjimkou jsou vzorky K1 a OK1, kde bylo hodnocení provedeno z pravé strany u vzorku K1 a ze strany nerezové oceli u vzorku OK1.

Tab. 2 Shrnutí výsledků PAUT všech 6 sad vzorků

Table 2 Summary of PAUT results of all sets of specimens

Označení vzorku	PAUT - metoda hodnocení	výchozí stav	PAUT - metoda hodnocení	po 1. etapě korozního namáhání 264 hod (11 dní)	PAUT - metoda hodnocení	po 2. etapě korozního namáhání 816 hod (34 dní)
	tip diffraction		tip diffraction	L / F	drop 6 dB	L / F
K1	x	0,7	x	0,7	x	1 (P / A)
K2	x	0,8	x	0,8	x	0,75
K3	x	0,8	x	0,8	x	0,5
K4	x	0,6	x	0,8	x	1
L1	x	0,9	x	0,9	x	1,1
L2	x	0,9	x	0,8	x	0,9
L3	x	1	x	0,9	x	0,9
L4	x	0,9	x	0,9	x	0,9
LS1	x	1	x	0,6	x	1
LS2		vada		vada		vada
LS3	x	N/A	x	0,5	x	0,75
LS4	x	N/A	x	0,7	x	1
O1	x	0,9	x	0,9	x	1
O2	x	0,8	x	0,7	x	1
O3	x	1	x	0,7	x	1
O4	x	1	x	0,6	x	1
OK1	x	N/A	x	0,8	x	1 (P / A)
OK2	x	0,8	x	0,8	x	0,8
OK3	x	0,7	x	0,5	x	1
OK4	drop 6 dB	1,1	drop 6 dB	1,1	x	0,8
S1	x	0,8	x	0,8	x	0,75
S2	x	0,7	x	0,7	x	1
S3	x	0,8	x	0,8	x	1
S4	x	0,8	x	0,7	x	1

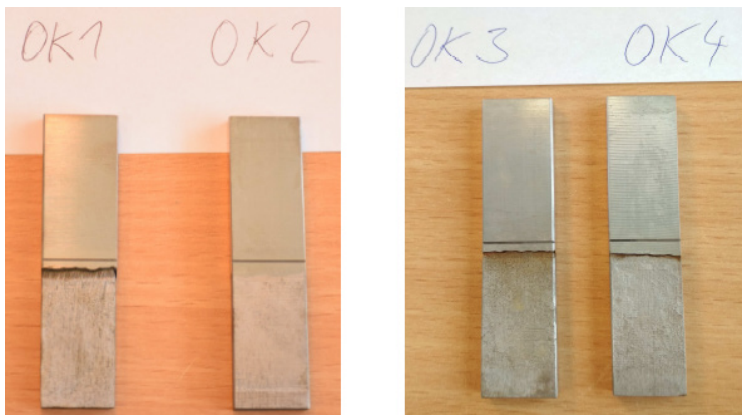
Hodnocení pomocí přímého odrazu od vrcholu EDM vrubu, tzv. tip diffraction bylo bráno jako prioritní, je-li difrakční echo přítomno, před hodnocením pomocí poklesu echa na 50 % maxima výšky echa (pokles o 6 dB). Důvodem je vyšší přesnost měření výšky vady.

Výška EDM vrubu měřením PAUT byla vyhodnocena pro všechny výchozí vzorky a stav po 1. etapě koroze, kromě vzorku OK4, pomocí tip diffraction. Naopak všechny vzorky po 2. etapě koroze byly hodnoceny poklesem o 6 dB. S ohledem na metodu hodnocení lze srovnat změnu výšky vrubu po 1. a 2. etapě korozního a korozně/mechanického namáhání s výchozím stavem vzorků.

U vzorku LS2 je v tabulce 2 zaznamenána výrobní vada svaru s výškou dosahující téměř tloušťky vzorku. Označení N/A v tabulce znamená, že EDM vrub byl detekován velmi slabě a nebylo možné určit jeho výšku, jednalo se o ve výchozím stavu o vzorky LS3, LS4 a OK1.

Níže uvedené záznamy PAUT se týkají vzorků sady OK, vyrobených z materiálů nejčastěji používaných v oblasti jaderné energetiky, jmenovitě oceli 08Ch18N10T a 22K. Vzorky OK1 a OK2 byly vystaveny účinkům vodného roztoku a vzorky OK3 a OK4 solné mlže.

Stav vzorků po 2. etapě a jejich očištění je dokumentován na obr. 3. Vizuelně je pozorovatelný plošný úbytek oceli 22K, zejména u vzorků OK1, OK3 a OK4.



Obr. 3 Vzorky sady OK po 2. etapě koroze a očištění
Fig. 3 Specimens set OK after 2nd period of corrosion and cleaning

U vzorku OK1 na rozhraní oceli 22K a svarového spoje se korozním úbytkem oceli 22K vytvořil schod z obou povrchů. Na povrchu bez EDM vrubu koroze vytvořila schod dosahující výšky až 0,5 mm, obr. 4.

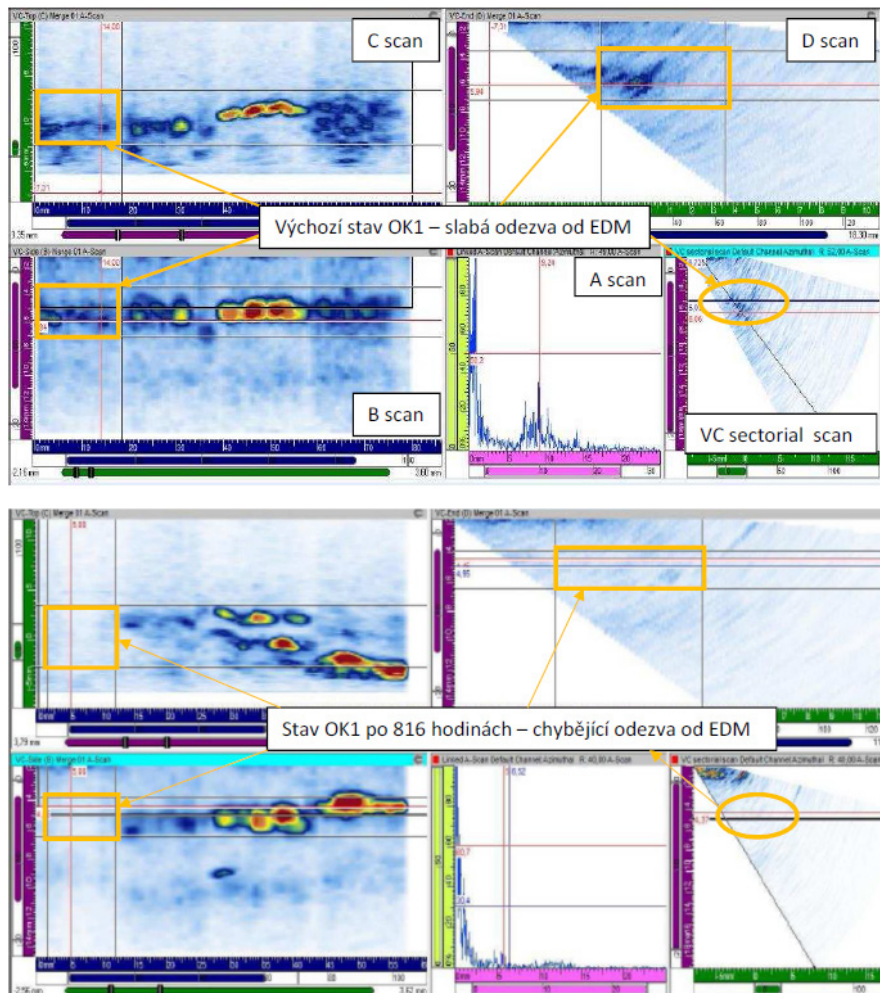


Obr. 4 Boční pohled na vzorky OK1 a OK4
Fig. 4 Side view of the specimens OK1 and OK4

Pro bližší rozbor byly vybrány výsledky PAUT vzorků OK1 a OK4, které byly zaznamenány při měření svarového spoje ze strany uhlíkové oceli. Záznamy výchozího stavu a po 2. etapě korozního zatížení jsou uvedeny na obr. 5 a 6. Stav po 1. etapě zatížení se významně

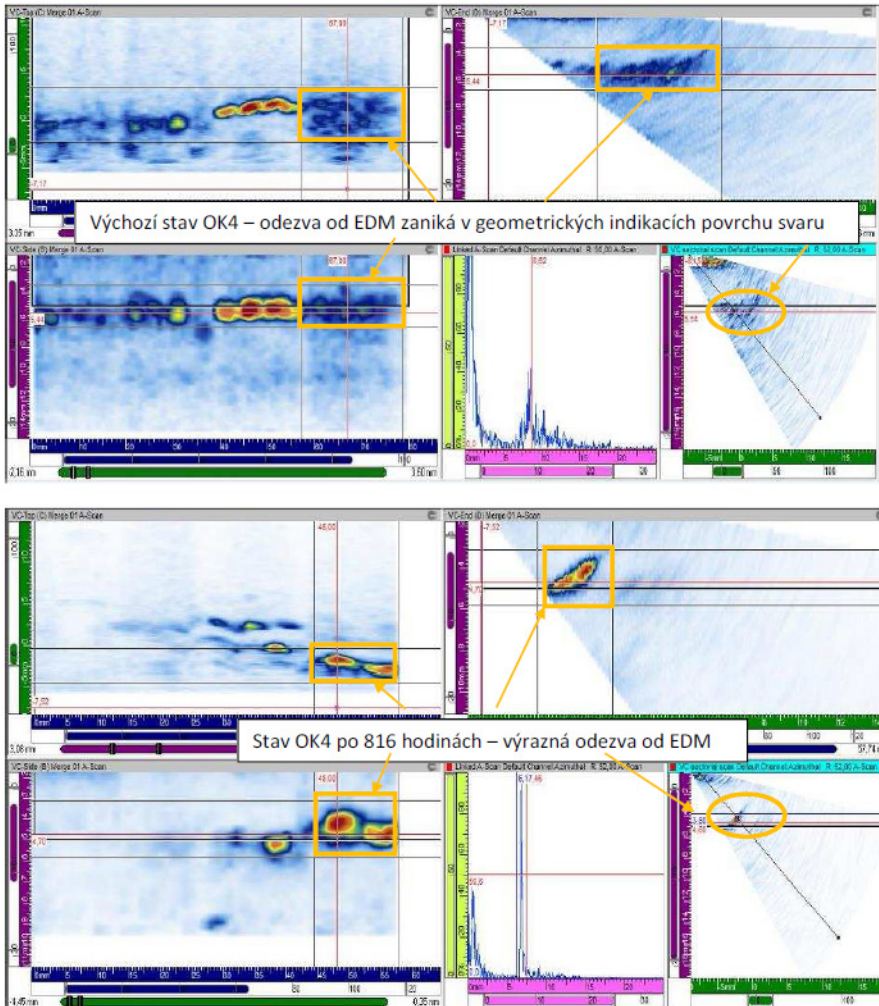
neodlišoval od výchozího stavu, a není proto dokumentován. Důvodem je zřejmě relativně krátká doba působení korozního prostředí.

U vzorku „OK1 výchozí stav“ bylo detekováno velmi slabé echo od EDM vrubu, a nebylo tak možné vyhodnotit jeho výšku. Po 2. etapě zatěžování nebyl vrub EDM detekován díky koroznímu úbytku oceli 22K a vytvořením schodu v blízkosti svarového spoje, obr. 4 a 5.



Obr. 5 Vzorek OK1 – PAUT ze strany F výchozího stavu (nahore) a po 2. etapě korozí (dole)
 Fig. 5 Specimen OK1 – PAUT result from side F of initial state (up) and 2nd corrosion period (down)

U vzorku „OK4 výchozí stav“ byl detekován EDM vrub s výškou 1,1 mm. Po 2. etapě zatěžování byl vrub EDM detekován a hodnocena výška 0,8 mm, tab. 2. Při hodnocení je nezbytné vzít v úvahu úbytek oceli 22K, který vytvořil na rozhraní se svarovým spojem schod o výšce 0,1 mm, obr. 4 a 6.



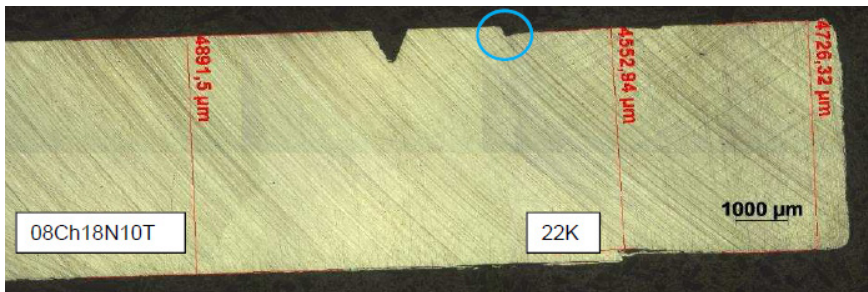
Obr. 6 Vzorek OK4 – PAUT ze strany F výchozího stavu a po 2. etapě koroze
 Fig. 6 Specimen OK4 – PAUT result from side F of initial state and 2nd corrosion period

5. Destruktivní hodnocení vzorků

Makroskopické hodnocení povrchů vzorků, stav EDM vrubu a měření tloušťky vzorků bylo provedeno po 1. etapě korozního a korozně/mechanického namáhání.

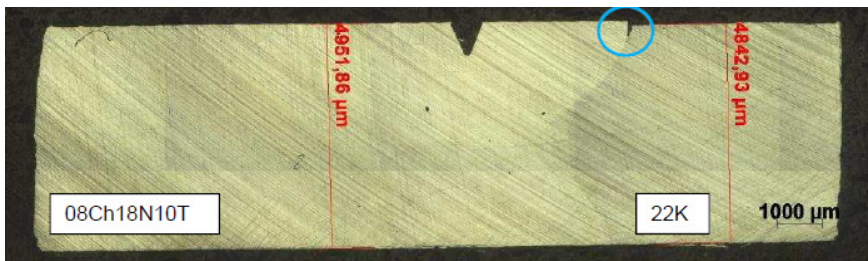
Homogenní vzorky označené K, L, O a S vykazovaly rovnoměrný plošný úbytek materiálu, který po 1. etapě zatěžování nepřekročil výšku 0,15 mm.

U vzorků s heterogenním svarovým spojem LS a OK byl pozorován také plošný úbytek na obou typech ocelí, kde největší úbytky byly měřeny na straně uhlíkové oceli s maximem v blízkosti rozhraní se svarovým spojem. Ze skupiny vzorků LS dosáhl největšího úbytku 0,19 mm měřeno vůči nerezové oceli. Ze skupiny vzorků OK dosáhl maximálního úbytku 0,34 mm vzorek OK1, obr. 7.



Obr. 7 Makroskopické hodnocení vzorku OK1
Fig. 7 Macroscopic evaluation of specimen OK1

Po 1. etapě zatěžování nebyl u vzorků zjištěn rozvoj koroze v oblasti EDM vrubu. Vzorek OK4 vykazoval počátek rozvoje štěrbinové koroze na rozhraní oceli 22K se svarovým kovem, obr. 8. Přítomnost korozní spáry nebyla detekována PAUT, viz obr. 6.



Obr. 8 Makroskopické hodnocení vzorku OK4
Fig. 8 Macroscopic evaluation of specimen OK4

Makroskopická hodnocení vzorků po 2. etapě zatěžování budou provedena.

6. Shrnutí

Vzorky všech šesti skupin rozdělených dle typu materiálu vystavené působení korozního a korozně-mechanického zatížení vykazovaly po 816 hodinách expozice v korozním prostředí stopy plošné koroze. Již vizuálně byly zjištěny vyšší úbytky uhlíkových ocelí na vzorcích homogenních i heterogenních a tyto byly potvrzeny měřením hmotnosti i makroskopickou analýzou jednotlivých vzorků. Největší úbytky u heterogenních vzorků byly změřeny na vzorcích LS1 a OK1 na straně uhlíkové oceli. Oba vzorky byly podrobeny koroznímu namáhání v korozní cele. Vliv na korozní úbytek mělo umístění vzorků v blízkosti oběhového čerpadla a zvýšená intenzita proudění tak přispěla k výraznému úbytku uhlíkové oceli ve srovnání s ostatními vzorky.

Vzorky, u nichž bylo korozní namáhání kombinované s mechanickým, nevykazovaly vyšší korozní úbytky ve porovnání s korozně namáhanými a neměly ani větší tendenci k rozvoji korozních trhlin v iniciačním EDM vrubu.

Nedestruktivní kontrolou technikou Phased Array vzorků ve výchozím stavu byla u většiny vzorků detekována přítomnost EDM vrubu. U vzorků OK1, LS3 a LS4 byl EDM vrub slabě detekovatelný. U vzorku OK4 odezva od vrubu téměř zaniká v odezvě od geometrie povrchu svaru. Po 816 hodinách působení korozního prostředí byly u vzorku OK4 technikou PAUT detekovány výrazné odezvy od EDM vrubu, ale zatím nelze přesně určit možný rozvoj poškození korozí pod napětím. Případný vznik poškození je nezbytné ověřit destruktivně makroskopickou analýzou, která bude provedena v další etapě experimentu. U vzorku OK1 po expozici 816 hodin nebyl EDM vrub detekován z důvodu odkorodování uhlíkové oceli v takovém rozsahu, že se vytvořil schod o výšce 0,5 mm na rozhraní svarového spoje a uhlíkové oceli. Změna geometrie rozhraní svarový spoj – uhlíková ocel znemožňuje provedení PAUT. Srovnáním výsledků PAUT vzorků podrobených koroznímu namáhání v korozní cele a v mlžné komoře nebyl zjištěn významný rozdíl. Stejně je tomu při srovnání výsledků PAUT u vzorků podrobených koroznímu namáhání a korozně-mechanickému namáhání. Ani jedna z jmenovaných skupin nevykazovala vyšší tendenci k rozvoji korozních trhlin. Měření PAUT po expozici 816 hodin neprokázalo negativní vliv ohybového namáhání na vznik koroze pod napětím.

Destruktivní makroskopická analýza vzorků provedená po 1. etapě, tj. po 264 hodinách neprokázala rozvoj trhlin z EDM vrubů a samotné vruby ve srovnání s povrchem vzorků nevykazovaly vyšší korozní napadení. Současně byl zaznamenán vznik štěrbinové koroze u heterogenních vzorků na rozhraní svarového spoje a uhlíkové oceli, rozvíjející se z povrchu umístění EDM vrubu.

7. Závěr

Výsledky PAUT budou po 2. etapě korozního a korozně-mechanického namáhání ověřeny makroskopickou analýzou. Technikou PAUT lze detekovat EDM vrub a odlišit změny v intenzitě odezvy po expozici 816 hodin ve srovnání s výchozím stavem. Nebyla potvrzena

přítomnost korozních trhlin. Výsledky makroskopické analýzy i PAUT vedou pro další pokračování experimentu umístit EDM vrub do přechodové oblasti svarový spoj – uhlíková ocel, kde je již nyní identifikován rozvoj štěrbinové koroze. Při stávajícím uspořádání změny geometrie rozhraní svar – uhlíková ocel neumožňují provedení PAUT, viz vzorek OK1. Pro další experimenty je uvažováno se zvýšením mechanického namáhání, které by v kombinaci s korozním prostředím a novým umístěním EDM vrubu mělo vést k rozvoji koroze pod napětím a vzniku korozních trhlin.

8. Zdroje

[1] Ciorau P., Chartier Ch, Mair K., A contribution of Phased Array Ultrasonic technology (PAUT) to detection and sizing stress corrosion cracks, NDT Canada, 11-2009

9. Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.



DETEKCE ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH S VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE

FATIGUE DAMAGE DETECTION IN COMPOSITE MATERIALS USING THE ACOUSTIC EMISSION

Jaroslav ZAČAL, Petr DOSTÁL, Jakub ROZLIVKA, Václav KAŠPAR

Department of Technology and Automobile Transport Faculty of Agronomy Mendel University in Brno Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: jaroslav.zacal@mendelu.cz

Abstrakt

Článek se zabývá monitorováním cyklické degradace vláknových uhlíkových kompozitních materiálů v tříbodovém ohybu a čtyřbodovém ohybu s využitím nedestruktivní metody testování (akustické emise – AE). Testovaný materiál se lišil způsobem provázání uhlíkových vláken, orientací vláken, plošnou hustotou vrstev a počtem vrstev. Experimentální data byla následně analyzována tak, aby byly popsány typické jevy v rámci každého měření. Výsledky ukazují, že sledování zdrojů AE může být použito k usnadnění diagnostiky časného poškození a vytvoření prognózy selhání. Jedná se o studium změn uvnitř kompozitních materiálů.

Klíčová slova: akustická emise, únavové zatěžování, šíření trhliny

Abstract

This work is focused on monitoring a cyclic degradation of carbon fibre reinforced composites in three-point and four-point bending test with a non-destructive testing method – acoustic emission (AE). Examined material was distinctive in a manner of carbon fibre weaving, their orientation, planar density of layers and their count. Experimental data were analysed to describe the phenomena typical for individual courses of testing. Results show that observation of AE sources could be used for facilitating of early damage diagnostics and estimation of possible material failure. This provides a valuable information on the internal composite structure and its changes in time.

Key words: acoustic emission, fatigue testing, fissure spread

1. Úvod

Charakteristickým rysem dnešní doby je dynamický technologický pokrok ve všech oblastech lidské činnosti, který je podmíněn zejména vývojem a aplikací nových typů materiálů. Rychlé vyčerpávání tradičních zdrojů energie, nárůst skleníkových plynů a další závažné ekologické otázky jsou hlavními důvody, proč je dnes kladen velký důraz na úsporu hmotnosti používaných součástí [1]. Jednou z možností řešení tohoto problému je zavádění kompozitních materiálů. Největší potenciál v této kategorii mají kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny, který jakožt nejpevnější a zároveň nejlehčí materiál vede k energetickým úsporám v celé řadě inženýrských aplikací. Dlouhá vlákna se mohou v kompozitech vyskytovat ve dvou podobách, buď jako samostatná vlákna (tzv. monovlákna), nebo ve svazcích obsahujících stovky či tisíce vláken (multivlákna) [3]. Použití uhlíkových vláken v kompozitech s epoxidovou maticí je

podmíněno jejich nízkou hustotou, vysokým modulem pružnosti a tahovou pevností, dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí a nízkým součinitelem teplotní roztažnosti [2].

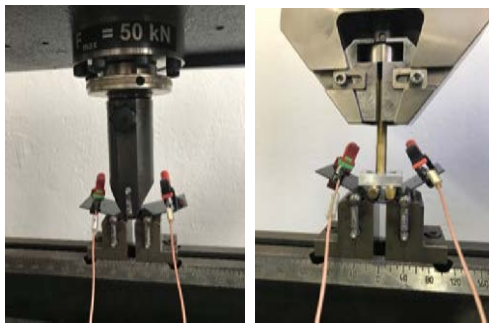
Nejčastější příčinou havárií součástí za provozu je výskyt tzv. únavových lomů. Studium únavy materiálu je zaměřeno na součásti, které jsou podrobené opakovanému působení vnějších sil, zejména tedy na materiály v oblasti automobilového, leteckého a energetického průmyslu [4]. Pro hlubší pochopení únavového procesu je nutné značnou pozornost věnovat oblasti nízkocyklové únavy, kdy dochází k lomu součásti při nízkém počtu zátěžných cyklů v důsledku kumulující se cyklické mikroplasticity [5, 6]. Nalezení příslušných únavových charakteristik, které vyjadřují schopnost materiálu odolávat cyklické plastické deformaci, je hlavním úkolem v pochopení únavového chování každého materiálu.

Během cyklického zatěžování dochází v materiálu k řadě strukturálních změn, které můžeme vizuálně v daný moment jen těžko zachytit či zaznamenat a které jsou během zkoušek ovlivňovány množstvím faktorů (např. podmínky zatěžování nebo stav mikrostruktury). Jedna z možností, jak hodnotit a monitorovat tyto procesy je využití metody akustické emise (AE). Jedná se o jednu v poslední době rychle se rozvíjející metodu nedestruktivního testování (NDT), která nachází široké uplatnění nejenom v technických oblastech [4, 5].

Únavové poškození v kompozitech je velmi komplexní problém. Kvůli různým mechanickým poškozením vyskytujících se v různých místech laminátu. Mechanizmy poškození můžeme rozdělit do pěti základních typů: trhliny v matrici, přetržení vláken, seskupování se trhlín, iniciace delaminací a růst delaminací. Následkem tohoto poškození se kompozitní materiály v podstatě neporuší vlivem jedné velké trhliny (jako je běžné u kovových materiálu) ale jejich poškození je způsobené sérií vzájemných závislých mikro poškození [7].

2. Experimentální zařízení

Všechny únavové zkoušky byly provedeny na univerzální trhacím zařízení MESSPHYSIK BETA 50-4/6x14 Zwick. Zařízení umožňuje zatěžovat vzorky v tahu-tlaku. Všechny testy byly prováděny s posuvnou rychlostí $2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Obrázek 1 prezentuje jednotlivé typy cyklického testování.

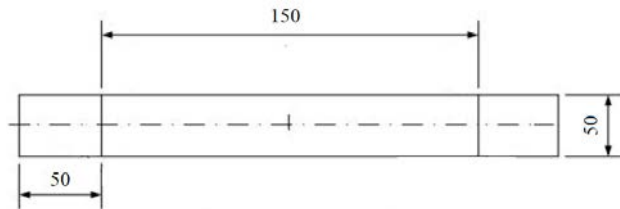


Obr. 1 Cyklické zatížení kompozitního materiálu třibodový ohyb (vlevo), čtyřbodový ohyb (vpravo)
Fig. 1 Cyclical load of composite material three-point bend (left), four-point bend (right)

3. Experimentální materiál

Testovaný kompozitní materiál byl zesílen uhlíkovými vlákny, který dodala společnost CARBONSTAR. Typ vlákna je T300J 3K v plátňové tkanině s hmotností $280\text{g}/\text{m}^2$. Testované materiály byly lisovány za tepla pro experiment byla použita stohovací sekvence, konkrétně

[(0°, 90°)]_{4s}, kde (0°, 90°) představuje jednu vrstvu kompozitu. Testované vzorky byly řezány vodou chlazenou diamantovou pilou. Rozměry vzorku jsou zobrazeny na obrázku 1 a jsou podle ČSN EN 2562 zkouška ohybem ve směru vláken [8].



Obr. 2 Rozměry použitého vzorku pro zkoušku únavy
Fig. 2 Dimensions of the used fatigue test

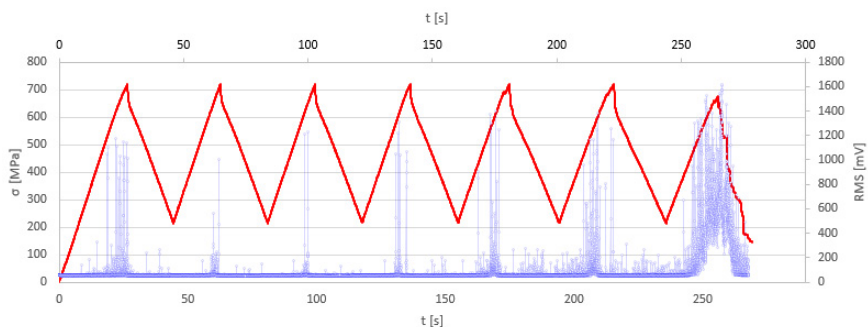
4. Metodika měření

Byla použita třibodová a čtyřbodová ohybová zkouška. Při těchto zkouškách se plochý vzorek podepře na dvou koncích a zatíží středovým břemenem (třibodová zkouška) – dvě podpěry a zatěžující trn uprostřed jsou uspořádány dle Obr. 1. Rovnoběžnost podpěr a trnu musí být v rozmezí $\pm 0,02$ mm. Poloměr R1 trnu a poloměr R2 podpěr musí být následující: $R1=5$ mm $\pm 0,1$ mm, $R2=2$ mm $\pm 0,2$ mm pro tloušťky zkušebního tělesa $3 \leq$ mm. Dále dvěma symetricky umístěnými břemeny (čtyřbodová zkouška). Čtyřbodová ohybová zkouška je modifikována o dvě příložky pod zatěžujícími podporami. Je to kvůli tomu, aby nedocházelo k nepříznivému vlivu (otlačení, odření povrchu vzorku) zatěžujících podpěr na povrchu vzorku při cyklickém zatížení. Středové břemeno při třibodovém ohybu vyvolá ohybový moment v testovaném vzorku, který se mění lineárně od nuly u podpěr k maximální hodnotě uprostřed.

Pro detekci napět'ových vln na povrchu materiálu byly použity dva pasivní piezoelektrické snímače typu IDK 09. Měření signálu AE bylo provedeno na zařízení XEDO. Oba snímače byly upevněny přímo na vzorku. Rozmístění bylo zvoleno tak, aby bylo možné na základě porovnávací studie příchozích signálů z jednotlivých snímačů zachytit zdroje jednotlivých vznikajících poškození a lokalizovat tak události dle časových zpoždění detekce hitů AE.

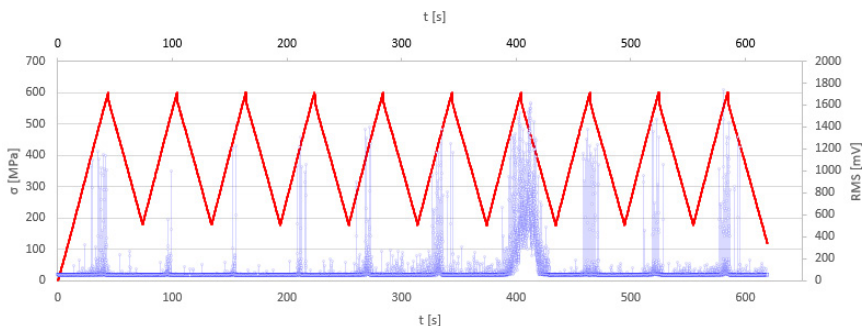
5. Výsledky a Diskuze

Výsledky potvrzují, že deformace nastává během prvních cyklů testování. Tuhle analýzu potvrzuje i zachycení signálu akustické emise. Protože vzorky byly testovány vyšším napětím, vzorky selžou brzy po spuštění experimentu. Na následujících Obr. 3 a Obr. 4 lze vidět jednotlivé cyklické zatížení v závislosti na rostoucím zatížení. V diagramech jsou současně také zahrnuty aktivity akustické emise z pohledu události RMS. Na spodní a horní horizontální ose je vyneseno čas (t) [s]. Na levé svislé ose je vyneseno napětí (σ) [MPa] a na pravé svislé ose (RMS) [mV].



Obr. 3 Diagram cyklického zatížení s akustickou emisí RMS vzorku pro tříbodový cyklický ohyb
 Fig. 3 Cyclic load diagram with acoustic emission rms sample for three-point cycle bend

Při počátečním růstu zatížení lze pozorovat výskyt vyšší aktivity AE. Ta má za následek poškození na rozhraní vlákna-matrice a jsou detekována již při počátečním zatížení. První mikrotrhlinky vznikají v matrici již v prvním cyklu zatížení. Akustická aktivita se dále navyšuje razantněji u 5-6 cyklu kde lze pozorovat významný nárůst detekovaných signálů porušení mezifázového rozhraní, a to spojování trhlin, které je potvrzeno událostmi RMS. Začátek konečného selhání lze spatřit u 7 cyklu zatížení vzorku s významnou událostí AE kde dochází k přetržení vláken.

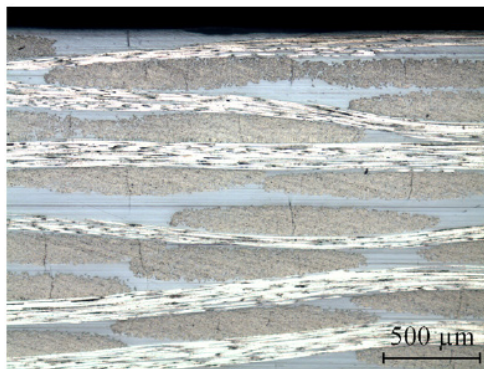


Obr. 4 Diagram cyklického zatížení s akustickou emisí RMS vzorku pro čtyřbodový cyklický ohyb
 Fig. 4 Cyclic load diagram with acoustic rms sample emission for a four-point cyclic bend

U čtyřbodového cyklického zatížení lze spatřit obdobné počáteční chování aktivity AE. Která se zintenzivňuje až do 7 cyklu kde došlo k nejvyšší detekované akustické aktivitě. Současně je vyvoláno rovnoměrně rozdělené interlaminární smykové napětí po celé délce vzorku. To může způsobit předčasné porušení vlivem nízké interlaminární smykové pevnosti kompozitů. Dvě symetrická břemena při čtyřbodovém ohybu vyvolávají ohybové momenty lineárně rostoucí od nuly na podpoře k maximální hodnotě pod břemenem. Ohybový moment mezi břemeny zůstává konstantní. V tomto případě nevzniká žádné smykové napětí mezi břemeny a tato část nosníku je tedy namáhána čistým ohybem. Interlaminární napětí jsou vyvolána pouze ve vnějších částech rozpětí, tj. mezi břemeny a podporami. Z hlediska stavu napětí je proto čtyřbodová ohybová zkouška vhodnější, kdežto tříbodová ohybová zkouška je snáze proveditelná. Určení

správné hodnoty pevnosti v ohybu vyžaduje, aby porušení nastalo přetržením vláken, a nikoliv interlaminárním smykem. To je zajištěno při velkém poměru rozpětí k výšce vzorku a lze to určit nalezením interlaminárního smykového namáhání nosníku.

V první etapě zatížení dochází k praskání matrice. Praskání se nejprve objevuje ve vrstvách s orientací vláken 90° a poté v dalších vrstvách s orientací 0° . Je to způsobeno koncentrací napětí v mezifázovém rozhraní uhlíkové vlákno-matrice. V první fázi vznik trhlin s orientací 90° nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Po vzniku prvních trhlin dochází k jejich šíření na hranice s vrstvami s podélně orientovanými vlákny. Čelo trhliny působí na rozhraní obou vrstev jako koncentrátor napětí. Zvyšuje se interlaminární napětí mezi vrstvami a v závěru fáze se iniciují delaminace. Při pokračujícím cyklickém zatížení dochází u vláken s orientací 0° k zvyšování napětí. Dochází k izolování jednotlivých vláken s orientací 0° a tím k růstu delaminací. Jednotlivé vrstvy kompozitu se začínají oddělovat což přispívá ke snížení tuhosti kompozitu. Výrazný růst delaminací je u vláken namáhaných tlakem u břemene, kde dochází ke ztrátě soudržnosti s matricí. proces porušování pokračuje dál, až dojde k finálnímu poruše kompozitního materiálu. Je možné z finálního porušení určit, zda se kompozit poruší dříve na straně s tlakovým napětím díky ztrátě vzpěrné stability jednotlivých vláken v důsledku přetržení vláken.



Obr. 5 Detaily míst porušeného vzorku v orientaci vláken 90° po ohybové únavové zkoušce
Fig. 5 Details of broken sites in fiber orientation 90° after flexural fatigue test

6. Závěr

Testované kompozitní materiály byly testovány třibodovým a čtyřbodovým cyklickým ohybem. U vzorků vyztužených uhlíkovým vláknem byla použita stohovací sekvence, konkrétně $[(0^\circ, 90^\circ)]_4s$. Výsledky únavy u třibodového i čtyřbodového je třeba interpretovat s opatrností, protože byla zaznamenána značná akustická aktivita, která vykazuje vznik deformací v kompozitní struktuře během experimentu, která však neměla vliv na mechanickou pevnost testovaných vzorků. Detailní a kontinuální monitoring mechanického stavu materiálu se jeví vedle ekonomických hledisek jako jedna z klíčových podmínek pro adekvátní nasazení moderních kompozitních materiálů, jako jsou vláknové uhlíkové kompozity, ve větším objemu, než je tomu doposud. Monitoringem mechanické kondice dílů za provozu lze také predikovat zbytkovou životnost materiálu či součástí, resp. je možné přesněji plánovat intervaly oprav nebo výměny jednotlivých součástí, což přispívá k vyšší konkurenceschopnosti a snižování nákladů

na servis i údržbu. Do dalšího testování by bylo vhodné analyzovat změny v signálu AE, které by mohly reflektovat počáteční přechodová stádia únavového procesu, popisovat odpor materiálu proti cyklické deformaci a iniciaci trhlin.

7. Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem TP 6/2017: Defektoskopické hodnocení kvality technických a organických materiálů; financován IGA AF MENDELU.

8. Literatura

- [1] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. str. 406. ISBN 80-730-0158-6.
- [2] MILLER, R. K., HILL, Eric v. K and MOORE, P. O. *Acoustic emission testing*. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005. p. 446. Vol. 3rd. ISBN 15-711-7106-1.
- [3] SCHINNER, G. – BRANDT, J. – RICHTER, H.: Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1996, vol. 9, no. 3, s. 239-245. ISSN 1530-7980.
- [4] *Composite Materials Handbook – Volume 1. Polymer Matrix Composites, Guidelines for Characterization of Structural Materials* [online]. Fort Washington, Department of Defense, 2002. 586 s. URL: <<http://www.acm-nevada.com/Technical/HDBK17-1F.pdf>>
- [5] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha, Nakl. Scientia, 2009. 352 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] ZAČAL JAROSLAV, DOSTÁL PETR, ŠUSTR MICHAL, DOBROCKÝ DAVID. 2016. Monitoring of Changes Signal Acoustic Emission Signals Using Waveguides. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(4): 0000–0000.
- [7] ZAČAL JAROSLAV, DOSTÁL PETR, ŠUSTR MICHAL, DOBROCKÝ DAVID. 2017. Acoustic Emission During Tensile Testing of Composite Materials. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(4): 0000–0000.
- [8] ČSN EN 2562 (317712) (1999) Letectví a kosmonautika - Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny - Jednosměrné kompozity - Zkouška ohybem ve směru vláken



VYUŽITÍ 3D PROFILOMETRIE V ENERGETICE

USING 3D PROFILEMETRY IN POWER ENGINEERING

Pavel ZAHŘÁDKA*, Vlastimil HABRCETL*, Jan PATERA*

*Centrum Výzkumu Řež, s.r.o.

Abstrakt

3D skenování patří mezi dynamicky se rozvíjející obory, které nacházejí využití v čím dál širším spektru technologických odvětví. Přináší zcela nové možnosti pro rozměrovou kontrolu komponent a nabízí komplexní možnosti hodnocení jejich kvality. V současné době je vývoj 3D skenerů směřován zvláště pro aplikace v automobilovém průmyslu a skenování se začíná prosazovat i v oblasti energetiky. Na trhu jsou k dostání různé typy skenerů, nejlepší kombinace přesnosti a variability pro použití v energetice se podařilo dosáhnout s laserovým ramenovým skenerem. Při skenování se uplatňuje zejména přechod od bodového měření k integrálnímu plošnému a objevují se i zcela nové nestandardní aplikace. Dostatečně vysoká přesnost skenerů a nástroje post-processingu umožňují hodnotit povrchové vady materiálu a 3D skenování je tak možno zařadit mezi doplňkové NDT metody. Tento příspěvek se převážně věnuje použití laserového ramenového skeneru v energetice a dalším speciálním aplikacím.

Klíčová slova: 3D skenování, důlková koroze, tečení materiálu, kavitace

Abstract

3D scanning is one of the dynamically evolving industries that find use in a wide scope of technology branches. It offers new possibilities for dimensional examination of components and offers comprehensive possibilities for evaluation of their quality. Currently, the development of 3D scanners is focused especially on automotive industry applications and 3D scanning is becoming increasingly used in the power industry. Different types of scanners are available on the market, and the best combination of precision and variability for the energetics use has been achieved with the laser arm scanner. In particular, transition from the point measurement to the integral surface scanning takes place. New non-standard applications also appear. Sufficiently high accuracy of scanners and use of post-processing tools make it possible to evaluate surface defects of material, and 3D scanning can thus be classified as an additional NDT method. This paper is mainly addressed to the use of a laser arm scanner in power engineering and to other special applications.

Key words: 3D scan, pitting, creep, cavitation

1. Úvod

Technologie 3D skenování v současnosti zažívá nebývalý rozmach, neboť díky neustále se zvyšující přesnosti skenerů nachází uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Tradičně nejpoužívanější je tato technologie v automobilovém průmyslu, avšak začíná se prosazovat i v oblastech jako např. textilní průmysl, kde po naskenování povrchu lidského těla software generuje střihy přesně podle typu postavy, v zemědělství, kde 3D skener navádí automatickou odsávačku mléka, archeologie, kde se roboticky skenují celé komplexy chodeb v pyramidách, ve stavebnictví, kde je běžné skenování domů, mostů, historických objektů i celých měst statickými skenery, skenery na dronech či případně větší laserové skenery na letadle.

3D skenování v oblasti energetiky tvoří několik specifických aplikací, s unikátním způsobem měření a hodnocení. NDT laboratoř společnosti CVŘ s.r.o. se zaměřuje mj. na služby veřejného výzkumu spojené s prodlužováním životnosti komponent jaderných, klasických a vodních elektráren, které zahrnují zejména defektoskopické kontroly, hodnocení stavu povrchu, opotřebení, a monitorování rozvoje nejen korozních defektů, kde 3D skenování nabízí nové možnosti hodnocení zbytkové životnosti technologií a predikci rozvoje stavu při dalším provozu.

2. Metody 3D skenování

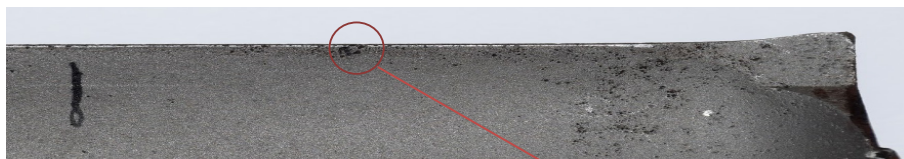
V rámci projektu se společností ČEZ a.s. s využitím informací z EPRI jsme testovali většinu typů skenerů s ohledem na přesnost zařízení a jeho použitelnost za geometrických omezení, plynoucích z provozních podmínek [1]. Jako nejuniverzálnější jsme zvolili velmi přesný ramenný skener s integrovaným laserovým skenerem RS4, který snímá až 752 000 bodů za sekundu s přesností stanovení bodů 28 μm . Díky 7 kloubům je velmi variabilní a umožňuje měření i velmi malých prostorů. Pomocí několika speciálních stativů, vyrobených v CVŘ s.r.o., je možné jej upnout i na tvarově složité plochy feromagnetických materiálů. V provozu jsou skenované díly často zabudovány v technologii a není možné je vymontovat nebo je umístit na nehybnou plochu. Měření probíhá většinou z lešení nebo ve stísněných prostorech bez jakéhokoliv pevného bodu, které naprostá většina skenerů vyžaduje. Pro každou takovou úlohu proto máme k dispozici speciální přípravek.



Obr. 1 Ramenný laserový skener
Fig. 1 Laser arm scanner

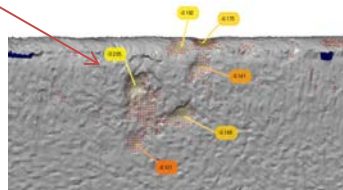
Pro některé aplikace používáme optický skener, který má horší skenovací parametry než ramenný skener. Snímá 210 000 bodů za sekundu s přesností stanovení bodů 50 μm a vyžaduje neustálý vizuální kontakt mezi trackerem a skenerem v prostoru cca 2 m^3 . Jeho výhodou je možnost skenovat nestabilní objekty pomocí infradiod připevněných na měřeném objektu. Tracker je tak schopný detekovat pohyb objektu způsobený např. vibracemi a posun okamžitě kompenzovat automatizovaným dopočtem souřadnic.

Velmi dobrých výsledků se podařilo dosáhnout v projektu zaměřeném na detekci korozních důlků na lopatkách nízkotlakých 200MW rotorů na klasických elektrárnách. Ve spolupráci s Výzkumným a zkušebním ústavem Plzeň s.r.o. jsme kvalifikovali metodu měření hloubky korozních důlků ramenným skenerem a vytvořili metodiku pro monitorování stavu lopatek a jejich vývoje s dobou provozování [2]. Cílem těchto měření je identifikace lopatek postižených tímto degradačním mechanismem v dostatečném časovém předstihu a další monitorování těchto míst, případně je možno doporučit výměnu a minimalizovat tak nežádoucí finanční ztráty vlivem havárie a neúměrného prodlužování odstávek.



Obr. 2 Fotografie lopatky s korozními důlky
Fig. 2 Photo of a blade with corrosion pitting

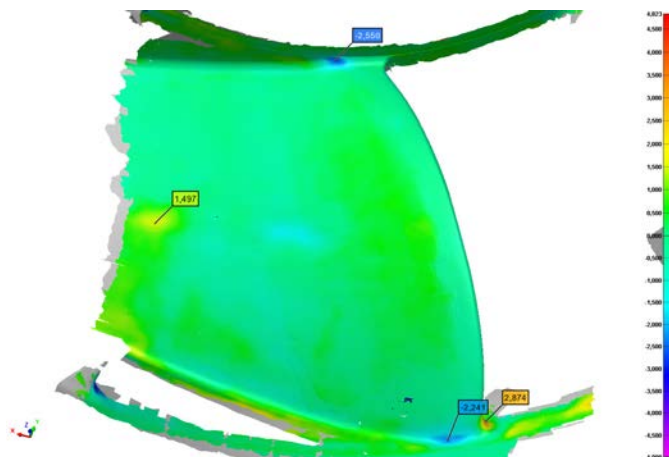
Pomocí 3D měření jsme schopni stanovit hloubku důlků, pokud přesahuje 50 μm , změřit jejich šířku a přesnou pozici na lopatce. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. pak na základě naskenovaných dat hodnotí kritičnost jednotlivých důlků podle napěťové analýzy lopatek [3].



Obr. 3 Sken korozních důlků
Fig. 3 Scan of corrosion pitting

Na projekt monitorování důlkové koroze navázal další výzkumný projekt CVŘ s.r.o. zabývající se skenováním lopat oběžných kol na vodních elektrárnách. Projekt byl zaměřen na hodnocení kavitací na lopatkách Francisovy turbíny a sledování úbytků v kritických místech oběžného kola [4]. Na rozdíl od klasických elektráren nemá odstavení vodní turbíny zásadní dopad na celkovou životnost lopat kvůli rozdílným degradačním mechanismům. Rozvoj degradačních procesů na lopatkách vodních turbín je tak možné sledovat v každoročních pravidelných odstávkách a podnikat včas opravy či jiná opatření. Při velkých úbytcích materiálu na lopatkách je možné navařit materiál a dosáhnout tak původního tvaru dle CAD modelu nebo skenu nulového stavu

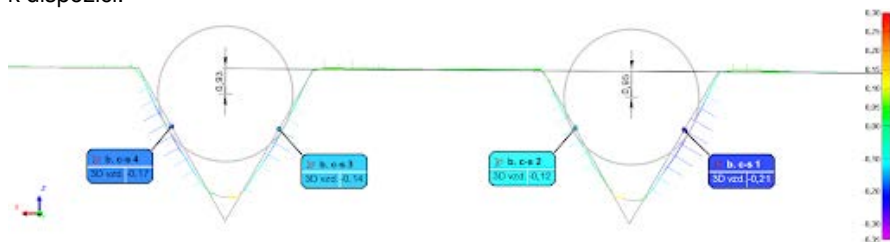
získaném skenováním před prvním spuštěním. Pro zjednodušení práce svářeče je možné vytvořit tvarovou šablonu na 3D tiskárně.



Obr. 4 Odchylky na lopatě Francisovy turbíny od ideálního tvaru
Fig. 4 Deviations on the Francis turbine blade from the ideal shape

Oproti klasickým elektrárnám jsou v jaderné energetice kladeny obecně daleko větší požadavky na bezpečnost personálu i technologií. Kromě špatné přístupnosti a komplikovaného uchycení skeneru je zde navíc faktor radiace, který omezuje čas na provádění kontrol a všeobecná možnost kontaminace jak lidí, tak technologií.

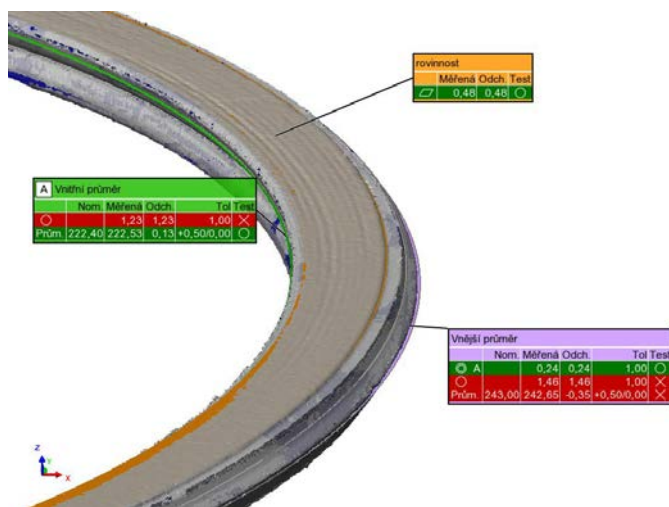
Na JE Temelín bylo ramenovým skenerem prováděno měření drážek těsnění hlavní dělící roviny a víka reaktoru [5]. Na hlavním výrobním bloku č. 2 bylo měření provedeno letos podruhé a bylo tak možné sledovat vývoj otlaků po jednom roce provozu. Vyhodnocení probíhalo ve 27 řezech kolmých na drážku těsnění, kde je možné měřit odchylky od ideálního CAD modelu nebo proti datům z poslední odstávky, pokud jsou k dispozici.



Obr. 5 Řez drážkou hlavní dělící roviny
Fig. 5 Cross-section of the groove of the main dividing plane

Výhodou této metody je, že na rozdíl od současné bodové metody měření (kuličkou s úchylkoměrem) lze monitorovat celý profil drážky a zkoumat, kde přesně dochází k deformacím. Vyhodnocení dat z 3D skenování je díky sklonu, který svírají stěny drážek s hlavní dělicí rovinou, zatíženo 2× menší chybou zarovnání dělicí roviny než ruční měření. Při 3D měření je navíc získána informace o případných defektech po celé hlavní dělicí rovině, jejichž pozici a rozměry lze přesně odměřit.

Mezi další úlohy vhodné pro 3D měření patří hodnocení geometrie nově vyrobených komponent a jejich shody s výrobní dokumentací, dodržení tolerancí zásadních pro funkci zařízení a dodržení bezpečnosti jaderných zařízení. Kontrola geometrických tolerancí je často obtížná pro ruční měření mikrometry. Takto bylo měřeno dodané grafitové těsnění pro kompenzátor objemu JE Temelín s cílem zjistit, zda odpovídá požadavkům zákazníka na kruhovitost a rovinnost. Na základě reportu z 3D měření bylo možné komponenty reklamovat. Navíc skenování již použitých těsnění pomohlo podle stupně deformace odhalit nerovnosti stykových ploch, které samotné nelze skenovat [6].



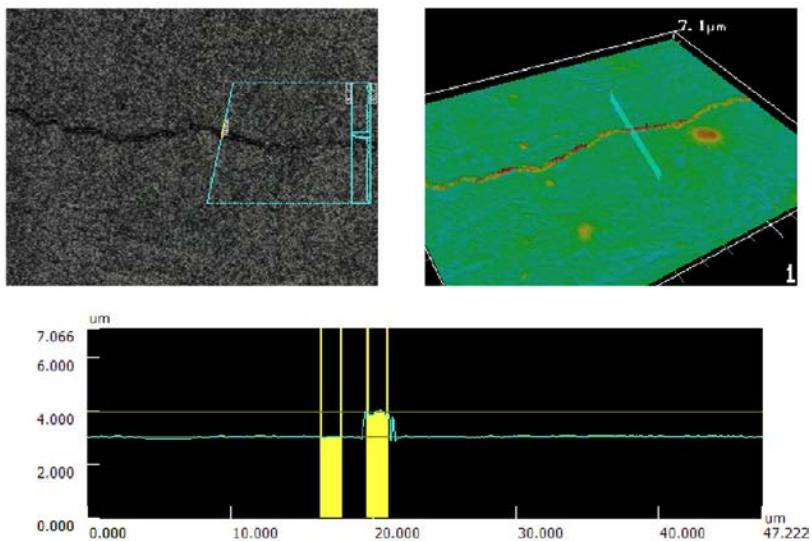
Obr. 6 Grafitové těsnění

Fig. 6 Graphite seal

Skenery dokáží zastat vizuální kontroly v místech, kam se člověk nedostane z důvodu vysoké radiace nebo nepřístupnosti. Pro měření malých defektů v nepřístupných místech používáme videoskop s možností 3D měření. Pomocí sond o průměru 6 mm a délce 3 m nebo 6 m je možné se dostat do velmi malých prostor, kde kromě klasické vizuální kontroly lze měřit rozměry a hloubku defektů.

Tento přístup nachází využití v bazénu vyhořelého paliva na reaktoru LVR-15 v Řeži, kde je nutné sledovat svary hliníkových plechů stínění na stěnách a stav armatur uvnitř bazénu. Za standardních podmínek je kontrola prováděna jednou za 5 let pomocí replikace povrchu, kdy je z bazénu vypuštěna voda. Pomocí videoskopu s 3D skenerem je možné provádět kontrolu každý rok a získat lepší přehled o stavu technologie. V tomto případě byla zkoumána i dávka, kterou je schopen kamerový systém vydržet. Maximální únosná dávka je omezena na 3 Gy a při vyšších dávkách dochází k již velmi výraznému zrnění obrazu, kdy už hodnocení není možné a dále k nevratnému poškození kamery.

Na závěr zmiňme použití optického profiloměru VKX 100 na principu laseru v kombinaci s optickými objektivy, určenými pro měření hloubkových profilů, lineární a plošné drsnosti. Profiloměr je vybaven motorizovaným stolkem a umožňuje skládání více snímků, čímž lze získat profil většího vzorku v detailním rozlišení. Tento profiloměr dosahuje přesnosti 5 nm, ale v praxi se dá využít pouze pro vzorky, které se vejdou pod mikroskop. V kombinaci s replikami povrchu lze ovšem kontrolovat i detaily velkých komponent. Replika dokáže přenést strukturu povrchu materiálu s přesností 0,1 μm , což přináší velmi detailní možnosti zkoumání různých typů defektů typu trhlin, korozních důlků nebo tvarových odchylek.



Obr. 7 Měření hloubky trhliny na replice
 Fig. 7 Depth measurement of a crack on the surface replica

3. Závěr

3D skenery jsou velkým přínosem pro energetiku, především pro hodnocení bezpečnosti komponent elektráren. Je pravděpodobné, že si v budoucnu získají ještě silnější pozici a časem najdou právoplatné místo i v rámci nedestruktivního testování. Nejdříve však bude nutné tuto metodu normalizovat jako ostatní defektoskopické metody.

Prezentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

Literatura

- [1] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., HABRCETL, V. *Monitoring korozních důlků: Srovnání možností dostupných metod pro detekci a monitorování korozních důlků*. CVŘ PL-1148/0. Plzeň 2015.
- [2] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., MATĚJÍČEK, J., HABRCETL, V. *Inspekční postup měření důlkové koroze na oběžných lopatkách*. CVŘ PL-1838/1. Plzeň 2017.
- [3] KASL, J., MATĚJOVÁ, M., MRŠTÍK, J. Failure of a Rotating Blade of a 200 MW Steam Turbine LP Rotor and Options for Eliminating other Similar Breakdowns. *Solid State Phenomena*, roč. 270, s. 174–182.
- [4] ZAHŘÁDKA, P., PATERA, J. *Protokol z měření lopat TG1 vodní elektrárny Dlouhé stráně*. CVŘ PL-1725/1. Plzeň 2017.
- [5] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., MATĚJÍČEK, J. *3D skenování hlavní dělicí roviny a víka tlakové nádoby HVB 2*. CVŘ PL-2074/0. Plzeň 2018.
- [6] MATĚJÍČEK, J., ZAHŘÁDKA, P. *Protokol z měření těsnění DR HPV KO poz. 13 ventilu JE Temelín*. CVŘ PL-1967/0. Plzeň 2018.



MOŽNOSTI DETEKCE TEPELNĚ INDUKOVANÝCH STRUKTURNÍCH ZMĚN KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ SONDAMI PHASED ARRAY

OPTIONS FOR DETECTION OF THERMALLY-INDUCED STRUCTURAL CHANGES OF STRUCTURAL STEEL BY PHASED ARRAY PROBES

Tomáš ZAVADIL^{1,2}, Petr ŽBÁNEK¹, Marie MOŘKOVSKÁ³

1) ATG s.r.o., Toužimská 771, Praha 9

2) ČVUT v Praze, Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská, Katedra materiálů

3) VŠB v Ostravě, Fakulta Strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování

Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt:

Tepelně indukované strukturní změny (během výroby či během provozu) jsou úzce spjaty se změnou rozložení napětí, které jsou dobře měřitelné konvenčními technikami UT. Použití konvenčních sond však naráží na určitá omezení, která uživateli komplikují práci především ve špatně přístupných místech, např. při inspekcích na tlakových zařízeních. Tento článek si klade za cíl analyzovat možnost nahrazení konvenčních sond sondami Phased Array, srovnává citlivost měření oběma typy sond a dává do vztahu s efektivitou využití při reálných aplikacích.

Klíčová slova: phased array, ultrazvukové zkoušení, creep, zbytkové napětí

Abstract:

Thermally induced structural changes (during production as well as during operation) are closely related to change of stress distribution that is well measurable by conventional UT techniques. Conventional UT probes have some limitations that complicate the work for the operator, especially in difficult-to-access areas, e.g. inspections on pressure equipment. The goal of this article is to analyze the option to replace the conventional probes with Phased Array probes and compares the measurement sensitivity between both types of probes in relation to usability during real applications.

Keywords: phased array, ultrasonic testing, creep, residual stress

1. ÚVOD

Tepelně indukované změny struktury materiálu, jako je (ve výrobním procesu) řízené tepelné zpracování, dokáže efektivně přizpůsobit vlastnosti materiálu zamýšlenému využití při provozování dané součásti. Provozování průmyslových zařízení za vysokých teplot může na základě stejných principů, ale za mnohem delší doby trvání, vlastnosti daných materiálů změnit v neprospěch jejich využití.

Tečení je jedním z hlavních degradačních procesů odpovědných za kolaps lakových zařízení provozovaných za vysokých teplot. Tečení je spojeno se synergickým efektem změn mikrostruktury a akumulace deformace, které vedou k nukleaci, růstu a kolaescenci mikroductin vedoucí k následnému kolapsu zařízení. Prodlužování technického života složitých technických celků je klíčové pro zařízení provozovaná za vysokých teplot. Očekávaná doba životnosti je dána schopností materiálu uchovat svoji mez pevnosti při tečení po dobu minimálně dvojnásobku navrhované životnosti zařízení. Vývoj nových metod, které budou schopny ověřit stav materiálu je proto nezbytný [1].

Různé nové techniky NDT byly vyvinuty pro detekci tečení, počínaje akustickou emisí, přes termografii, měření rychlosti šíření ultrazvukových vln či útlumu, až po vířivé proudy [2,3]. Akusto-elastické a akusto-plastické efekty reagují na napětí v elasticky deformovaném tělese a na zbytkové pnutí vyvolané makroskopickou deformací. Vzhledem k tomu, že většina zbytkového pnutí je způsobena plastickou deformací a tečení je dlouhodobá plastická deformace vyvolaná v důsledku souběžného působení vysokých teplot a tlaků, akustická měření zbytkového pnutí jsou vhodnými kandidáty pro zamýšlenou aplikaci detekce tečení.

Pro určení stavu zařízení je v tomto případě potřeba měřit velikost vnitřního pnutí přímo, nebo využít možnosti srovnání potenciálně degradované součásti s referenčními hodnotami neovlivněného materiálu. Výzkum firmy ATG se zabývá druhou z uvedených možností. V následujících kapitolách budou shrnuty dosavadní poznatky z předchozích prací a diskutována možnost použití moderních technik jako je Phased Array pro přesnější a efektivnější sběr dat.

2. SHRUTÍ DOSAVADNÍCH POZNATKŮ VÝZKUMU VE SPOLEČNOSTI ATG

Jak popisuje Obrázek [4], rychlost šíření ultrazvukových vln je funkcí napětí σ . Příklad pro prosté jednoosé namáhání zkušební tyče v tahu závislost napětí lze popsat následovně:

$$\sigma = \frac{\delta t - (\beta_T + \alpha_T)\Delta T}{\beta_\sigma + \frac{1}{\varepsilon}} \quad (1)$$

kde $\delta t = \Delta t/t_0$ je poměrná změna času průchodu ultrazvukových vln materiálem (TOF), α_T a β_T jsou koeficienty teplotní roztažnosti, ΔT je změna teploty, β_σ je akustoelastický koeficient a ε je poměrné prodloužení.

Pokud předpokládáme $\Delta T \rightarrow 0$ (tj. změna teploty je zanedbatelná), vztah lze zjednodušit na:

$$\sigma = \frac{\delta t}{\beta_\sigma + \frac{1}{\varepsilon}} \quad (2)$$

V tomto případě lze využít TOF jak podélných, tak příčných vln. Pokud se tyto hodnoty dají do poměru, vztah lze dale převést na:

$$\sigma = \frac{\frac{t_{0T}}{t_{0L}} - \frac{t_T}{t_L}}{\left(\beta_{\sigma L} + \frac{1}{\varepsilon}\right) \left[\frac{t_{0T}}{t_{0L}} + \frac{t_T}{t_L}\right]} \quad (3)$$

kde t_{0T}/t_{0L} je poměr TOF zkoušené součásti před zatížením a t_T/t_L po zatížení.

Tento vztah nicméně lze velmi špatně využít během inspekci na průmyslových zařízeních, protože:

- 1) Původní nezatížený stav zařízení není dostupný k porovnání.
- 2) Poměrné prodloužení ε nemůže být vypočteno, protože nejsou známy přesné rozměry zařízení v době inspekce.
- 3) Napětí na součásti provozovaného zařízení je víceosé, nikoliv jednoosé (zvláště když uvažujeme vliv procesu tečení).

To znamená, že navzdory tomu, že dochází k poměrné změně TOF v důsledku dodaného vnitřního prnutí, tento stav nemůže být během průmyslových jednoduše měřen přímo. Z toho vyplývá, že přesné měření napětí σ nemůže být použito a je třeba využít srovnávací měření se sérií referenčních vzorků.

Budeme-li předpokládat, že objem zkoušené části dané součásti má izotropní chování, lze využít skutečnosti, že vztahy pro rychlost šíření podélných a příčných vln lze napsat v jejich zjednodušené formě, a to:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (4)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}}$$

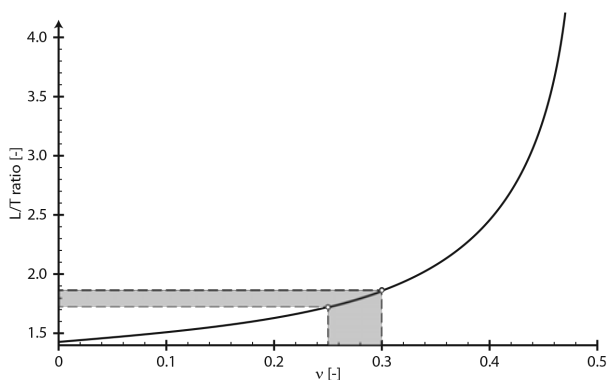
kde E je Youngův modul, G je smykový modul ρ je hustota a ν je Poissonovo číslo.

Je známo, že rychlost šíření podélných vln c_L roste s rostoucím napětím v oblasti elastických deformací, zatímco rychlost šíření příčných vln klesá. Jak prokázal experimentálně tým z Det Norske Veritas [5], růst rychlosti šíření podélných vln je omezeno dosažením určité kritické hodnoty deformace a poté začne opět docházet k poklesu. Stejného poznatku docílil i Kobayashi o příčných vlnách [6]. Toto chování je důsledkem anizotropie v elastických vlastnostech a nehomogenním rozložení plastické deformace. To může zahrnovat vznik bodových poruch a skluzových rovin odpovědných za degradaci Youngova modulu [7,8].

Této skutečnosti lze s výhodou využít, když uvedené rychlosti budou dány do poměru c_L/c_T (také poměr L/T , bezrozměrná veličina). Situace se pak zjednoduší na rovnici o jedné neznámé (Poissonovo číslo) s monotónně rostoucí charakteristikou:

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \sqrt{\frac{\rho}{G}} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} = f(\nu) \quad (5)$$

To může pomoci určit současný stav napjatosti nepřímo, jak uvádí Kumar et al. [7] ve své práci o závislosti rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln na Poissonově čísle. Youngův a smykový modul mají tendenci se měnit ve stejném směru pro většinu běžných materiálů. Proto změna Poissonova čísla je závislá pouze na tom, do jaké míry bude každý modul ovlivněn. Pro izotropní pevné látky lze rozsah hodnot Poissonova čísla omezit na $0 < \nu < 0.5$ [8]. Čím větší je hodnota, tím menší změna objemu nastává během deformace (pro $\nu = 0.5$ nedochází k žádné změně). Graf vztahu (7) je znázorněn na Obr. 1. Pro Poissonovo číslo $\nu = 0.25 \div 0.30$, běžné pro konvenční konstrukční oceli, je znázorněna odpovídající očekávaná hodnota poměru L/T , tj. $c_L/c_T = 1.73 \div 1.87$.



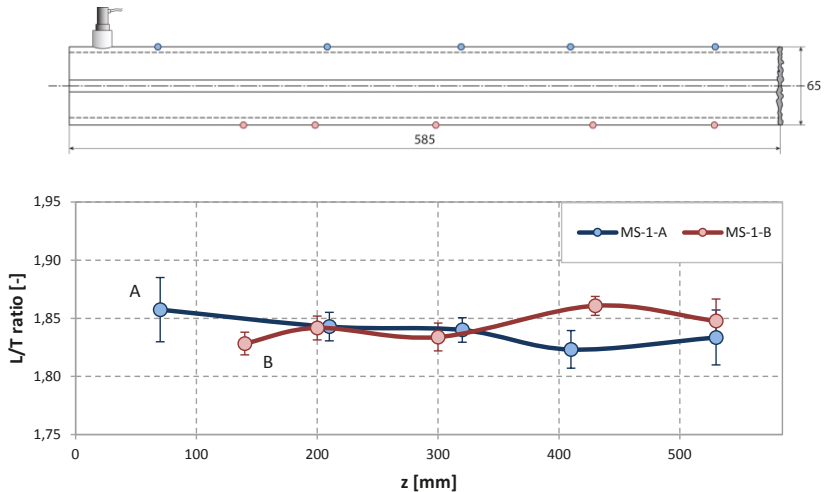
Obr. 1: c_L/c_T jako funkce Poissonova čísla ν pro izotropní kontinuum. Oblast hodnot typická pro konstrukční oceli ($\nu = 0.25 \div 0.30$) vyznačuje adekvátní rozsah $c_L/c_T = 1.73 \div 1.87$ [9].

Jak prokázal Zavdil [9] ve své práci při měření poměru L/T na laboratorních vzorcích 3 typů oceli třídy 12 (12021 / C16E, 12040 / C35 a 12060 / C55) tepelně zpracovaných za různých teplot kalení a popouštění, střední hodnota poměru L/T se drží v intervalu naznačeném na Obr. 1 a tyto hodnoty jsou na neovlivněném materiálu dobře měřitelné, jak uvádí Tab. 1 (viz určená směrodatná odchylka měření).

V další své práci [10] Zavdil ověřil, že uvedené hodnoty naměřené na laboratorních vzorcích odpovídají s malými odchylkami i stavu reálného materiálu po dlouhodobém provozování v oblastech, kde nedocházelo k makroskopické deformaci (libovolnou formou, tj. bez deformace mechanické či v důsledku degradačních procesů jako je tečení). Na těchto vzorcích bylo prokázáno i to, že dlouhodobé tepelné zatížení bez degradace tečením vedou (v předpokládaném důsledku zotavení struktury) ke snížení poměru L/T . Oba tyto předpoklady jsou uvedeny na Obr. 2.

Tab. 1 Naměřené střední hodnoty poměru L/T a směrodatné odchylky pro různé oceli třídy 12 měřené na vzorcích tepelně zpracovaných při teplotách kalení 850 °C a 950 °C a teplotách popouštění 400 °C, 500 °C, 600 °C a 700 °C. Poslední sloupeček udává očekávaný rozsah hodnot poměru L/T pro různé oceli třídy 12 na základě provedených měření v práci [9].

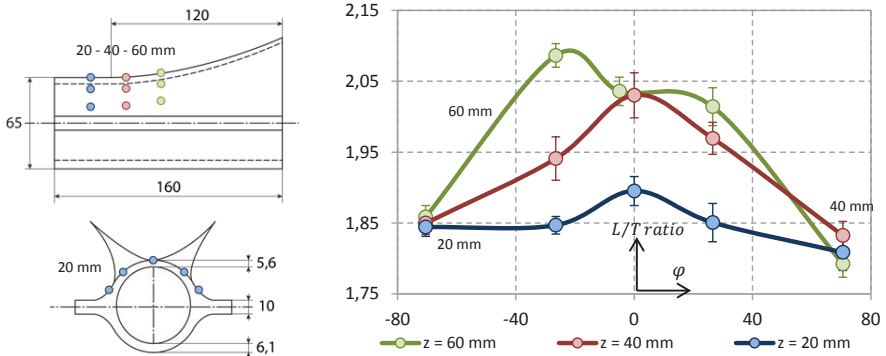
Typ oceli	Střední hodnota $\langle c_L/c_T \rangle$	Směrodatná odchylka $s_{L/T}$	Očekávaný rozsah $\langle c_L/c_T \rangle \pm 3 \cdot s_{L/T}$
12020 / C16E (ČSN 412020)	1.818	0.003	1.809 ÷ 1.827
12040 / C35 (ČSN 412040)	1.820	0.003	1.811 ÷ 1.829
12060 / C55 (ČSN 412060)	1.823	0.005	1.808 ÷ 1.838



Obr. 2: Naměřené hodnoty poměru L/T na neovlivněné části membránové stěny z oceli P265GH zkolabované v důsledku tečení (● otápěná strana A, ● neotápěná strana B). Spojnice bodů nerepresentují žádnou závislost, slouží k pouhé lepší orientaci.

Ve stejné práci [10] Zavadiš také prokázal, že část zařízení, kde došlo k vzniku makroskopické trhliny v důsledku koalescence mikrodutin během procesu tečení vykazuje hodnoty poměru L/T výrazně vyšší, než hodnoty uvedené na Obr. 2, resp. Tab. 1. Měření probíhalo na materiálu P265GH, který je složením blízké oceli 12020 z práce [9]. Hodnoty poměru L/T rostly od nominální hodnoty pro neovlivněný materiál 1.820 ± 0.027 až po své maximum na čele trhliny 2.080 ± 0.047 , viz Obr. 3. Pro laboratorní vzorky z článku [9] představující referenční hodnotu

materiálu vyšlo měření neovlivněného materiálu v toleranci uvedené v Tab. 1, zatímco hodnoty na degradovaném materiálu u čela trhliny střední hodnotu pro laboratorní materiál přesahovaly o 67s [9], což znamená, že poměr L/T degradované struktury je na principu srovnávacího měření zcela jednoznačně měřitelný.



Obř. 3: Vzorek zkolabovaný v důsledku coalescence mikrodotin během tečení s naměřenými hodnotami poměru L/T v rovinách R1 (modrá), R2 (červená) and R3 (zelená). Spojnice bodů nereprezentují žádnou závislost, slouží k pouhé lepší orientaci.

3. POUŽITÍ PHASED ARRAY SOND PRO MĚŘENÍ POMĚRU L/T

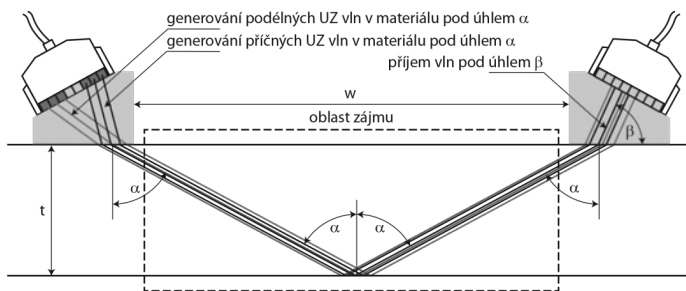
Hlavní komplikací předchozích měření byla potřeba použití dvou konvenčních přímých sond, jedné pro podélné ultrazvukové vlny a druhé pro příčné ultrazvukové vlny, pro měření poměru L/T. Požadavkem v takovém případě je, aby se obě dvě vlny šířily po stejné dráze (tj. stejně dlouhé a skrz stejnou oblast). Pokud zanedbáme vliv změny struktury v důsledku špatného umístění, je třeba zajistit, aby dráhy byly minimálně stejně dlouhé.

V případě, kdy dráhy pro podélné a příčné vlny nejsou stejné, musí být vztah (5) doplněn o korekční faktor (inverzní poměr obou drah). Vzhledem k obecně neznámé tloušťce zkoušené provozované součásti a neznámému stavu vnitřního povrchu je možné, že nepřesné umístění obou sond povede k nejednotné dráze každé z nich. Neboť rozdíl drah není konstantní, záleží na umístění jednotlivých sond na daný materiál a stavu povrchu na zadní stěně i z hlediska mikroobjemu, je možné, že vztah (5) nebude možno spolehlivě využít bez značných časových ztrát nutných pro kompenzaci této nepřesnosti.

Je proto žádoucí nalézt vhodný způsob, umožňující měření poměru L/T takovým způsobem, aby se oba typy vlnění šířily přes zkoumanou oblast zájmu po stejné dráze, nebo po drahách, které od sebe nejsou výrazně vzdáleny a jejichž rozdíl je konstantní. Následující část tohoto článku se proto zabývá experimentálním ověřením použití vhodné buzených sond Phased Array s předšádkou za účelem měření poměru L/T.

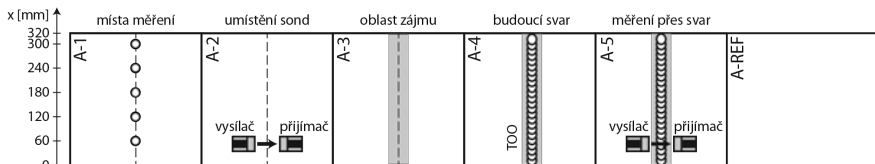
4. NÁVRH EXPERIMENTU

Pro experiment byl použit přístroj Sonatest VEO+, sonda: T1-PE-5.0M32E0.8P - 5 MHz, 32 měničů, 0,8 mm rozteč měničů, předsádka: D1AW-N57S a PA-Splitter- IX64 to IX32:32. Přístroj byl nastavený tak, aby generoval dva různé typy skenů, oba v režimu P&C - pitch-catch (průchodová technika). První nastavení používá k vysílání aperturu 4 měničů nastavených tak, aby v materiálu vznikla podélná vlna. Použití pouze 4 měničů zajistí velké rozevření svazku a tak se materiálem šíří jak vlna laterální (pro náš účel nepoužitelná), tak vlna, které se odráží od zadní stěny - princip TOFD. Druhé nastavení využívá jinou skupinu opět 4 měničů tak, aby se v materiálu šířila příčná vlna. Jednotlivé skupiny měničů jsou svojí polohou voleny tak, aby bod výstupu vysílající předsádky a bod vstupu přijímající předsádky byl pro oba typy vlny pokud možno stejný. Výstupem jsou dva signály procházející po stejných drahách, pouze jeden pro podélnou vlnu a druhý pro příčnou vlnu, viz Obr. 4. Měřena byla doba průchodu koncových ech (odražených od zadní strany vzorku). Použití principu techniky TOFD má zajistit částečnou netečnost nastavení vůči změnám rychlosti, kterou by čistě technikou PA nemohla dosáhnout.



Obr. 4 Princip měření pomocí sond Phased Array při konstantním w .

Měření probíhalo na vzorcích z 3 typů oceli: P265GH, C45 a 54SiCr6 o tloušťce $t = 15 \text{ mm}$. Každá ocel byla zastoupena 5 vzorky $320 \times 320 \text{ mm}$, na každém vzorku bylo provedeno 5 měření podél podélné osy x vzorku vzájemně vzdálených o 60 mm , dle Obr. 5. Je předpoklad, že v těchto místech v budoucích experimentech bude proveden řez a vzorky opětovně svařeny s různými hlavními svařovacími parametry za účelem docílení různé tepelně ovlivněné oblasti a tím i různé vnitřní struktury a zbytkového napětí pro další měření. Výsledky experimentu v tomto článku budou poté sloužit jako referenční hodnoty neovlivněného materiálu.



Obr. 5 Princip měření pomocí sond Phased Array, místa měření, rozložení sond, návrh budoucího svařového spoje.

Měřena byla doba TOF jednotlivých typů vln (t_L , t_T) s přesností měření na setiny μs . Ověřována byla přesnost měření pomocí daného uspořádání ve srovnání s konvenčním ultrazvukem diskutovaným v kapitole 2.

5. VÝSLEDKY

Měření při zachování konstantní vzájemné vzdálenosti mezi předsádkami

Vzdálenost mezi předsádkami byla konstantní $w = 55\text{mm}$, hloubka fokusace $h = 10\text{mm}$, tloušťka vzorků $t = 15\text{mm}$, úhel šíření vlnění v materiálu $\alpha = 77,5^\circ$ byl určen na základě maximálního echa. Data t_L , t_T byla měřena s přesností na $0.01\ \mu\text{s}$ a dána do inverzního poměru.

Tab. 2 Data oceli P265GH ve směru válcování y a kolmo na směr válcování x (budoucí osa svaru). Ocel P265GH vykazovala hodnoty P265GH poměru L/T v rozsahu $c_L/c_T = 1.8055 \pm 0,0012$. Směrodatná odchylka $s = 0.067\ \%$. Ocel nevykazovala žádný trend hodnot v ose válcování y ani v ose kolmé x.

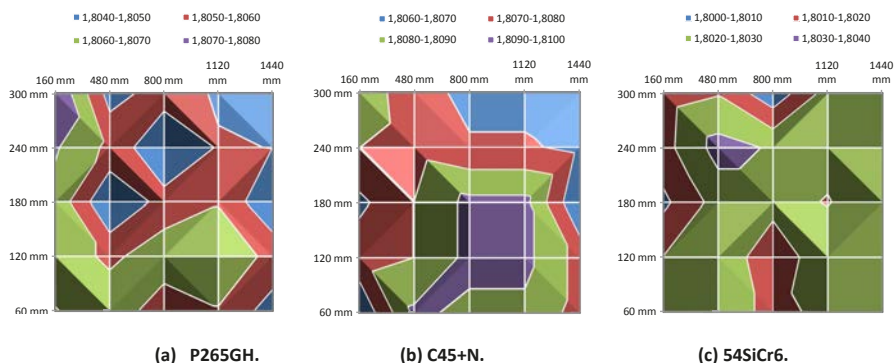
P265GH	x/y	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	< c_L/c_T >	$s_{L/T}$
		160 mm	480 mm	800 mm	1120 mm	1440 mm		
	60 mm	1,8059	1,8067	1,8054	1,8059	1,8045	1,8057	0,0007
	120 mm	1,8067	1,8058	1,8066	1,8066	1,8058	1,8063	0,0004
	180 mm	1,8067	1,8019	1,8054	1,8059	1,8040	1,8048	0,0017
	240 mm	1,8071	1,8058	1,8040	1,8051	1,8050	1,8054	0,0010
	300 mm	1,8080	1,8046	1,8055	1,8049	1,8046	1,8055	0,0013
	< c_L/c_T >	1,8069	1,8049	1,8054	1,8057	1,8048	1,8055	-
	$s_{L/T}$	0,0007	0,0017	0,0008	0,0006	0,0006	-	0,0012

Tab. 3 Data oceli C45+N ve směru válcování y a kolmo na směr válcování x (budoucí osa svaru). Ocel C45+N vykazovala hodnoty P265GH poměru L/T v rozsahu $c_L/c_T = 1.8077 \pm 0,0011$. Směrodatná odchylka $s = 0.058\ \%$. Ocel nevykazovala žádný trend hodnot v ose válcování y ani v ose kolmé x.

C45+N	x/y	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	< c_L/c_T >	$s_{L/T}$
		160 mm	480 mm	800 mm	1120 mm	1440 mm		
	60 mm	1,8061	1,8092	1,8088	1,8088	1,8076	1,8081	0,0011
	120 mm	1,8076	1,8080	1,8093	1,8093	1,8076	1,8084	0,0008
	180 mm	1,8067	1,8080	1,8093	1,8093	1,8059	1,8078	0,0014
	240 mm	1,8080	1,8076	1,8071	1,8071	1,8067	1,8073	0,0004
	300 mm	1,8085	1,8075	1,8067	1,8067	1,8064	1,8071	0,0008
	< c_L/c_T >	1,8074	1,8081	1,8082	1,8082	1,8068	1,8077	-
	s	0,0009	0,0006	0,0011	0,0011	0,0007	-	0,0011

Tab. 4 Data oceli 54SiCr6 ve směru válcování y a kolmo na směr válcování x (budoucí osa svaru). Ocel P265GH vykazovala hodnoty P265GH poměru L/T v rozsahu $c_L/c_T = 1.8022 \pm 0,0007$. Směrodatná odchylka $s = 0.040\ \%$. Ocel nevykazovala žádný trend hodnot v ose válcování y ani v ose kolmé x.

54SiCr6	x/y	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	< c_L/c_T >	$s_{L/T}$
		160 mm	480 mm	800 mm	1120 mm	1440 mm		
	60 mm	1,8020	1,8029	1,8015	1,8024	1,8020	1,8022	0,0005
	120 mm	1,8020	1,8029	1,8012	1,8029	1,8025	1,8023	0,0007
	180 mm	1,8008	1,8024	1,8024	1,8019	1,8029	1,8021	0,0007
	240 mm	1,8016	1,8034	1,8029	1,8024	1,8024	1,8025	0,0006
	300 mm	1,8015	1,8019	1,8003	1,8024	1,8029	1,8018	0,0009
	< c_L/c_T >	1,8016	1,8027	1,8017	1,8024	1,8025	1,8022	-
	$s_{L/T}$	0,0005	0,0005	0,0009	0,0003	0,0003	-	0,0007



Obr. 6 Zobrazení rozložení poměru L/T . Na plechách nebyl patrný žádný trend poměru L/T .

6. DISKUSE

Cílem experimentu bylo ověřit přesnost měření poměru rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln L/T pomocí dvojice sond Phased Array, kde jedna sonda byla vysílač a druhá přijímač. Vysílačí sonda byla buzena vybranými elementy tak, aby bylo docíleno stejného úhlu lomu podélných a příčných vln na rozhraní předsádka-materiál a minimálnímu posuvu V-dráhy ve směru prozvučování.

Nominální hodnoty

Naměřené výsledky poměru L/T vykazovaly hodnoty nižší o 0.02, tj. o 1.09%, než odpovídá Tab. 1, i historickým záznamům [9, 10] uvedených na Obr. 2. Na vzorku A-3 bylo proto provedeno referenční měření za použití konvenčních přímých ultrazvukových sond pro podélné a příčné vlny, které zaznamenalo reálný poměr L/T ve výši 1.824 (tj. dle očekávání). Vzhledem k tomu, že zkoušené vzorky oceli P265GH byly dodány z výroby, bez vlivu dlouhodobého tepelného zatížení v provozu, a naměřené hodnoty poměru L/T nevykazovaly žádný trend, jak je vidět na Obr. 6, lze předpokládat, že vzniklá chyba pramení v nepřesném nastavení.

Možným důvodem může být nevhodná volba měničů pro generování podélných a příčných vln. Ověřením bylo prokázáno, že výběr jiných měničů vedl ke změně poměru L/T v důsledku posuvu V-dráhy ve směru prozvučování (bez změny úhlu lomu α). Vybrané měniče pro tento experiment měly nejbližší hodnoty očekávaným výsledkům z práce [9]. Lepších výsledků by bylo patrně možné docílit použitím sondy s více měniči, která by umožňovala jemnější dělení.

Přesnost měření

Naměřená data pro všechny typy ocelí vykazovala dobře kontrolovanou směrodatnou odchylku měření $s_{L/T}$, která vyšla pro jednotlivé oceli dle Tab. 2, 3 a 4 menší než 0.067%. Lze tedy usuzovat, že lze docílit dostatečné přesnosti měření k detekci strukturních změn vyvolaných dlouhodobým působením teplot a tlaků, které obecně dosahují hodnot řádově jednotek

procent [7, 8]. Vzhledem k výše diskutovanému omezení měření nominální hodnoty poměru L/T je možno měřením hledat kritická místa srovnáním s poměrem L/T měřeném na referenčním vzorku, nebo přenásobením vhodným koeficientem po ověření skutečného poměru L/T pomocí konvenčních přístrojů. Tyto možnosti je však třeba v budoucím výzkumu ještě ověřit a budou součástí budoucí práce autorů.

7. ZÁVĚR

Článek si kládí za cíl ověřit, zda je možno využít sond Phased Array k monitorování degradačních mechanismů vyvolaných dlouhodobým teplem zatěžováním (tj. např. tečení). Za tímto účelem byla provedena série měření, která měla za úkol ověřit, zda jsou sondy Phased Array schopny měřit správně nominální hodnotu poměru rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových vln L/T, zda jsou tento poměr L/T schopny měřit s dostatečnou přesností (tj. s dostatečně malou směrodatnou odchylkou na idealizovaných vzorcích) a zda tyto hodnoty nemohou být zkresleny nevhodným nastavením systému.

Článek prokázal, že správných nominálních hodnot poměru L/T lze docílit správným nastavením kombinace parametrů, které zajistí stejný úhel lomu i bod lomu na rozhraní předsádka-materiál pro podélné, i transformované příčné vlny. Je předpokládáno, že velký vliv hraje výběr budící sondy (resp. počet měničů).

Současně bylo zjištěno, že měření hodnot poměru L/T na idealizovaných vzorcích vykazuje směrodatnou odchylku srovnatelnou s měřením konvenčními přímými sondami pro podélné a příčné vlny a tato směrodatná odchylka (v řádu setin procent) je dobře kontrolována vzhledem k odchylkám vyvolaným změnou struktury (obecně v řádech jednotek až desítek procent). Sondy Phased Array proto lze použít pro měření poměru L/T na součástech odpovídající velikosti.

Další výzkum autorů se zaměří na ověření schopnosti detekovat strukturální změny na výše vzorcích, které budou svařeny při různém nastavení hlavních svařovacích parametrů (tj. při různých TOO a mikrostruktuře).

8 REFERENCE

- [1] V. Sklenička, K. Kuchařová, M. Svoboda, L. Kloc, J. Buršík, A. Kroupa, 'Long-term creep behavior of 9-12%Cr power plant steels'. *Materials characterization*. 2003, Vol. 51, pp 35-48.
- [2] V. Obraz. 'Zkoušení materiálu ultrazvukem'. Praha, SNTL, 1989. 460 p.
- [3] R. Schneder, K. Goebbels. 'Zertörungdfreie Bestimmung von Eigenspannungen mit linear polarisierten Ultraschallwellen'. *VDI Berichte*, Nr. 439, 1982.
- [4] S. Eldevik, O. Olsen, and P. Lunde, 'Sound velocity change owing to the acousto-elastic/plastic effect in steel measured using Acoustic Resonance Technology (ART) ', *Scandinavian Symposium on Physical Acoustics*, Geilo, 2012.
- [5] M. Kobayashi, 'Ultrasonic Nondestructive Evaluation Of Microstructural Changes of Solid Materials Under Plastic Deformation - Part I. Theory', *International Journal of Plasticity*, Vol. 14, No. 6, pp 511-522, 1998.

- [6] M. Kobayashi, 'Analysis of deformation localization based on proposed theory of ultrasonic wave velocity propagating in plastically deformed solids', *International Journal of Plasticity*, Vol. 26, pp 107-125, 2010.
- [7] A. Kumar et al., 'Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials'. *Acta Materialia*. Vol. 51, pp 2417-2426, 2003.
- [8] H. H. Hilton, S.Yi, 'The significance of (an)isotropic viscoelastic poisson ratio stress and time dependencies'. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 35. pp 3081-3095, 1998.
- [9] T. Zavadil, 'Setting of ultrasonic velocity ratio reference value of P265GH steel for detection of creep degradation by ordinal means of evaluation'. 57th BINDT Conference Book of Proceedings, Nottingham, 2018.
- [10] T. Zavadil, 'Detection of creep degradation on collapsed membrane wall from P265GH pressure purpose steel by Ultrasonic Testing'. ASME PVP 2018 Book of Proceedings, Prague, 2018.



JAK ŘEŠIT PRAXI NDT PERSONÁLU – ROLE NDT LEVEL 3

HOW TO ASSESS THE EXPERIENCE OF NDT PERSONNEL – THE ROLE NDT LEVEL 3

Tomáš ZAVADIL, Václav JANDURA

ATG s.r.o., Toužimská 771, Praha 9
Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

Školení a praxe jsou jediné dvě části kvalifikačního procesu, které umožňují uchazeči získat znalosti a dovednosti k zajištění způsobilosti k výkonu činnosti NDT. Většina kvalifikačních systémů včetně certifikačních orgánů (pro ISO 9712) však přistupuje k problému praxe neadekvátně. Tento článek shrnuje jednotlivé přístupy kvalifikačních systémů jak ověřit skutečnou praxi NDT personálu s důrazem na přístup norem SNT-TC-1A, EN 4179 a ASME ANDE-1, kde NDT Level 3 hraje ústřední roli, a navrhuje postup pro interní zajištění praxe obhajitelné před zákazníkem či během auditů (NADCAP, TPG).

Klíčová slova: kvalifikační proces, praxe, NDT Level 3

Abstract

Training and experience are the only two parts of the qualification process that enables the applicant to gain knowledge and skills for achieving competence for performing NDT tasks. Majority of qualification systems including certification bodies (for ISO9712) however assess the experience issue non-adequately. This article summarizes the approaches of individual qualification systems how to verify the real experience of NDT personnel with focus on EN 4179 and ASME ANDE-1 standards, where the NDT Level 3 plays a key role, and proposes approach for internal experience verification that is trustworthy for the customer or during audits (NADCAP, TPG).

Key words: qualification process, experience, NDT Level 3

1. ÚVOD

Základní povinností každého dodavatele na evropský trh je dodávat na tento trh pouze bezpečné výrobky. Pro uspokojení tohoto požadavku (tzv. deklarace bezpečnosti v CE marking) musí průmyslové firmy zajistit odpovídající kvalitu svých výrobků, aby byly bezpečné alespoň na takové úrovni, že při dodržování předepsaných pravidel provozování dodávaného zařízení či jeho součástí nebude ohrožen jeho personál či lidé v jeho okolí. Za tímto účelem musí často takový dodavatel zajistit adekvátní kontrolu kvality, která je realizována mimo jiné i nedestruktivním zkoušením.

Nedestruktivní zkoušení za svou existenci prošlo dlouhou cestou a stalo se robustním systémem ověřování kvality průmyslových výrobků a jejich součástí. Byl vytvořen celý systém, který ke správnému fungování vyžaduje, aby zahrnoval minimálně následující části:

- 1) Odpovědnou osobu schopnou řídit proces NDT
- 2) Kvalifikovaný personál schopný provádět jednotlivé svěřené úkony správně, svědomitě a odpovědně
- 3) Vhodné přístrojové vybavení schopné nalézt odpovídající nehomogenity
- 4) Vhodné spotřební materiály pro toto vybavení umožňující zařízení správně fungovat
- 5) Adekvátní postupy pro zajištění jednotné a dostatečné kvality kontroly

Proces NDT stále nelze plně automatizovat a nepředpokládá se, že v dohledné době jej automatizovat v plném rozsahu bude možné. Velký vliv na výsledek má tedy lidský faktor, tj. personál, který kontrolu provádí. Pokud je personál neadekvátně kvalifikovaný, nezkušený, nebo nevykonává svojí práci svědomitě a odpovědně, může celý proces NDT selhat ve svém hlavním úkolu – tj. maximalizovat bezpečnost provozu zařízení tím, že nalezne včas maximum závažných vad omezujících bezpečný provoz zkoušeného zařízení. Z toho důvodu je v NDT kladen velký důraz na kvalifikaci personálu, která je popsána řadou mezinárodně platných předpisů (ISO 9712, SNT-TC-1A, EN4179/NAS410, ASME ANDE-1, ASNT ACCP a další).

2. PROKAZOVÁNÍ PRŮMYSLOVÉ PRAXE A JEJÍ ZNEUŽÍVÁNÍ

Je třeba si uvědomit, že správná praxe, a to znamená metodické a přímé vedení/výchova NDT operátora, je tím nejpodstatnějším prvkem kvalifikace personálu. Školení pouze utřídí a provede správnou interpretaci získaných poznatků, znalostí a dovedností během odborné praxe a zkoušky pouze verifikují získání základní způsobilosti.

Proto v dnešní době je čím dál častěji diskutována problematika praxe NDT personálu, a to jak z pohledu požadavku na získání certifikace, tak i z pohledu způsobilosti k výkonu činnosti. I přesto, že praxe je požadována a kvantifikována (v drtivé většině případů pouze počtem hodin práce v oblasti NDT – viz. ISO 9712 odst. 7.3.1, SNT-TC-1A odst. 6.3.1). Za dostatečnou praxi odpovídá zaměstnavatel, který tuto odpovědnost může přenést na svou odpovědnou osobu, kterou je v NDT (Responsible) Level 3. Bohužel, zaměstnavatelé často prokázání praxe podceňují a své zaměstnance přihlašují na kvalifikační kurzy bez praxe (praxe je pouze potvrzena podpisem čísla počtu hodin na papíře) a po případném získání certifikátu je ihned umístí do ostrého provozu.

Tímto však zaměstnavatelé prokazují způsobilost svého personálu, a pokud to není pravda a dojde k soudní při, potom zaměstnavatel nese plnou odpovědnost, nikoliv kvalifikační či certifikační orgán. I přesto, že tento „podvod“ může být jednoduše viditelný, nemají kvalifikační orgány nástroje k tomu, aby zasáhly. Na základě nestrannosti a nezávislosti každý, kdo formálně uspokojí požadavek deklarovaný certifikačního orgánu, má právo na školení, absolvování zkoušky a případné udělení certifikátu. A tímto požadavkem obecně je písemné potvrzení zaměstnavatele, že uchazeč má požadovaný počet hodin praxe.

Řízené falšování praxe v AQB certifikačního orgánu PCN

Největší skandál současnosti v souvislosti falšování praxe NDT personálu se projevil v nedávné době u britského certifikačního orgánu PCN (pro více informací čtěte např. [6]). Tento orgán je největším certifikačním orgánem dle ISO9712 na světě a provozuje celou řadu

(50 k 12. 10. 2018 [7]) autorizovaných kvalifikačních orgánů (tzv. AQB) a autorizovaných školicích středisek (tzv. ATO) po celém světě. Každý takový orgán je odpovědný za celý proces kvalifikace až po certifikaci, kterou v tomto případě zajišťuje PCN. V případě AQB NDT International PTE Inc. z Indie došlo k závažnému řízenému podvodu, kdy tato pověřená AQB a všech jejích 7 ATO (školicích středisek) pomáhalo personálu i zaměstnavatelům falšovat praxi a v některých případech dokonce i průběhy školení a zkoušek. (Toto téma bylo diskutováno na konferenci APCNDT2017 v Singapuru, kde vystoupili přímo i zástupci certifikačního orgánu PCN). PCN, i přesto, že tuto skutečnost znalo, nezasáhlo po několik let – údajně z důvodu sbírání důkazů. V době zásahu v roce 2017 pak došlo k odebrání licence na AQB/ATO společnosti NDT International PTE Inc. a odebrání certifikátů cca 3000 lidí, které byly v inkriminovanou dobu vydány.

Zaměstnavatel takto certifikovaných operátorů může mít velké problémy s uznáním svého personálu zákazníkem i několik následujících let. Je přitom nasnadě, že ne všichni postižení se podíleli na podvodu a ne všechny firmy vysílaly nezpůsobitelný personál na zkoušky. PCN požadovalo pro navrácení certifikátů novou zkoušku, kterou si účastníci/jejich zaměstnavatelé zaplatí na vlastní náklady i přesto, že za bezproblémový chod AQB bylo přímo odpovědné PCN. I přes zásadní pochybení, kdy nepřišlo na řízené podvody přes pravidelné audity a nezasáhlo okamžitě při jejich zjištění, PCN opětovně získalo akreditaci od UKAS (United Kingdom Accreditation Service) potvrzující v očích mnoha „bezchybný proces řízení certifikačního orgánu“.

Reakce světa NDT– takové zneužívání je nepřipustné a musí být řešeno. Reakce různých orgánů byly různé.

Své stanovisko, leč velmi opatrné, poskytlo ASNT:

ASNT is currently reviewing all PCN certificate holders that may also hold an ASNT certification. Each one is being rigorously checked and identified to ensure that all experience and training can be verified to ASNT's high standards.

které ujišťovalo, že problém vnímá a řeší ve spolupráci s BINDT [8], dále ASME v rámci řady prohlášení během přednášek k ANDE-1 a PRI (Performance Review Institute) – odpovědný za akreditaci NADCAP:

For any Nadcap audit in this region, Auditors are requested to verify that if individuals are certified to EN4179/NAS410 based upon the possession of a current ISO9712 (PCN) certificate, that they ensure the current PCN Certificate is valid.

Indický trh se nyní mnohem častěji obrací na zbylé certifikační orgány z důvodu snížené důvěry k PCN.

3. JAK ŘEŠIT NEDOSTATEČNOU PRAXI NDT PERSONÁLU

Historicky ve všech kvalifikačních systémech se praxe definovala výhradně počtem hodin, nikoliv deklarací, že operátor nebo uchazeč skutečně získal určité schopnosti a dovednosti. Některé kvalifikační předpisy (EN4179/NAS410 či ASME ANDE-1) proto dnes mají zpřísněné požadavky na prokázání praxe. Cílem je zajistit, že praxe bude prokazatelná a v dostatečné míře tak, aby bylo možno ověřit způsobilost NDT personálu.

EN4179 odst. 6.3 (doplněna PRI NADCAP AC 7114) požaduje, aby praxe byla evidována a potvrzena odpovědnou osobou. Tento požadavek má za cíl zajistit, že personál se skutečně podílel na jednotlivých úkonech a splnil normativní požadavek hodin (případně požadavek interní Written Practice). Bylo by velmi náročné falsifikovat každý jednotlivý den praxe, i proto, že letecký průmysl (používající předpis EN4179/NAS410) a především velcí odběratelé (Rolls Royce, GE Aerospace, ...) vyžaduje plnou dohledatelnost všech jednotlivých úkonů během procesu kontroly jednotlivých leteckých dílů. Tento problém však řeší pouze rozsah praxe, neřeší ale její obsah, pokud zaměstnavatel neuzpůsobí správným způsobem svou Written Practice.

Přístup předpisu ASME ANDE-1 nepožaduje žádné splněné hodiny praxe, namísto toho vyžaduje prokázání praxe ve všech důležitých bodech procesu NDT pro danou NDT metodu. Odpovědná osoba zaměstnavatele v tomto případě musí prokázat, že uchazeč o certifikaci má praxi a umí vše, co správný operátor umět má a stvrzuje tak svým podpisem pro každou takovou činnost. I přesto, že i zde by bylo možné falsifikovat praxi, tento předpis ve svém principu umožňuje prokázání úmyslu podvodu – pokud by totiž operátor neuměl během inspekce to, co dle požadavků v tzv. Qual Card umět musí, je prokazatelné, že firma falšovala praxi a může tedy být hnána k odpovědnosti jednodušeji. V případě požadavku na pouhý počet hodin je vymezení odpovědnosti zcela nereálné.

4. INTERNÍ ZLEPŠOVÁNÍ PRAXE - ÚLOHA RESPONSIBLE LEVEL 3

Kdo je Responsible Level 3

Každý zvláštní proces by měl mít svoji odpovědnou osobu, která odpovídá vůči zaměstnavateli, zákazníkovi, inspekčními dozoru apod. za celý zvláštní proces. Responsible Level 3 je osoba kvalifikovaná v NDT ve stupni 3 a pověřená zaměstnavatelem býti odpovědná za proces NDT ve společnosti, a tudíž mimo jiné i za kvalifikaci interního NDT personálu. Tato osoba by měla být plně způsobilá převzít tuto odpovědnost a znát všechny nezbytné souvislosti svých rozhodnutí. Znamená to, že Responsible Level 3 by neměl být pouze odborník na metody NDT zavedené ve společnosti, ale měl by mít dostatečné znalosti, zkušenosti a schopnosti pro řízení týmu lidí dané velikosti.

Co je Written Practice a k čemu slouží

I přesto, že normy ve většině případů nařizují pro splnění praxe pouze určitý počet hodin, nic nebrání odpovědné osobě tyto požadavky navýšit, pokud chápe důležitost a filosofii/podstatu kvalifikace personálu a odpovědnosti vůči zaměstnavateli. V zaměstnavatelských systémech (SNT-TC-1A odst. 5.0, EN4179 odst. 4.1) je pro tento účel určen dokument Written Practice, který dále rozšiřuje a upřesňuje kritéria pro kvalifikaci personálu uvnitř společnosti zaměstnavatele. Zde je možné přihlídnout na rozšířené množství hodin, průkaznost absolvované praxe, nebo i zohlednit v čem konkrétně personál musí získat praxi, aby mohl být pověřen ke konkrétním úkonům. Tento dokument vytváří a spravuje Responsible Level 3.

Responsible Level 3 a Written Practice u nezávislých kvalifikačních systémů

Některé kvalifikační systémy pojem Responsible Level 3 či Written Practice neznají (ISO 9712, ISO 20807, ASNT ACCP a další). Požadavek na odpovědnou osobu však vychází již z ISO9001 [5], který požaduje, aby každý proces měl právě jednu odpovědnou osobu, která je plně způsobilá nést tuto odpovědnost. Z výše uvedeného lze tedy říci, že ve všech kvalifikačních předpisech je požadavek na určitou formu „Responsible Level 3“ i přesto, že v některých případech nemusí být takto nazývána a nemusí být kvalifikována v NDT ve stupni 3. Tato osoba má poté právo definovat vnitřní směrnici požadavky na kvalifikaci vlastního NDT personálu, který v důsledku bude plnit úlohu Written Practice a může dále definovat požadavky na praxi, dodatečný on-the-job training a další.

Autorizace personálu NDT

Certifikace není jediným požadavkem pro to, aby mohl personál začít provádět NDT pro zaměstnavatele. Bez ohledu na kvalifikační systém je vždy nezbytné personál autorizovat (viz např. ISO 9712 odst. 5.5.5, ASME ANDE-1 odst. 1-3.5d, nepřímě SNT-TC-1A odst. 9.0, EN4179 odst. 3.23). Důvodem je, že požadavky na kvalifikaci personálu jsou univerzální pro všechny uchazeče u dané certifikační autority (certifikační orgán pro nezávislé kvalifikační systémy, zaměstnavatel pro zaměstnavatelské kvalifikační systémy) a pouze zaměstnavatel, resp. jeho odpovědná osoba ví, co konkrétně musí uchazeč pro získání způsobilosti vědět, znát a umět ovládat a taktéž jako jediný zná další vlastnosti každého konkrétního zaměstnance (tj. např. pečlivost, rozvážnost, zbrkllost ...). Vyslání zaměstnance k provedení inspekce u zákazníka je autorizace zaměstnance k vykonání takové činnosti a zaměstnavatel je za jeho způsobilost odpovědný.

Certifikace je tedy podmínkou nutnou, nikoliv dostačující k autorizaci (pověření) a jako taková žádnou osobu neopravňuje k výkonu činnosti pro zaměstnavatele či zákazníka. Autorizaci personálu by zaměstnavatel měl udělovat pouze v momentě, kdy si je dle svých možností dostatečně jistý, že je daná osoba pro výkon takové činnosti způsobilá – tj. mimo jiné i to, že má dostatečné množství praxe.

V případě dodávek služeb NDT pro zákazníka autorizaci stvrzuje smlouva o dodávce takových služeb. Zákazník má právo požadovat prokázání způsobilosti a klást požadavky nad rámec certifikace (např. praxe v NDT ve vyšším stupni, praxe min. 5 let apod.) pro podepsání takové smlouvy. Více se této otázce věnuje kapitola 6.

5. EXTERNÍ ZLEPŠOVÁNÍ PRAXE – ÚLOHA CERTIFIKAČNÍHO ORGÁNU

I certifikační orgány nezávislých kvalifikačních systémů¹ mají možnost svým správným nastavením interních procesů zvýšit transparentnost získávání a prokazování praxe v daném odvětví. Kvalifikační předpisy dávají certifikačnímu orgánu právo přizpůsobovat své požadavky

¹ Vzhledem k tomu, že u zaměstnavatelských systémů certifikuje zaměstnavatel, jeho možnosti jsou shrnuty v kapitole 4.

pro udělení certifikátu (viz např. ISO 9712 odst. 5.2.2). Tím se současně certifikační orgán současně může částečně chránit proti situaci podobné situaci PCN.

Nástroji pro ověření praxe personálu je celá řada. Certifikační orgány např. mohou požadovat podrobnější časový rozpis realizované praxe v návaznosti a dobu, jak dlouho byl uchazeč u zaměstnavatele zaměstnán tak, aby se zabránilo certifikaci personálu bez praxe. Může také definovat oblasti, v kterých musí mít uchazeč praxi a v jakém rozsahu, případně co za praxi uznává a co nikoliv.

Navíc může požadovat (nepřímé) ověření praxe při provedení kvalifikační zkoušky. Toho může docílit několika způsoby. Může požadovat strukturu otázek (pro všeobecný a specifický test) orientovanou na pochopení problému namísto memorování a hledání v normách. Během praktické části může zpřísnit pravidla hodnocení pro úkony, které s praxí nezbytně souvisí a nejsou sbíráním bodů za opsání zadání (tj. např. zvýšit podíl získatelných bodů za kalibraci přístroje), nebo požadovat důslednější dodržování časových limitů praktické zkoušky (uchazeč s dostatečnou praxí by neměl tápat během zkoušky).

Všechny tyto kroky by však certifikační orgán měl dělat uvážlivě a ve spolupráci se svými ATB a AQB a nastavit tento systém tak, aby zkouška ověřovala získané znalosti během školení, nikoliv aby školení bylo ohýbáno dle vrtochů certifikačního orgánu tak, aby uchazeč přes zkoušku prošel a nikoliv aby se naučil důležité věci pro svoji budoucí práci.

Všechny tyto opatření však nemění nic na tom, že nezávislý certifikační orgán nikdy nepřebírá odpovědnost za činnost certifikovaného operátora. To by si zaměstnavatel měl uvědomovat a nežít v představě, že operátor s platným certifikátem ho ochrání od případných problémů s neadekvátně provedenou NDT kontrolou.

6. PROKAZATELNOST PRAXE PŘED ZÁKAZNÍKEM ČI AUDITOREM

Zákazník očekává od svého dodavatele zajištění adekvátní kvality, často včetně správně provedené NDT kontroly. V některých situacích pak může požadovat prokázání způsobilosti dodavatelova NDT personálu. Typicky se tak stává během v leteckém či petrochemickém / energetickém průmyslu, a to prostřednictvím skilil testů, během zákaznických auditů, nebo v rámci nezávislých auditů dle např. ASME, PRI NADCAP či PRI TPG.

Prokázání způsobilosti se z hlediska praxe skládá z:

- 1) Průkaznosti realizované praxe
- 2) Prokázání způsobilosti na základě witness auditu
- 3) Průběžného ověřování způsobilosti personálu prostřednictvím Performance Evaluation / Annual Maintenance

Tyto požadavky jsou během auditu standardně posuzovány dohromady, tj. pro uspokojení požadavků auditora je většinou třeba prokázat všechny 3 body.

Požadavek a průkaznost praxe vede k požadavku evidování vykonané práce personálu, která je začleněna do systému řízení kvality procesu dané NDT metody u dodavatele. Dle EN4179 odst. 6.3 musí být evidováno min. jméno, úloha, datum, délka a v případě personálu získávající praxi i podpis personálu odpovědného za dohled. Vzhledem k monitorování speciálních procesů v leteckém průmyslu je případné falšování výrazně zkomplikováno.

Během whitness auditu zákazníka či auditora např. PRI musí personál demonstrovat způsobilost provedením zkoušky dle předpisů (tj. např. návodky) na reálném vzorku přímo před auditorem. Posuzováno je provedení i řešení případných nestandardních situací. Auditor může požadovat demonstraci postupu v případě, kdy se vnější podmínky změní. Podpora interního Level 3 či jiného (zkušenějšího) personálu není během whitness auditu možná. V případě, že personál má nedostatečnou praxi, auditor takovou situaci většinou jednoduše odhalí. Nezpůsobilost personálu prokázaná při auditu je zásadní pochybení, které může vést až ke ztrátě zakázky pro dodavatele.

Personál by se měl svým svěřeným úkolům v oblasti NDT v průběhu roku věnovat tak, aby si stále udržoval způsobilost pro výkon činnosti. Pro interní ověření způsobilosti je možno využít Performance Evaluation / Annual Maintenance, kdy jsou dovednosti personálu interně ověřeny, případně přezkoušeny. V případě nedostatečné způsobilosti může být požadováno doplňkové školení, či dočasné odebrání autorizace po dobu opětovného nabytí potřebných dovedností.

7. ZÁVĚR

Praxe v NDT je v poslední době často diskutované téma. Na problémy s praxí upozornil nedávný skandál britského certifikačního orgánu PCN a jeho AQB v Indii, tento případ ale není ojedinělý a řízená manipulace s praxí se děje u zaměstnavatele i dalších certifikačních orgánů. Je nezbytně nutné problém praxe řešit. Takové řešení musí přijít ve dvou rovinách – větší důslednosti zaměstnavatele, který nebude potvrzovat praxi personálu, která nemá reálnou praxi, a změně přístupu certifikačních orgánů, které budou prokázání praxe požadovat důsledněji (tj. budou požadovat rozpad provedené praxe v rozsahu i obsahu) a zaměřit se na ověření deklarované praxe během zkoušky. Změna ve finále prospěje všem, jak certifikačnímu orgánu, který se spíše vyhne problémům podobným PCN, uchazeči, který bude lépe připravený pro výkon činnosti, i zaměstnavateli, který nebude riskovat ztrátu zakázky z důvodu nezpůsobilosti personálu.

8. REFERENCE

- [1] ISO 9712:2012. *Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel*, June 2012.
- [2] ANDE-01:2015. *ASME Nondestructive Examination and Quality Control Central Qualification and Certification Program*. November 2015.
- [3] SNT-TC-1A:2016. *Personnel qualification and certification in Nondestructive Testing*. 2016.
- [4] EN 4179:2017. *Aerospace series – Qualification and approval of personnel for non-destructive testing*. January 2017.
- [5] ISO 9001:2015. *Quality management systems -- Requirements*. September 2015.

- [6] Bad Breisig. *NDT International / BINDT - The Forum discusses the revoking of thousands of PCN certifications*. [online] [cit. 2018-10-18]
URL: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=21282&content=1>
- [7] List of NDT&Inspection Approved Training Organisations. [online] [cit. 2018-10-14]
https://www.bindt.org/downloads/ndt_ato.pdf
- [8] ASNT. ASNT Statement Regarding ASNT Certification Integrity. [online] [cit. 2018-10-18]
URL: https://www.asnt.org/MajorSiteSections/Certification/Integrity_Statement.aspx
- [9] Phil Ford. *NADCAP Auditor Advisory – NDT – 2017 – 006 Revised*. July 2017



PRINCIPY FUNGOVÁNÍ TECHNIKY FULL MATRIX CAPTURE PRO ZKOUŠENÍ DÍLŮ ULTRAZVUKOVOU METODOU

PRINCIPLES OF FULL MATRIX CAPTURE TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF PARTS BY ULTRASONIC TESTING

Petr ŽBÁNEK

ATG s.r.o.

Contact e-mail: zbanek@atg.cz

Abstrakt:

Technika Phased Array a s ní související vybavení se stále častěji využívá pro konvenční průmyslové aplikace při zkoušení ultrazvukem. Její hlavní předností je především úspora času a nákladů při opakovaném zkoušení. Technika Full Matrix Capture / Total Focusing Method významně rozšiřuje potenciál techniky Phased Array díky možnosti detailní analýzy zkoušených součástí na nehomogenitu. Mezi její přednosti patří schopnost přesnějšího zjištění velikosti a tvaru (orientace) nehomogenit i schopnost detekce nehomogenit ve vzájemném zákrytu. Tento článek si klade za cíl seznámit odborníky v oblasti UT s touto novou technikou, jejími výhodami a omezeními a objasnit princip jejího fungování na přístrojích Sonatest v tzv. offline módu.

Klíčová slova: *phased array, full matrix capture, total focusing method, ultrazvukové zkoušení*

Abstract:

Phased Array technique and related equipment is increasingly common for conventional industrial applications while using ultrasonic testing. The main advantages are time and expenses savings during serial testing. Full Matrix Capture / Total Focusing Method technique significantly extends the potential of Phased Array technique due to ability of detailed analysis of tested parts for presence of defects. The main advantages include more detailed shape, size and orientation measurement of defects and the ability to detect defects in in mutual cover. The goal of this article is to introduce to the UT experts this new technique, its advantages and limitations and explain the principle of operation on Sonatest equipment in so called offline mode.

Keywords: *phased array, full matrix capture, total focusing method, ultrasonic testing*

Phased array technika zažívá v poslední době poměrně velký rozmach. Řada firem touto technikou nahrazuje klasický konvenční ultrazvuk nebo dokonce radiografickou kontrolu. Spolu se zájmem zákazníků se zvyšuje i nabídka výrobců přístrojů z hlediska hardwaru i softwaru. Jednou z aplikací, která se v poslední době objevila v nabídce výrobců přístrojů je i technika Full Matrix C apture (FMC) / Total Focusing Method (TMF).

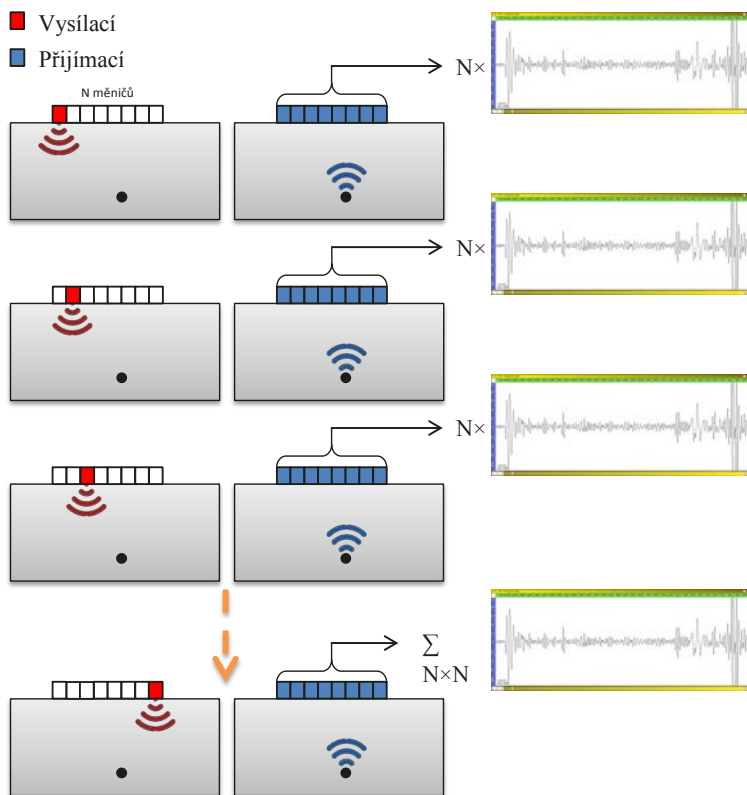
Full Matrix Capture je relativně nová inovativní technika sběru dat, která ve spojení s algoritmem zpracování těchto dat (Total Focusing Method) umožní detailní analýzu nalezených indikací a výrazně tak rozšiřuje detekční a vyhodnocovací schopnosti phased array přístrojů.

Tento článek si klade za cíl seznámit čtenáře s podstatou sběru dat FMC a hlavně s detekčními a zobrazovacími možnostmi TFM. Shrnuje základní výhody, nevýhody a omezení této techniky. V článku nejsou diskutovány „pod-techniky“ jako HMC (Half Matrix Capture), STF (Sectorial Total Focusing) apod.

1 Princip

Základem techniky FMC/TFM je sběr dat. Data jsou sbírána takovým způsobem, aby jich bylo možné následně použít k analýze materiálu resp. jsou sebrána data tak, aby z nich bylo možné následně rekonstruovat jakýkoliv svazek, jakýkoliv směr, který je samozřejmě dostupný sondě a případně i použité předsádkce.

Princip sběru dat dokumentuje následující obrázek.

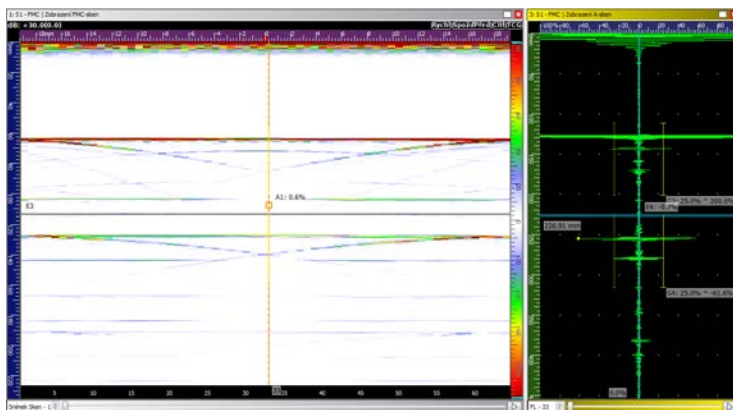


Obr. 1 Princip sběru FMC dat

Sběr dat probíhá tak, že každý element phased array sondy vyšle signál, který následně všechny elementy zpětně přijmou (včetně vysílajícího), a signál je digitalizován.

Tato data mohou být následně použita k výpočtu jakýchkoliv daných svazků (apertura, úhel, fokusační bod). S těmito daty může být v současné době naloženo dvěma způsoby.

- 1) Data jsou ihned použita na výpočet potřebného zobrazení. Výsledkem je „živý“ obraz situace pod sondou (ve vybrané oblasti). K tomuto je nutné použití vysokorychlostního hardwaru, který je schopný s obrovským množstvím dat pracovat v reálném čase. Výhodou je samozřejmě ono „živé“ zobrazení. Toto zobrazení je možné nahrát jako klasický sken phased array. Nevýhodou je, že dat je mnoho, a tak jsou „surová“ data ihned po použití zahozena a nejsou už k dispozici pro další zpracování. To může způsobit problém v tom, že některé indikace nejsou viditelné při přepočtu podle jedné sady pravidel a je nutné použít jiný přepočet. Data ale pro jiný přepočet nejsou k dispozici, pokud nedojde znovu k nahrání nových dat.
- 2) Druhý způsob surová data ukládá pro následnou analýzu a ihned nezobrazuje přepočítaný výsledek. Operátor tedy zpravidla vidí pouze FMC data, která ale nelze pohledem nijak interpretovat. Je tedy vhodné použít ještě nějaké dodatečné běžné phased array zobrazení. Uložená data je pak možné přepočítávat podle různých pravidel a provést tak detailní analýzu zkoušené oblasti. Navíc je možné i oblast redefinovat, tedy v rámci nahrané délky časové základny s oblastí zájmu posouvat, měnit požadované rozlišení apod. Nevýhodou tohoto řešení je samozřejmě absence „živého“ obrazu a tím zpomalení inspekce. Výhodou je ale to, že data je nutné nahrát pouze jednou v dané oblasti zájmu a následná analýza může probíhat různými způsoby použitím stále stejných dat (ekvivalent znovunasnívání dané oblasti).



obr. 2 Data FMC

Data, která jsou sbírána, jsou neusměrněné A-skeny. Je třeba, aby byla dostupná informace o fázi signálu, aby bylo možné vypočítávat, zda došlo k interferenci v daném bodě konstruktivní nebo destruktivní. Signály samozřejmě nemohou být vyhlazené, tato funkce není pro neusměrněný signál dostupná.

Minimální požadovaná hodnota digitalizační frekvence by měla být 100 MHz a neměla by být použita žádná forma komprese, i když při velkých rozsazích časové základny je nevyhnutelná. Detailní vzorkování je pro post procesní zpracování zásadní.

Při sběru dat vyše každý měnič signál, který je následně zpracováván zpět. Při sondě s 16 měniči je posláno 16^2 , tedy 256 A-skenů, při sondě s 32 měniči je to už 1024 A-skenů atd. Z tohoto důvodu není možné používat žádný druh průměrování, protože samotný sběr dat je poměrně časově náročný.

Hodnota kvantování by měla být min 12-bitů, nebo lepší, protože jsou zpracovávány malé amplitudy a nižší stupeň digitalizace není přesný.

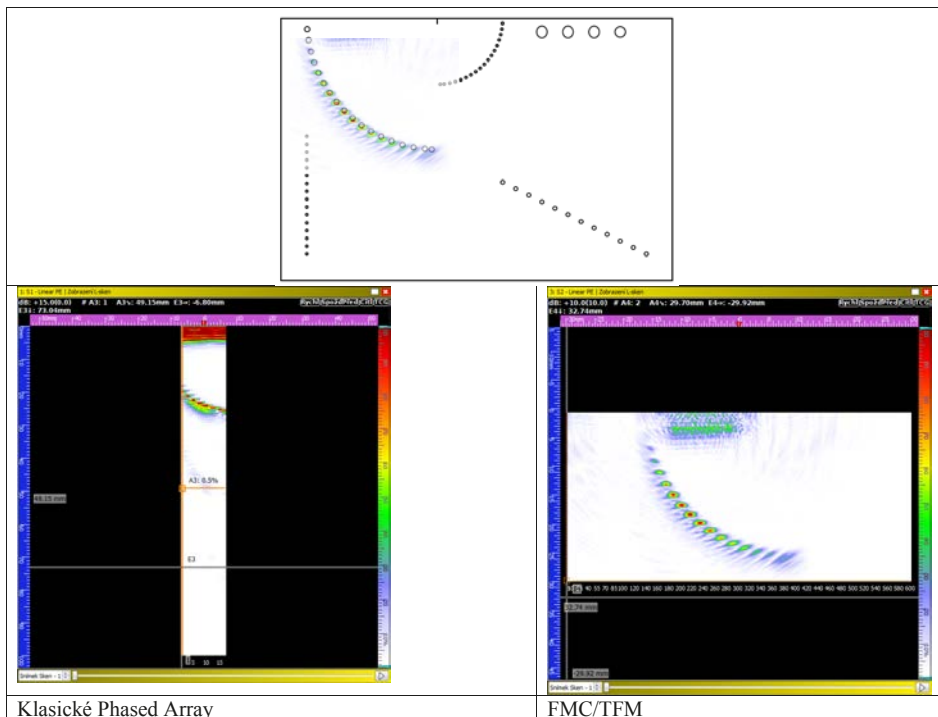
Největší výhodou tohoto sběru dat je velký potenciál v následném zpracování nasbíraných dat. Nevýhodou je to, že sebraná data jsou poměrně velká a tak je práce s nimi obtížná. Například, pokud budeme mít sondu s 64 elementy, bude sbíráno 4096 A-skenů, pokud každý bude obsahovat 8192 bodů při 12-bitové digitalizaci, pak velikost souboru pouze s jedním celkovým snímkem bude mít cca 64 MB. Pokud budeme zkoušet svar o délce 250 mm s rozlišením enkodéru na 1 mm, potom velikost souboru bude cca 16 GB.

2 Nedostatky FMC

- Malá nebo žádná možnost změny zesílení. Zesílení je obvykle stejné pro každý A-sken
- Zatím neexistuje žádný obecně uznávaný způsob kalibrace – přístroje obvykle neobsahují žádný způsob kalibrace, nebo FMC sken přebírá kalibraci z nastavení paralelního klasického phased array skenu (nikoliv však citlivost)
- Bez možnosti filtrace signálu (pomocí Filtru s konečnou impulzní odezvou – FIR – digitální filtrace). Filtrace analogovými filtry je samozřejmě možná
- Není možné použít průměrování
- Technika není podporována žádným obecně uznávaným standardem, i když existuje skupina, pracující na zavedení této techniky do ASME V.

3 Porovnání klasického phased array s FMC/TFM

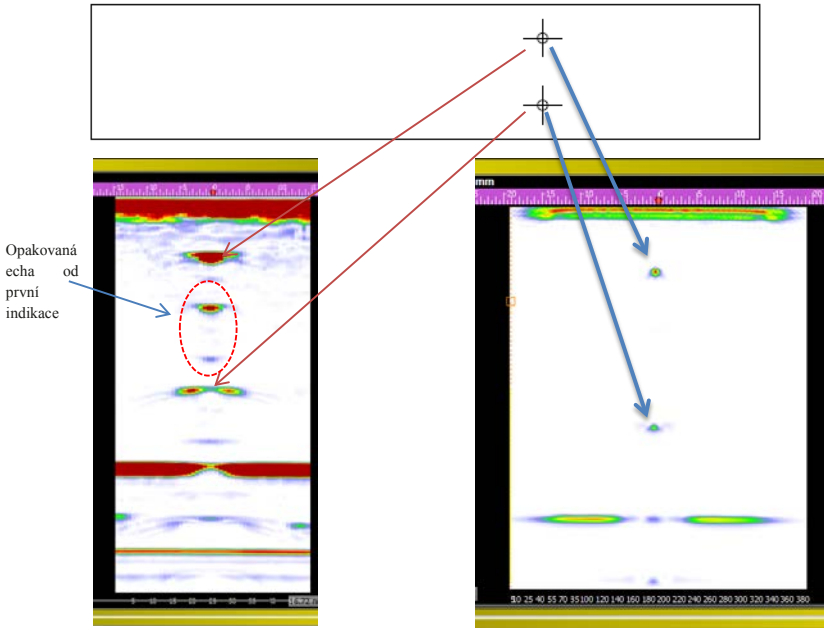
Výhodou FMC/TFM v porovnání s klasickým phased array je mnohem detailnější a názornější zobrazení požadované oblasti. Porovnání zobrazuje následující obrázek skenu měřky ASTM type B.



Obr. 3 Porovnání klasického phased array a FMC/TFM

Navíc, na dobře nastaveném FMC se nezobrazují opakovaná echa od indikací, které by sice každý zkušený operátor měl rozeznat, ale navíc nedojde ani k zakrytí indikací pod případnou vadou blíže k povrchu.

Zkoušený díl



Zobrazení klasického phased array

Zobrazení FMC/TFM

obr. 4 Zobrazení indikací pomocí phased array a FMC/TFM, které jsou v "zákrytu"

Je možné si všimnout i toho, že délka mrtvého pásma, je v porovnání s klasickým phased array podstatně menší. Použitá phased array sonda je opatřena předsádkou.

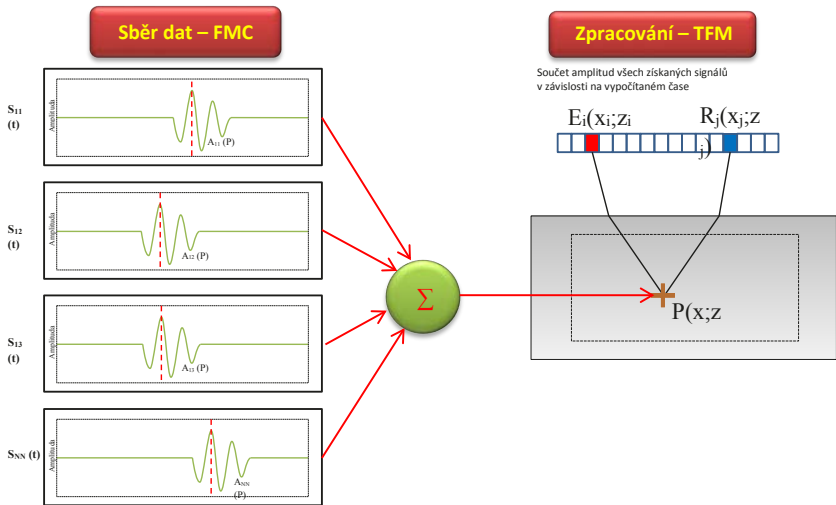
4 Základy výpočtu TFM

Pro rekonstrukci obrazu TFM potřebuje soustavu A-skenů získaných pomocí FMC. Algoritmus TFM vygeneruje skalární zobrazení $I(P)$ zkoušené oblasti, kde je sken zaměřen do každého pixelu. Intenzita každého pixelu v zobrazení se získá:

$$I(P) = \sum_{i,j=1}^{N_t} S_{ij}(T_{ip} + T_{jp})$$

Kde S_{ij} je získaný signál,

T_{ip} a T_{jp} jsou časy nutné pro dosažení bodu P pro i-tý resp. pro j-tý měnič.

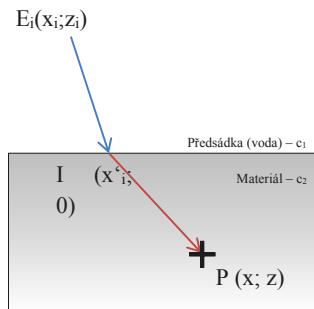


Obr. 5 Základní princip TFM

Při použití předsádky je měnič oddělený od zkoušeného materiálu vrstvou jiného prostředí, buď pevným materiálem předsádky, nebo při imersním zkoušení vrstvou vody. V tomto případě, při průchodu vlnění dvěma materiály s různou rychlostí šíření dochází na rozhraní k lomu. Čas šíření k bodu P se pak vypočítá podle rovnice:

$$T_{Eip} = \frac{\sqrt{(x_i - x'_i)^2 + z_i^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x'_i - x)^2 + z^2}}{c_2}$$

Kde c_1 resp. c_2 je rychlost šíření v předsádce resp. zkoušeném materiálu
 $(x_i; z_i)$ je pozice i-tého měniče
 $(x'_i; 0)$ je pozice bodu lomu
 $(x; z)$ je souřadnice bodu P



obr. 6 Lokalizace bodu při použití předsádky

X-ová souřadnice bodu lomu se vypočítá podle klasického Snellova zákona podle rovnice:

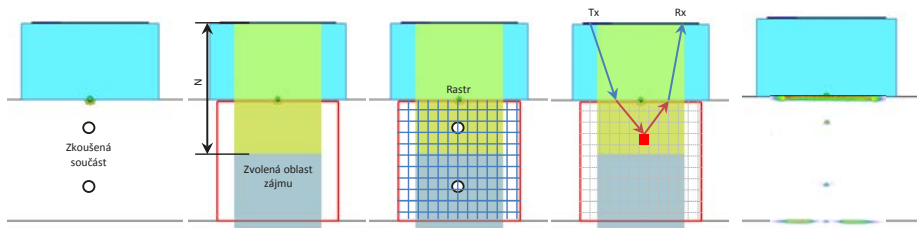
$$\frac{x_i - x'_i}{c_1 \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + z_i^2}} = \frac{x'_i - x_i}{c_2 \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + z_i^2}}$$

4.1 Typy přepočtů TFM

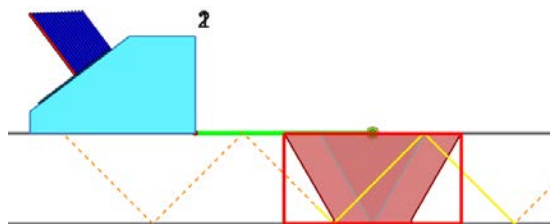
Obraz je možné získat tzv. „on the fly“, tedy všechny A-skeny jsou získány a ihned použity, přičemž data jsou okamžitě smazána, aby se získal volný prostor pro další sběr dat. Pokud jsou data uložena a výpočet je proveden až následně, potom je stejný soubor dat možné použít pro výpočet různými způsoby, pro různé režimy šíření. Pro každý výpočet pak můžou být použita různá kritéria TFM jako je pozice a velikost rámce, nebo různé režimy šíření. Různé TFM rámce je pak možné spojit a vytvořit detailnější zobrazení pro lepší analýzu záznamu.

Data potřebná pro zadefinování TFM

- oblast, pro kterou bude TFM počítána – je určena jako oblast vzhledem k sondě
- rozlišení, na které bude zadaná oblast rozdělena – počet bodů které budou počítány
- režim šíření, pro který budou data počítána, resp. jaká rychlost, případně kombinace rychlosti šíření budou k výpočtu použity



Obr. 7 Postup TFM zpracování dat

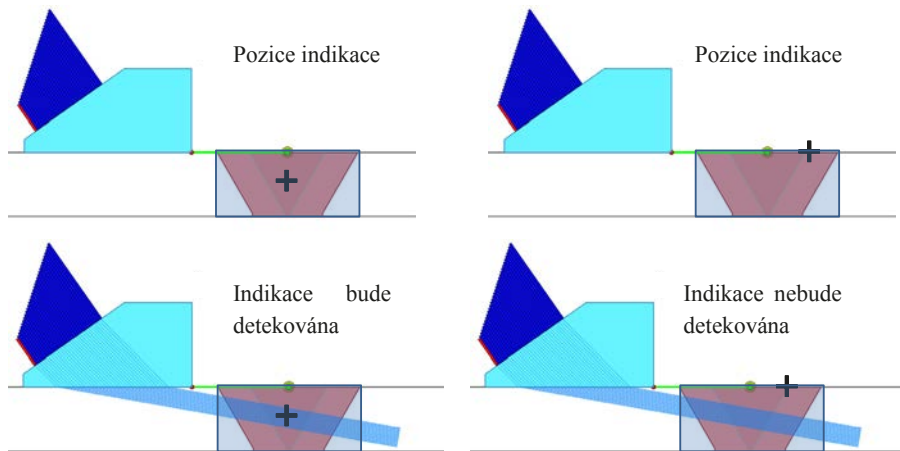


obr. 8 Oblast zájmu TFM

Oblast je rozdělena na počet bodů, který odpovídá velikosti oblasti a rozlišení. Algoritmus potom vypočítá každý svazek tak, aby fokusaci odpovídal každému z bodů v oblasti. Každý bod je tedy ve výsledku dokonale zafokusován, pokud to odpovídá fyzikálním možnostem. Ani u této techniky samozřejmě není možné fokusovat za hranici blízkého pole, která je definována velikostí apertury (virtuální apertury) dané sondy, frekvencí, rychlostí šíření, použitím předsádky

atd. Pixely za hranicí blízkého pole budou samozřejmě vypočítány a budou mít „obsah“, ale ten bude odpovídat možnostem klasického phased array.

Oblast pokrytí TFM má svoje omezení. Není možné použít jakýkoliv režim šíření pro celou vybranou oblast. Omezení, které platí pro phased array sondu platí totiž i pro TFM. Pokud má tedy sonda omezený úhlový dosah, potom ho bude mít i TFM.



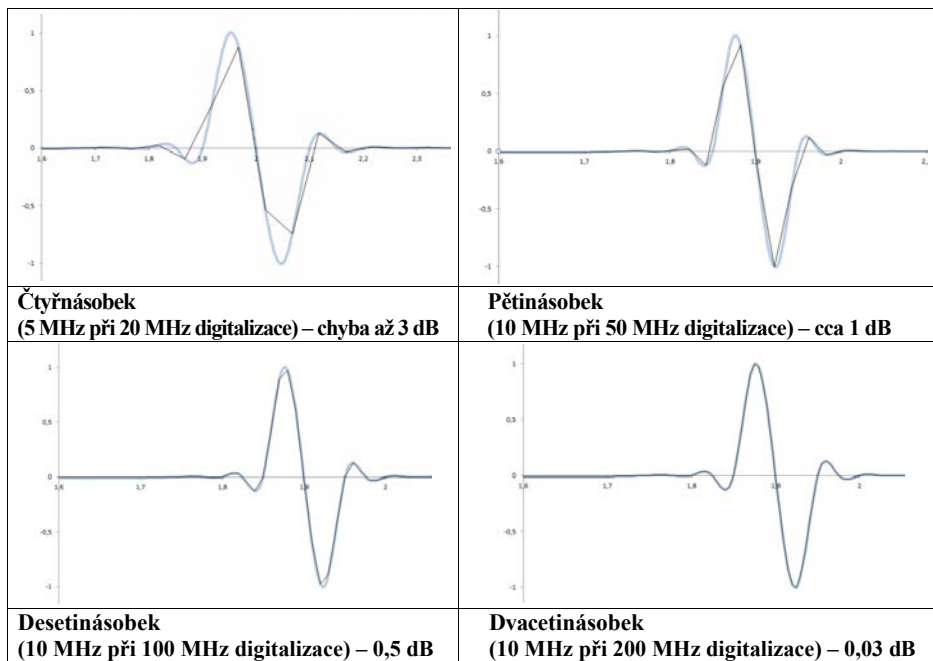
Obr. 9 Oblast dostupná a nedostupná pro FMC/TFM

Na obr. výše je patrné, jak režim šíření ovlivní detekovatelnost indikace. V posledním případě, pokud v oblasti krycí vrstvy na straně od sondy bude indikace, nebude možné ji detekovat. Pro detekci v této oblasti by bylo nutné zvolit jiný typ šíření vlny. Je tedy velmi důležité, v případě „živého“ zobrazení dat, správně zvolit typ šíření vlny, nebo v případě dat uložených pro pozdější zpracování, zvolit více druhů šíření, protože některé indikace budou viditelné jen v některých případech.

5 Volba a možnosti rozlišení TFM algoritmu

Jak již bylo uvedeno výše, TFM algoritmus vypočítá pokud možno zafokusaný svazek pro každý pixel v oblasti zájmu. Tento pixel potom dostane barvu ze zvolené palety podle amplitudy signálu získaného z tohoto místa. Algoritmy TFM zpravidla fokusují svazek do středu daného pixelu a zde se může projevit jev podobný tomu, co popisuje tzv. Nyquistův teorém, který je známý z digitalizace signálu.

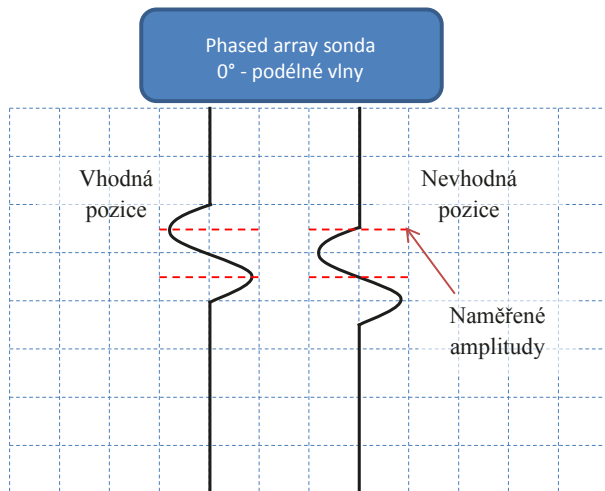
Stejně jako při digitalizaci, pokud zvolíme nízkou digitalizační frekvenci, máme velkou šanci, že signál nebude digitalizován vždy ve své maximální hodnotě, tak i zde, pokud bude rozlišení požadované oblasti malé, nemusíme vždy získat maximální amplitudu.



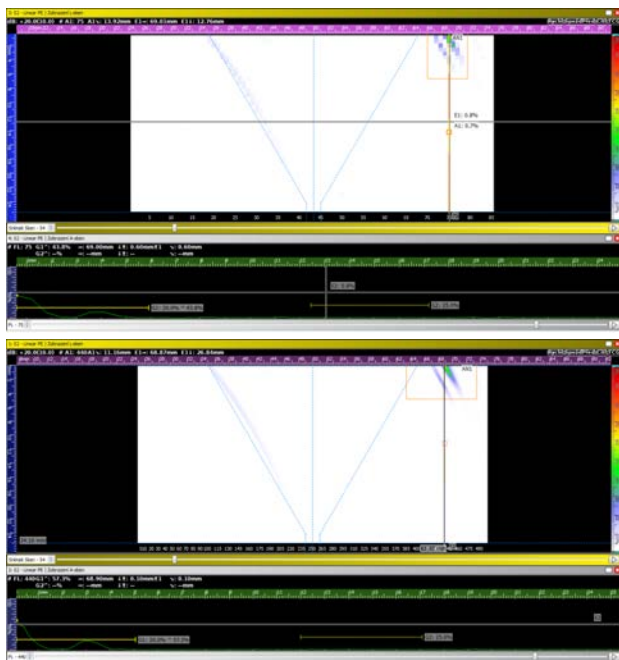
obr. 10 Vliv digitalizační frekvence na velikost chyby odečtu

Problémem je, že pokud se v dané oblasti objeví (sčítají) dva a více signálů, ale střed pixelu nevychází optimálně tak, aby se signály sečetly s maximální možnou amplitudou, získáme amplitudu menší, než by mohla být. Nebezpečí, že mineme maximální amplitudu, roste se zvětšujícím se pixelem v oblasti zájmu. Z tohoto hlediska vychází lépe systémy, které mají definované rozlišení oblasti zájmu jako velikost pixelu (tedy hodnotu $X \times Y$) oproti systémům, které mají rozlišení definované například jako 256×256 bodů. U těchto systémů samozřejmě roste pixel s růstem oblasti zájmu.

Rozdíl mezi zachycenou a nezachycenou maximální amplitudou zobrazuje následující obrázek. Pokud se bude velikost pixelu snižovat, potom je šance na získání maximální amplitudy větší.



Obr. 11 Chyba měření amplitudy při nízkém rozlišení



Nízké rozlišení
(0,6×0,6 mm)
Max. amplituda
43,8 % FSH

Vyšší rozlišení (0,1×0,1 mm)
Max. amplituda 57,3 % FSH
Rozdíl oproti předchozímu
případu +2,33 dB

obr. 12 Naměřené hodnoty při malém a velkém rozlišení

6 Vliv volby módu šíření ultrazvukové vlny

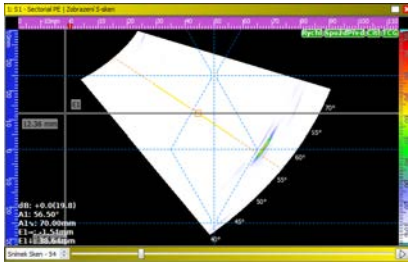
Jak již bylo řečeno výše, volba typu vlny, pro kterou bude vypočítávaný výsledný obraz, je zásadní. Některá zobrazení totiž mohou minout některé typy indikací, případně některé pozice indikací. Software Sonatest – UTStudio+, který je využitý pro přepočít zde zobrazovaných dat disponuje deseti režimy šíření vln. Jsou to:

Označení	Schématické zobrazení	Popis
LL		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, odražená vlna PODÉLNÁ
TT		Vysílaná vlna PŘÍČNÁ, odražená vlna PŘÍČNÁ
LT		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, odražená vlna PŘÍČNÁ
LTL		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, transformace vlny podélné na PŘÍČNOU, zpět transformace na vlnu PODÉLNOU
LLT		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, odražená vlna PODÉLNÁ, transformace na vlnu PŘÍČNOU
LTT		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, transformace vlny podélné na PŘÍČNOU, odraz vlny PŘÍČNÉ zpět
LLL		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, odražená vlna PODÉLNÁ – PODÉLNÁ
TTT		Vysílaná vlna PŘÍČNÁ, odražená vlna PŘÍČNÁ – PŘÍČNÁ
LLLL		Vysílaná vlna PODÉLNÁ, odražená vlna PODÉLNÁ – PODÉLNÁ – PODÉLNÁ
TTTT		Vysílaná vlna PŘÍČNÁ, odražená vlna PŘÍČNÁ – PŘÍČNÁ – PŘÍČNÁ

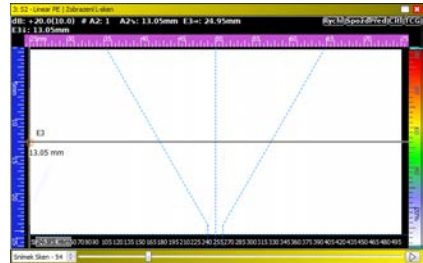
Tak například, pokud zvolíme pro úhlovou sondu režim pouze TT, indikace u horního povrchu nemohou být zobrazeny, protože sonda s předsádkou nemá úhlový dosah do 90°, tedy indikace se nemůže zobrazit. Pro zobrazení indikací u horního povrchu je zapotřebí režim TTTT, ale indikace kolmé na povrch bez kontaktu s povrchem opět ani pro tento režim pravděpodobně nebudou zobrazeny a projeví se nejspíše pro režim LLT (známá technika z konvenčního ultrazvuku). Pro techniku LLT se ale indikace zobrazí pouze, pokud budou ve specifické vzdálenosti vůči sondě, takže ani zde není, pro jednu pozici sondy, detekce indikace zaručena. Je tedy vhodnější danou oblast načíst a nechat si vypočítat více pohledů, resp. více režimů šíření, abychom získali větší přehled o rozložení případných indikací v materiálu.

Příkladem je následující obrázek. Zde je na prvním obrázku vidět indikace na horním povrchu svaru na klasickém phased array zobrazení. Na zobrazení FMC/TFM není tato indikace vůbec patrná.

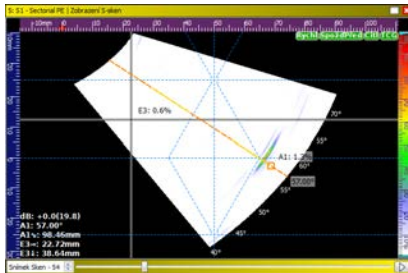
Na druhé sadě obrázků jsou již data přepočítána jinak a indikace se objeví.



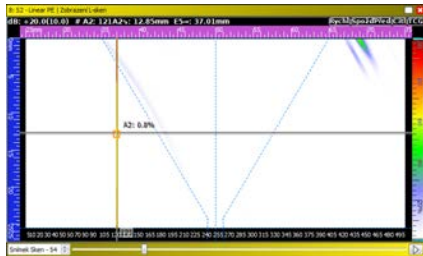
Klasické PA



Režim šíření TT



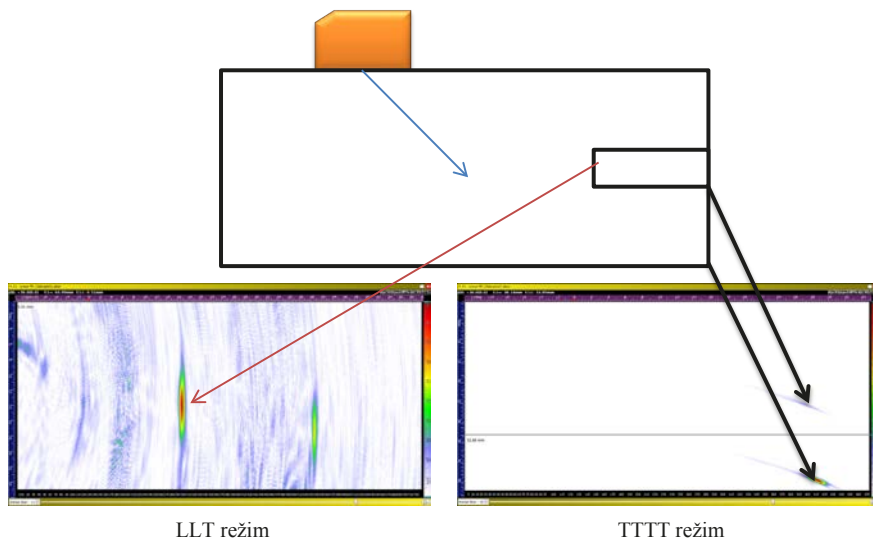
Klasické PA



Režim šíření TTTT

Obr. 13 Výběr vhodného režimu šíření

Podobný jev je na dalších obrázcích. Zkoušenou součástí je v tomto případě měřka s vývrtem s plochým dnem podobné konstrukce, jako by byla použitá pro kalibraci konvenčního ultrazvukového systému pro techniku LLT. Měřka obsahuje vývrt s plochým dnem orientovaným kolmo k povrchu, na kterém se pohybuje sonda.

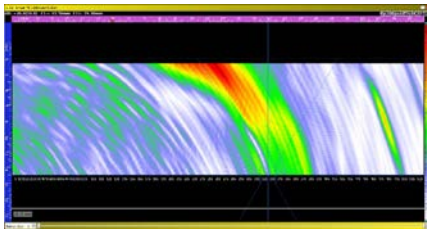
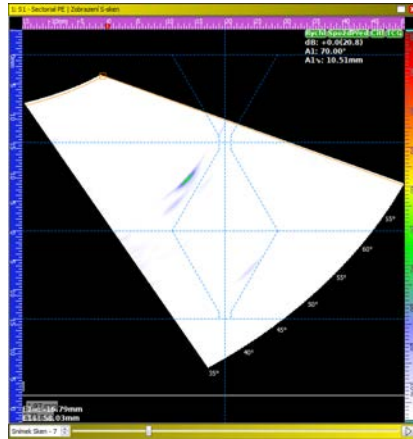


LLT režim

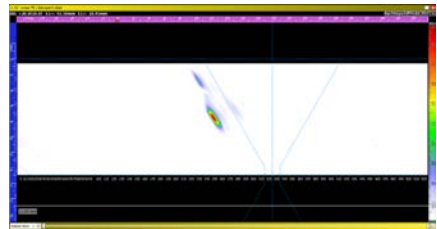
TTTT režim

obr. 14 Detekovatelnost indikace při vhodném a nevhodném režimu šíření

Nevhodná volba režimu ale nemusí vést pouze ke skrytí některých indikací, ale k zakrytí úplně všech indikací, resp. operátor získá naprosto nesmyslné výsledky. Na následujícím příkladu jsou zvoleny dva typy šíření. V prvním případě, protože byla použita úhlová předsádka, je zvolený typ šíření TTTT, v druhém případě je zvolený typ LLLL, který je teoreticky stejný, pouze místo příčné vlny je počítáno zobrazení pro podélnou vlnu.



Režim šíření LLLL



Režim šíření TTTT

Obr. 15 Vhodný a nevhodný režim šíření

V tomto případě sonda nedokáže požadovaný režim šíření, v kombinaci s použitou předsádkou, správně sfázovat a tak nelze data správným způsobem interpretovat.

7 Závěr

Technika FMC/TFM je schopná detekovat celou řadu indikací, které jsou pro klasické phased array nejasné, případně naprosto nedetekovatelné a které by za normálních okolností vyžadovaly doplňkovou zkoušku jinou technikou, nebo dokonce jinou NDT metodou. Princip sběru a uložení dat pro pozdější analýzu dává této technice potenciál v tom, že na jednu sadu dat je pak možné aplikovat celou řadu technik, které by za normálních okolností bylo nutné provést odděleně přímo na zkoušeném kusu. Ušlechtlí a urychlí tedy analýzu indikací, které by bylo nutné například ověřovat tandemovou, nebo LLT technikou, což s sebou nese poměrně velké časové nároky.

Klasické phased array nadále pravděpodobně zůstane hlavním nástrojem pro detekci indikací, ale technika FMC/TFM je vhodným podpůrným nástrojem pro přesnější interpretaci indikací. Poskytne operátorovi informace o nalezené indikaci, které je možné použít k detailní analýze materiálu, zjištění možného mechanismu vzniku vad apod. Vzhledem k technickým omezením, která v současné době FMC/TFM má, není vhodné 100%ni nasazení pouze této techniky ke kontrole materiálu i přes nesporné výhody v zobrazení, které jsou této technice vlastní. Větší

nasazení této techniky lze očekávat v budoucnu, kdy bude výpočetní technika schopná zpracovávat a uchovat takové množství dat, jaké vyžaduje FMC/TFM.

Překážkou, která také brání většímu nasazení této techniky v praxi je absence kalibračních postupů a standardů pro vyhodnocení indikací a tak je zatím ani není možné využít možností FMC/TFM k celkovému hodnocení materiálu. Na nových standardech pro FMC/TFM by měl pracovat IIW, a skupina ASME, která výsledky hodlá uveřejnit v nejbližším vydání ASME V.

ABSTRAKTY ABSTRAKT'S



FOCAL SPOT AND X-RAY IMAGING

Jan BRESSENDORFF

YXLON Copenhagen

Abstract

The focal spot is the core in all X-ray systems but often overseen. However the importance of the focal spot cannot be underestimated. The focal spot has board and significant impact on various areas, ranging from performance limitations across image quality to work procedures and efficiency.

Focal spot size is a central parameter when determine the appropriate procedure for execution of an X-ray inspection but how the focal spot is defined, measured and how does it looks will be explained together with the factors that influence the image quality and the day-to-day X-ray inspection work.



EVALUATION OF EFFECTIVE ELASTIC MODULUS OF OPTICAL FIBER BY USING FBG SENSOR

Dae-Hyun KIM *†, Bonyong KOO **

*Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of
Science and Technology (SeoulTech.), Seoul, South Korea

Dept. of mechanical convergence system engineering Kunsan National
University, Kunsan, South Korea

† Contact e-mail: dkim@seoultech.ac.kr

Abstract

Tensile tests of optical fibers and vibration tests of optical fiber rings have been conducted to measure the exact physical properties of optical fibers and optical fiber sensors. However, there have been few studies using optical fibers themselves as measurement sensors. In this study, we propose a free vibration test using an FBG sensor embedded in an optical fiber and a method to estimate the mechanical properties of the optical fiber sensor from the measured natural frequency. The proposed method does not require additional equipment such as tensile tester and can easily evaluate the mechanical characteristics even with the FBG sensor strain measuring equipment already provided. Therefore, it is expected to be used for checking the physical properties of the optical fiber itself and the properties of the recoated optical fiber and the sensor. In order to analyze the natural frequency of the optical fiber, we compared the experimental results with the analytical solution, the Rayleigh-Ritz method, and the finite element method, and evaluated the elastic modulus, which is mechanical property, from the natural frequency of the optical fiber.

Key words: Optical fiber, Elastic modulus, FBG, Vibration test



TENSILE FORCE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR PSC GIRDER BRIDGES USING EMBEDDED EM SENSOR AND RBFN

Junkyeong KIM*, Minsu PARK*, Byung-Joon YU*, Seunghee PARK*

*Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Contact e-mail: junk135@nate.com

Abstract

The tensile force of PSC structures is the key to managing their safety because the tensile force of PS tendons determines the performance of such structures. As problems increase according to the age of PSC bridges, such as the loss of tensile force in the Seoul Jeongneungcheon Highway in 2016, many studies have been conducted to verify the safety of PSC bridges. However, it is difficult to directly measure the tensile force of PS tendons using conventional methods. In this study, a tensile force measurement technique for PS tendons of PSC structures using an embedded EM sensor and machine learning method is proposed to measure the tensile force of the hidden part of PSC structures. The magnetic hysteresis curves, which change with the stress introduced to a ferromagnetic material, were measured using an embedded EM sensor to measure the tensile force introduced into the ferromagnetic PS tendons of a PSC girder. The measured magnetic hysteresis curves were quantified as an area ratio, and the tensile force on the PS tendons was estimated using the radial basis function network (RBFN), which is machine learning method. The real-size PSC girder test and actual construction site test were performed to confirm the field applicability of the developed technique. The results show that the tensile force of a PSC girder can be measured using the developed technique in the field.

Key words: *Tensile force measurement, Embedded EM sensor, Machine learning, RBFN, PSC*



MAGNETIC SENSING TECHNIQUE INCORPORATING WITH GPR BASED 3D INTERNAL IMAGING MODEL FOR ENCASED TENDON NDE

Ju-Won KIM*, **Jihwan PARK****, **Junghyeon Lim****, **Seunghee PARK***

* School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture,
Sungkyunkwan University, Suwon 2066, Korea,

**Department of Convergence Engineering for Future City, Sungkyunkwan
University, Suwon 2066, Korea
Contact e-mail: malsi@nate.com

Abstract

For the inspection of steel wires in encased PS (pre-stressed) tendons, magnetic sensing techniques based NDE (Non-destructive evaluation) and internal 3D model generated using GPR (ground penetrating radar) were applied. To obtain the 3D shape model include the shape and configuration of steel wires, the PS tendon was scanned using the GPR technique that can see through objects occluded by coating and grouting. On the other hand, the MFL (magnetic flux leakage) technique was used to detect the local damages of the steel wires in PS tendon. A multi-channel MFL sensor head optimized for the PS tendon was fabricated by using the Hall sensors and the permanent magnet yokes. The magnetic flux signals were measured from the steel wires of the PS tendon using MFL sensor head and quantified through a series of signal processing processes. Finally, the inspection results of magnetic sensing based NDE was mapped to a GPR based 3D Internal Imaging model to provide intuitive diagnostic results.

Key words: *Ground penetrating radar, Magnetic flux leakage, Pre-stressed tendon, Non-destructive evaluation*



KONTROLA SVARŮ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM POMOCÍ RADIOGRAFICKÉ METODY

TESTING OF THE ELECTRON BEAM WELDS USING RADIOGRAPHIC METHOD

Bohuslav KOLÁŘ

ATG s.r.o.

Contact e-mail: kolar@atg.cz

Abstrakt:

Cílem tohoto článku je prezentovat možnosti řešení kontroly svarů elektronovým paprskem pomocí radiografické metody (RT). Článek se zabývá kontrolou svarů o velice malých tloušťkách (desetiny a setiny milimetru) používaných zejména v kosmickém průmyslu a kontrolou svarů elektronovým paprskem na dílech používaných v leteckém průmyslu (např. náboje turbinových kol). Článek shrnuje radiografické techniky používané při kontrole takovýchto svarů, jako je například počítačová tomografie (CT), a také se standardizovanými pravidly pro kontrolu a vyhodnocení kontroly svarů, respektive poukazuje na některé nedostatky těchto pravidel. Součástí je i reálný příklad provedení a vyhodnocení takovéto kontroly na základě zkušeností z praxe.

Klíčová slova: *svary elektronovým paprskem, radiografická kontrola, počítačová tomografie, letecký průmysl*

Abstract:

The goal of this article is to present the process of testing of electron beam welds using radiographic method. The article will address testing of welds with very small thicknesses (tens or hundreds of micrometers) which are mostly used at space industry and also testing of electron beam welds which are often used for parts manufactured for aviation industry (for example turbine wheel hubs). The article summarizes radiographic techniques for testing of these types of welds, as is Computed tomography technique. The article also follow up the standardized rules for testing and acceptance criteria, or some of its insufficiencies respectively. The real example of application of electron beam weld testing will be also part of this article; this example is based on practical experience.

Keywords: *electron beam welds, radiographic testing, computed tomography, aerospace*



UPLATNĚNÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ PŘI AUTOMATICKÉ VIZUÁLNÍ KONTROLE

USE OF MACHINE VISION FOR AUTOMATIC VISUAL INSPECTION

Zuzana KOMÁRKOVÁ

ATG s.r.o.

Contact e-mail: komarkova@atg.cz

Abstrakt:

V současné době dochází stále častěji k nahrazování lidských zdrojů pomocí strojů prostřednictvím automatizace a robotizace. Výjimkou nezůstává ani oblast vizuální kontroly. Pomocí strojového vidění a vhodného vyhodnocovacího aparátu lze provádět nepřetržitou vizuální kontrolu bez rizika dopadů únavy zraku, či ztráty pozornosti operátora. Další výhodou je sjednocení závěrů z vizuální kontroly, které se v případě několika různých operátorů nezdá liší. Cílem tohoto článku je poskytnout stručný přehled o typech používaných kamer a zkušebních podmínek v jednotlivých aplikacích vizuální kontroly, shrnout možnosti zpracování obrazu a automatické detekce, kategorizace a vyhodnocení nasnímaných defektů.

Klíčová slova: vizuální zkoušení, strojní vidění, zpracování obrazu

Abstract:

Nowadays, there is an increasing number of cases where human resources are being replaced by machines through automation and robotization. The field of visual inspection is not an exception. Machine vision and a suitable evaluation device can be used to carry out continuous visual testing without the risk of fatigue of sight or operator's inattention. Another advantage is the unification of the conclusions from the visual inspection, which is often different for individual operator. The goal of this article is to provide a brief overview of the types of cameras and test conditions used in individual visual testing applications, to summarize the possibilities of image processing and automatic detection, categorization and evaluation of the displayed defects.

Klíčová slova: visual testing, machine vision, image processing



NEW APPROACH FOR LOCALIZATION AND MASS ESTIMATION OF LOOSE PARTS IN REACTOR COOLANT SYSTEM BASED ON CYBER PHYSICAL SYSTEM

Seongjin MOON*, To KANG and Soonwoo HAN

Korea Atomic Energy Research Institute

Contact e-mail: simoon21c@kaeri.re.kr

Abstract

Loose parts can cause component damages and material wear on nuclear power plants; thus localization and mass estimation of the loose parts are crucial to safety management. Various methods have been proposed, such as hyperbola method, circle method, triangular intersection method, etc. for the localization and centre frequency method, frequency ratio method, etc. for the mass estimation, which mostly rely on analytical computation and simplified geometry. Also, the methods do not reflect recent improvement and availability of computational capacity. Recently, a model-based diagnostic approach is becoming one of noticeable techniques to predict fault behaviours of mechanical components. In this paper, cyber physical system (CPS) for a downsized steam generator in nuclear power plant was constructed to simulate impact wave propagation behaviour, and then that was validated the usefulness. Furthermore, this paper proposed a new methodology for localization and mass estimation of loose parts using machine learning technique based on simulation data from CPS, which can be applicable to an arbitrary geometry. In the proposed methodology, time-of-arrival (TOA), amplitude, and cross-correlation coefficient from measured and simulated impact waves are used as feature vectors. It is expected that the developed CPS and proposed methodology can be utilized in model-based prognostics for localization and mass estimation of loose part in nuclear power plants.

Key words: *Loose part, Localization, Mass estimation, Cyber physical system, Impact wave*



RISK ANALYSIS IN THE INDUSTRIAL RADIOGRAPHY PROCESS USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS AND BAYESIAN BELIEF NETWORKS

José Cristiano PEREIRA*, Luciano Azeredo LUIZ **

* Petrópolis Catholic University and Scientific Computing National Laboratory,
Petrópolis, Brazil

**Petrópolis Catholic University, Petrópolis, Brazil

Contact e-mail: josecristiano.pereira@ucp.br / jpereira@Incc.br

Abstract

This paper proposes a method for identifying the high-level risks in the Radiographic Inspection Process, using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Bayesian Belief Network (BBN). The combination of probability and the impact identified the most significant risks, which needs to be addressed to improve quality and safety of inspection. The radiographic inspection of parts in the manufacturing and services industry is very critical. The correct control of variables in the process to ensure inspection process reliability is very important and can avoid part failure and costly accidents. As a methodological approach, the estimated risk probabilities for the risk factors were loaded into Bayesian Belief Networks software to assess the probability of occurrence of undesirable events and AHP was utilized to rank the relative importance (effect) of risks. The combination of probabilities and the effects identified the most significant risks. As far as the authors are aware, this is the first time this method is being used in this specific process. The novelty of the paper is the combination of Bayesian Belief Networks with AHP to select the most significant risk in the inspection process. In this study a total of 22 risks and 66 risk factors were analysed. The most relevant risks identified were the preparation and definition of radiographic parameters, and the processing and development of the film. The paper proposes responses to these risks aiming at preventing the occurrence of failure in the radiographic inspection. It contributes to the literature in the field non-destructive inspection of parts during manufacturing or services. The proposed model has also practical implications and is an invaluable source for non-destructive inspection professionals, safety engineers, quality managers and decision makers in companies to augment their information and to identify critical risks in the radiographic inspection of parts. The identification and prioritization of risk factor makes it easier to allocate resources to prevent parts failure and improve product quality and ensure safety.

Key words: NDT, Industrial Radiography, Analytic Hierarchy Process, Bayesian Belief Networks



HIGH FREQUENCY GUIDED WAVES EVALUATION OF PLATE-LIKE STRUCTURES USING ULTRASONIC PHASED ARRAY TRANSDUCERS

M. J. RANJBAR and S. SODAGAR*

Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Iran

*Corresponding author e-mail: sodagar@put.ac.ir

The characteristics of the ultrasonic wave field radiated by a linear phased array transducer and the echo information of the inspected area are the main basis of designing a phased array inspection system. In this paper, a novel ultrasonic phased array method is proposed for guided waves evaluation of surface and in-depth defects in a plate-like structure. For this purpose, in a plate-like structure, the ultrasonic high frequency guided wave modes resulting from a linear phased array transducer is modelled using finite element method. The numerical results are employed to study the effects of phased array parameters on the guided wave modes for an effective guided waves evaluation. To investigate reliability and efficacy of the proposed approach, the phased array experimental results for a variety of surface and in-depth defects using A_0 , A_1 , S_0 and S_1 modes are studied and compared.



ROBOTIZED ULTRASONIC TOMOGRAPHY FOR SAFETY AND SAFEGUARDING OF SPENT NUCLEAR FUEL

Dmitry SEDNEV*, Andrey LIDER*, Michael KROENING*, Yana SALCHAK*

National Research Tomsk Polytechnic University

Contact e-mail: sednev@tpu.ru

Abstract

Nowadays, nuclear waste and its' disposal is one of the relevant topics. IAEA puts a lot of efforts in order to develop the robust technology for safe operation with nuclear waste, especially with spent nuclear fuel or SNF. SNF contains a lot of nuclear material that potentially could be used as core material for nuclear weapon or dirty bombs. Therefore, SNF has to be safeguarded by IAEA. Typically, containment and surveillance (C&S) are in use for this purpose. However, following 3S synergy trends of IAEA and many publications on vulnerabilities of various sealing and tagging technologies, there is a growing demand on technique that could provide information for safety and safeguard areas. Moreover, safeguarding should be based on intrinsic features of material, that couldn't be replicate or copied. Tomsk Polytechnic University has developed such technology based on robotized ultrasonic tomography.

The core idea is the following: to use weld seam as unique fingerprint of SNF cask. So, with one procedure of nondestructive testing we could obtain data for safety – flaws of weld seam and for safeguards – unique fingerprint of a cask. The study has shown that obligatory requirement for robust application of ultrasonic tomography is positioning accuracy. Therefore, articulated robotic manipulator was applied in tomographic system. Beside this, data for 3-d real-time reconstruction was collected with Digital Focusing Array method.

Obtained results have shown a good stability of cask recognition with the same weld seam and high sensitivity for point reflectors. In the paper the methodology and system is described in details.

Key words: *ultrasonic tomography, fingerprinting technologies, spent nuclear fuel, robotized ultrasonic systems.*

OVĚŘENÍ MOŽNOSTI APLIKACE MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU PRO KONTROLU PŘEDEPJTÉ VÝZTUŽE V MOSTNÍCH KONSTRUKCÍCH

VERIFICATION OF METAL MAGNETIC MEMORY METHOD FOR INSPECTION OF PRE-STRESSED STEELS IN BRIDGE STRUCTURES

Václav SVOBODA¹, František ŽEMLIČKA¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

Abstrakt:

Metoda magnetické paměti materiálu nachází stále větší uplatnění v diagnostice kovových konstrukcí. Umožňuje z hlediska principu metody určovat místa v zatěžovaných kovových komponentách, která vykazují zóny zvýšené koncentrace namáhání. V těchto místech pak vlivem provozních zatěžujících podmínek může docházet k přednostnímu poškození kovu, které vede ke vzniku defektů typu trhliny a jejich postupnému šíření až do ztráty stability konstrukce. Uvedená metoda byla aplikována na detekci poškození předepjaté výztuže zabudované v betonovém loži mostní konstrukce. Bylo provedeno opakované měření metodou MPM bezkontaktním způsobem na havarovaných segmentech Trojské lávky. Dále pak byla tato metoda aplikovaná na existujících lávkách obdobného typu, přes řeku Labe ve městě Nymburk a přes řeku Moravu ve městě Kroměříž. Tyto naměřené výsledky umožnily provést dílčí srovnání z hlediska úrovně měřených signálů ve vztahu k poškozovacím procesům v kovové výztuži.

Klíčová slova: Mostní konstrukce, Metoda magnetické paměti materiálu

Abstract:

Metal Magnetic Memory Method is becoming increasingly used in the diagnostics of metal structures. It allows, in the light of the principle of the method, to determine the location of zones of increased stress concentration in the loaded metal components. In those places, due to the operational loading conditions, preferential metal damage can occur, resulting in crack type defects and their gradual spread until loss of structural stability. The MMM method was applied for detection of damage to the prestressed reinforcement embedded in the concrete bed of the bridge structure. Repeated measurements were made by the MMM method in a non-contact way on the crashed segments of the Trojská lávka bridge. Furthermore, this method was applied on existing bridges of a similar type, across the Elbe river in the town of Nymburk and across the river Moravia in town of Kroměříž. These measured results made it possible to perform partial comparisons with respect to the level of the measured signals in relation to the damaging processes in the metal reinforcement.



DEVELOPMENT OF HIGH SPEED INVERSION TECHNIQUE FOR THE CHARACTERIZATION OF FULL-FIELD MATERIAL PROPERTIES BASED ON QUANTITATIVE LASER ULTRASOUND VISUALIZATION SYSTEM

Sheng-Po TSENG¹ and Che-Hua YANG¹.

¹Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan

Contact e-mail: tseng3392@gmail.com

Ultrasonic guided waves become an important tool for nondestructive evaluation of structures and components. Guided waves are used for the purpose of identifying defects or evaluating material properties in a nondestructive way. While guided waves are applied for evaluating material properties, instead of knowing the properties directly, preliminary signals such as time domain signals or frequency domain spectra are first revealed. With the measured ultrasound data, inversion calculation can be further employed to obtain the desired mechanical properties.

This research aims at the development of high speed inversion calculation technique for obtaining full-field mechanical properties from a quantitative laser ultrasound visualization system (QLUVS). The QLUVS and inversion process have been investigated before, however, suffer the drawback of excessive computation time. This research introduces two important tools to improve the computation efficiency. First of all, graphic procession unit (GPU) with large amount of cores are introduced. Furthermore, combining the CPU and GPU cores, parallel procession scheme is developed for the inversion of full-field mechanical properties based on the QLUVS data. The newly developed inversion scheme is applied to investigate the computation efficiency for single-layered and double-layered plate-like samples. The computation efficiency is shown to be 80 times faster than the un-paralled computation scheme. The developed high speed computation scheme is ready for applications where full-field mechanical properties are needed in a nondestructive and nearly real-time way.

Key words: Nondestructive evaluation, material characterization, guided waves, inversion,



ÚČEL KVALIFIKAČNÍ ZKOUŠKY V KVALIFIKAČNÍM A CERTIFIKAČNÍM PROCESU NDT PERSONÁLU

PURPOSE OF THE QUALIFICATION EXAM IN THE QUALIFICATION AND CERTIFICATION PROCESS OF NDT PERSONNEL

Tomáš ZAVADIL

ATG s.r.o., Toužimská 771, Praha 9
Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

Kvalifikační zkouška je hlavním třídícím kritériem uchazečů o NDT kvalifikaci k získání certifikátu. Výsledek zkoušky tak musí jasně informovat odpovědný orgán (certifikační orgán či zaměstnavatel) o způsobilosti uchazeče k výkonu činnosti, tj. ověřit jeho teoretické znalosti, schopnost používat normy a zacházet s patřičným přístrojovým vybavením a implementovat proces kontroly správně a kompletně. Přístupy ke kvalifikační zkoušce se liší jak podle kvalifikačních systémů (ISO 9712, SNT-TC-1A, EN 4179 atd.) tak podle požadavků odpovědného orgánu. Tento článek vymezuje skutečný účel zkoušky a definuje hlavní faktory ovlivňující správný průběh na základě dlouhodobých zkušeností a standardní praxe společnosti ATG.

Klíčová slova: kvalifikační proces, certifikace, odborná způsobilost, kvalifikační zkouška

Abstract

Qualification exam is the key sorting criteria of applicants for NDT qualification and certification. The exam result shall clearly inform the responsible body (certification body or the employer) about competence of the applicant for performance of given tasks, i.e. confirm his knowledge of theory, ability to use standards and use appropriately the equipment as well as implement the testing process correctly and in completely. Approaches to the qualification examination differ based on qualification system (ISO 9712, SNT-TC-1A, EN 4179 etc.) as well as acc. to requirements of the responsible body. This article defines the purpose of the exam and defines the main factors affecting the correct execution based on long-time experience and standard practice of ATG company.

Keywords: qualification process, certification, competence, qualification exam

Název	Defektoskopie 2018 / NDE for Safety 2018 sborník příspěvků
Editor	Luboš Pazdera, Pavel Mazal
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT, z.s.
Tisk	Betis s.r.o. Praha Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice
Vyšlo	listopad 2018
Vydání	první
Náklad	200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-5684-6

Česká společnost pro nedestruktivní testování, z. s.
pořádá nejvýznamnější událost roku 2019 z oblasti nedestruktivního
zkoušení v České republice.

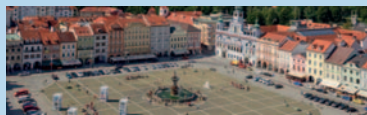


49. mezinárodní konferenci a výstavu NDT techniky



DEFEKTOSKOPIE 2019

NDE FOR SAFETY 2019



5.–7. 11. 2019, Clarion Congress Hotel** České Budějovice**

Mezinárodní konference a výstava Defektoskopie 2019 / NDE for Safety 2019 bude zaměřena zejména na problematiku nedestruktivního zkoušení materiálu a konstrukcí ve všech oborech technické činnosti. Konference bude příležitostí k setkání všech, kteří se zajímají o výzkum, vývoj, praktické aplikace i vzdělávání a normalizaci v tomto oboru.

Součástí konference bude veřejně přístupná výstava NDT techniky.

Základní termíny konference

Defektoskopie 2019 / NDE for Safety 2019:

- Zaslání abstraktu příspěvku **31. červenec 2019**
- Platba sníženého vložného **16. září 2019**
- Odeslání textu příspěvku **30. září 2019**

Aktuální informace a přihlášky: www.cndt.cz

Czech Society for Non-destructive Testing



invites all NDT specialists to

**49th International Conference
and Exhibition of NDT technique**



NDE FOR SAFETY 2019

DEFEKTOSKOPIE 2019

Clarion Congress Hotel** České Budějovice, Czech Republic,
November 5–7, 2019**

This event will be organized by Czech Society for NDT as an international annual meeting and exhibition. The conference is aimed at 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. Manufacturers and suppliers of NDT instruments and services are invited to present their products and innovations.

Preliminary Conference Time Schedule:

Deadline for abstracts submission: **July 31, 2019**

Limit date for payment of reduced fees:

September 16, 2019

Deadline for papers delivery: **September 30, 2019**

Conference Language:

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

More info: www.cndt.cz

ISBN 978-80-214-5684-6