

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2011

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

41. mezinárodní konference
41st International Conference



9.–11. listopad 2011
November 9–11, 2011

Ostrava, Czech Republic

41. mezinárodní konference DEFEKTOSKOPIE 2011/ NDE for Safety

je sponzorována:

hlavní sponzoři / main sponsors

AQUACHEMIE 

 **DEKRA**



GE
Measurement & Control Solutions

OLYMPUS[®]

Your Vision, Our Future

sponzoři / sponsors

DEFEKTA

foma
since 1921

TESYDO

Czech Society for Nondestructive Testing
Česká společnost pro nedestruktivní testování



NDE for Safety DEFEKTOSKOPIE 2011

**41st International Conference and NDT Exhibition
41. mezinárodní konference a výstava NDT techniky**

PROCEEDINGS SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

**November 9 - 11, 2011
9. - 11. listopad 2011**

Ostrava, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera and Pavel Mazal

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

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

Scientific Committee / Reviewers:

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

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal

Copyright © 2011
Czech Society for Nondestructive Testing
All rights reserved

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

for

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

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

ISBN 978-80-214-4358-7

CONTENTS / OBSAH

Josef BAJER, Karel HÁJEK	1
Diferenční spektrální analýza impact-echo signálu DIFFERENTIAL SPECTRAL ANALYSIS OF THE IMPACT-ECHO SIGNAL	
Radim BLAHETA, Roman KOHUT, Alexej KOLCUN, Kamil SOUČEK, Lubomír STAŠ	9
X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY IN GEOTECHNICS	
Marie BOHÁČOVÁ	17
Postup teardown analýzy draku letounu TEARDOWN ANALYSIS PROCEDURES OF AIRFARME	
Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Krzysztof SCHABOWICZ	23
NONDESTRUCTIVE TESTING OF HEAT PIPE CARRYING TUNNEL WALL THICKNESS BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPH	
Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Krzysztof SCHABOWICZ	29
NONDESTRUCTIVE TESTS OF SUBFLOOR LAYER IN SHOPPING CENTRE BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPH	
Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI	35
NONDESTRUCTIVE TESTING OF THE BOND BETWEEN CONCRETE FLOOR LAYERS BY IMPULSE RESPONSE AND IMPACT-ECHO METHODS	
Josef HOLEC	41
Optimalizace rutinních ultrazvukových zkoušek za podpory dalších metod NDT a výsledků materiálových analýz OPTIMIZATION OF ROUTINE ULTRASOUND TESTS USING FURTHER NDT METHODS AND RESULTS OF MATERIAL ANALYSES	
Libor KELLER	55
PosiTector® nové generace THE NEW GENERATION OF POSITECTOR®	
Bernard KOPEC	61
Role spolehlivosti v hodnocení nedestruktivními metodami ROLE OF RELIABILITY IN ASSESSMENT NDE	
Marta KORENSKA	65
NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE DAMAGE	
Ivo KUSÁK, Bohumil KOKTAVÝ, Miroslav LUŇÁK	71
Měření elektrických parametrů u betonových plátů různého složení MEASUREMENTS OF ELECTRIC PARAMETERS OF CONCRETE SLABS OF DIFFERENT COMPOSITION	

Lindsey R. LINDAMOOD, James B. SPICER	79
ULTRASONIC BIREFRINGENCE MEASUREMENTS OF ELASTIC ANISOTROPY IN FATIGUE DAMAGED BRASS, COPPER AND ALUMINUM ALLOYS	
Monika MANYCHOVA	87
EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE INTEGRITY BY FREQUENCY INSPECTION	
Michal MATYSÍK, Iveta PLŠKOVÁ, Marta KOŘENSKÁ	93
Detekce trhlin v betonu metodami nelineární akustické spektroskopie DETECTION OF CRACKS IN CONCRETE USING NONLINEAR ACOUSTIC SPECTROSCOPY METHODS	
Josef NEUGEBAUER	101
Co můžeme zjišťovat při NDT zkoušení materiálů z pohledu evropských norem WHAT CAN WE DETECT IN NDT MATERIALS TESTING FROM THE PERSPECTIVE OF EUROPEAN STANDARDS	
Libor NOHÁL, Pavel MAZAL	107
Identifikace poškození součástí automobilové převodovky metodou akustické emise AN IDENTIFICATION OF AUTOMOTIVE GEARBOX COMPONENTS DAMAGE USING ACOUSTIC EMISSION	
Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Jaroslav SMUTNY, Pavel MAZAL, Vlastimil BILEK, Marta KORENSKA, Michal MATYSIK, Veronika RODRIGUEZOVA	115
CONCRETE LIFETIME MONITORING BY NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS	
Iveta PLŠKOVÁ, Michal MATYSÍK, Marta KOŘENSKÁ, Zdeněk CHOBOLA	121
Porovnání detekce vnitřních vad mrazem poškozených střešních tašek akustickými nedestruktivními metodami COMPARISON OF DETECTION OF FROST DAMAGED ROOF TILES INTERNAL DEFECTS BY ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE METHODS	
Miloslav PROCHÁZKA	127
Provozní kontroly teplosměnných trubek elektromagnetickými metodami IN-SERVICE INSPECTION OF HEAT-EXCHANGER TUBES BY MEANS OF ELECTROMAGNETIC METHODS	
Maciej ROSKOSZ, Andrzej RUSIN, Michał BIENIEK	143
QUALITATIVE RELATIONSHIPS BETWEEN RESIDUAL MAGNETIC FIELD AND RESIDUAL STRESS	

Kristýna ŠAMÁRKOVÁ, Zdeněk CHOBOLA	151
LOW-RESISTANCE MEASUREMENTS AS A TOOL TO DIAGNOSE THE ARMATURE CORROSION	
Břetislav SKRBEK, Pavel LHOTÁK, Michal FLANDERKA	155
Příspěvek ke kalibraci přístrojů řady domena. BENEFIT TO CALIBRATION APPARATUS SERIES DOMENA	
Břetislav SKRBEK, Vladimír NOSEK	163
Srovnávací nedestruktivní testy materiálu autodílů COMPARATIVE NON-DESTRUCTIVE TESTS OF AUTOMOTIVE MATERIALS	
Lubomír SODOMKA	169
Dokonalá zrna karbidu křemíku připraveného metodou vysokoteplotní samošířící se syntézou (VSS) PERFECTION OF SILICON CARBIDE GRAINS PREPARED WITH SELFPROPAGATING HIGH TEMPERATURE SYNTHESIS (SHS)	
Lubomír SODOMKA	175
Výuka fyziky jedním z pilířů materiálového inženýrství, podstatou nedestruktivních zkušebních metod a nanotechnologie PHYSICS LECTURES THE SUPPORT OF NONDESTRUCTIVE TESTING, MATERIAL ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY	
Jan VALÍČEK, Dalibor SOLNAŘ, Marta HARNIČÁROVÁ	181
Metoda expresní diagnostiky pružnopevnostních parametrů a okamžitého napětíodeformačního stavu materiálu ultrazvukem A NEW METHOD FOR RAPID NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSIS OF ELASTIC-STRENGTH PARAMETERS AND FOR DETERMINATION OF AN INSTANTANEOUS STRESS-STRAIN STATE OF A MATERIAL BASED ON ULTRASOUND MEASUREMENTS	
David VARNER*, Miroslav VARNER	189
COMPARATIVE STUDY OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS FROM WOOD SPECIMENS UNDER STATIC BENDING LOAD	
Jan VÍT, Zdeněk SKÁLA, Lukáš STAINER, Jakub SAMEK	199
Optimalizace ultrazvukového zkoušení TNR typu VVER při provozních kontrolách OPTIMISATION OF ULTRASONIC TESTING OF WWER RPV DURING IN-SERVICE INSPECTIONS	
František VLAŠIC, Libor NOHÁL, Pavel GEJDOŠ, Pavel MAZAL	207
Detekce únavového poškození v konstrukčních materiálech využitím metody akustické emise FATIGUE DAMAGE DETECTION IN CONSTRUCTION MATERIALS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE	

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

Grzegorz JEZIERSKI	217
Historie „Museum rentgenek ” na Opolské polytechnické univerzitě HISTORY OF „X-RAY TUBES MUSEUM” ON THE OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	
Władysław MICHNOWSKI, Jarosław MIERZWA, Piotr MACHAŁA, Patryk UCHROŃSKI	223
Badanie kolejowych zestawów kołowych NDT OF RAILWAY WHEELS	
Lubomír SODOMKA	231
Rentgenové záření jako diagnostický prostředek materiálového inženýrství a nanotechnologie X-RAY AS DIAGNOSTICS MEANS OF MATERIÁL ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY	
Lesław SOZAŃSKI	245
Možnosti použití nedestruktivního zkoušení při využití těžních strojů v povrchovém hornictví POSSIBILITY OF APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN THE USE OF MINING MACHINES IN STRIP MINES	
Zbyněk BUNDA, Josef VOLÁK	249
Nedestruktivní hodnocení materiálu energetických komponent NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF POWER PLANT PARTS	
Vaclav SVOBODA, Zdislav OLMR	255
Metoda magnetické paměti materiálu MAGNETIC MEMORY METHOD	
Václav KŮS, Michal ZÁVESKÝ	261
NUMERICAL TESTS ON ACOUSTIC EMISSION LOCALIZING TECHNIQUES FOR ANODIZED ALUMINIUM WATERING CAN	
Asad BABAKHANI, Fereidoun A. MIANJI, Ariya PARISH, Mahdi MOZAFFARIAN, Abdollah DADKHAH	269
WORK OF IRANINAN ULTRASONIC SCANNER FOR FAULT DIAGNOSTIC OF CNG CYLINDERS AT PRODUCTION LINES	
Carole KAOUANE, David CHEINISSE	270
USING NDE APPLICATIONS FOR ASSESSMENT OF PAVEMENT CONDITIONS : TOOLS FOR PUBLIC SERVICES	

Valentin PETROV, Aleksandr PETROV	271
MYTHS AND POSSIBILITIES OF ACOUSTIC EMISSION METHOD	
M. SHEHADEH, M. Abdel-GELIEL, A. ADEL	272
STUDY OF WIND TURBINE BLADES UNDER STATIC LOADING USING ACOUSTIC EMISSION METHOD	
Jan KOBER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ	273
Hodnocení průběhu korozního poškození metodami akustické emise a nelineární ultrazvukové spektroskopie	
CORROSION DAMAGE EVALUATION BY ACOUSTIC EMISSION MONITORING AND NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY TESTING	
Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ	281
Sledování rozvoje únaravových trhlin v nýtovaných leteckých konstrukcích pomocí akustické emise	
MONITORING OF FATIGUE CRACK GROWTH IN RIVETED AIRCRAFT STRUCTURES BY ACOUSTIC EMISSION	
Miloslav PROCHÁZKA, Roman BENEŠ	289
Ruční, mechanizované a manipulátorové kontroly ultrazvukem metodou phased array a tofd – praktické příklady	
MANUAL, MECHANIZED AND MANIPULATOR INSPECTION BY MEANS OF ULTRASONIC PHASED ARRAY AND TOFD METHODS – PRACTICAL EXAMPLES	
Michal KUBINYI, Zdeněk PORKERT	297
Průmyslová digitální rentgenová radiografie	
DIGITAL RADIOGRAPHY FOR INDUSTRY	
Jan HETTLER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ	305
Defektoskopie betonových dílců pomocí nelineární vlnové modulační spektroskopie s využitím 3D skeneru	
DETECTION OF DEFECTS IN CONCRETE SAMPLES BY NONLINEAR WAVE MODULATION SPECTROSCOPY WITH 3D SCANNER	
Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Milan CHLADA, Josef KROFTA	306
Vzdálené monitorování ae - prostředek včasného varování před kolapsem konstrukce	
REMOTE AE MONITORING - A TOOL FOR EARLY WARNING OF STRUCTURE COLLAPSE	
František ŽEMLIČKA, Emil VAŘÁK, Antonín GALLE, Jiří KŘEHNÁČ	308
Aplikace akustické emise při kontinuálním monitorování stavu a rozvoje defektů na kulových zásobnicích čpavku v Lovochemii a.a. Lovosice	

AUTHORS INDEX / INDEX AUTORŮ

Adel A.	272	Michnowski W.	223
Babakhani A.	269	Mierzwa J.	223
Bajer J.	1	Mozaffarian M.	269
Benes R.	289	Nohal L.	107, 207
Bieniek M.	143	Nosek V.	163
Bilek V.	115	Neugebauer J.	101
Blaheta R.	9	Olmr Z.	255
Bohacova M.	17	Parish A.	269
Bunda Z.	249	Pazdera L.	115
Cheinisse D.	270	Petrov A.	271
Chlada M.	281, 306	Petrov V.	271
Chobola Z.	121, 151	Plskova I.	93, 121
Dadkhah A.	269	Porkert Z.	297
Flanderka M.	155	Prevorovsky Z.	273, 281, 305, 306
Gejdos P.	207	Prochazka M.	127, 289
Galle A.	308	Rodriguezova V.	115
Geliel M. A.	272	Roszkosz M.	143
Gorzelańczyk T.	23, 29	Rusin A.	143
Hajek K.	1	Sadowski L.	35
Harnicarova M.	181	Samarkova K.	151
Hettler J.	305	Samek J.	199
Hola J.	23, 29, 35	Schabowicz K.	23, 29
Holec J.	41	Shehadeh M.	272
Jeziarski G.	217	Skala Z.	199
Kaouane C.	270	Skrbek B.	155, 163
Kober J.	273	Smutny J.	115
Keller L.	55	Sodomka L.	169, 175, 231
Kohut R.	9	Solnar D.	181
Koktavy B.	71	Soucek K.	9
Kolcun A.	9	Sozanski P.	245
Kopec B.	61	Spicer J.R.	79
Korenska M.	65, 93, 115, 121	Stainer L.	199
Krehnac J.	308	Stas L.	9
Krofta J.	306	Svoboda V.	255
Kubinyi M.	297	Topolar L.	115
Kus V.	261	Uchronski P.	223
Kusak I.	71	Valicek J.	181
Lhotak P.	155	Varak E.	308
Lindamood L.R.	79	Varner D.	189
Lunak M.	71	Varner M.	189
Machała P.	223	Vít J.	199
Manychova M.	87	Vlasic F.	207
Matysik M.	93, 115, 121	Volák J.	249
Mazal P.	107, 115, 207	Zavesky M.	261
Mianji F.A.	269	Zemlicka F.	308

QC Plzeň s.r.o.

**Authorized Qualification Body to EN 473 / ISO 9712
in APC and SECTOR Cert**

Pověřený kvalifikační orgán dle EN 473 / ISO 9712 v certifikačních systémech APC a SECTOR Cert, které jsou akreditovány u ČIA a DAKKS (DAR)



Certifikační systémy SECTOR Cert a APC jsou vzájemně harmonizovány. Na základě dohody o dodržování společných zásad při provozování kvalifikačního systému a za předpokladu úspěšně složených kvalifikačních zkoušek v QC Plzeň, může kandidát žádat o vystavení jak českého, tak i německého certifikátu.

- **Kvalifikační zkoušky NDT personálu** ve stupni 1, 2 a 3 v metodách MT, PT, RT, UT, VT (*ET, LT) v průmyslových sektorech MS, PV, MM a výrobních oborech c, f, w, t, wp
- **Konzultace pro stupeň 3 v metodách** BASIC, MT, PT, RT, UT, VT (*ET, LT)
- **Vydávání školících materiálů pro stupně 1, 2, 3**
- **Školení a zkoušky pro US americkou kvalifikaci dle ACCP/ASNT (ASME Code + SNT)**

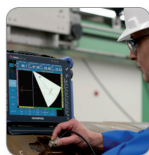
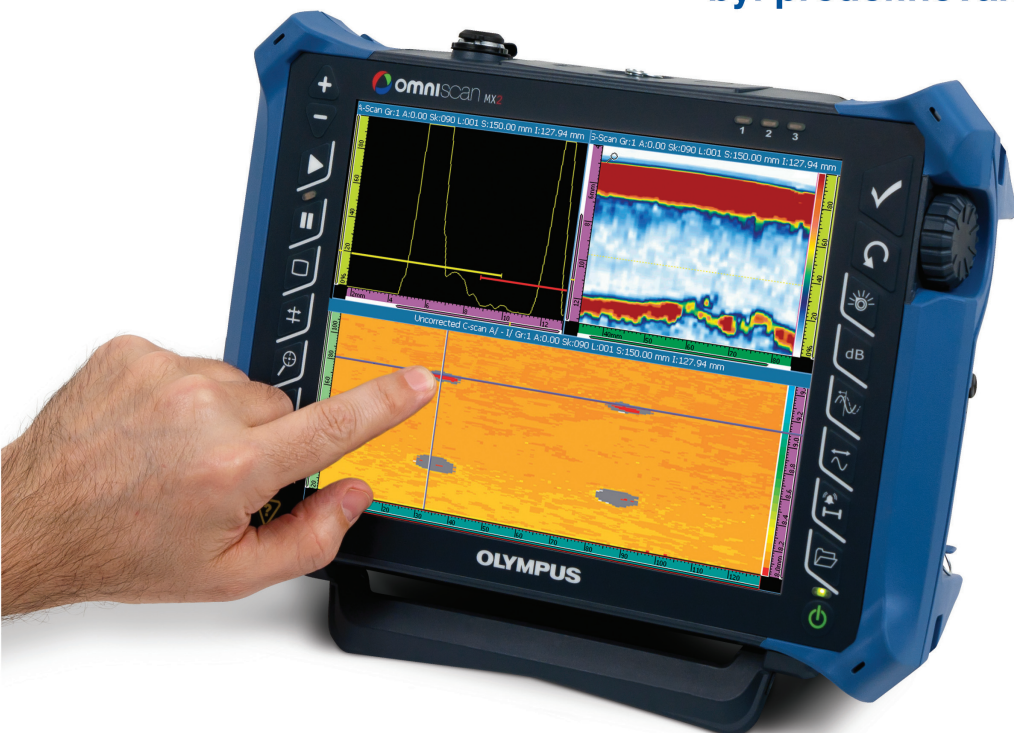


OLYMPUS®

Your Vision, Our Future

omniscan MX2

Referenční standard v technologii Phased Array byl předefinován



BRILANTNÍ DOTYKOVÁ LCD OBRAZOVKA

Novinka od lídra v technologických inovacích Phased Array.

OmniScan MX2: 10,4" LCD obrazovka, rychlé a snadné ovládání, odolnost, vysoko-rychlostní transfer dat, a ještě mnohem víc.

OLYMPUS CZECH GROUP SPOL. S R.O., ČLEN KONCERNU

Pro více informací nás kontaktujte na ndt@olympus.cz, nebo navštivte www.olympus-ims.cz

Defectobook® DIO1000

Ruční Ultrazukový Defektoskop

Verze: Konvenční,
Phased Array,
EMAT

STARMANS electronics, s.r.o.

Vzahradách 24, 180 00 Praha 8
Czech Republic, EU
Telefon: +420 283 842 063
FAX: +420 283 841 067
ndt@starmans.cz
www.starmans.net



Ultrazukový defektoskop Defectobook® DIO 1000 PA

Nový pokročilý digitální ultrazukový defektoskop Defectobook® DIO1000 PA je nyní rozšířen o možnost zobrazování v režimu Phased Array. Je kombinací všech funkcí konvenčního ultrazuku s fázovým posunem. Použitím nejnovější generace elektronických komponentů a mikroprocesorů jsme přinesli nejtenčí, nelehčí a skutečně přenosný Phased Array zařízení, který vaši kontrolu dělá snadnou a rychlou. Standardní konfigurace je 16:16 souběžně, a s rozšiřitelným modulem umožňuje konfigurace 16:32, 16:64 a 16:128. Defectobook DIO1000 PA splňuje všechny běžné normy EN 12568-1, ASME Code 2541, ASTM E2491, E2700 ASTM. Přístroj také spojuje silné výhody digitálního designu s podrobnými dynamickými informacemi echa, s využitím vzorkovací frekvence 200 MHz, 12-bit.

HLAVNÍ APLIKACE:

- Letectví a kosmonautika – zkoušení kompozitů.
- Výroba oceli - velkých odlitek, válcovaná oceli za tepla a za studena.
- Strojírenství - svary a spoje.
- Železnice - traťové uzly manganové oceli.
- Energetika - austenitické svary, hnací hřídele atd.
- Inspekce potrubí.
- Defektoskopie a dimenzování.

TESTY PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ:

- Zkoušení vlivu prostředí dle normy EN 600-2-78, 02 EN 60068-1 a EN 60068-2-29:1996 + Z1: 10
- Vibrační zkoušky podle normy EN 60068-2-8 od 2:08

VŠEOBECNÉ SPECIFIKACE

Displej:	Barvěný TFT transl., 1024 (Š) x768 (V)
Frekv. obnovy zobrazení:	Minimum 60 Hz
Rozměry displeje:	96x130 mm
Fokální množství:	512 (1024)
Synchronizace:	Vnější synchronizace, echo start.
Provozní teplota:	-10 °C až 60 °C
Teplota ukládání:	-40 °C až 70 °C
Provozní doba baterie:	až 10 hodin
Paměť:	2-16 GB
Rozměry:	224x188x34 mm
Hmotnost:	0,74 kg bez baterie + 0,54 kg baterie
Záruka:	2 roky standardně, volitelná 3 roky

BERNARD KOPEC A KOLEKTIV

NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A KONSTRUKCÍ



Akademické nakladatelství CERM vydalo dotisk publikace Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí (Kopec a kol.) Kniha je nyní opět k dispozici všem zájemcům. Více informací a objednávku naleznete zde:

<http://www.cndt.cz>

Kniha Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí na více než 600 stranách podává základní přehled o tradičních i nově zaváděných metodách nedestruktivního zkoušení.

Předností této rozsáhlé příručky je značná pozornost věnovaná fyzikálním základům jednotlivých metod, moderní lomové mechanice i problematice managementu kvality a aktuálnímu stavu v oblasti normalizace oboru NDT. Kniha je určena nejen výzkumným pracovníkům, pedagogům a studentům technických škol, ale zejména odborníkům z praxe.

PAPERS / PŘÍSPĚVKY

NOTES / POZNÁMKY



DIFERENČNÍ SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA IMPACT-ECHO SIGNÁLU DIFFERENTIAL SPECTRAL ANALYSIS OF THE IMPACT-ECHO SIGNAL

Josef BAJER, Karel HÁJEK

University of Defence Brno, Dpt. of Electrical Engineering

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

Abstrakt

Nedestruktivní testování sluchovou analýzou signálu odezvy testovaného tělesa na vybuzení úderem patří k nejstarším defektoskopickým metodám. Moderní technika umožňuje zvyšovat citlivost a objektivizovat tuto metodu NDT. Současná forma této metody, prostá spektrální analýza celého záznamu I-E signálu nevyužívá všechny informace v něm obsažené a zbytečně tak omezuje svou citlivost. Proto jsou realizovány různé detailní analýzy I-E signálu. Článek ukazuje přehled dosavadních přístupů a možnosti jejich zlepšování, které spočívají především ve vyhodnocování relativních časových změn spektra v průběhu odezvy.

Klíčová slova: *Impact echo, analýza signálu, nelineární spektroskopie*

Abstract

NDT by aural analysis of impact response is part of the oldest NDT methods. The modern technologies enable to improve a sensitivity and objectivity of this method. Simply spectral analysis as the present form of this method didn't derive benefit from all information of the recorded signal and it limits the sensitivity. Therefore there are realized various detailed analysis of I-E signal. This paper shows a summary of this accesses and possibilities of their improving. They consist first of all in evaluation of relative time changes of frequency spectrum in the time of response.

Key words: *Impact echo, signal analysis, nonlinear spectroscopy*

1. Úvod

Zvyšující rozvoj technologií a zvyšující se tlak na kontrolu spolehlivosti a bezpečnosti provozu i menších a levnějších zařízení. Proto je snaha rozvíjet i defektoskopické metody s levnějším integrálním (jednorázovým) testováním bez lokalizace místa poruchy s výsledkem třídění dobrý-špatný. Proto se pro některé typy testovaných těles s výraznějšími rezonančními vlastnostmi (kovy, keramika atp.) začala rozvíjet staronová metoda spektrální analýzy impact-echo (I-E) signálu.

V principu tato metoda patří historicky mezi nejstarší metody NDT, kdy „spektrální analýzu“ prováděnu sluchem používali hrnčíři, zvonáři a mnoho dalších profesí. Je ale skutečností, že takovéto testování je do určité míry subjektivní a málo citlivé na malé defekty. Proto se s rozvojem technologií a především počítačů přešlo na diskrétní fourierovskou spektrální analýzu (rychlá Fourierova transformace - FFT),

kteřá odstranila subjektivitu a zvýšila kmitočtovou rozlišitelnost a tím i teoretickou citlivost. Praktická citlivost se pak dále zvyšuje vytvořením co nestabilnějšího způsobu testování (stabilita buzení úderem, stabilita umístění testovaného tělesa) a nasnímáním co největšího počtu referenčních signálů z nepoškozených těles. Důležité je pak následně vytvořit správná testovací kritéria na povolené odchylky vypočítaného kmitočtového spektra. Je zřejmé, že nastavení testovací aparatury je trochu pracné a vyžaduje určité znalosti a zkušenosti. Z toho vyplývá, že se takovéto testování vyplatí pro sériovou výrobu s velkou produkcí. V tom případě se tato metoda stává provozně velmi levnou, protože vlastní provozní náklady jsou minimální, zařízení pracuje naprosto automaticky a s velkou rychlostí cca 1 test/sec.

Na druhou stranu má tato metoda některé nedostatky. Jednak je její citlivost na malé defekty také omezená a dále neumí rozeznat např. rozdíly spektra způsobené povolenými tolerancemi rozměrů a defekty. Hlavní důvod vyplývá ze samotného principu FFT spektrální analýzy. Ten spočívá v počítání průměrného spektra z celé doby záznamu I-E signálu. Nedokáže tak zjistit informace vyplývající z časově a intenzitně proměnného působení tohoto signálu na testované těleso. Určitou nevýhodou je v případě širokospektrálního vyhodnocování i lineární osa FFT s malým relativním rozlišením pro nízké kmitočty a vysokým rozlišením pro vysoké kmitočty. Zde je kupodivu na tom lépe „spektrální analýza“ prováděná lidským sluchem. To totiž neprovádí klasickou fourierovskou analýzu ale frekvenčně-časovou analýzu v logaritmické ose kmitočtu. Navíc je „zpracování v mozku“ zvýšeně citlivé na intermodulační složky (zní disharmonicky) oproti vyšším harmonickým složkám (zní harmonicky). Proto dokáže rozlišit špatný vzorek i bez „vytvoření přesného modelu“ poslechem mnoha dobrých vzorků.

Dosavadní přístupy k podrobnější analýze I-E signálu pro defektoskopii [5], [6], [7] vycházejí z různých předpokládaných aspektů projevů defektů v I-E signálu i z různých technik analýzy těchto signálů. Dostupné testované vzorky ovšem obvykle měly poměrně malé defekty, obtížně zjistitelné i náročnějšími NDT metodami. Je bohužel velmi obtížné získat vzorky vhodných těles s rezonačními projevy, které by měly větší a odstupňované defekty typu prasklina. Proto dosud publikované přístupy k analýze I-E signálů neprokázaly na těchto vzorcích jednoznačné výsledky a nebyly stanovené jednoznačné postupy pro takovouto analýzu.

2. Teoretická východiska pro analýzu I-E signálů a dosud publikované metody

Základní časový průběh I-E signálu s typickým exponenciálním tlumením jeho amplitudy je velmi dobře znám a publikován v mnoha pramenech. Detekce poruch a defektů testovaných těles se provádí vesměs ve spektrální oblasti a je sledováno více vlastností snímaných I-E signálů založených na různých fyzikálních projevech.

Nejjednodušší je klasická spektrální analýza celého I-E signálu testovaného tělesa. Získané spektrum můžeme porovnávat se standardním spektrem získaným testem sady dobrých vzorků, jak to bylo popsáno v úvodu. Tento postup je poměrně spolehlivý pro větší rozměrové, tvarové a materiálové odlišnosti a pro relativně velké defekty typu prasklina. Ale jak již bylo uvedeno v úvodu, nelze dosáhnout vyšších citlivostí a z důvodu průměrování celé odezvy se evidentně ztrácí množství časově proměnných informací v signálu, které vypovídají o různých vlastnostech tělesa.

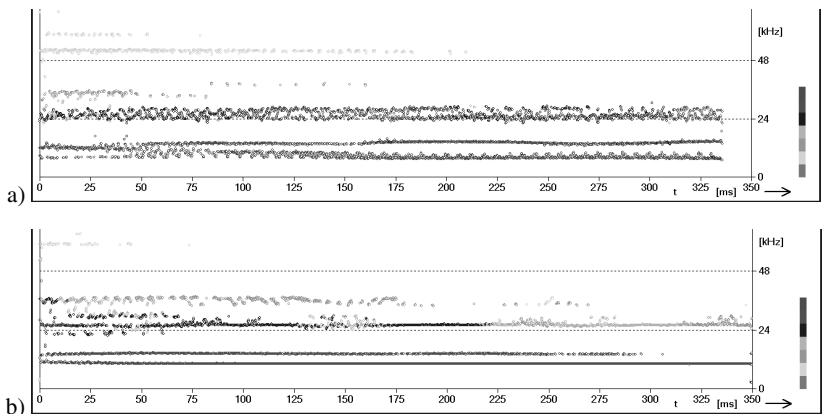
Proto byl v článcích [5], [6] publikován nový princip NDT, který vychází z nelineárních projevů defektů typu prasklina na šíření elastických kmitů v materiálech. Východiskem k tomu byl poznatek o vlivu praskliny na posuv

rezonančního maxima při harmonickém buzení tělesa [2], [4]. Lze předpokládat, že tento efekt se alespoň částečně projeví i při buzení širokopásmovým úderovým signálem. Další úvahy o nelineárním projevu těchto defektů vychází z obecné teorie současně působení více různých harmonických signálů, kdy pro dva budící signály získáme výsledné spektrum se složkami podle vztahu

$$f_V = |\pm nf_1 \pm nf_2|_{m,n=0,1,2,\dots,\infty}, \quad (1)$$

takže těleso s defektem bude v I-E signálu obsahovat nové kmitočtové složky, a to jednak tzv. vyšší harmonické od budících signálů (různé rezonance vybuzené úderem) a dále tzv. součtové a rozdílové (intermodulační) složky. Další zásadní myšlenkou článku [5] byla ta skutečnost, že nelineární efekty se projevují s vyššími mocninami amplitudy budících signálů, a tudíž že tyto efekty budou výrazně závislé na amplitudě a tudíž také na čase proměnného I-E signálu. Z toho vyplynula potřeba realizovat časově-frekvenční analýzu známou např. jako spektrogramy, založené na použití krátkodobé FFT (tzv. STFT).

Pro tuto analýzu se ale nepříznivě projevuje princip neurčitosti, kdy při zvyšování časové rozlišitelnosti (zkracování analyzovaného úseku) klesá adekvátně kmitočtová rozlišitelnost. Proto byly hledány jak optimální kompromisy z hlediska volby délky analyzovaného úseku, tak i další výpočetní postupy, minimalizující tyto negativní efekty, jako umělé prodlužování testovaného úseku, použití „klouzavých“ spekter apod. Cílem pak bylo nalézt ve spektrogramech zmíněné nelineární efekty (frekvenční posuv a vznik nových složek) závislé na amplitudě a tudíž i čase I-E signálu. Po prvních jednodušších pokusech a metodách byl vytvořený speciální programem, který detekoval a zakresloval polohu maxim [6]. Tak jsme získali výsledky pro dobrý a špatný vzorek, kde u špatného vzorku se projevovala zjevná kmitočtová nestabilita některých kmitočtových složek, viz obr. 1.

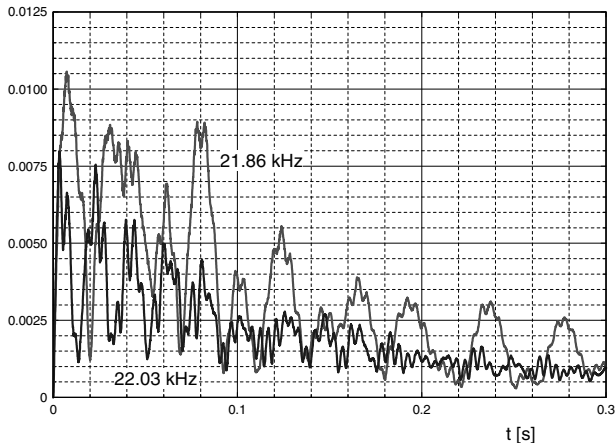


Obr.1 Maxima spektrogramu: a) špatný vzorek, b) dobrý vzorek
Fig.1 Tops of spectrogram: a) damaged sample, b) good sample.

Nicméně výsledky do značné míry záležely na nastavení mnoha parametrů použité spektrální analýzy (klouzavé spektrum) a byl použit poměrně malý analyzovaný úsek s malou kmitočtovou rozlišitelností, takže často bylo výsledné maximum dáno součtem více blízkých proměnných složek a výsledky nebyly zcela spolehlivé.

Jako kontrolní metodu jsme se pokoušeli využít sluchovou analýzu, kdy jsme transponovali široké kmitočtové spektrum (v závislosti na typu vzorku 30-150 kHz) do akustického pásma.

Protože slabinou uvedených metody se jevila malá kmitočtová rozlišitelnost, snažili jsme se ji doplnit úzkopásmovou filtrací „podezřelých“ kmitočtových složek se získáním jejich časových závislostí, viz obr. 2. Ani tato cesta nevedla k získání spolehlivých výsledků a byla dosti pracná.



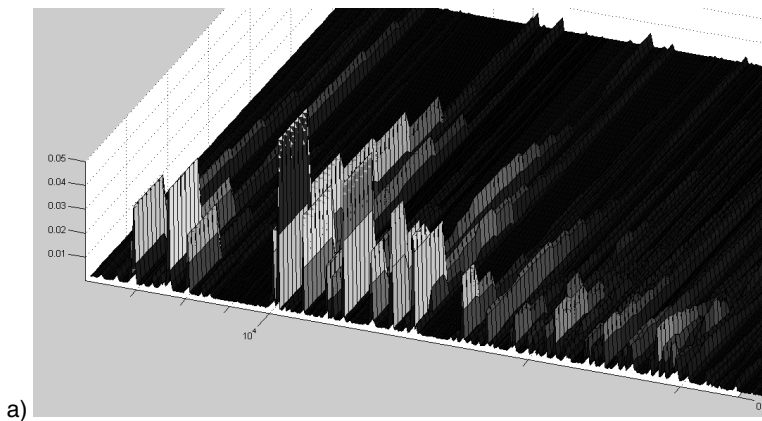
*Obr. 2 Časové průběhy amplitudy dvou vybraných rezonančních složek
Fig. 2 Time dependencies of magnitude of two resonant frequency components .*

Pro zvýšení časově-frekvenční rozlišitelnosti relativně širokopásmových signálů a přehlednější zobrazení spektrogramů byla vytvořena metoda kvazi-logaritmické FFT s proměnnou délkou úseků pro různá kmitočtová pásma [7]. Touto cestou byly získány jiné pohledy na časově-spektrální znázornění I-E signálů, viz obr. 3, kde jsou tyto spektrogramy zobrazeny jak v lineární, tak i v logaritmické ose. Opět se ukázala malá spolehlivost v rozlišení dobrých a špatných vzorků, protože i u dobrých vzorků se projevovala určitá nestabilita jednotlivých složek spektra.

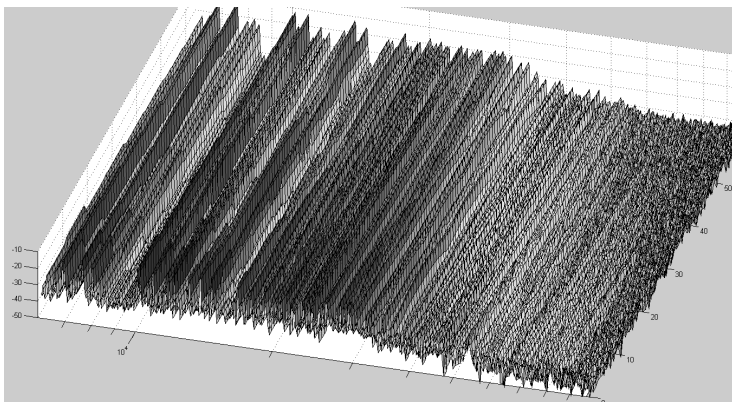
2. Diferenční analýza I-E signálů ve frekvenční oblasti

Z dosavadních výsledků bylo zjevné, že projevy způsobené nelineárními projevy relativně malých defektů byly obtížně rozlišitelné v množství dominantních a při tom časově částečně nestabilních kmitočtových složek. Proto jsme se pokusili jít cestou zvýraznění nestabilit odečtením základních dominantních složek signálu a také bazálního šumu. K tomu byl vytvořen program pro realizaci odečtení těchto složek s nastavitelnou mezí úrovně pro jejich odlišení. Jak je zřejmé z obr. 4, z vypočteného spektra celé odezvy byla vypočítána relativní úroveň spektra, která byla použita jako posouvání mez pro rozdělení spektrálních složek. Z takto separovaných složek byly zpátky poskládány a zaznamenány časové signály.

Separované signály jsme opět podrobili časově-spektrální analýze. Jak je zjevné z obr. 5, lze pozorovat u vzorku s defekty ve spektrogramu s podstatně menší dynamikou mírně vystupující „podezřelé“ nestabilní složky, nicméně ani toto zvýraznění neposkytlo jednoznačné a spolehlivé výsledky.



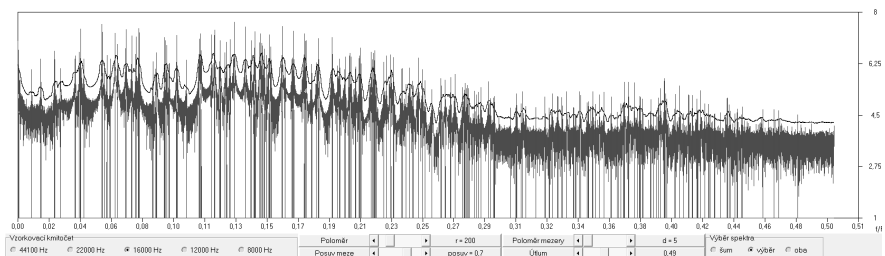
a)



b)

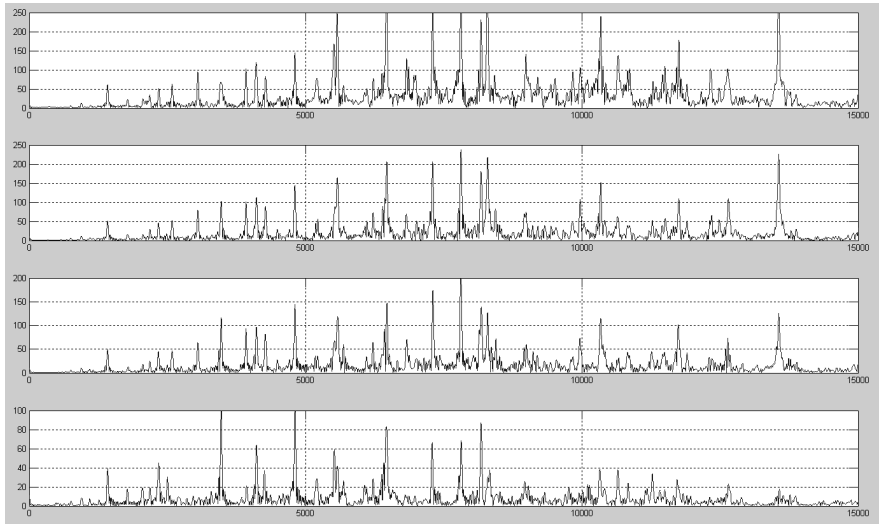
Obr. 3 Spektrogramy I-E signálu s kvazi-logaritmicovou kmitočtovou osou : a) lineární osa amplitudy, b) logaritmická osa amplitudy

Fig. 3 Spectrograms of I-E signal with quasi-logarithmic frequency axis: a) linear axis of magnitude, b) logarithmic axis of magnitude.

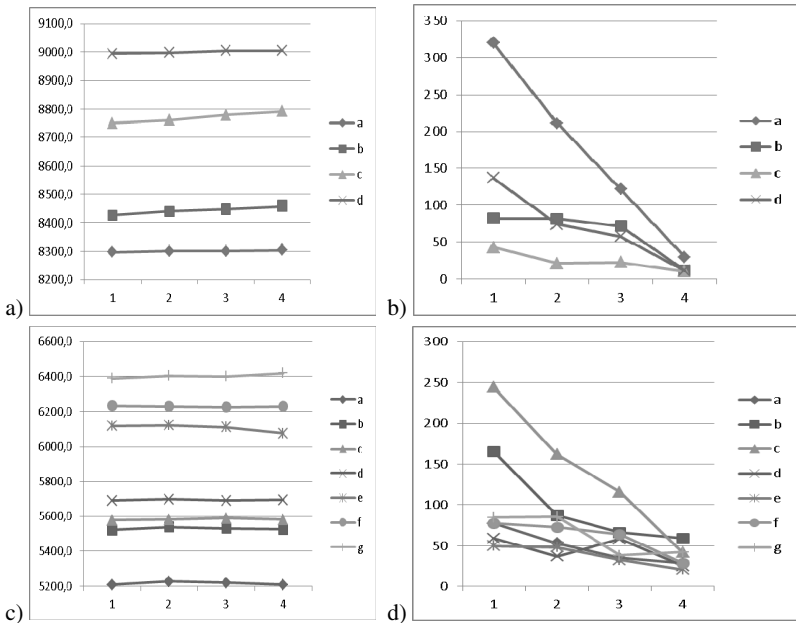


Obr. 4 Spektrum celého I-E signálu se zobrazením separační meze

Fig. 5 Spectrum of whole I-E signal with limit of separation



Obr. 6 Spektra úseků 1-4 poškozeného vzorku
 Fig. 6 Spectrum of stages 1-4 of damaged sample



Obr. 7 a,c) závislosti kmitočtů dominantních složek, b,d) závislosti jejich amplitud na pořadí úseků
 na pořadí úseků

Fig. 7 a,c) frequency dependencies of dominant components, b,d) dependencies of their magnitudes as function of stage order

kmitočtu, viz obr. 7 c). Ani pokles amplitudy těchto složek není zcela pravidelný, jak to ukazuje obr. 7 b,d), existují i složky, které po poklesu mají i následný vzestup apod.

5. Závěr

Příspěvek ukazuje přehled různých přístupů k časově spektrální analýze I-E signálu se snahou o získání informace o relativně malých poškozeních typu prasklina. Vzhledem k malým defektům dostupných vzorků, se v předchozích přístupech nedařilo získat jednoznačné informace ať už přímým sledováním časových závislostí dominantních maxim spektrogramů, tak ani selektivnějším typem kvazi-logaritmických spektrogramů.

Proto bylo snahou zvýraznit relativně malé změny spektra diferenčním přístupem jak v kmitočtové, tak i v časové oblasti. Bohužel, ani toto zvýšení rozlišení změn v získaných spektrálních závislostech nepřineslo jednoznačné postupy pro detekci nelineárních efektů způsobených malými defekty typu prasklina. Nicméně, ukázalo se, že časově spektrální závislosti jsou značně proměnné i u dobrých vzorků a lze usuzovat, že se zde projevují další materiálové a mechanické vlastnosti testovaných těles.

Proto je potřebná další analýza podmíněná získáním vzorků s odstupňováním dostatečně velkých defektů, což umožní spolehlivější rozlišení důvodů časově-spektrálních změn v naměřených signálech a případná analýza dalších vlastností testovaných vzorků.

Tato práce byla podpořena prostředky grantové agentury ČR pro grant 102/09/H074.

Literatura

- [1] Jaeger, B.J., Sansalone, M.J., and Poston, R.W. "Using Impact-Echo to Assess Tendon Ducts," *Concrete International*, Vol. 19, No.2, February 1997, pp. 42-46.
- [2] Van Den Abeele K. A., Carmeliet, J., TenCate, J. A. Johnson P. A. "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage. Part II: Single Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy". *Res. Nondestr. Eval.* 12/1, 31-42, 2000.
- [3] Johnson, P. A., TenCate, J. A., Guyer R. A. Van Den Abeele K. A. "Resonant nonlinear ultrasound spectroscopy". US Patent 6330827
- [4] Muller, M., Sutin, A., Guyer, R., Talmant, M., Laugier, P. Johnson P. A. "Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone." *J. Acoust. Soc. Am.* 118 (6), December 2005.
- [5] Hájek K, Šikula, J. A Resonance Frequency Shift in Spectral Analysis of the Impact Echo. Proceedings of the International Symposium 18th ISNA 2008, Stockholm. S. 525-528. ISBN: 978-0-7354-0544-8 (ISSN 0094-243X).
- [6] Hájek K. Šikula, J. Analysis of Impact-Echo Signal of Nonlinear Damaged Elements in Frequency-Time Domain. Proceedings of the International Workshop NDT in Progress. Praha, 2009, pp., 93 – 100, ISBN 978-80-214-3968-9
- [7] Hájek, K. Quasi-Logarithmic FFT and their Use for an Analysis of the Impact-Echo Signals. In Proc. of 8th Workshop NDT 2010 Brno, 2010.
- [8] Hájek K. Šikula, J. Bajer, J. Detailed Analysis of Impact-Echo Signals of Specimens with Nonlinear Effects. ECCTD 2010, Moskva



X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY IN GEOTECHNICS

**Radim BLAHETA, Roman KOHUT, Alexej KOLCUN, Kamil SOUČEK,
Lubomír STAS**

Ústav geoniky AVČR, v. v. i.

Contact e-mail: alexej.kolcun@ugn.cas.cz

Abstract

The paper describes some experience with the X-ray CT-FEM analysis. It focuses on geocomposites arising by chemical grouting of coal substances and on using mathematical modelling of response to a load. The application potential of this new methodology is found in utilization of the obtained properties for solving the stability problems by numerical modelling of geotechnical projects. The following research activities are touched:

i) application of X-ray computed tomography (CT) for visualization of geo-materials structures, mainly geocomposites consisting of rocks (coal substance) and chemical grout materials (polyurethane resin), ii) finding correspondence between CT values and local material properties, iii) numerical testing of digitalized samples for obtaining homogenized properties, iv) experimental validation by means of laboratory tests of calculated homogenized properties.

Key words: X-ray CT, geocomposite, FEM, homogenization

1. Introduction

The paper describes a way, how to use the digital image of geocomposite structure not only for visualization but also for construction of a numerical model by the finite element method (FEM). The created model can be used for testing the material response to mechanical (eventually another) loading and determination of material properties (of geocomposites). The presented numerical analysis is performed by software, developed at the Institute of Geonics because most of the standard FEM packages are not able to solve large scale problems arising from high resolution scanning and specific problems related to a determination of macroproperties (homogenization, upscaling).

The presented paper focuses on geocomposites arising from chemical grouting of coal substances and on using mathematical modelling of response to a load. The application potential of this new methodology is found in utilization of the obtained (homogenized) properties for solving the stability problems by numerical modelling of geotechnical projects.

The contribution will touch the following research activities.

- Application of X-ray tomography for visualization of structure of geomaterials, mainly geocomposites consisting of rocks (coal substance) and chemical grout materials (polyurethane resin).
- Analysis of a need for modification of the digitalized data and finding correspondence between CT values and local material properties.

- Numerical testing of digitalized samples for obtaining homogenized properties.
- Experimental validation by means of laboratory tests of calculated homogenized properties.

2. Materials used for preparing geocomposite specimens

In order to affect the properties of coal mass the two-component foaming polyurethane grouts (PUR) with conspicuous volume change during curing was used. These grouting media show high deformation abilities and good adhesive properties in respect of rocks [5]. This is a good condition for affecting the properties of brittle coal mass and discontinuities too. The physico-mechanical properties from laboratory research are mentioned in Fig. 1. Coal for preparing of geocomposites was withdrawn from the coal seam No39 in local underground mining plant (see Tab. 1). The mechanical properties of used materials serve as input data for mathematical modelling of behaviour at compression loading of the investigated coal geocomposites.

Young Modulus [MPa]	Poisson's ratio	Uniaxial compressive strength [MPa]
2000 – 3000	0.25 – 0.4	20 – 40

Tab. 1 Basic properties of used coal.

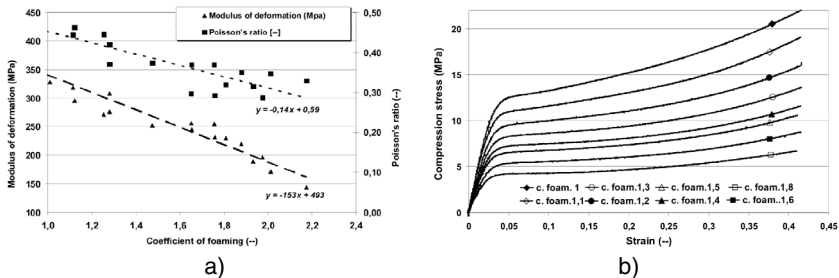


Fig. 1 a) Dependence of deformation modulus and Poisson's ratio on the degree of foaming of used polyurethane grouts. b) Compressive stress-strain curves for different foaming coefficient of used PUR.

Coal geocomposites were prepared from blocks of hard coal about 250x250x250 mm size, which were withdrawn in situ. Such coal ashlar were partially crushed within a protective jacket so as to form an irregular network of cracks in coal ashlar. A coal block prepared in such a way was put into a knockdown steel sheet mould and located within a sand bed. During the next step of sequence a grouting hole was bored in the coal ashlar into which a perforated grouting pipe was inserted. Subsequently the specimen with grouting pipe was closed up in its sheet mould by running in of concrete mixture by which a concrete closing-up plate of about 60 mm thickness was formed. Such closed-up ashlar was grouted during the last phase by means of perforated grouting pipe, which passed across the closing-up concrete plate. The grouting was performed by means of manual controlled two-component

grouting pump – Fig. 2. The blocks of withdrawn coal as well as of coal geocomposites were cut into individual cubic test pieces about 50-60 mm size.

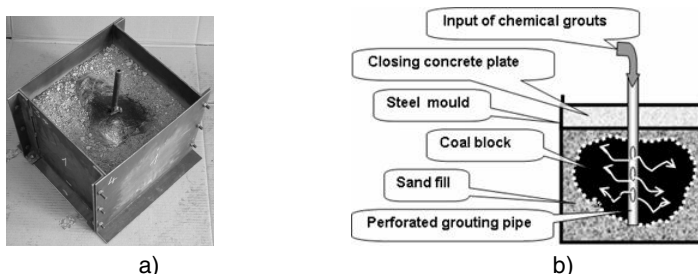


Fig. 2 a) Coal-PUR geocomposite specimen, b) scheme of geocomposit preparing.

The properties of the coal geocomposites differ from original properties of coal mass – Fig. 3. After reach the uniaxial compressive strength level (UCS) during compression test, coal specimens show a brittle or even explosive failure character. The coal geocomposites show different behaviour: after they have reached the UCS, maintain more or less their shape and the sudden loss of stability does not occur. In the majority of geocomposites, in comparison with coal, we can observe a residual strength beyond the UCS.

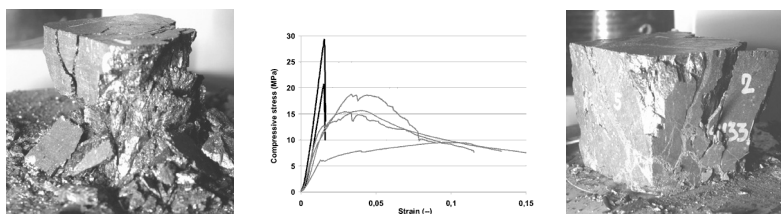


Fig. 3 Stress-strain curves of pure coal and geocomposite based on the PUR grouting system obtained by uniaxial compressive test and their typical manner of the test samples failure after reaching UCS

3. Coal geocomposite visualization via X-RAY Computer Tomography (CT)

One of the potential methods how to observe the distribution of grouting resin in the cubic coal geocomposite specimen is the application of non-destructive methods by means of X-ray CT in the selected parallel individual cross-sections. 3D model of a geocomposite specimen for creation of rectangular grid for finite element (FE) modelling purpose can be constructed from these parallel individual cross-section images. CT image is constructed as regular rectangular mesh (voxel grid). Dimension of voxel is 0,1mm x 0,1mm x 1,125mm.

Primary image analysis consists of: **1.** rescaling the CT-values of specimen, **2.** coarsening of the voxel mesh, **3.** identifying the CT-values with the components of the geocomposite.

3.1 Rescaling the CT-values

The scanning process is very time consuming and one can expect interruptions within it. Due to this, the independent scanning of slices is preferred, regarding the stability and the consistence of the scanning process. Moreover, there is a need to identify CT values with etalon materials. Such rescaling is organized as follows.

1. CT values are scaled in each slice independently, where original extremal values correspond to values 0 and 255 respectively – Fig. 4.
2. CT-values of etalons (min, max, average) are found in each slice in an independent way – Fig. 5a), Tab. 2.
3. In each slice the CT-values of geocomposite voxels are interpolated linearly, using prescribed etalon values – Fig. 5b).

The result of this rescaling process is shown in Fig. 6.

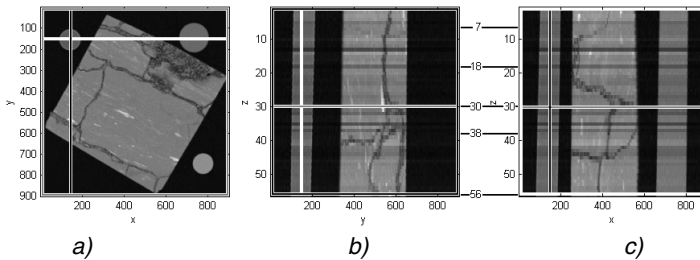


Fig. 4 independently scaled slices **a)** horizontal slice xy , **b)** crosssection yz , **c)** crosssection xz **b)–c)** location of horizontal slices from other figures is marked.

N°	CT values of etalons			Prescribed value	Material
	Min value	Max value	Avrg value		
1	7	21	13	0	Empty
2	89	104	97	100	Oil
3	104	122	113	120	H ₂ O
4	145	162	154	180	Carbon

Tab. 2. Found and prescribed CT values in the slice N°038 of the analyzed sample.

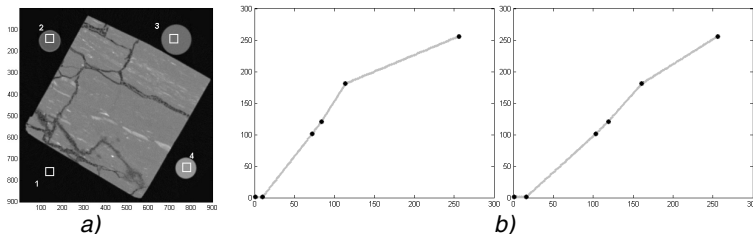


Fig. 5 **a)** CT-scan (slice N°038) of the geocomposite sample with etalons. **b)** Rescaling the CT-values in the slices N°018 and N°056.

In the Fig. 5 a) the areas for the evaluating the characteristic values of etalons in the slice are shown. Each slice is analyzed independently and gives us a table like

Tab. 2. Obtained data 'Avrg value' (horizontal axis) vs. 'Prescribed value' (vertical axis) generate the polyline interpolation – Fig. 5 b) for each slice. The Fig. 6 shows the resulting interpolation of the whole sample.

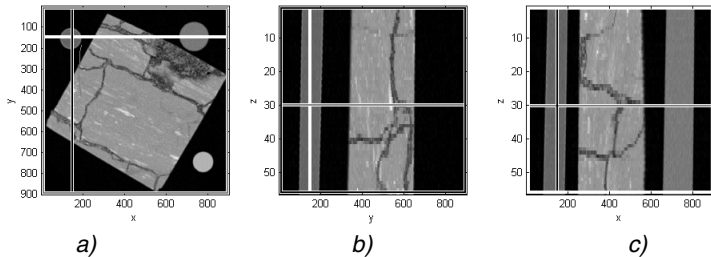


Fig. 6 Polyline independently rescaled slices. a) horizontal slice xy N°030, b) vertical cross-section yz , c) vertical cross-section xz .

3.2 Coarsening of the voxel mesh

Mesh of a geocomposite sample (after rotation of the geocomposite sample and clipping) consists of $623 \times 633 \times 56$ voxels. Due to the used computational facilities it was necessary to reduce the voxel mesh. Coarsening was obtained by averaging the squares of 6×6 voxels in each slice. Resulting voxel mesh consists of $103 \times 105 \times 56$ voxels. Fig. 7 shows the original and coarsed slice in two levels of detail.

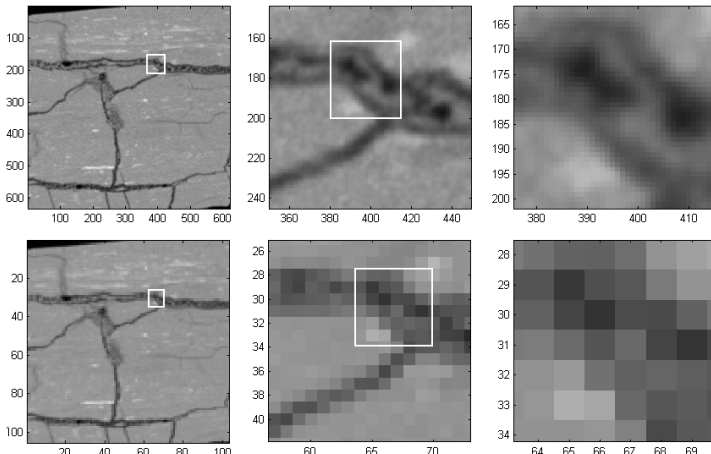


Fig. 7 Upper row: the whole slice N°007 and two levels of detail in the original resolution. Bottom row – the same for the 6×6 coarsed mesh.

3.3 Identifying the CT-values with the components of the geocomposite

Components of the coal geocomposite are identified according to the Tab. 3. Fig. 8 shows the resulting distribution of the components for the fine and coarse meshes.

N°	Material	CT value	Young Modulus [Mpa]	Poisson's ratio	γ [g cm ⁻³]	% of volume
0.	empty space	0 – 20				0.2
1.	PUR1	21 – 45	200	0.28	0.6	0.9
2.	PUR2	46 – 70	300	0.38	0.9	3.7
3.	PUR3	71 – 95	400	0.40	1.1	7.5
4.	Coal	≥ 96	2200	0.23	1.3	87.7

Tab. 3. CT-values and mechanical properties of the geocomposite components.

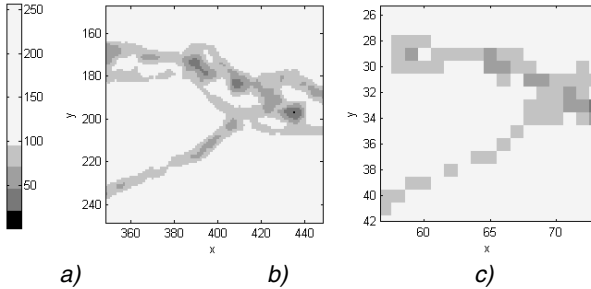


Fig 8 a) Reduced scale of CT-values, b) detail (middle column of the Fig. 7 of the fine mesh c) the same detail in the resulting coarse mesh.

5. Numerical determination of homogenized properties of geocomposites

For the determination of elasticity parameters, the specimen ought to be loaded by suitable boundary conditions.

In the first variant (**D**), the boundary conditions are of the Dirichlet's type with normal zero displacements prescribed on five faces of the cube and nonzero (constant) normal displacements given on the sixth face. Three cases (D_x, D_y, D_z) are solved, they differ in the direction of the applied nonzero displacements. This approach is close to triaxial test with induced side pressure.

In the second variant (**M**), mixed boundary conditions are used with normal displacements given on two opposite faces (the nonzero displacements on one face, the zero displacements on the second one) and zero forces on the other four faces. Again three cases (M_x, M_y, M_z) with different direction of loading were solved. The mixed boundary conditions are closer to conditions of experimental laboratory test (uniaxial compressive loading).

In both types of the problems it is supposed that the stress and the strain tensors of the homogenized cube have zero shear components.

Resulting relationships are valid:

$$\text{Case (D): } \nu = \frac{1}{1+p}, \quad E = \frac{r(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad \text{where } p = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} = \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad \text{and } r = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z}. \quad (1)$$

$$\text{Case (M): } \nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}, \quad E = \frac{\sigma_z(1+\nu)(1-2\nu)}{2\nu\varepsilon_x + (1-\nu)\varepsilon_z}. \quad (2)$$

The finite element method (FEM) approach was used for finding proper stress and strain tensor components. To compute (1), (2), averaged stress and strain tensor components were found

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \varepsilon_x^j}{nel}, \bar{\varepsilon}_y = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \varepsilon_y^j}{nel}, \varepsilon_x = \varepsilon_y = (\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)/2, \varepsilon_z = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \varepsilon_z^j}{nel},$$

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \sigma_x^j}{nel}, \bar{\sigma}_y = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \sigma_y^j}{nel}, \sigma_x = \sigma_y = (\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y)/2, \sigma_z = \frac{\sum_{j=1}^{nel} \sigma_z^j}{nel}.$$

The corresponding parameters are presented in the tables below.

	D		M		UCT	NM	
Dir. of loads	E [MPa]	v	E [MPa]	v	E [MPa]	E [MPa]	v
X	1916	0.236	1903	0.245	1505	1711	0.176
Y	1864	0.239	1858	0.243	1098	1231	0.138
Z	1784	0.244	1789	0.237	930	1039	0.128

Tab. 4 (D,M) – computed and (UCT) – measured (uniaxial compressive test) averaged elasticity parameters for directions x,y,z. (NM) – optimized elasticity parameters for coal.

(NM) columns of Tab. 4 give such parameters of coal, for which the homogenized properties of geocomposites approximate in the best way measured values of Young modulus. Nelder-Mead optimization method was used [2].

6. Conclusion

From results of FEM and experimental analysis we can state, that the absolute values of Young's modulus obtained by above described methodology of FEM are not close to the values gained by UCT in a laboratory. This incongruence between analyzed Young's moduli can be caused by following facts.

- Used value of the Young's modulus of the coal in mathematical model is determined in a laboratory on undisturbed coal samples prepared by cutting. In FEM we used its average value, which seems too high and does not lead to real obtained experimental results (Tab 4).
- The used coal ashlar were partially crushed within a protective jacket to form an irregular network of cracks. It can affect real values of Young's modulus of the coal in the geocomposite sample. The values of the Young's modulus should be lower then the used one in FEM.
- Due to the coarsening of the FEM mesh and reduction of the CT-values scale some of the discontinuities dissaperar from the computational model.

To obtain better results, the developed FEM methodology will be directed to apply properties of orthogonal anisotropy. Next step of the experimental test will be focused on testing on samples of larger size.

7. Acknowledgements

Presented work was supported by the Grant Agency of the Czech Republic via the project GACR105/09/1830 "Multiscale modelling and X-Ray tomography in geotechnics" and in connection with project Institute of clean technologies for mining and utilization of raw materials for energy use, reg. no. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 supported by Research and Development for Innovations Operational Programme financed by Structural Funds of Europe Union and from the means of state budget of the Czech Republic.

8. References

- [1] Blaheta, R., Kohut, R., Kolcun, A., Souček, K., Staš, L.: Using of multiscale modelling and X-ray computer tomography in geotechnics - first experience, In: *Advances in Rock Engineering - ISRM International Symposium 2010 and Asian Rock Mechanics Symposium /6/. Keynotes and Abstracts*. New Dehli: ISRM, Indian National Group of International Society for Rock Mechanics, Central Board of Irrigation and Power, 2010. pp. 1-9.
- [2] Nelder, J.A., Mead, R.: A simplex method for function minimization, *Comput. Journal* 7, 1965, pp. 308-313.
- [3] Otani J.: State of the Art report on geotechnical X-ray CT Research at Kumamoto University, In: *Proc. of the Int. Workshop on X-ray CT for Geomaterials – soils, concrete, rocks, Geox 2003*. A.A. Balkema Publisher, Kumamoto, Japan, 2003.
- [4] Souček, K., Staš, L., Obara, Y., Fukahori, D.: X-ray CT observation of failure in coal geo-composites, In: *Advances in Geomaterials and structures AGS'06. Proceedings of the First Euromediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*. Tunis, 2006. pp. 269-274.
- [5] Ščučka, J., Souček, K.: Stavba a vlastnosti geokompozitních materiálů s polyuretanovými pojivky, In: *Documenta Geonica 2007/1*. Ostrava, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2007. 247p.
- [6] Technical list of the PUR grouting system Bevedan – Bevedol S21, <http://www.minova.cz/materialy/hornictvi/materialy-pro-injektaze>



POSTUP TEARDOWN ANALÝZY DRAKU LETOUNU TEARDOWN ANALYSIS PROCEDURES OF AIRFRAME

Marie BOHÁČOVÁ

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Praha
Aerospace Research and Test Establishment, Prague
Contact email: bohacova@vzlu.cz

Abstrakt

Teardown analýza je nedílnou součástí filozofie Damage Tolerance. Aplikace této filozofie na letoun vyžaduje mimo jiné stanovení detekovatelné velikosti poškození, přípustné velikosti poškození z hlediska zbytkové pevnosti, stanovení periodicity a způsobu nedestruktivních prohlídek kritických míst v konstrukci. Pro stanovení těchto požadavků je nutné znát řadu charakteristik, které se stanovují v jednotlivých dílčích krocích (materiálové vlastnosti, výpočtové metody, intervaly prohlídek, apod.). Mezi tyto jednotlivé kroky patří i verifikace nedestruktivních metod zkoušení (Non-Destructive Testing, NDT). Jedním z cílů NDT je stanovení minimální detekovatelné délky (velikosti) poškození s 90% pravděpodobností při úrovni spolehlivosti 95% v daném kritickém místě konstrukce a stanovení metodik kontrol jednotlivých kritických míst draku letounu. Aby bylo této minimální detekovatelné délky a dané pravděpodobnosti dosaženo, je třeba provést tzv. Teardown analýzu, která je nejpřesnější a nejspolehlivější metodou ověření nalezených poškození danou NDT metodou. Na základě znalosti minimální detekovatelné velikosti poškození, růstové křivky poškození a maximálního poškození, které ještě zajistí požadovanou zbytkovou pevnost konstrukce, jsou předepisovány prohlídky v provozu letounu v daných inspekčních intervalech. Obecně je tato problematika náročná na řešení, protože se v primárních oblastech konstrukce vyskytují poruchy draku detekovatelné s různým stupněm obtížnosti (vizuálně, skryté pod jednou, nebo více vrstvami, nepřístupné, apod.).

Klíčová slova: Teardown analýza, Damage Tolerance, nedestruktivní zkoušení, pravděpodobnost detekce poškození, úroveň spolehlivosti

Abstract

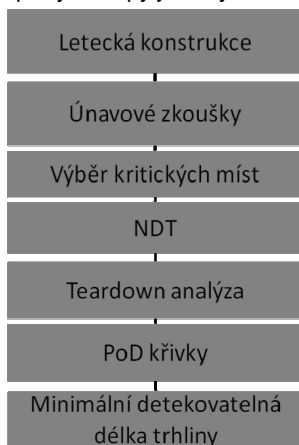
Teardown analysis is an integral part of Damage Tolerance philosophy. The application of this philosophy for aircraft requires the determination of detectable flaw size, tolerated flaw size in term of residual strength, determining the periodicity of non-destructive inspection of principal structural elements. To determine these requirements is necessary to know a number of characteristics that are determined in the individual steps (material properties, calculation methods, inspection intervals, etc.). These steps include the verification of non-destructive testing methods (Non-Destructive Testing, NDT). One aim of NDT is to determine the minimum detectable flaw size with 90% probability at 95% confidence level in the critical part and design procedures for the inspection of the airframe critical parts. To achieve this minimum detectable flaw size and probability, it is necessary to make so-called teardown analysis, which is the most accurate and reliable method of verifying the damages detected by the NDT method. Based on the knowledge of the minimum detectable flaw size, growth curves and the maximum damage that still provides the required residual structural strength are prescribed the in-service nondestructive inspection of the aircraft in the inspection intervals. Generally, the issue is difficult to solve because there are damages with varying

degrees of difficulty (visual, hidden under one or more layers, inaccessible, etc.) in the primary areas of airframe structures.

Key words: Teardown analysis, Damage Tolerance, Non-Destructive Testing, Probability of Detection, Confidence level

1. Úvod do filozofie Damage Tolerance z hlediska NDT

Pomocí filozofie Damage Tolerance (DT) lze prodloužit efektivní životnost letounu a zajistit jeho požadovanou provozní spolehlivost. Tato filozofie umožňuje efektivní využití aktuálního stavu draku letounu, přičemž je kladen požadavek na předepsání intervalů provozních kontrol letadla a zpracování jejich postupů. Tyto provozní kontroly letadla jsou sestavovány za účelem detekce degradace materiálu, které by mohlo vést k předčasnému poškození konstrukce letounu. Je v nich zdůrazněna důležitost vysoké úrovně údržby konstrukce letounu, zejména z hlediska pozornosti na únavové poškození a korozi. Postupně se tedy zdůraznila důležitost kontrolních programů, při kterých může letoun dosáhnout dlouhé, bezpečné provozní životnosti. Takovéto programy by měly pokrýt primární konstrukci a konstrukční spoje a měla by být věnována pozornost zejména skrytým oblastem, které jsou vystaveny opakovanému cyklickému zatěžování. Princip filozofie Damage Tolerance z hlediska NDT se skládá z několika etap. Tyto etapy jsou vyobrazeny na Obrázku 1.



Obrázek 1 Základní schéma principu Damage Tolerance z hlediska NDT [2]
Figure 1 Schematic diagram of Damage Tolerance philosophy in term of NDT [2]

Po provedení únavových zkoušek draku letounu a na základě nich stanovených kritických míst konstrukce lze přistoupit k nedestruktivnímu zkoušení draku letounu, tedy k etapě NDT. Před samotným nedestruktivním zkoušením je nutné provést nezbytné kroky k tomu, aby celá kontrola draku letounu byla provedena korektně a aby výsledky kontroly byly způsobitelné pro další etapy Damage Tolerance. Základní postup, který by měl kvalifikovaný a hlavně zkušený NDT operátor vzít v úvahu, zahrnuje tyto důležité kroky:

1. seznámení s leteckou konstrukcí (výkresová a materiálová dokumentace);
2. seznámení s kritickými místy konstrukce (vlastnosti, parametry);

3. výrobu referenčních vzorků s různými rozměry simulovaných vad (případně s nacyklovanými únavovými trhlinami). Tyto vzorky by měly, co nejpřesněji, simulovat kritické místo a být ze stejného materiálu;
4. zvolení vhodné NDT metody dle povahy míst. Ověření zvolené NDT metody v provozu;
5. zvolení vhodného systému značení pro jednoznačnou identifikaci kontrolované části či celku;
6. provedení záznamu nalezených trhlin/poškození dle systému značení do výkresové dokumentace letecké konstrukce.

Celá nedestruktivní kontrola je ovlivněna několika faktory a to zejména lidským faktorem, který představuje vysoké procento úspěšnosti/neúspěšnosti celého programu Damage Tolerance z hlediska NDT. Pokud dojde k selhání etapy NDT, pak následné etapy, jako jsou Teardown analýza, stanovení tzv. křivky pravděpodobnosti detekce (*Probability of Detection, POD*) trhliny v daném kritickém místě a následné stanovení minimální detekovatelné délky trhliny s pravděpodobností 90% při úrovni spolehlivosti 95%, budou s největší pravděpodobností provedeny nesprávně a výsledky budou neuspokojivé až nepoužitelné. Pak je nutné přistoupit k různým nápravným opatřením, která jsou velmi finančně náročná a i tak může dojít k neuspokojivým celkovým výsledkům. Proto je důležité, aby byla věnována maximální pozornost kontrole draku letounu, byla zkontrolována všechna kritická místa i skryté vrstvy daného místa s maximální pečlivostí před zahájením etapy demontáže, tedy tzv. Teardown analýzou.

2. Postup Teardown analýzy

Teardown analýza neboli demontáž se sestává z detailního rozebrání konstrukce, z detailní vizuální kontroly vnitřní konstrukce (případně i jiné NDT metody) a z fraktografické analýzy podezřelých a kritických míst.

Na počátku demontáže je důležité, aby NDT operátor definoval požadavky, které jsou nezbytné pro její úspěšné provedení. Mezi tyto požadavky patří:

- zajištění adekvátní stability pracovního místa, aby nedošlo k pohybu konstrukce;
- zajištění adekvátního osvětlení;
- zbavení draku letounu všech nečistot, zejména pak nečistot v otvorech nýtových spojů;
- provedení bezpečnostních a funkčních opatření pro odstranění jednotlivých částí draku letounu z hlediska jejich velikosti a hmotnosti;
- vedení řezů dostatečně daleko od částí a komponentů, které budou podrobeny fraktografické analýze, aby nedošlo k jejich poškození;
- minimalizace řezů částí a komponentů o velkém průřezu;
- oddělení spojů, spojovacích prvků od jednotlivých částí bez poškození, případně náhodné poškození musí být vždy zaznamenáno;
- nepřevrtávání otvorů spojů;
- dokumentace a identifikace jednotlivých demontovaných částí a komponentů dle systému značení vytvořeného v etapě NDT.

Významnou skupinu v oblasti NDT a Teardown analýzy tvoří otvory spojů, jelikož jsou častým zdrojem iniciace trhlin a jejich následného šíření vlivem zatížení a koncentrace napětí. Obecně jsou tedy předkládány pečlivé kontrole. Nejběžnější a efektivní způsob kontroly otvorů je pomocí rotačních vířivoproudých sond (*Bolt-Hole Eddy Current, BHEC*). Spolehlivost této kontroly se odvíjí od kvality a čistoty otvoru. Proto je důležité všechny otvory spojů řádně očistit. Při odstraňování spojovacích prvků (šroubů, nýtů) je nutné minimalizovat náhodná poškození. Techniky, které se použijí, musí předcházet poškození povrchu otvorů spojů, tzn., že použité nástroje nesmí být v kontaktu s otvory nebo vytvořit zahlobnutí do povrchu otvoru a spoje by se neměly protáčet.

I přes veškerou snahu a preciznost mohou vlivem odstranění spojů vzniknout náhodná poškození, což může způsobit chybné pozitivní indikace přítomnosti trhliny a výsledkem je pak zbytečná a drahá fraktografická analýza.

Samotná demontáž draku se skládá ze čtyř hlavních kroků:

1. označení všech částí určených k demontáži;
2. hlavní demontáže daného celku draku letounu na jednotlivé části;
3. rozřezání těchto jednotlivých částí na ještě menší části;
4. rozlomení jednotlivých spojů.

Drak letounu se před demontáží rozdělí do jednotlivých zón, které jsou vybrány na základě četnosti detekovaných trhlin a jiných poškozeních v daných místech draku letounu v etapě NDT. Drak letounu se před rozřezáním na jednotlivé části kompletně popíše systémem značení dle jednotlivých zón a komponentů na draku letounu tzn., zda se jedná o část trupu, ocasních ploch či křídla (viz Obrázek 2).

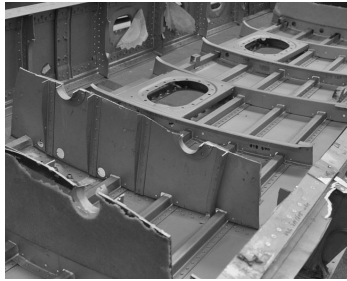


Obrázek 2 Příklad popisu draku letounu
Figure 2 Example of airframe description

Jakmile se drak letounu označí a je k dispozici potřebné vybavení, lze započít demontáž. Vybavení pro demontáž představuje celou řadu různých typů a rozměrů pil, brusek, pomocných držáků, zdvihových strojů atd. Obecný postup demontáže je takový, že se nejdříve kompletně odstraní komponenty, které nespádají do kritických míst a brání analýze míst kritických. Následně se zajistí adekvátní stabilita draku letounu a započne proces demontáže jednotlivých částí (viz Obrázek 3). Výsledek takovéto demontáže dané části draku letounu je vyobrazen na Obrázku 4.



Obrázek 3 Provedení řezu při demontáži potahového plechu a podélníku
Figure 3 Performance of cut at teardown analysis of metal sheet and runner



Obrázek 4 Výsledek demontáže
Figure 4 Result of teardown analysis

Součástí Teardown analýzy je fraktografická analýza, která představuje nejprůkaznější způsob ověření přítomnosti trhliny. Každá část proto musí být po hlavní demontáži křídla opět rozřezána ještě na menší části, aby bylo možné provést lomy jednotlivých nýtových spojů. Řez musí být veden ve směru kolmém na směr šíření trhlin. Následně se provede rozlomení jednotlivých spojů. S cílem stanovení tzv. křivky pravděpodobnosti detekce (*Probability of Detection, POD*) a následně minimální detekovatelné délky trhliny v kritických místech se porovná soubor nalezených poškození operátorem v etapě NDT, který provedl kontrolu, se souborem nalezených poškození zjištěných fraktografií.

3. Shrnutí

U filozofie Damage Tolerance lze vytvořit vysoce účinný systém údržby draku letounu, připustit a předpokládat vznik trhliny v kritických místech konstrukce vlivem provozu, vytvořit objektivní podmínky pro posouzení skutečného vlivu provozu na daný letoun a v neposlední řadě provoz letounu není omezován počtem letových hodin.

Jednotlivé etapy této filozofie z hlediska NDT představují její nedílnou součást a je velmi důležité, aby tyto etapy, zejména pak etapa NDT a Teardown analýza, byly provedeny korektně s maximálním důrazem na odbornost, zkušenost a pečlivost.

Teardown analýza tedy spočívá v komplexní demontáži a rozřezání draku letounu s následnou fraktografickou analýzou konstrukce na základě četnosti detekovaných trhlin a jiných poškození (vměstky, koroze atd.) Je nutné postupovat tak, aby se zabránilo náhodným poškozením, zejména pak otvorů při demontování nýtových spojů. Mohlo by tak dojít nejen k odstranění případných malých trhlin, ale tyto

náhodná poškození mohou způsobit chybné pozitivní indikace přítomnosti trhliny. Též je žádoucí, aby jednotlivé řezy byly vedeny s dostatečnou vzdáleností od částí, které se budou podrobovat fraktografické analýze. Před demontáží je důležité vytvoření systému značení, dle kterého lze v budoucnu jednoznačně identifikovat i tu nejmenší rozlomenou část draku letounu.

Z hlediska organizační struktury je nutné zajistit bezpečnost pracovníků a NDT operátorů a řídit se tak předpisy o bezpečnosti práce. Zajistit očištění draku letounu a potřebné vybavení pro demontáž. Variace vybavení by měla být velmi pestrá a zahrnovat různé typy a rozměry strojů a nástrojů vzhledem k proměnlivosti rozměrů a tvaru draku letounu.

4. Použitá literatura

[1] BOHÁČOVÁ, M., ŠEDEK, J., PAVLAS, J.: Probability of Detection and Prediction of Fatigue Crack Growth in Aircraft Structures. *Czech aerospace proceedings*. October 2010, 2010, 3, s. 2-5. ISSN 1211-877X.

[2] BOHÁČOVÁ, M.: Prezentace Damage Tolerance, Teardown analýza, Pravděpodobnost detekce, Kurz Damage Tolerance – metody, aplikace, Česká společnost pro mechaniku a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2011.

[3] BOS, Marcel J.: *ICAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice*. 1. Rotterdam, The Netherlands : Springer, 2009. 1368 s. ISBN 978-90-481-2745-0.



NONDESTRUCTIVE TESTING OF HEAT PIPE CARRYING TUNNEL WALL THICKNESS BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPH

Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

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

Abstract

The paper presents the results of nondestructive tests aimed at determining the thickness of the walls of a tunnel carrying heat pipes under a river. Ultrasonic tomography was used for this purpose. An analysis of the obtained results showed that because of the way the tunnel had been constructed the wall thickness varies along its length. Moreover, the tests have demonstrated that the ultrasonic tomography method is suitable for determining the thickness of concrete elements which cannot be tested by any conventional destructive method.

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

1. Introduction

Today nondestructive methods are more universally used to diagnose all kinds of building structures [1-3]. Owing to their noninvasiveness they are irreplaceable in some cases. Most often nondestructive acoustic methods are used. One of such methods is ultrasonic tomography [4, 5]. It was used in this study to test the thickness of a heat pipe carrying tunnel.

The investigated heat pipe carrying tunnel runs under one of the large rivers in Poland, at a depth of ten-twenty meters below the water level. The tunnel was built, using the caisson method and manual tunnelling, in the 1950s. The tunnel was bored simultaneously from two sides. The tunnel walls are made of concrete. The tunnel is 930 m long and has an inside diameter of about 3.5 m. The location of the tunnel and its general view are shown in respectively fig. 1 and fig. 2.

Currently, in the tunnel there are two pipes (each 900 mm in cross section) carrying hot water from a heat and power plant to households, and a service platform for getting from one side to the other.

Recently, because of the planned repair of the tunnel it became necessary to assess the load-bearing capacity of its concrete walls. Therefore not only the thickness of the walls (accessible from one side only), but also the variation in their thickness along the tunnel had to be determined. Because of the peculiar location of the tunnel, destructive tests (consisting in drilling through the wall) could be carried out only sporadically. Since the tunnel had been built using the caisson method one could expect that the actual tunnel wall thickness would considerably differ from the design thick-

ness of 400 mm. It was decided to carry out nondestructive tests by means of an ultrasonic tomograph.



Fig. 1. Location of investigated tunnel under river



Fig. 2. General view of investigated tunnel

2. Description of tests

The ultrasonic tomography set shown in action in figure 3 was used to test the tunnel's concrete walls. The set includes a special multihead antenna and a laptop with dedicated software enabling the recording of graphic images. The antenna with 40 independent dry-contact heads is used to excite, receive and process ultrasonic signals. The tomograph can be used to test concrete elements in order determine their thickness (when they are accessible from only one side) and to detect cracks, inclusions, voids and other places which may be empty or filled with liquid or material whose density is different than that of the surrounding concrete or which has different physical and mechanical properties.

Tests by means of the ultrasonic tomograph were carried out in twenty measuring sites. A measuring band, about 500 mm wide and 1500 mm long, was covered in each measuring site. During a wall test the ultrasonic tomograph's antenna was continuously moved (in 100 mm long steps) in one direction. In total there were 400 measuring points. The images of the cross section in each position were collected in a three-dimensional matrix table. Three mutually intersecting cross sections (images B, C and D) of the investigated object would be obtained on the basis of the matrix table. Figure 4 shows the names of the cross sections (images) of the investigated object and the coordinate system fixed to the tomograph's antenna. Image B is on the right while images C and D are respectively at the top and the bottom. The measuring sites in the tunnel are marked in fig. 5.

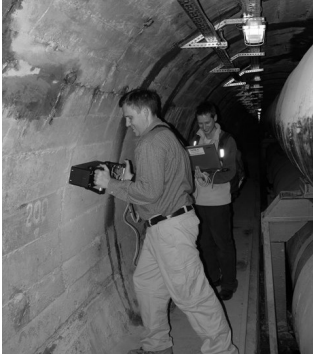


Fig. 3. Ultrasonic tomography set in action

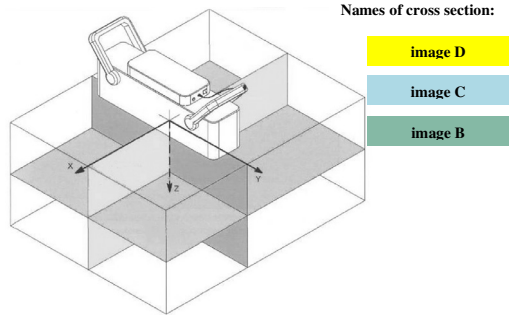


Fig. 4. Names of cross sections of investigated object, and coordinate system fixed to tomograph's antenna

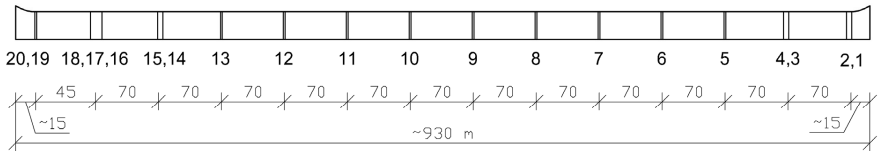


Fig. 5. Measuring sites in tested tunnel

3. Test results and their analysis

Typical results (in the form of images B, C and D) of the nondestructive ultrasonic tomography tests are shown in figs 6-8. For example, figure 6 shows images B, C and D obtained in measuring sites no. 7, 14 and 19. Figure 6b shows an image of the cross section of the examined concrete wall while the solid line and the arrows mark the wall thickness. In the top right corner in figure 6 there is a scale showing the correspondence between the ultrasonic dispersion level in a point of the examined tunnel concrete wall and the colour representing this level. The ultrasonic dispersion level represents changes whose physical characteristics are different than the characteristic of the concrete in the investigated area, indicating the presence of voids, large inclusions, zones of concrete of different density and so on.

An analysis of the particular images in 20 investigated sites showed that the tunnel concrete wall thickness was close to its design value. As expected, because of the way in which the tunnel was constructed, the tunnel wall thickness is not the same along the tunnel length, ranging from 385 mm to 420 mm. Moreover, at the depth of about 90-140 mm there is probably a reinforcement layer, represented as places with a high dispersion level (red colour), in the images. It should be also noted that the analysis did not indicate any significant cracks, intrusion or voids in the concrete.

In order to verify the obtained results random destructive tests (drillings through) in several selected places were carried out.

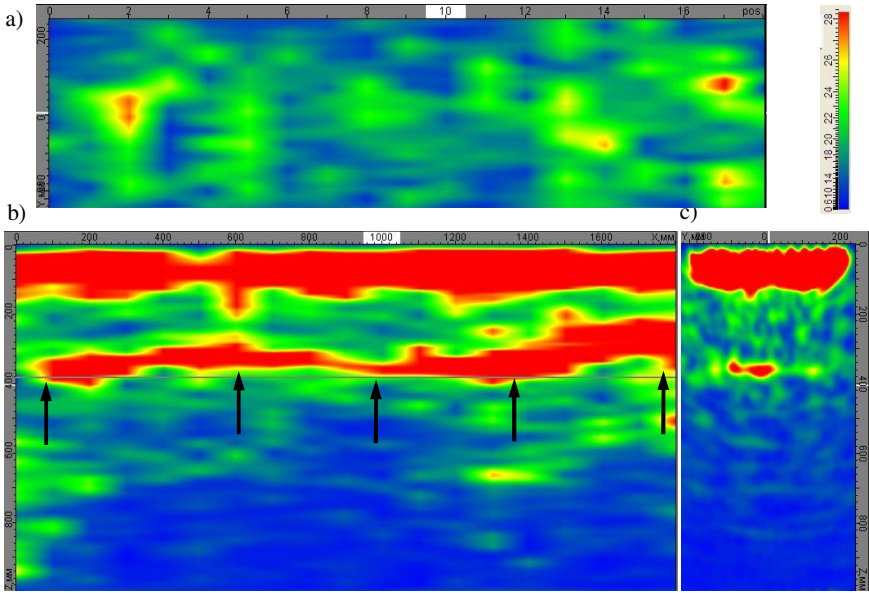


Fig. 6. Band in measuring site no. 7: a) image C, b) image D, c) image B

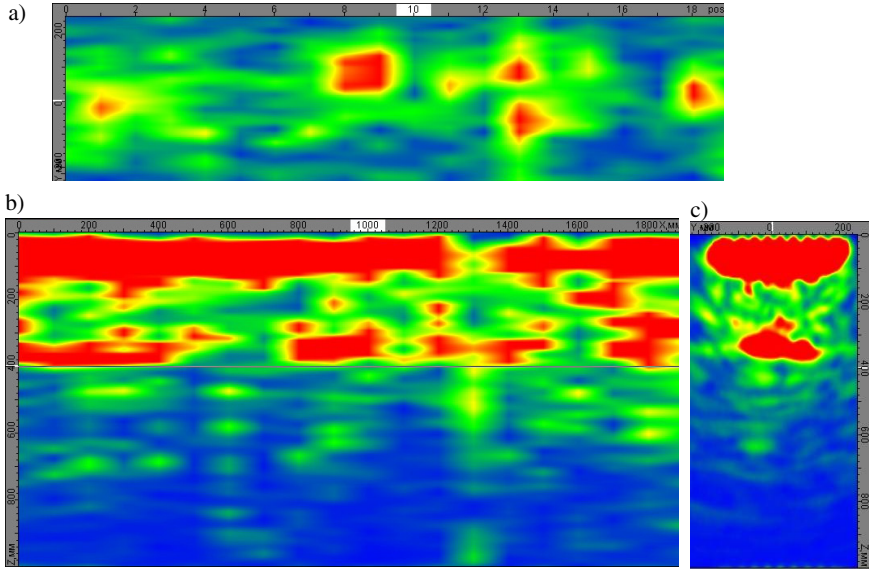


Fig. 7. Band in measuring site no. 14: a) image C, b) image D, c) image B

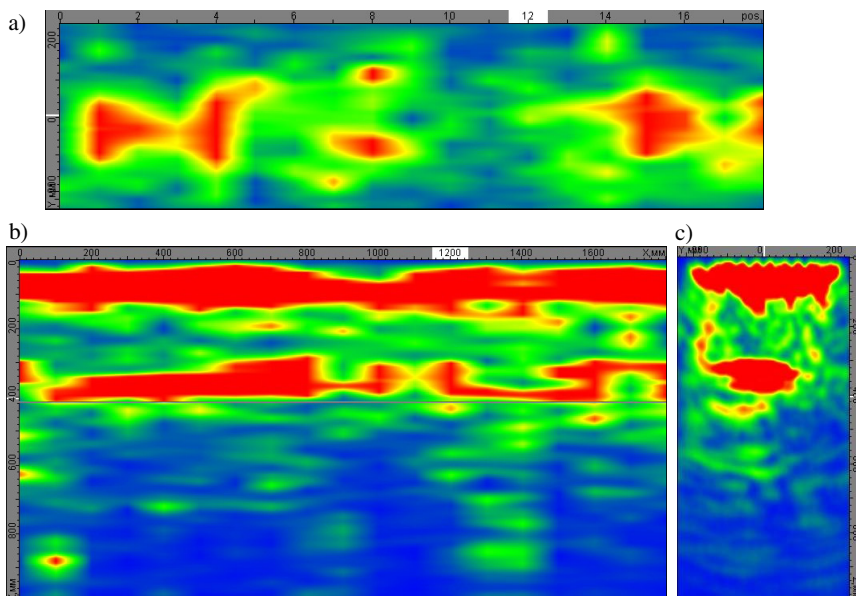


Fig. 8. Band in measuring site no. 19: a) image C, b) image D, c) image B

4. Conclusion

Thanks to the ultrasonic tomography investigations the thickness of the unilaterally accessible concrete walls of the under-river heat pipe carrying tunnel was determined. The wall thickness was found to vary along the tunnel length (due to the way the tunnel had been constructed), ranging from 385 mm to 420 mm. This was confirmed by random drillings through. The thickness is close to its design value of 400 mm. Moreover, the tests have demonstrated the suitability of the ultrasonic tomography method for determining the thickness of concrete elements which cannot be tested by any conventional destructive method.

References

1. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities. The 5th International Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry". Mashinostroenie, 2006, p.152.
2. Garbacz A.: Nondestructive investigations of polymer-concrete composites using stress waves – repair efficiency evaluation (in polish). Prace naukowe. Budownictwo z. 147, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
3. Schabowicz K., Hoła J.: Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, Yokohama, Japan, 2009.

4. Bishko A. V., Samokrutov A. A, Shevaldykin V. G.: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics. vol. 13, 2008.
5. Schabowicz K., Hoła J., Styś D.: Nondestructive elastic-wave tests of concrete in foundation slab, 10th European Conference on Nondestructive Testing, Moscow, Russia, 2010.



NONDESTRUCTIVE TESTS OF SUBFLOOR LAYER IN SHOPPING CENTRE BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPH

Tomasz GORZELAŃCZYK, Jerzy HOŁA, Krzysztof SCHABOWICZ

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

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

Abstract

The paper presents the results of nondestructive tests of a concrete floor and the subfloor layer in a shopping centre. The tests were carried out using the ultrasonic tomography method. An analysis of the results showed that the floor thickness in the tested places was in agreement with the de-sign thickness. This was confirmed by random test boreholes. It was also found that below the concrete floor there was a layer of ground (sand) characterized by nonuniform density. Moreover, the tests demonstrated the suitability of the ultrasonic tomography method for determining the thickness of concrete elements in the case of which no conventional destructive method can be applied.

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

1. Introduction

Today nondestructive methods are increasingly commonly used to diagnose building structures of different types [1-3]. In some cases they are irreplaceable owing to their noninvasiveness. Most often acoustic nondestructive methods are used. One of such methods is ultrasonic tomography [4, 5]. It was used in this research to investigate a subfloor layer in a shopping centre.

The shopping centre was built in 1996 as one of the first of its kind in Poland. Currently the shopping centre's renting space amounts to about 120 000 square metres housing over one hundred shops.

Recently, because of the cracks appearing in the floor, it became necessary to check the thickness of the concrete floor and that of its base. Since the shopping centre was in operation all the time it was not possible to drill a large number of boreholes. Therefore a decision was made to carry out nondestructive tests by means of an ultrasonic tomograph.

2. Description of tests

As mentioned above, nondestructive instrumentation in the form of an ultrasonic tomograph (shown in action in fig. 1) was used to test the concrete floor. The tomography set includes a multihead ultrasonic antenna and a laptop with dedicated software enabling the recording of graphic images. The antenna, having 40 dry-contact heads,

is used to generate, receive and process ultrasonic signals. The tomograph has been adapted for examining concrete elements to determine their thickness (in the case of one-side access) and detect cracks, inclusions, air voids and other spaces which may be empty or filled with a liquid or a material differing in its density and physical and mechanical properties from the surrounding concrete.

The ultrasonic tomography investigations were carried out in three measuring sites. In each of the sites a 500 mm wide and respectively about 2500, 3800 and 4800 mm long band was examined. During the examination the ultrasonic tomograph's antenna was being moved in one direction by every 100 mm in a given band. In total there were 111 measuring points.

The images of the cross sections in each position were collected in a three-dimensional matrix table. Images B, C and D of the three intersecting cross sections were obtained on the basis of the matrix table. Figure 2 shows the names of the cross sections (images) of the examined object and the coordinate system tied to the tomograph's antenna. Image B is situated on the right side while images C and D are respectively at the top and the bottom.



Fig. 1. Ultrasonic tomography set in use

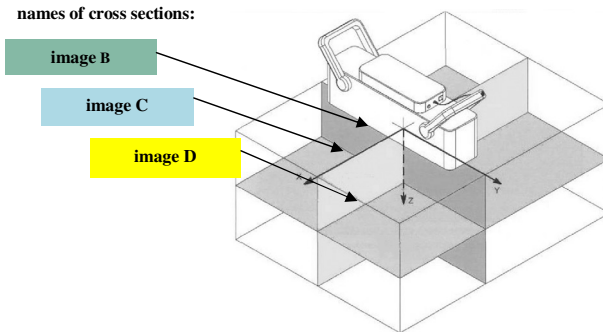


Fig. 2. Names of examined object's cross sections and coordinate system tied to tomograph antenna

3. Test results and their analysis

Exemplary results (images B, C and D) of the nondestructive tests carried out by means of the ultrasonic tomograph are shown in figs 3-5. For instance, figure 3 shows images B, C and D obtained in the first measuring site. Figure 3b shows an image of the cross section of the tested concrete floor, with the solid line and the arrows marking the thickness of the floor. In the bottom left corner in figure 3 there is a scale of correspondence between the ultrasonic dispersion level in a given point of the tested concrete floor and the colour representing the level. The level of ultrasonic dispersion is indicative of changes whose physical characteristics differ from those of the concrete in this area. It may indicate the existence of a material (e.g. air voids, zones of concrete characterized a different degree of compaction, large inclusions, etc.) whose density is different than that of the concrete.

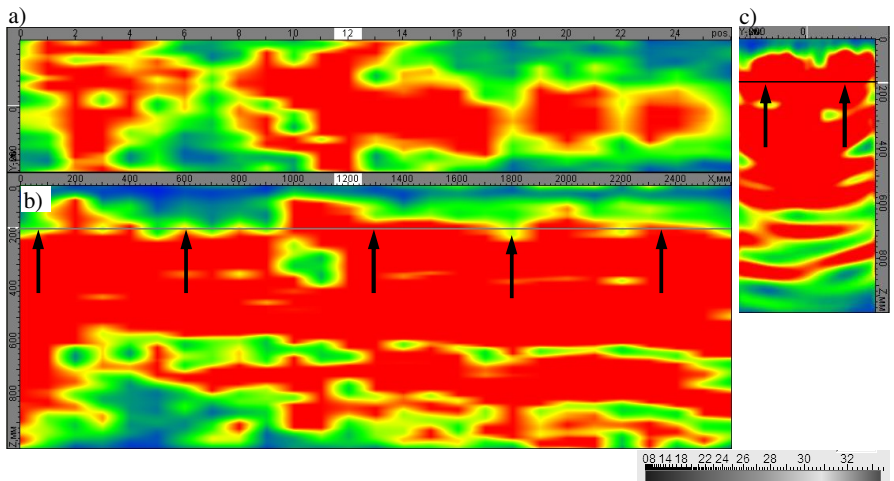


Fig. 3. Measuring band in site no. 1: a) image C, b) image D, c) image B

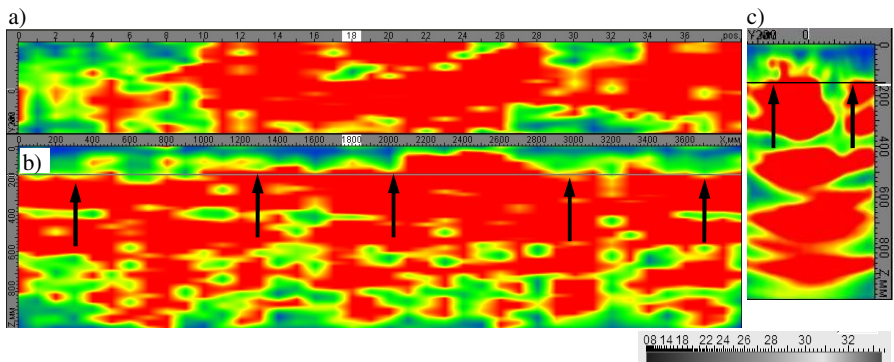


Fig. 4. Measuring band in site 2: a) image C, b) image D, c) image B

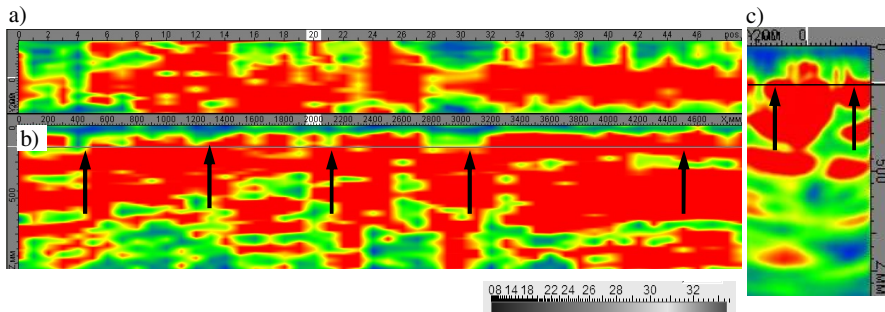


Fig. 5. Measuring band no. 3: a) image C, b) image D, c) image B

The nondestructive tests carried out by means of the ultrasonic tomograph and an analysis of their results showed that the thickness of the concrete floor in all the tested areas in the shopping centre agreed with the design thickness of about 160 mm. In order to verify the results random destructive tests, consisting in drilling boreholes in several selected places, were carried out. The destructive tests also showed that there was ground (sand) below the concrete floor and that the layer of ground (from the surface of the topping down to a depth of about 1000 mm) was characterized by nonuniform density. In places the ground was loose and voids filled with air or water occurred in it. This is especially revealed by images of type D. One can surmise that this situation arose because of the high groundwater level in the area in which the shopping centre is located. Probable the groundwater table was not lowered enough when the shopping centre was being built. It should also be noted that not far from the shopping centre there are flood channels of the largest river in Poland, which may have contributed to the “washing out” of the ground from under the concrete floor.

4. Conclusion

Thanks to the use of the ultrasonic tomography method the subfloor layer was examined and the thickness of the concrete floor in the shopping centre was determined. The thickness of the floor in all the tested places was found to amount to about 160 mm. This was confirmed by random test boreholes. It was also found that below the floor there was ground in the form of sand. The layer of ground, from the surface of the topping down to a depth of about 1000 mm, is characterized by nonuniform density. The ground is loose in places and voids filled with air or water occur in it. It should be added that the tests demonstrated the suitability of the ultrasonic tomography method for determining the thickness of concrete floors in the case of which conventional destructive methods cannot be applied.

References

1. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G.: Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities. The 5th International Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry". Mashinostroenie, 2006, p.152.
2. Garbacz A.: Nondestructive investigations of polymer-concrete composites using stress waves – repair efficiency evaluation (in polish). Prace naukowe. Budownictwo z. 147, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
3. Schabowicz K., Hoła J.: Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building, 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, Yokohama, Japan, 2009.
4. Bishko A. V., Samokrutov A. A, Shevaldykin V. G.: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics. vol. 13, 2008.
5. Schabowicz K., Hoła J., Styś D.: Nondestructive elastic-wave tests of concrete in foundation slab, 10th European Conference on Nondestructive Testing, Moscow, Russia, 2010.



NONDESTRUCTIVE TESTING OF THE BOND BETWEEN CONCRETE FLOOR LAYERS BY IMPULSE RESPONSE AND IMPACT-ECHO METHODS

Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI

Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology

Abstract

When making and repairing concrete floors in the civil engineering industry it is crucial to prepare the surface of the structural layer in order to obtain proper bonding. In the following article the impulse response method and the impact-echo method were used in comparative tests of the interlayer bond in a model concrete floor specimen. The aim of the paper was to find out how the results obtained using the above nondestructive methods would differ for the two ways of preparing the bonding surface.

Keywords: *acoustic methods, adhesion, concrete floors, bond surface*

1. Introduction

The durability of concrete floors is to a high degree determined by the pull-off adhesion of the topping to the structural layer [1]. Both when making and repairing concrete floors it is crucial to prepare the surface of the structural layer in order to obtain proper bonding. The measure of the latter is the adhesion value determined by the pull-off test [2]. The search for concrete floor areas lacking adhesion at the interface between the layers was the subject of paper [3] by Delatte who on the basis of pull-off test results produced a map showing the areas where delamination occurred. Also Garbacz et al. [4] proposed to use the pull-off method to obtain a map of delaminations on the surface of laminar concrete elements. However, the pull-off method is much less suitable for evaluating the bond between the layers or locating the places or areas in which there is delamination at the interface between the layers. In the latter case its effectiveness depends on the number of drilled boreholes. The larger the number of boreholes, the larger the number of places in which the floor needs to be repaired after the tests. It seems that this problem can be solved by applying nondestructive methods, i.e. the impulse response method and the impact echo method [5].

In this study the impulse response method and the impact-echo method were used in comparative tests of the interlayer bond in a model concrete floor specimen. The surface of the specimen's structural layer was prepared in two ways, i.e. half of the surface was mechanically ground in order to increase adhesion, whereas the other half remained in its original post-concreting condition.

The aim of the study was to find out how the results obtained using the above nondestructive methods would differ for the two ways of preparing the bonding surface.

2. Description of tests, their results and analysis

The tests were carried out on a 2500 x 2500 mm model concrete slab consisting of a 100 mm thick structural layer and 50 mm top layer (fig. 1). The structural layer was made of grade C30/37 concrete with aggregate of 8 mm maximum grading, naturally cured at a temperature of $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$. The structural layer was laid on a 100 mm thick layer of sand. The top layer was made of grade C20/25 concrete with aggregate of 16 mm maximum grading. All the tests were carried out after the concrete had cured for 90 days, except for the compression strength tests on the concrete, which were carried out after 28 days of curing.

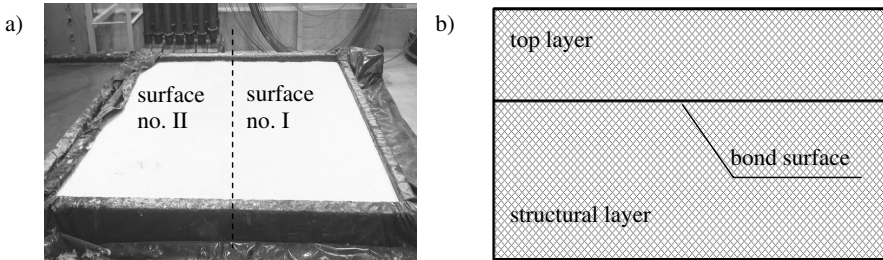


Fig. 1. Concrete floor: a) view of structural layer before top layer concreting, b) cross section through concrete floor layers.

The following two ways of preparing the structural layer's surface were used:

- surface no. I – in post-concreting condition, covered with dust (which is often the case in building practice),
- surface no. II – mechanically ground and dedusted (which should be the standard practice).

After the surface of the top layer was marked, a 1500 x 1500 mm test area was demarcated in its central zone and a grid of measuring points spaced at every 100 mm was marked on this area. The columns were marked with letters from A to H and the rows with numbers from 1 to 16. In this way 128 measuring points were obtained on each of the surfaces.

The impulse response tests consisted in exciting an elastic wave in each point of the measuring grid by means of a calibrated hammer and analyzing elastic wave F , a diagram of wave velocity w and a diagram of mobility N after each excitation. Then using the special software the acquired data were processed and as a result the values of the following parameters in each measuring point were obtained: average mobility N_{av} , stiffness K_d , mobility slope M_p , mobility times mobility slope $N_{av} \cdot M_p$ and voids index w .

Exemplary results of the impulse response tests for surface no. 1 (no surface preparation) are shown in fig. 2.

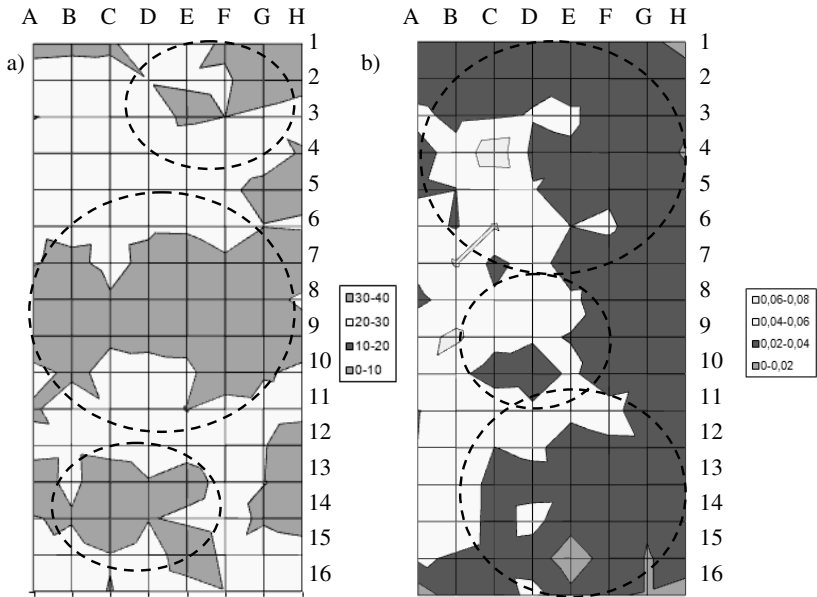


Fig. 2 Exemplary impulse response test results for surface no. I: a) map of mobility, b) map of stiffness.

It appears from the above results that in the demarcated areas of surface I the mobility parameter amounts to 30-40 on most of the surface and stiffness to 0-0.04. A local increase in mobility on the mobility map means the susceptibility of the material to deflection, which may indicate delamination. When mobility is high while stiffness is low the presence of delamination is highly probable.

Exemplary results of the impulse response tests for surface no. II (no surface preparation) are shown in fig. 3.

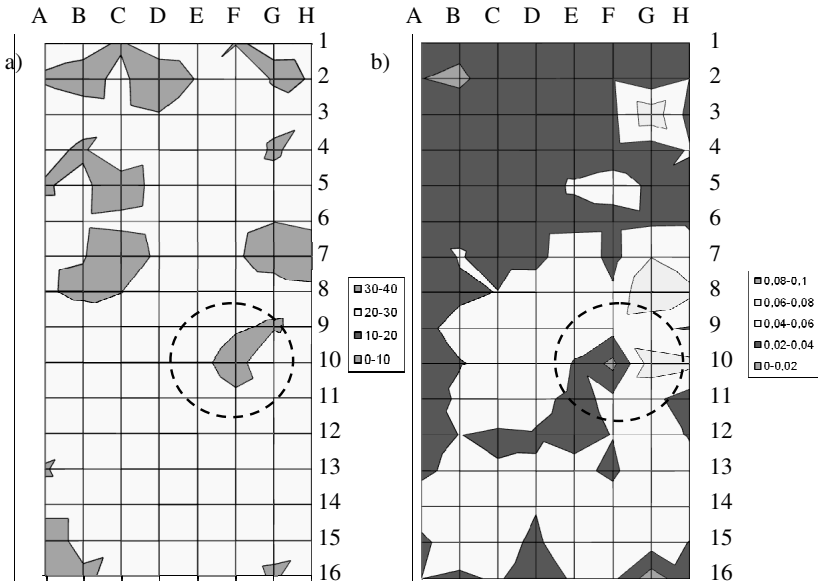


Fig. 3 Exemplary results of impulse response tests for surface no. 2: a) map of mobility, b) map of stiffness.

It appears from the above results that in the neighbourhood of measuring point F10 on surface II the mobility parameter ranges from 30 to 40 and stiffness is in a range of 0-0.04. As opposed to the results obtained for surface no. I, the results for surface no. 2 do not indicate any delamination.

Then in the marked measuring points an elastic wave was generated by means of an exciter placed on the impact-echo tester head. Using the dedicated software and the Fourier transform the signals were processed to obtain an amplitude-frequency spectrum of the recorded elastic wave.

The amplitude-frequency spectrum shown in figure 4 was usually obtained from the tests for surface no. 1. A signal of this type is obtained when the generated ultrasonic wave bounces off a discontinuity. This means that the signal value corresponding to the frequency at the location of the interlayer bond, which amounts to 35.1 kHz, is analyzed. In the tested concrete floor a discontinuity is present at a depth of about 50 mm, i.e. at the top layer/subfloor interface:

$$T_2 = \frac{0.96 \cdot 3650 \text{ m/s}}{2 \cdot 35.10 \text{ kHz}} = 50 \text{ mm}$$

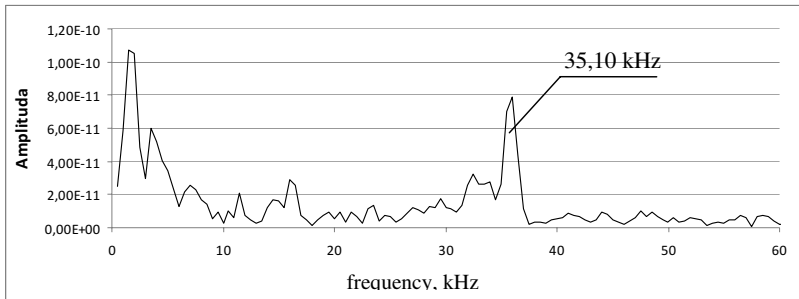


Fig. 4. Exemplary amplitude-frequency spectrum obtained from impact-echo tests for point A2 on surface no. I.

The amplitude-frequency spectrum shown in figure 5 was usually obtained from the tests for surface no. II. A signal of this type is obtained when the generated ultrasonic wave bounces off the bottom. This means that the signal value corresponding to the frequency at the place where the wave is reflected from the bottom, which amounts to 35.1 kHz, is analyzed. Thus the thickness of the specimen amounts to about 149 mm:

$$T_2 = \frac{0.96 \cdot 3650 \text{ m/s}}{2 \cdot 1.17 \text{ kHz}} = 149 \text{ mm}$$

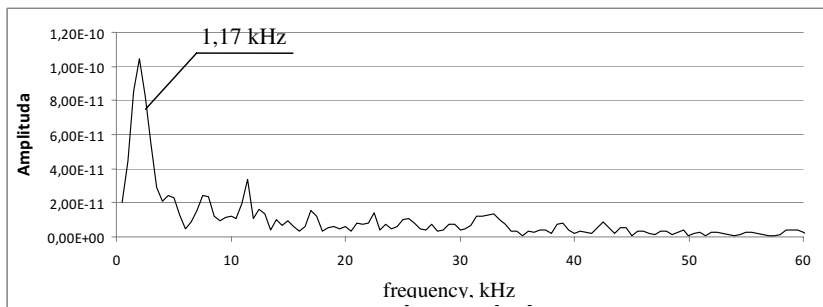


Fig. 5. Exemplary amplitude-frequency spectrum obtained from impact-echo tests for point E6 on surface no. II.

The results of the nondestructive tests were verified by the semi-nondestructive pull-off test which confirmed the absence of adhesion at the interface between the layers.

3. CONCLUSION

Comparative tests of the interlayer bond in a model test concrete floor specimen were carried out using the nondestructive AE methods: the impulse response method and the impact-echo method. A model specimen with its structural layer surface prepared in two different ways, i.e. a half of the surface in post-concreting condition and covered with dust (which is often the case in building practice) and the other half mechanically ground (which should be the standard practice) was subjected to the tests.

For the surface covered with dust the area where delamination was present was determined using the impulse-response method. Then the depth at which the delamination occurred was precisely determined using the impact-echo method.

In the case of the ground surface, the tests showed the absence of delamination in most of the area. This was confirmed by the impact-echo test results.

The results of the nondestructive tests were verified by the semi-nondestructive pull-off method. The study has shown the impulse-response method and the impact-echo method to be suitable for the evaluation of the bond between the layers in concrete floors.

4. REFERENCES

- [1] Czarnecki L., Mierzwa J., Selected material causes of damage to concrete floors (in Polish) *Materiały Budowlane*, No. 9 (2004).
- [2] ASTM D7234 – 05. Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.
- [3] Delatte N., Fowler D, McCullough F., Full-Scale Test of High Early Strength Bonded Concrete Overlay Design and Construction Methods, Transportation Research Board of the National Academies, 1544 (1996).
- [4] Garbacz A., Krystosiak M., Ultrasonic assessment of adhesion between polymer coating and concrete subfloor (in Polish). 31st National Conference on Nondestructive Testing, Szczyrk, pp. 125-130 (2002).
- [5] Hoła J., Sadowski Ł., Schabowicz K., Non-destructive evaluation of the concrete floor quality using Impulse Responses' Mash and Impact-Echo Methods, *e-Journal of Non-destructive Testing & Ultrasonics*, Vol. 14, No. 3 (2009).

This research was carried out as part of research project no. 0926/B/T02/2011/40 entitled: "New Nondestructive Way of Evaluating the Pull-off Adhesion of the Layers in Concrete Floors, Using Artificial Neural Networks" funded by the National Science Centre.



OPTIMALIZACE RUTINNÍCH ULTRAZVUKOVÝCH ZKOUŠEK ZA PODPORY DALŠÍCH METOD NDT A VÝSLEDKŮ MATERIÁLOVÝCH ANALÝZ

OPTIMIZATION OF ROUTINE ULTRASOUND TESTS USING FURTHER NDT METHODS AND RESULTS OF MATERIAL ANALYSES

Josef HOLEC

České dráhy, a.s.

Contact e-mail: Holec@mail.cd.cz

Abstrakt

Práce prezentuje výsledky a novelizace metodických postupů k detekci provozního poškození kol a náprav dvojkolí kolejových vozidel. Dvojkolí je slisovaná sestava extrémně namáhaných dílů (náprava, vlastní kola, ložiska, ozubená kola pohonu, brzdové kotouče, apod.), ve kterých dochází při UT zkoušce k průchodům, nežádoucím odrazům a transformacím ultrazvukových vln. Zkušební povrch je v provozních podmínkách, u většiny těchto dílů, jen nepatrnou částí celku, vhodnou pro aplikaci ultrazvukové zkoušky. K účelnému zaměření hlavních způsobů a směrů provozních ultrazvukových zkoušek a zvýšení jejich rozlišovacích schopností, byl proveden komplex podpůrných zkoušek dalšími metodami NDT a následných materiálových analýz pro identifikaci zdroje iniciací a šíření pod/povrchových vad. Tyto vady se mohou rozšířit do nebezpečných únavových trhlin a ovlivnit rozhodující faktory související s pevností exponované namáhaných součástí, které by mohly ohrozit bezpečnost provozu. K vyloučení nahodilosti prováděných technologicky, časově a finančně náročných analýz, byla pro jejich potvrzení m.j. použita nepřímá vizuální metoda, ve které vidíme dostupnou možnost dalšího vývoje pro aplikaci NDT zkoušek nejen ultrazvukových.

Klíčová slova: ultrazvuk, dvojkolí, iniciace vad, laboratorní analýza, související NDT

Abstract

The paper presents results and novelizations of methodological procedures for detection of operation damage of wheels and diwheel axles of tracked vehicles. Diwheel is a pressed setup of extremely stressed parts (axle, wheels, bearings, cog wheels of gear, brake wheels, etc.) in which throughpasses, unwanted reflections and transformations of ultrasound waves appear during ultrasound tests. The testing surface is in operation conditions, in the case of most of these parts, only a subtle part of the whole piece, suitable for application of ultrasound test. For efficient targeting of main means and directions of operation ultrasound tests and for increasing of their differentiation ability, a set of supportive tests by further NDT methods was implemented, followed by subsequent material analyses for identification of the source of initiations and propagation of sub/surface defects. These defects can enlarge into dangerous fatigue cracks and influence decisive factors related to stability of parts exposed to stress, which could endanger the safety of operation. For exclusion of randomness in the performed analyses which were technologically, timely and financially demanding, indirect

visual method was used (among other) for their confirmation. We see in this method a reasonable possibility of further development for NDT test application not only ultrasound.

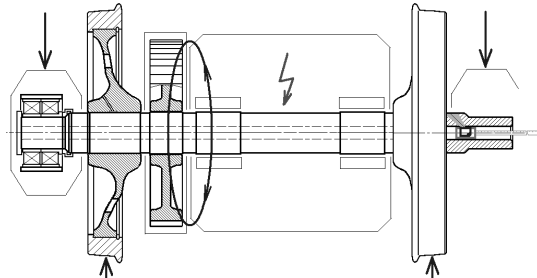
Key words: ultrasound, axle, initiation cracks, laboratory analysis, related NDT

1. Úvod

Málokdo už dnes ví, že prevence bezpečného provozu na železnici dala vzniknout základním NDT metodám již v předminulém století. Stejně tak leckoho překvapí, že v rámci železniční dopravy a opravárenství byl nejen v naší republice zaveden zaměstnanecký systém kvalifikace personálu v polovině minulého století. Pravidelnými i mimořádnými prohlídkami namáhaných částí kolejových vozidel, vyžadujících rychlost v provozních režimech odstavby vozidla z důvodu ošetření nebo prohlídky vozu nebo lokomotivy je dlouhodobě požadovanou metodou ultrazvuk. Nestoří této metody nás však již při prvních školeních varovali slovy je zelený a zrádný. Miniaturizace a rozvoj technologií nám dnes sice přinesl pestré barvy „B“, „C“...až „Z“ scanů, obsluhu přístrojů zjednodušil, ale orientace a správné vyhodnocení vad zůstává v některých případech a pro některé zúčastněné stále „zrádné“. Vadové indikace vznikající při provozním namáhání dvojkolí (viz **obr.1**), jsou toho důkazem.

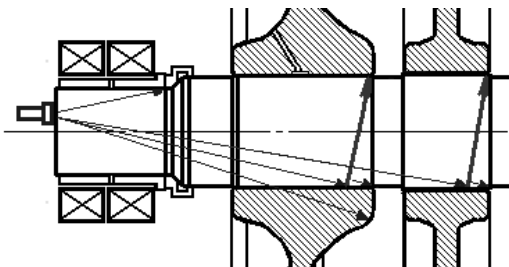
Obr. 1 Schéma pozic dílů a jejich namáhání v sestavě dvojkolí

Fig. 1 Diagram of the parts' positions and their loading in the wheel set



Obr. 2 Schéma UT zkoušky nápravy, průchod, odrazy, a transformace UZ svazku včetně nalisovaných dílů

Fig. 2 UT test diagram of the axle.



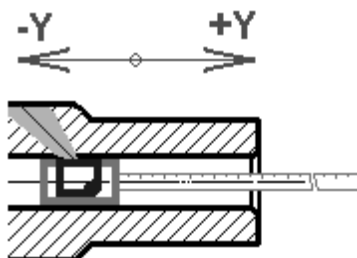
2. UT zkouška nápravy

Náprava dvojkolí je nejčastěji plný hřídel na kterém jsou nalisovány kola, ozubená kola pohonů, ložiskové kroužky, případně brzdové kotouče. Jednotlivá sedla pro tyto součásti mají různé průměry, které jsou spojeny mezidřívky s přechodovými rádiusy. Vlivem dynamického namáhání se začínají iniciovat únavové trhliny (v řádu 1 milionu km) převážně v místech okrajů lisovacích ploch nebo přechodových nákrůžků. Tento typ nápravy se během provozu zkouší UT z přístupného čela nápravy. Přímá sonda se v různých pozicích doplňuje plexiklínou pro podélnou, případně příčnou vlnu. Jak je patrné na **obr.2** dochází během těchto zkoušek k odrazům, průchodům a transformacím ultrazvukového svazku, které vyžadují podrobnou znalost součástí dvojkolí a orientaci pracovníka ve vztahu k poloze sondy a dynamiky echogramů ze zkoušeného směru nebo transformovaného odrazu, který může být násobkem předcházející změny tvaru nápravy. Druhým typem náprav jsou nápravy s podélným vývrtem (dutinou). Vedle jeho primárního účelu, zvýšení pevnosti, je vývrt využíván jako inspekční otvor pro UT zkoušku. Lze tak prakticky vyzkoušet celý povrch nápravy s nepoměrně vyšší rozlišovací schopností a v minimální tloušťce zkoušeného materiálu.

Obr. 3 Schéma UT zkoušky duté nápravy.

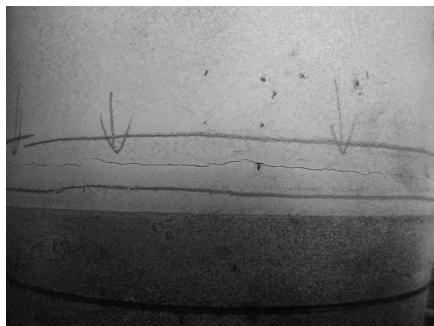
Úhlové sondy v rozsahu 30 až 70° se překlápají pro zkoušení ve směru -Y (od čela) a +Y (k čelu nápravy)

Fig. 3 Diagram of UT test of the hollow axle. The angle search units in the range 30 - 70° change the orientation for testing in direction -Y (from the face) and +Y (to the face).

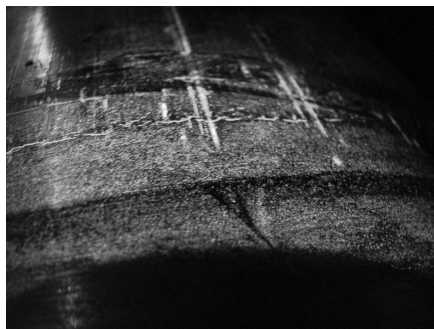


3. Inicivace únavových trhlin

Dosud zavedený postup UT zkoušky nápravy byl limitován použitou úhlovou sondou 45° o jmenovité frekvenci 2 MHz, schématicky znázorněný na **obr.3**. Na základě fyzikálních vlastností mohla být touto sondou indikována vada o minimální velikosti 0,8 mm. Kritickou oblastí byl především nepřístupný vnější povrch nápravy v oblasti okrajů sedel kol a ozubeného kola s jejich mezidřívky (viz **obr.1**) V případě nejednoznačné UT indikace byly po slisování dílů dvojkolí označených náprav zjištěny vady typu únavová trhlina metodou magnetickou práškovou polévací (MT) po obvodu sedla kola (viz **obr.4**). Podobně byly touto metodou zjištěny drobné únavové trhliny v případě slisování vadných dílů dvojkolí během běžných opravárenských zásahů, kdy je metoda MT striktně nařízena na celém povrchu slisované nápravy (viz **obr.5**).



Obr. 4 Propojování iniciačních trhlin po obvodu sedla nápravy
Fig. 4 Interconnection of initiation cracks along the perimeter of the axle seating



Obr. 5 Iniciační trhliny po slisování kola pod UV světlem
Fig. 5 Initiation cracks after disjunction of the wheel under UV light

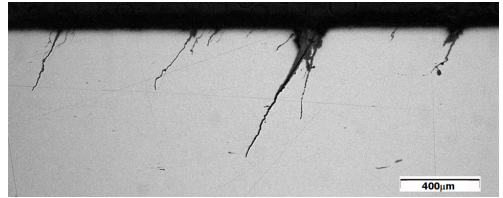
Již tyto standardní zkoušky poukázaly na některá specifika zjištěných vad. Problematická byla např. jejich lokalizace. Po slisování byly zjištěny povrchové trhliny v oblasti sedla kola a u některých náprav rovněž v oblasti sedla ozubeného kola převodovky, tj. mimo standardně zkoušený kritický průřez náprav metodou UT. Vady nepředstavovaly přímé provozní riziko, neboť jejich rozsah nedosahoval limitních hodnot dle souvisejících předpisů. I za těchto okolností však bylo rozhodnuto o nutnosti kompletní analýzy poškozené nápravy. Pro další provozování náprav bylo rozhodující zjištění přesného rozsahu vad a identifikace jejich zdroje.

4. Laboratorní analýzy iniciací vad

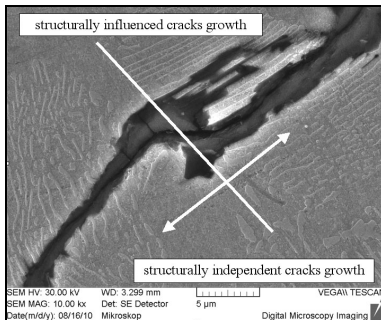
Cílem provedených analýz bylo vymežit vliv jakosti materiálu, podmínek provozního zatěžování, popř. technologie lisování na provozní poškození. Po stránce chemického složení a mechanických parametrů vyhovovaly požadavkům souvisejících norem. Materiál všech náprav vykazoval feriticko-perlitickou strukturu a zjemnění zrna po normalizačním žhání dosahovalo požadovaných parametrů. Rovněž z hlediska mikročistoty materiál vyhovoval platným kritériím. Rozsah poškození a stav okolní mikrostruktury náprav byly zmapovány na metalografických výbrusech v poškozených částech lisovacích ploch sedel kol a převodovky až po dřív náprav. Z výsledků vyplývá, že vady zjištěné nedestruktivními zkouškami v podstatě představovaly pásma maximální hloubky i hustoty trhlin (viz **obr.6**). Výskyt trhlin byl zjištěn rovněž po celé zbývající ploše sedla směrem k jeho osazení. Trhliny byly souběžné, shodně orientované pod úhlem cca 60° od podélné osy nápravy. Odchytky od této orientace byly zjištěny pouze v iniciačním stadiu trhlin, kde byly ovlivněny morfologií struktury nebo výskytem inkluzí.

Obr. 6 Souvislý výskyt trhlin v oblasti sedla nápravy (zv. 100x)

Fig. 6 Continuous occurrence of cracks on the axle seat (Mag. 100x)

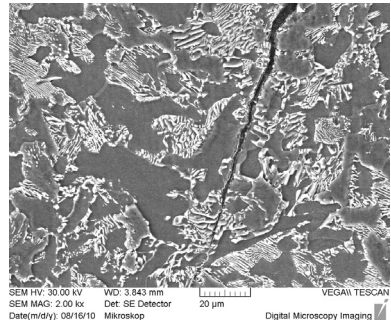


V dalším případě se jednalo i o vliv lokální orientace perlitických kolonií, kdy mikroskopické trhliny sledovaly fázové rozhraní ferit-cementit (viz **obr.7**). Místy tak docházelo k odklonu nebo větvení trhlin. V případě kolize s nečistotami docházelo především k propojování těchto nečistot. Zatímco míra vlivu inkluzí, resp. celkově vnitřní jakosti aplikovaného materiálu, byla zjištěna jako zanedbatelná, strukturní charakteristika podstatně ovlivnila průběh trhlin do hloubky 0,1 až 0,2mm. Zjištěné parametry trhlin principiálně odpovídaly mechanismu iniciace a rozvoje únavového poškození. Do hloubky řádově desítek mikrometrů, kde byl zjištěn vliv struktury materiálu na orientaci nespojitostí, bylo poškození tvořeno síťovím členitých mikrotrhlin. S rostoucí hloubkou trhlin byl pozorován klesající vliv mikrostruktury na rozvoj trhlin. Trhliny s délkou nad cca 200 μm postupně nabývaly rovinný charakter pod shodným sklonem od povrchu. Jako příklad dokumentováno čelo magistrální trhliny (viz **obr.8**) v hloubce 350μm pod povrchem, postupující bez strukturní závislosti. V dalších etapách rozvoje poškození náprav lze tedy v souladu s principem únavového mechanismu očekávat růst trhlin směrem kolmo ke hlavnímu napětí. Metalografické analýzy dále prokázaly významnou souvislost únavového poškození a korozního poškození povrchu sedel náprav. Změny stavu povrchu vlivem lisování nebyly přímým zdrojem únavového poškození. Pozorované iniciace mikrotrhlin byly pouze reakcí na mikroskopické nerovnosti povrchu před lisováním.



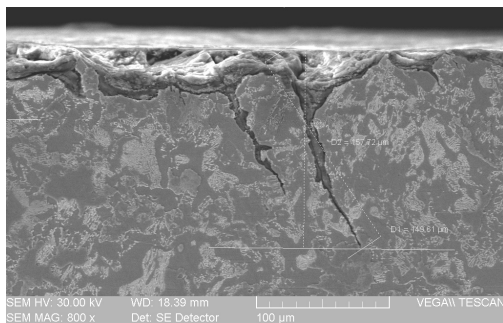
Obr. 7 Přechod iniciačního stadia poškození do etapy rozvoje únavových trhlin (zv.10 000x)

Fig. 7 Transition between the initiation stage of the damage and the stage of the development of fatigue cracks (Mag. 10,000x)



Obr. 8 Rozvoj magistrální trhliny bez strukturní závislosti (zv. 2000x)

Fig. 8 Development of the magistral crack without structural dependence (Mag. 2,000x)



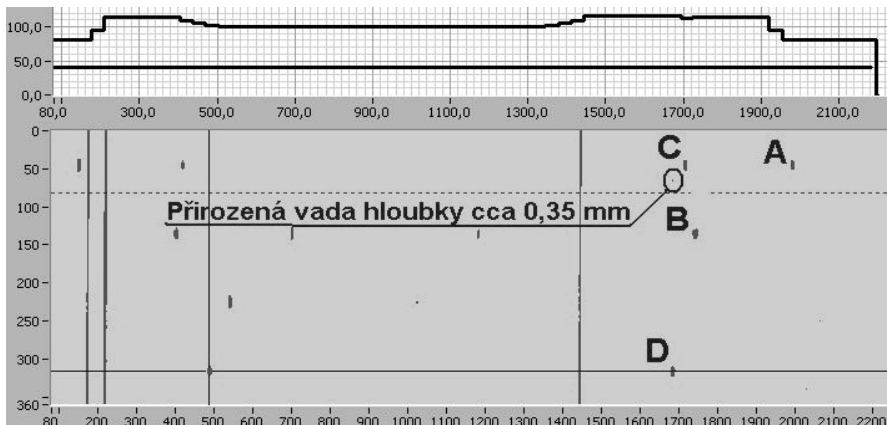
Obr. 9 Iniciační vliv důlkové koroze (zv. 800x)
Fig. 9 Initiation influence of pit corrosion (Mag. 800x)

5. Optimalizace UT zkoušky náprav s podélným vývrtem

Na základě výsledků prezentovaných analýz byla rozšířena a upravena metoda nedestruktivních zkoušek, jako prevence během provozu kolejových vozidel s tímto typem náprav. Metodika postupů pro zkoušení a případné následné sledování náprav s výskytem iniciačních trhlin, dle jejich výše uvedeného analyzovaného rozvoje, spočívala především v zadání těchto novelizací:

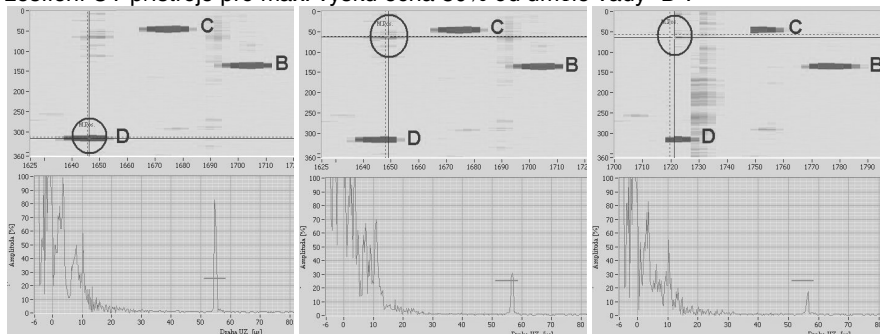
- a) použité sondy s úhlem výstupu UT svazku cca 37°, který má výhodnější charakteristiku odrazu a tím i vyšší citlivost od vadového rozhraní na zkoušeném povrchu,
- b) zvýšení frekvence používaných úhlových sond na 5MHz, čímž klesla hodnota minimálně identifikovatelné trhliny na 0,35 mm,
- c) provádění UT zkoušky úhlovými sondami oběma směry (+Y a -Y), byl eliminován úhel šíření iniciačních trhlin (je opačný, vzhledem k podélné ose vývrtnu, u sedla kola a sedla ozubeného kola nápravy).

Zjištěné poznatky byly ověřeny poloautomatickým UT zařízením na vyřazených nápravách. K přirozené vadě typu iniciační trhlina byly vyrobeny shodně příčně orientované umělé vady (viz **obr.10**) různých hloubek a umístění, vzhledem ke geometrii a namáhání nápravy.



Obr.10 Schéma profilu duté nápravy a výsledný Scan s indikacemi umělých vad (A, B, C a D hloubky 0,75 mm) na etalonu s přirozenou vadou typu iniciační trhlinka
Fig.10 Hollow axle profile with false damage indication (A, B, C a D - depth 0,75 mm)

Původní UT postup měl limitující porovnávací úroveň (PÚ) pro vyřazení nápravy z provozu umělou vadu hloubky 1,5mm (+10 dB). Porovnání echogramů umělé vady hloubky 0,75mm (viz obr.11), s přirozenou vadou ve výhodném směru -Y (viz obr.12), i průkazná indikace nevýhodně orientovaného směru (+Y) iniciační trhlinky (viz obr.13), demonstruje dostatečnou vypovídací hodnotu k posouzení, případně k dalšímu sledování nápravy v provozu. Výchozí nastavení bylo konstantní zesílení UT přístroje pro max. výšku echa 80% od umělé vady "D".



Obr. 11 Umělá vada D, směr-Y, hloubka 0,75 mm
Fig. 11 False damage D, direction -Y, depth 0,75 mm

Obr. 12 Přirozená vada, směr-Y, výška echa 30%
Fig. 12 Natural damage, direction -Y

Obr. 13 Přirozená vada, směr+Y, výška echa 18 %
Fig. 13 Natural damage, direction +Y

Znalost charakteru, lokalizace a směru iniciačních trhlin, jejich zjištění, porovnání a reprodukovatelnost UT zkoušek, umožňuje fundovaně rozhodnout o včasném vyřazení nápravy z provozu kolejového vozidla. Na základě výsledků materiálových analýz byly rovněž zavedeny příslušná opatření v údržbě povrchů náprav, včetně povrchové úpravy celé sestavy dvojkolí po standardních opravárenských zásadách (přelísování vadných nebo rozměrově již nevyhovujících součástí dvojkolí).

6. Zkoušení jízdních ploch dvojkolí

Nejrozšířenější způsob brždění pomocí brzdových špalků nebyl tak účinný jako kotoučovou brzdou. Pokud však nedošlo k intenzivnímu (záchrannou brzdou) nebo časově dlouhému (na spádech v horských a podhorských tratích) brždění, brzdový špalek tepelně stabilizoval povrch jízdní plochy kola. Moderní kotoučové brzdy vedle vysoké účinnosti však vyžadují správné seřízení protismykového zařízení (obdoba ABS u automobilu) a u hnacích dvojkolí i správné nastavení protiskluzových ochran. V případě špatného nastavení výše zmíněných ochran dochází, vlivem náhlé změny adhezních podmínek styčné plochy kolo-kolejnice, k lokálnímu tepelnému přetížení povrchu jízdní plochy. Pokud dojde k tepelnému přetížení, náhle dochází k degradaci povrchové vrstvy jízdní plochy s následným porušením materiálové struktury (viz **obr.14**). Tento zpočátku povrchový defekt se následným provozem a dynamickým zatížením kola rozvíjí do nebezpečných rozměrů, které již nekorespondují s povrchem, ale šíří se ve směrech, které bylo nutné definovat pro plnohodnotné UT zkoušky dvojkolí bržděných kotoučovou brzdou.

Obr.14 Povrchový projev nebezpečné vady na jízdní ploše kola bržděného kotoučovou brzdou.

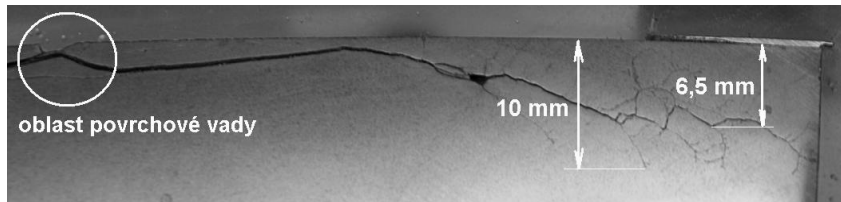
Fig.14 The surface appearance of the dangerous defect on the wheel contact area braked by the disk brake



7. Zaměření a rozsah provedených analýz

- Rozbor chemického složení pro ověření deklarovaného složení předmětné oceli
- Hodnocení tvrdosti
 - pro kontrolu předepsané úrovně tvrdosti po tepelném zpracování
 - k vyhodnocení povrchového zpevnění provozním zatížením
- Hodnocení mikročistoty s ohledem na případný vliv na degradaci materiálu
- Metalografické analýzy makro a mikrostruktury materiálu
 - komplexní rozbor strukturních parametrů z pohledu vlivu na jakost a provozní odolnost materiálu,
 - vliv případných strukturních heterogenit na iniciaci a rozvoj dekoheze oceli.

Na základě těchto rozborů bylo zjištěno, že materiál sice odpovídal souvisejícím normám a předpisům, ale je velmi citlivý na teplotní pole a silové účinky, vznikající např. při brzdění a smyku. Tendence radiálního větvení (viz **obr.15**) probíhá i v podpovrchových vrstvách nad 10 mm hloubky pod povrchem jízdni plochy, kde vizuálně není poškození pozorovatelné.



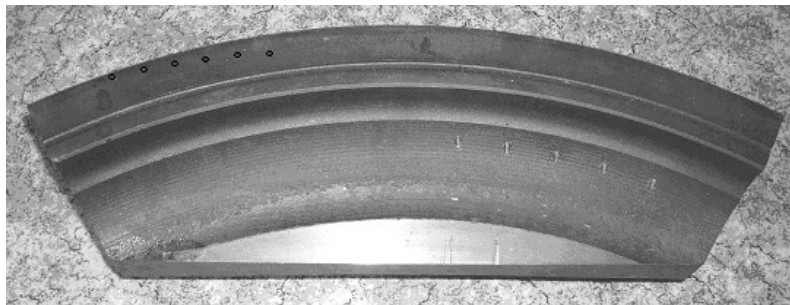
Obr.15 Metallografický řez vady pod povrchem jízdni plochy
Fig.15 The metallography cutting cross the defect under loading surface

8. Podpůrné NDT metody k potvrzení laboratorních analýz

Výše uvedené rozsáhlé, časově a finančně náročné rozboru univerzitní laboratoře byly u těchto typů vad provedeny pouze u 2ks různých typů kol. Pro potřeby provozních UT zkoušek se však hledal dostupný a rychlý způsob ověření pravidel rozvoje a šíření těchto nebezpečných trhlin. K tomu posloužila nepřímá VT metoda během soustružení kol s předmětnými vadami. Ke kvalitnějšímu videozáznamu byly později trhliny vyplněny barevnými penetranty. Rozborem videozáznamů, resp. fotografií, v průběhu soustružení bylo ověřeno pravidlo šíření, které bylo popsáno v laboratoři. Přestože tato analýza probíhala před lety a byla použita pouze tehdejší poloprofesionální technika, domníváme se, po předvedení názorné ukázky, že v dnešní době ze dosáhnout daleko kvalitnější výsledky. V současné době je univerzitní laboratoř vybavena špičkovou záznamovou videotechnikou. Tento námi navržený princip, lze dále rozvíjet. Využitím zdokonalených stříhových programů s klíčováním barev a pozadí, by bylo možné v budoucnu vytvářet 3D obrazy celkového prostorového průběhu a orientace jakýchkoliv vnitřních vad a únavových trhlin. Celková znalost vlastností a parametrů vad (jejich iniciace, orientace a šíření materiálem) je důležité právě pro provádění jakýchkoliv standardních UT zkoušek v provozu.

9. Optimalizace UT zkoušky jízdni plochy

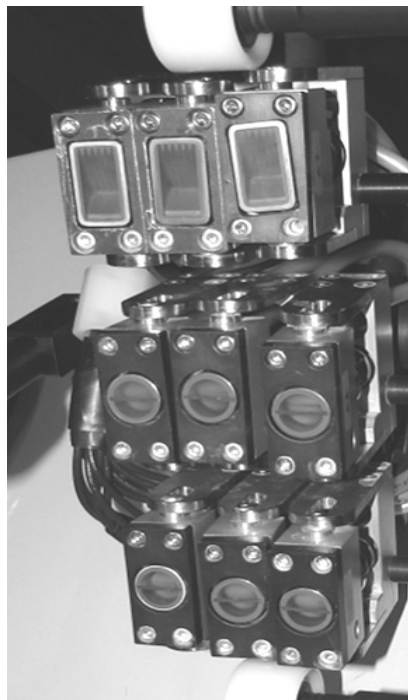
Tato zjištění jsou významná především z hlediska bezpečnosti provozu a předpokladů ohledně životnosti kol, které souvisí s potřebou reprofilyce (soustružení jízdniho profilu) případně vyrazení kola z provozu. K zjištění a nastavení správné citlivosti zkoušky, byla nejdříve vyrobena srovnávací měrka z referenčního materiálu kola. V závislosti na podmínky evropských TSI byly v měrce vyrobeny reflektory jak požadovaného plochého dna vývrtu (FBH), tak praktičtějšího bočního válcového vývrtu (SDH) pro porovnání jejich velikosti k jednotnému určení náhradní velikosti vady (viz **obr.16**). Vzhledem ke složité geometrii příčného profilu jízdni plochy a k poměrně velké toleranci jejího opotřebení v průběhu provozní životnosti, je SDH relevantní porovnávací úroveň umělé vady při provádění provozní UT zkoušky celého věnce kola.



Obr.16 Srovnávací měrka umělých vad FBH a SDH z referenčního materiálu

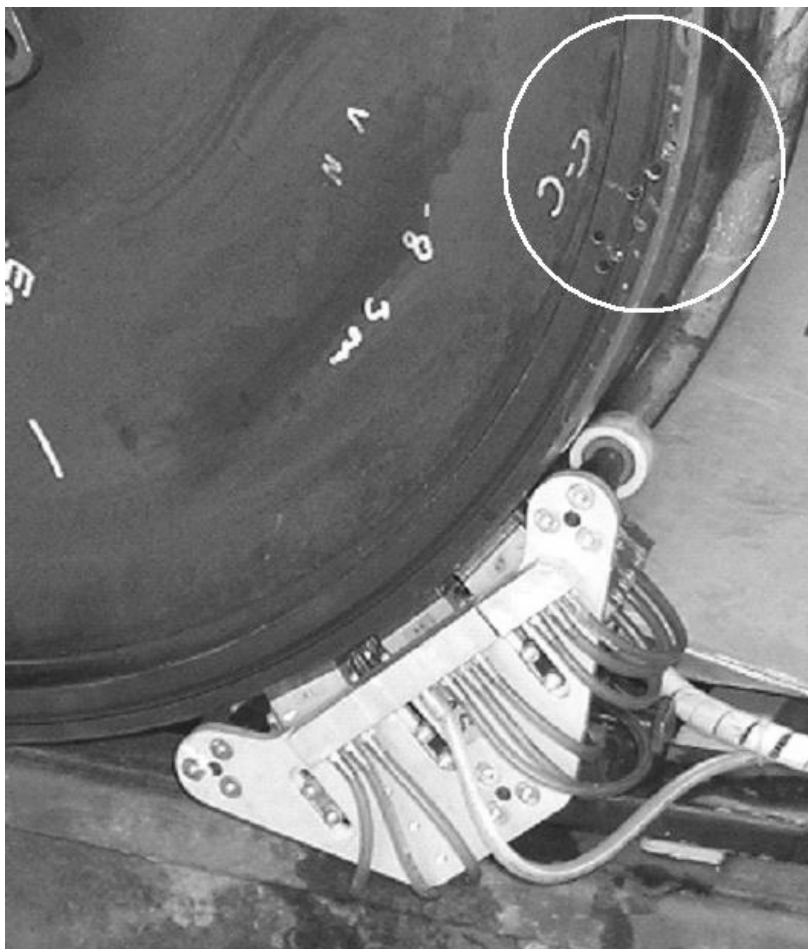
Fig.16 The comparative gauge of the false damages FBH and SDH from the reference material

Ověřením mezinárodně platných podmínek pro jednotné hodnocení vad, byl vznesen požadavek na výrobu poloautomatického zařízení s „botkou“ potřebných UT sond (viz **obr.17**), které by zahrnovalo i nová zjištění vzniku a rozvoje trhlin pod povrchem jízdni plochy. Ověřenou geometrií trhlin, pravidelnost jejich šíření a rozvětvení do radiálního směru nás vedla k výrobě reálných srovnávacích měrek dvojkolí, kde byly uměle vyrobeny „shluky“ umělých vad typu SDH (viz **obr.18**).



Obr.17 Realizace návrhu zkušební „botky“ se soustavou dvojitých a úhlových sond pro inspekci celého objemu věnce kola, se zaměřením na kritický úsek výskytu nebezpečných vad

Fig.17 Realization of the testing „boot“ concept with the system of the double and angle search units



Obr.18 Shluk vad (C - C, \varnothing 5mm, SDH) pod jízdni plochou věnce kola na reálné srovnávací měrce najíždí k „botce“ UT sond během zkoušky

Fig.18 Cluster of the defects below the contact area – real comparative gauges. UT search units during the test.

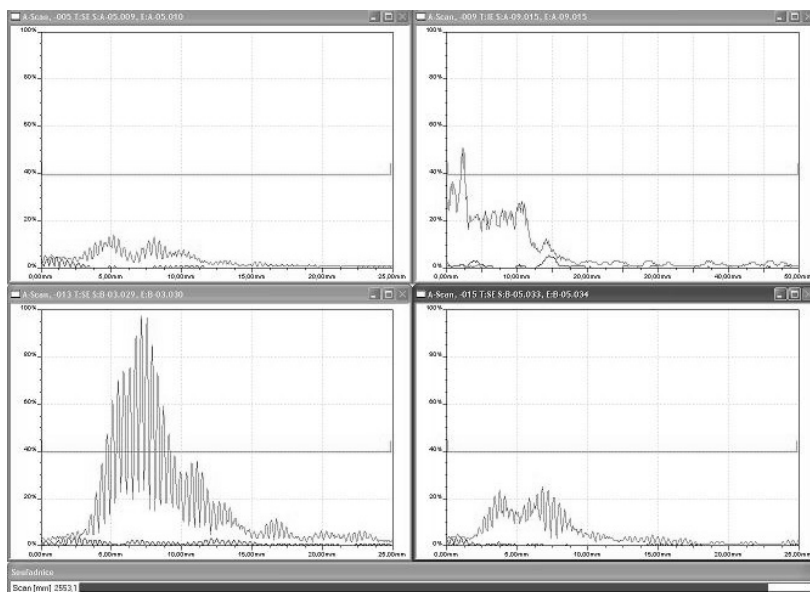
Konkrétní případ vady zjištěné vizuálně (viz **obr.19** a **20**), byl během reprofilace – osoustružením profilu jízdni plochy o 3,5 mm – zkoušen metodou MT fluorescenčně. Na **obr.20** jsou vidět široké trhliny (šířící se pod povrchem) a úzké trhliny jsou stopy jejich obou radiálních směrů (k povrchu a pod povrch). Během UT zkoušení na vícekanálovém zařízení, lze navolit 4 A-zobrazení kanálů, současně se zapojením zpoždovacího „stínu“ maximálního echa, které reálně vizualizují stav pod povrchem jízdni plochy (viz **obr.21**), která je podstatná pro vyhodnocení vady a rozhodnutí o vyřazení či reprofilaci (osoustružení porušené vrstvy) vadného kola.



Obr. 19 Vizualně zjištěná vada
Fig. 19 Visual indicated defect



Obr. 20 Vada (obr.19) během soustružení
Fig. 20 The defect (Fig.19) during turning



Obr. 21 Obrazovka vícekanálového zařízení se 4 zobrazeními A-scan.
Vpravo nahoře kanál úhlové sondy, ostatní jsou kanály dvojitých sond.
Červený šum=aktuální stav časové základny. Zelená echa=zpoždění 3 sec.
Vizualizace po přejezdu vady nad snímací „botkou“ UT sond

Fig. 21 The screen of the multichannel equipment

10. Závěr

Výše uvedené dva příklady UT zkoušek jsou jen nepatrnou podmnožinou celkového objemu NDT na železničních kolejových vozidlech. Výsledky těchto analýz jsou aplikovány do technologických postupů pro rutinní jednoúčelové zkoušky na standardních UT přístrojích. Podle těchto postupů pak může zaměstnanec defektoskopického střediska v Chebu, Břeclavi nebo Mnichově zkoušet konkrétní součást s reprodukovatelnými výsledky během následných ověřovacích zkoušek, na kterémkoliv NDT pracovišti zákazníka.

11. Poděkování

Tento příspěvek vznikl díky spolupráci mnoha dalších bezejmenných řemeslníků, techniků, výzkumníků a kolegů, kteří se dokáží věnovat drážní problematice nad rámec svých běžných povinností. Dík patří i řadě manažerů privátních opravců kolejových vozidel, za jejich vstřícnost při zajištění řady náročných experimentů. Zvláštní poděkování patří neuvěřitelně technicko-praktickému nasazení dvou žen: Doc. Evy Schmidové a mé kolegyně, Ing. Vladislavy Sekerášové

12. Literatura

[1] Schmidová a kol.: *Analýzy poškození náprav*, Výzkumná zpráva č. KMMČS 68/2010, Univerzita Pardubice, 2010

[2] Schmidová a kol.: *Vyhodnocení výskytu defektů a dominantních faktorů, stimuluje tvorbu defektů v kontaktu kolo-kolejnice*. Výzkumná zpráva č. A4-01/2006, Výzkumné centrum kolejových vozidel, Univerzita Pardubice, 2006



PosiTector® NOVÉ GENERACE THE NEW GENERATION OF PosiTector®

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

Abstrakt

Legendární povlakoměr PosiTector® je nyní opět promyšlenější, rychlejší a výkonnější. Standardní i pokročilé provedení nabízí v tvarově upraveném těle přístroje velký a přehledný displej, vestavěnou paměť, statistické vyhodnocení měření, USB rozhraní a rychlý měřicí režim. Pokročilý model se navíc vyznačuje vysoce kontrastním barevným displejem, nápovědou, grafickým zobrazením výsledků a řadou dalších nových funkcí. Dále je možné oba modely rozšířit o skenovací snímač a o vlhkoměr s teploměrem.

Klíčová slova: *tloušťka povlaku, profil povrchu, klimatické sondy, internetová aplikace*

Abstract

Legendary coating thickness gage PosiTector® is now back smarter, faster and more efficient. Standard and advanced design provides a modified shape in a large body of the device and clear display, built-in memory, statistical evaluation of measurements, the USB interface and fast measurement mode. The advanced model also features high-contrast color display, help, graphic display of results and many other new features. In addition both models can be extended by the scanning sensor and the hygrometer and thermometer probe.

Key words: *coating thickness, surface profile, environmental probe, cloud application*

1. Úvod

Legendární povlakoměr PosiTector® je nyní opět promyšlenější, rychlejší a výkonnější. Standardní i pokročilé provedení nabízí ve tvarově upraveném těle přístroje velký a přehledný displej, vnitřní paměť dat, statistické vyhodnocení měření, USB rozhraní a rychlý měřicí režim. Pokročilý model se navíc vyznačuje vysoce kontrastním barevným displejem, skenovacím režimem, nápovědou, grafickým zobrazením výsledků a řadou dalších nových funkcí.

Nejvýraznější změny doznalo zpracování naměřených hodnot. PosiTector® nyní umožňuje ukládat měření, vytvářet podrobné měřicí protokoly a sdílet získané výsledky prostřednictvím internetového prohlížeče bez potřeby vlastního programu.

Všechny snímače předchozí verze jsou s novým tělem kompatibilní, tak stačí jen obměnit přístroj, abyste mohli naplno využívat nových vlastností poslední generace přístrojů PosiTector®. Praktický způsob výměnných snímačů dále umožnil rozšířit aplikační možnosti přístrojů PosiTector® o přímé měření rosného bodu a profilu povrchu.

2. Významné vlastnosti

PosiTector® je jednoduše použitelný. Nevyžaduje žádná kalibrační nastavení a je tak ihned připravený měřit. Jednou rukou zvládnete procházet přehlednou nabídku funkcí. Ve hlučném prostředí oceníte signalizaci blikajícím displejem. A pokud se potřebujete vrátit do základního nastavení, je vždy po ruce funkce obnovy parametrů na výrobní nastavení.

PosiTector® je vhodný do těžkých pracovních podmínek. Tělo přístroje odolává rozpouštědlům, kyselinám, olejům a je utěsněné proti vodě a prachu. Stejně tak je vodotěsný měřicí dotyk každého snímače. Odolnosti přispívá ochranné gumové pouzdro se sponou pro zavěšení na opasek. Případnému zašpinění displeje barvou brání ochranná fólie. A navíc jsou přístroje i snímače kryty dvouletou zárukou.

PosiTector® vyniká vysokou přesností. Vestavěná teplotní kompenzace zajišťuje dlouhodobou přesnost měření při proměnných klimatických podmínkách. V režimu s vysokým rozlišením se zobrazují naměřené hodnoty až na desetinu mikrometru. Vlastnosti přístroje odpovídají požadavkům národních i mezinárodních standardů včetně ISO a ASTM.



Obr. 1: PosiTector® 6000

Výhodou přístrojů PosiTector® je jejich variabilita. Všechny snímače jsou plně zaměnitelné pro obě provedení těla přístroje. Pro vyšší přesnost měření je možné přístroj kalibrovat na aktuální podklad v jednobodovém a dvoubodovém režimu na známou tloušťku povlaku s využitím průměrovaného nulování. Přístroj komunikuje s obsluhou v řadě jazyků včetně češtiny. Vysoce kontrastní podsvětlený displej je dobře viditelný v jasném i tmavém prostředí a umožňuje převrátit zobrazení pro pohodlné odečítání v libovolné pracovní pozici. Pro měření na větší vzdálenost jsou k dispozici prodloužené kabely snímačů až do 75 m. K napájení slouží volitelně alkalické baterie nebo akumulátory, které mohou být lithiové nebo nikl-metal hydridové.

PosiTector® je připravený pro náročné použití. Přístroj při měření průběžně obnovuje střední hodnotu, standardní odchylku a mezní hodnoty naměřených dat. Signalizuje akusticky i opticky překročení nastavených mezí. Pro přehledové měření se nabízí rychlý měřicí režim. Prostřednictvím USB rozhraní se přenášejí data a zajišťuje se i nabíjení akumulátorů nebo napájení přístroje. Každé měření je označeno datem a časem sejmutí hodnot. Naměřená data uložená v přístroji je možné pohodlně zpracovat prostřednictvím internetové aplikace PosiTector.net. Ta umožňuje i zákaznickou aktualizaci programového vybavení přístroje.

3. Dva modely

Standardní model přístroje PosiTector® má všechny uvedené vlastnosti a je vybavený monochromatickým displejem a základní pamětí pro 250 naměřených hodnot. Ty je možné zobrazit na displeji přístroje nebo přenést pro další zpracování.

Přístroj PosiTector® v pokročilém provedení má navíc vysoce kontrastní barevný displej, který umožňuje také inverzní zobrazení. Paměť pojme 100 000 měření, která lze rozdělit do 1 000 souborů. Nabízí také nápovědu přímo na displeji a navíc i zobrazování grafů, obrázků a poznámek k jednotlivým souborům měření. Data se pro další zpracování mohou přenášet přes USB rozhraní nebo bezdrátově pomocí technologie Bluetooth. K dispozici je skenovací režim, který nabízí možnost průběžného měření bez oddalování snímače od měřeného povrchu. Pro specifická měření na různých podkladech lze využít možnosti ukládat a vyvolat několik kalibračních nastavení. Implementovaná funkce SSPC-PA2 pomáhá určit, zda povlak na velké ploše odpovídá uživatelsky zadaným podmínkám minimální a maximální tloušťky. Vyhodnocení měření funkcí PSCP 90/10 umožňuje posoudit povlakovou vrstvu podle standardu IMO.

4. Komunikační možnosti

Přenášení naměřených dat k dalšímu zpracování je možné několika způsoby. Pokud přístroj PosiTector® připojíme k počítači prostřednictvím rozhraní USB, máme pomocí průzkumníka operačního systému nebo pomocí internetového prohlížeče přístup k naměřeným datům jako u velkokapacitního paměťového média. Také je pro přenos dat možné využít osvědčený program PosiSoft® a navázat tak na dosavadní zpracování naměřených hodnot. Nejpokrokovější způsob přenosu a zpracování dat však je použití internetové aplikace PosiTector.net.

Tato volně dostupná aplikace nabízí bezpečnou centralizovanou správu naměřených dat. Měření se po připojení k internetu okamžitě synchronizují na zabezpečeném serveru, do přístroje se také mohou stahovat zaznamenané komentáře a doplňující

obrázky. Připojení je snadné pomocí standardního prohlížeče z libovolného místa na světě. Pak už nic nebrání vytváření dokonalých protokolů se všemi podklady právě tam, kde je to zapotřebí. Data je možné také sdílet s autorizovanými spolupracovníky nebo exportovat do dalších aplikací. Výhodou je také volba libovolného jazykového prostředí v aplikaci PosiTector.net pro bezproblémovou komunikaci.

5. PosiTector® 6000

Připojením jednoho z 21 typů snímačů získáme povlakoměr přesně podle vlastních potřeb. K dispozici jsou kompaktní snímače v provedení F, N a FN, jejichž výhodou je možnost měření jednou rukou. Pokud dáte přednost snímači na kabelu, je k dispozici stejná trojice snímačů v přímém i úhlovém provedení. Všechny tyto snímače mají měřicí rozsah do 1500 μm . Pro měření tenkých vrstev na malých plochách jsou vhodné mikrosnímače, které jsou přímé a úhlové. Silné povlakové vrstvy změří širokorozsahové snímače, které jsou v kompaktním provedení použitelné do tloušťky 6 mm a v provedení s kabelem až do 13 mm.

6. PosiTector® DPM

Pokud k standardnímu nebo pokročilému tělu přístroje PosiTector® připojíme snímač DPH, získáme měřidlo pro určení klimatických podmínek. Přístroj PosiTector® DPM měří relativní vlhkost, teplotu vzduchu a teplotu povrchu, určí teplotu rosného bodu, vypočte rozdíl hodnot teplot povrchu a rosného bodu a stanoví teplotu mokrého teploměru. Tím je zaručeno sledování klimatických podmínek při provádění povrchových úprav podle ISO 8502-4.



Obr. 2: PosiTector® DPM

Pro usnadnění a zpřesnění měření je k dispozici teplotní snímač povrchu konstrukce s magnetickým upnutím. Je-li potřebné kontinuální měření, je možné vybavit tělo přístroje PosiTector® také magnetickým upínačem. V automatickém měřicím režimu ukládá data ve zvoleném časovém intervalu a ta mohou být současně přenášena

přes USB nebo Bluetooth rozhraní. Na baterie může v tomto režimu pracovat trvale 8 měsíců nebo nepřetržitě, je-li napájen přes USB.

7. PosiTector® SPG

Nově je k dispozici kompaktní snímač SPG, který umožní po připojení k tělu přístroje PosiTector® měřit profil povrchu. Proč je toto měření důležité? Ocelové povrchy se často před povrchovou úpravou abrazivně čistí. Výsledný profil povrchu, který je charakterizovaný rozdílem mezi nejvyšším vrcholem a nejnižší prohlubní, představuje důležitý faktor pro stanovení parametrů povrchové úpravy. Nízký profil může ovlivnit přilnutí povlaku, naopak vysoký profil může způsobit nedostatečné krytí povlaku. Znalost profilu může tedy významně ovlivnit kvalitu povrchové úpravy a její cenu.



Obr. 3: PosiTector® SPG

K měření profilu slouží hrot z karbidu wolframu o úhlu 60° a poloměru 50 μm . Jeho životnost je vysoká a k dispozici je kalibrační destička pro nastavení nulové hodnoty.

8. Závěr

Nová generace přístroje PosiTector® nabízí ve variantách 6000, DPM a SPG nejmodernější měřicí, ovládací a přenosové technologie, které uživatelům umožní přesné a rychlé měření, podpořené bezpečným ukládáním naměřených hodnot a jejich pohodlným a jednoduchým zpracováním.



ROLE SPOLEHLIVOSTI V HODNOCENÍ NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI

ROLE OF RELIABILITY IN ASSESSMENT NDE

Bernard KOPEC

Quality Testing Ultrasound

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

Abstrakt

Je všeobecně známo, že zařízení, postupy a personál jsou v nedestruktivním zkoušení systémové prvky, které tvoří NDE spolehlivost. Kvantitativní míry těchto prvků, jakož i jejich vzájemný poměr na celkovou spolehlivost NDE nejsou dosud určeny. Příspěvek je diskusí ke koncepčnímu modelu spolehlivosti NDE.

Klíčová slova : NDE spolehlivost, NDE systém, postupy, zařízení, personál, lidský faktor, normy

Abstract

It is well known that the equipment, procedures and personnel are in non-destructive testing of system components that make up the NDE reliability. Quantitative measures of these elements, as well as the ratio between the overall reliability of the NDE is not yet determined. The paper is a conceptual model discussed NDE reliability.

Key words: NDE reliability, NDE system, procedures, equipment, personnel, human factor, standards

Nedestruktivní zkoušení má řadu významných úloh při zajišťování kvality života a spolehlivosti mnoha významných produktů a zařízení, jejichž nezávadné použití je nanejvýš důležité. Tradiční role nedestruktivního zkoušení v oblasti kontroly kvality během výroby, převážně detekce vad, byla doplněna v posledních letech stále důležitějšími kontrolami v provozu strojů a zařízení v různých fázích po celou dobu životnosti produktu. Nejen správná aplikace nedestruktivního zkoušení, ale především spolehlivost použití nedestruktivních metod může zabránit nehodám, zachraňovat životy, chránit životní prostředí a vyhnout se hospodářským ztrátám.

Základ k systematickému sledování spolehlivosti nedestruktivního zkoušení položily dva významné workshopy, zabývající se NDE spolehlivostí:

- a) 1st European – American Workshop NDE Reliability, June 18-20, 1997, Berlin, Germany
- b) 2nd American – European Workshop NDE Reliability, September 21-24, 1999, Boulder, Colorado, USA

Problematika spolehlivosti pak byla předmětem samostatných sekcí na světových konferencích WCNDT.

První Evropsko – Americký Workshop stanovil základní model spolehlivosti:

$$R = f(IC) - g(AP) - h(HF)$$

Tento koncepční model uvádí, že celková spolehlivost jakéhokoliv systému NDE je suma funkcí, kde:

- IC je vnitřní schopnost systému (techniky, kombinace technik)
AP je vliv parametrů aplikace, jako je omezení přístupu, stav povrchu apod., které snižují schopnost systému NDE
HF je vliv lidského faktoru, jenž obecně snižuje schopnost, efektivitu a účinnost systému NDE

Druhý Americko – Evropský Workshop revidoval tento model na vztah, který je nyní akceptován v problematice stanovení spolehlivosti NDE:

$$R = f[AC, HF] < IC$$

kde

$$AC = f(AP, HF) < IC, \text{ kde } HF=0$$

Aplikační parametr AP, jako parametr funkce AC, byl upřesněn jako faktor zahrnující vliv materiálových podmínek diskontinuit, defektů, postupů a zařízení, které ovlivňují schopnost systému NDE důsledně plnit stanovenou aplikaci.

Lidský faktor HF byl nově definován jako fyzikální a poznávací prvky, které mají vliv na výkon systému NDE.

K významným závěrům, které z tohoto upraveného koncepčního modelu spolehlivosti NDE patří tyto:

- Lidský faktor HF nemůže mít přednost před ostatními parametry.
- Je nutno uvažovat rozdíl mezi teoretickým postupem a nejlepší praktickou zkušeností.
- Vnitřní schopnost systému IC může být v určitých případech považována za selhání procesu návrhu a vývoje (schopnost detekce necelistvosti).
- Parametry aplikace AP musí být rozloženy na cílové složky a ztráty.

Dalšími významnými pracovními workshopy byly :

- a) 3rd European – American Workshop NDE Reliability, September 11-13, 2003, Berlin, Germany
- d) 4th American – European Workshop NDE Reliability, June 24-26, 2009, Berlin, Germany

Oba tyto Workshopy se konaly v BAM, Berlín, kde vzniklo první významné světové pracoviště zabývající se spolehlivostí NDE systémově. Na obou workshopech byl upřesněn vliv jednotlivých aspektů spolehlivosti metod NDE, navržených v koncepčním modelu.

Obr. 1 se pokouší reprezentovat infrastrukturu kvality NDT. Levé silně označené boxy jsou veškeré možné subjekty, které mají vliv na spolehlivost a tvořící jako celek NDE systém. Jsou to postupy, zařízení, personál a lidský faktor. Celá pravá strana představuje různá opatření a nástroje pro dosažení kvality zkoušení nedestruktivními metodami, včetně různých typů certifikace a akreditace.

Předpisy a normy mají důležitou úlohu pro dosahování kvality a spolehlivosti. K dispozici je celá řada mezinárodních, evropských a národních norem, jsou vytvořena pravidla pro NDT techniky vybavení a personál. Ve větší míře se rozšiřuje oblast kalibrace přístrojů a zařízení. Je možno konstatovat, že dnes jsou k dispozici normy pro všechny metody NDT. Pozornost je třeba věnovat specifickým pracovním školením, protože zákazník může žádat zkoušení, které může být mimo rozsah jak certifikovaných metod postupů, tak kvalifikace zkušební technika. V oblasti personální certifikace, jak je všeobecně známo, existují dva typy norem a to certifikace třetí stranou (ISO 9712, EN 473) a interní certifikace (SNT-TC-1A, oborové normy).

Kvalita při provádění operací NDT vyžaduje pozornost k sérii propojených aspektů výzkumu a vývoje, zákonů a norem, vybavení, školení personálu a certifikací, vlivu lidské spolehlivosti a vlivu auditu a kontroly. Tyto aspekty mohou být reprezentovány jako odkazy v celém řetězci systému NDE. Řetězec bude pouze tak silný, jako jeho nejslabší článek. Zvláštní pozornost na jeden článek v řetězci nemůže nahradit nedostatek pozornosti na jiný, stejně pevný článek v řetězci. Nemůže vyvážit slabý článek.

Národní a mezinárodní normy pro systému managementu kvality jako je ISO 9001 vyžadují řízení k prokázání kvality systému řízení všech činností, které mají vliv na kvalitu, včetně NDT. Systém kvality musí řešit každý z článků v řetězci kvality a zajistit, aby všechny subjekty byly obsaženy a byly propojeny. Právní a regulatorní předpisy a dobrá praxe by měly napomáhat tomu, jak dosáhnout spolehlivosti NDT. Akreditace zkušeben jsou mnohem komplexnější než audit systému managementu kvality dle ISO 9001 s větším důrazem na vlastní technické schopnosti zkušebny.

Lidský faktor, který ovlivňuje spolehlivost provádění NDT je v častých případech nejslabším článkem v řetězci kvality nedestruktivního zkoušení a kvalita NDT infrastruktury je v této oblasti nejméně zmapována. Aspekt lidský faktor nemůžeme ztotožňovat s certifikací personálu (vlastnictví certifikátu stupně 1., 2., 3.). Lidské motivaci k dosažení kvality je nutné věnovat zvláštní pozornost. Ve skutečnosti motivace a závazek kvality personálu NDT má zásadní význam v úsilí o celkovou kvalitu NDT operací. Je málo pravděpodobné, že kvalita může být dosažena certifikovaným systémem managementu kvality, validací zkušebních metod a vlastnictvím personálních certifikátů NDT metod, pokud osoby vykonávající nedestruktivní zkoušení nejsou správně motivovány a nemají potřebné charakterové vlastnosti.

Lidský faktor je definován jako duševní a fyzický potenciál jednotlivce vycházející z individuálního výcviku, zkušeností a podmínek za nichž musí jednat pracovat a které ovlivňují schopnost NDE systému pro dosažení cíle. Je všeobecně známo, že zřízení, postupy a personál jsou v nedestruktivním zkoušení systémové prvky,

kteří tvoří NDE spolehlivost. Kvantitativní míry těchto prvků jakož i jeho vzájemný poměr na celkovou spolehlivost NDE nejsou dosud určeny. Lidskou chybou je třeba brát vážně. Lidskou chybou lze charakterizovat jako rozdíl mezi provedenou akcí a akcí, která měla být provedena, což má vliv na následek, který je konkrétní (bezpečnost) a který je závislý na lidské interakci. Lidská chyba může způsobit škodu mnohem větší než nedorozumění, rozbitá váza nebo rozpaky.

Na závěr bych citoval Ernsta Macha, který výmluvně prohlásil „Nedosáhneme nikdy 100% spolehlivosti NDE, ale naše neustálé úsilí k dosažení co nejvyšší spolehlivosti bude přínosem pro lidstvo“.

NDT Systém NDT System	Standards Standards	Postupy Procedures	Kvalifikace Qualification	Inspekce Inspection Certifikace Certification Notifikace Notification	Akreditace Accreditation
POSTUPY PROCEDURES	Metody, Techniky Normy	Pracovní postupy, Schopnost hodnocení, Zkoušky způsobilosti zařízení	Validace, Výkonnost, Demonstrace, Inspekce, Kvalifikace dle ASME, API	Audity, Certifikace organizací dle EN ISO/IEC 17021, Certifikovaný systém managementu kvality dle ISO 9001	Akreditace zkušeben a kalibračních laboratoří dle EN ISO/IEC 17025
ZAŘÍZENÍ EQUIPMENT	Přístroje Příslušenství Kalibrace				
PERSONÁL PERSONNEL	Výcvik, Školení Kvalifikace Certifikace	Popisy práce		Certifikace personálu dle EN 473, ISO 9712, SNT-TC-1A	Akreditace organizací certifikace personálu dle EN ISO/IEC 17024
LIDSKÝ FAKTOR HUMAN FACTORS	Etický kodex	Řízení a plánování, Řízení rizik	Prohlášení o společném záměru, Odborné společnosti	Morálka, Etika Charakterové vlastnosti	?

Obr. 1: Infrastruktura kvality NDE
Fig. 1: The NDE Quality Infrastructure



NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE DAMAGE

Marta KORENSKA

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Physics
e-mail: korenska.m@fce.vutbr.cz

Abstract

The present paper deals with an experimental study of the frequency inspection method applicability to the concrete structure integrity damage assessment. Our research has addressed to three groups of specimens which differed from each other in the structure quality, because of different concrete ageing conditions, were subjected to the degradation. Our objective consisted in determining how the freeze-thaw cycle application induced degradation depends on the structure initial quality. The measurement results of the specimens (the best structure quality) which had undergone degradation showed no frequency spectra changes and no predominant frequency shifts. Specimen groups of which quality was inferior due to the lack of water during the ageing process showed a shift of the predominant frequencies toward higher frequencies. However, it was an upward shift which we are interpreting as a symptom of the specimen structure improvement – contrary to our expectations. The structure integrity improvement is in our opinion due to the additional hydration of mixed cement grains in consequence of specimen soaking in water in the course of the freeze-thaw cycles. It was verified that this method is appropriate to concrete structure changes assessment.

Key words: concrete ageing conditions, structure integrity, micro-cracks, frequency inspection

1. Introduction

The frequency inspection method is used for non-destructive quality evaluation of building elements and concrete and masonry structures. It is based on the propagation of stress waves, which are generated by a mechanical impulse. A short-duration mechanical impact, produced by tapping a hammer or a small steel ball against the surface of tested object produces low-frequency stress waves (from 1 to 60 kHz) that propagate into the structure and are reflected by flaws and/or external surfaces [1 - 3]. Reflected waves are recorded on the surface by a sensor in the form of a voltage signal. The resulting voltage versus time plot (time-domain realization) is digitized and fed into the memory of a computer, which subsequently carries out the frequency analysis of it. What results are a time realization and the corresponding frequency spectrum display. The predominant frequencies (which are represented by local maxima in the spectrum) may be associated with multiple reflections within the structure, carrying information on the structure integrity and defect localization [4 - 6].

2. Experimental part

The three groups of the specimens of dimensions 4cmx4cmx16cm were prepared from a cement screed and mixed cement III was used. The first specimen group

(denoted V) was kept, in accordance with standard conditions, in water for the entire ripening period (28 days). In this case no water content reduction took place. The second specimen group was kept in air in laboratory environment conditions (denotation L). In consequence of water content reduction after hardening, the specimens shrank and microcracks arose in the specimen structure. The third specimen group (denoted S) was placed for twelve days of the ripening process into a dryer in which the air temperature was 60°C in order to increase the specimen load and get heavier structure deterioration. All three sample groups were placed in laboratory environment conditions for 8 months and then underwent 25 freezing cycles according to the norm CSN 73 1380. One cycle represented freezing the sample for 4.5 hours to -24°C and subsequent warming to 20°C for 2 hours. Three samples from the group V were left in laboratory environment conditions and denoted as reference samples V_r . The goal of the experiment was to evaluate the influence of the sample structure quality (different concrete ageing conditions) on the effect of degradation by freezing cycles.

The frequency inspection method was applied to the tests of concrete specimens before and after degradation. A special hammer provided longitudinal excitation. The mechanical impulse was applied by a special hammer and a piezo-electric sensor was used to pick up the response. The measurements results are represented in the form of the specimen response frequency spectra as shown in Figs 6 through 8.

3. Measurement results

Fig. 1 compares the results of two measurements of reference specimens carried out at different times. They are represented by specimen No $V_r 4$.

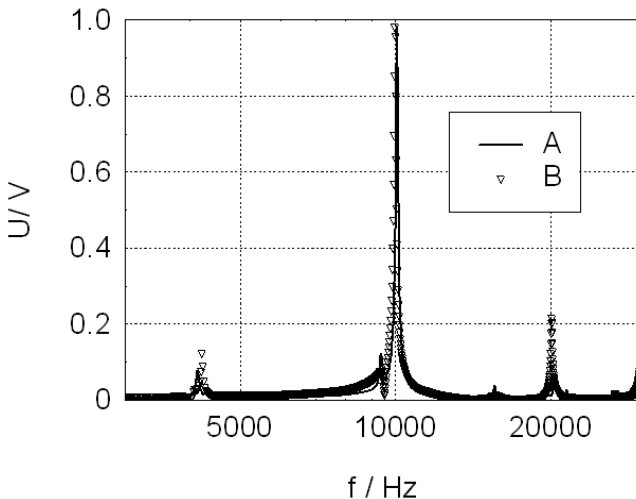


Fig. 1 Response frequency spectrum of intact reference specimen $V_r 4$

Curve A represents the measurement carried out on 12.5.2011, whereas curve B belongs to the measurements of 11.8.2011. It is evident that no shift of the predominant frequency component is taking place in this case.

The next Figure, No. 2, compares the results obtained from V1 before and after the thermal degradation. It represents the results obtained from the group of V specimens. During the ageing period, these specimens were kept – according to standard conditions – in water.

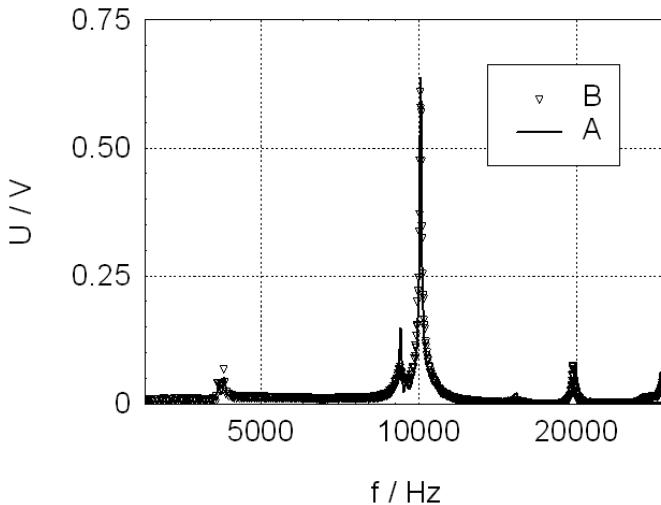


Fig. 2 Response frequency spectrum of V1 specimen, which was kept in water for the entire ripening period, A - before degradation, B – after degradation

In this diagram, curve A shows the measurement results obtained prior to the specimen degradation (measurement date, 9.5.2011), whereas curve B belongs to the post-degradation measurements (measurement date 11.8.2011). The comparison shows clearly that no predominant frequency shift has taken place in this case, which indicates that the application of 25 freeze-thaw cycles has not resulted in any structure damage.

The next Figure No. 3 represents the L-specimen group. During the ageing period, these specimens were kept in laboratory environment conditions, being exposed to the air but not to the water. The measurement results of this specimen group are represented by those of L1 specimen.

The diagram compares the measurement results obtained before (curve A, the readings having been taken on 13.5.2011) and after the thermal stress (curve B, 11.8.2011). In this case, a slight shift of the predominant frequency components is observed, however, toward higher frequencies, which contradicts our expectations [7]. The respective predominant frequencies prior to and after the thermal degradation were 8 770 Hz and 8 980 Hz, $\Delta f = 210$ Hz. The thermal degradation resulted in reducing the second harmonic frequency magnitude. Based on the predominant frequency upward shift, it may be supposed that the specimen structure integrity has improved in consequence of the thermal stress. The thing is that the specimens are soaked in water in the course of the degradation cycles, which has probably caused additional hydration of cement grains [8, 9].

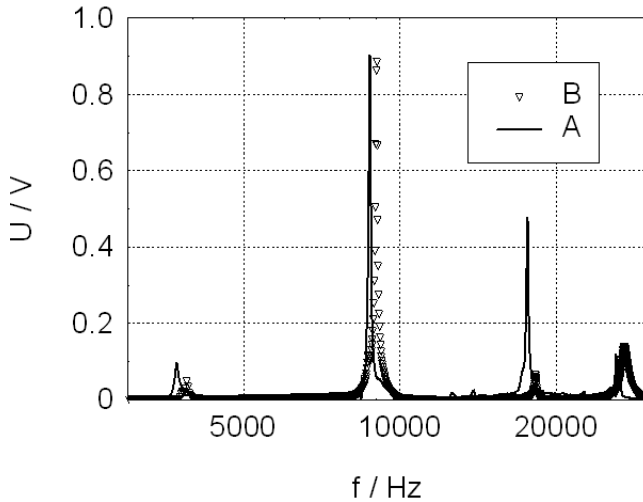


Fig. 3 Response frequency spectrum of L1 specimen which was stressed by shrinking, A - before degradation, B - after degradation

The last Figure, No. 4, shows the measurement results obtained from the S-specimen group, whose quality was the worst.

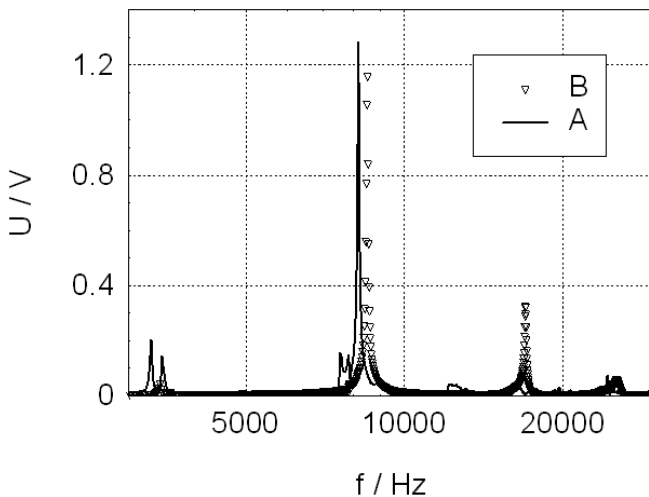


Fig. 4 Response frequency spectrum of S3 specimen which was subjected to stronger stressing, A - before degradation, B - after degradation

The diagram compares the frequency spectra of S3 specimen. Curves A and B correspond to the measurements made before (13.5.2011) and after (11.8.2011) the

specimen degradation, respectively. Again, an upward shift of the predominant frequencies is evident: pre-degradation frequency = 8 040 Hz, post-degradation frequency = 8 360 Hz. In this case, the frequency shift is higher, namely, $\Delta f = 320$ Hz, which indicates a thermal-stress-induced improvement of the structure integrity, which is considered to be due to an additional hydration of cement grains.

4. CONCLUSION

Our experiments focused on detecting structural changes in concrete specimens (made from mixed cement screed) which were supposed to arise in consequence of the thermal stress being applied in compliance with CSN 73 1380 standard. Three groups of specimens differing from each other in their structure quality, depending on the concrete ageing conditions, were studied. Our experiments aimed at comparing the effect of 25 freeze-thaw cycles on the specimens of three different quality groups. The 1st group, consisting of the best-quality concrete specimens, showed no frequency spectra changes and no predominant frequency shifts. The same results were also obtained from three specimens of this group which had not been subjected to any thermal stressing, being continuously kept at laboratory conditions.

The second specimen group whose quality was inferior due to the lack of water during the ageing process showed a shift of the predominant frequencies. However, it was an upward shift (toward higher frequencies) which we are interpreting as a symptom of the specimen structure improvement – contrary to our expectations. The structure integrity improvement is in our opinion due to the additional hydration of mixed cement grains in consequence of specimen soaking in water in the course of the freeze-thaw cycles.

Similar results were obtained from the 3rd group specimens (showing the worst quality of the structure). In this case, the frequency shift was still higher.

Our measurements also show that the frequency inspection method is a sensitive structure status indicator, which can also be used to assessing the frost resistance of these building elements.

Acknowledgement

The research described in this paper was supported by the Grant Agency of the Czech Republic under project No. P104/10/1430 and by the research project MSM 0021630519.

References

- [1] M. Korenska, L. Pazdera, K. Pospíšil, J. Stryk, P. Vyroubal: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3 September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322, ISBN 961–90610-5-5.
- [2] Kořenská M., Weber Z., Smutný J., Pazdera L.: *Aplikace moderních metod frekvenční analýzy na signál akustické emise {Application of Modern Time-Frequency Analysis on Acoustic Emission Signal}*, Mezinárodní vědecká konference, 60. výročí Stavební fakulty STU v Bratislave, Sekcia: Matematika a fyzika, Bratislava, Slovakia, November 18-20, 1998, pp. 33-36, ISBN 80-227-1135-7.
- [3] M. Korenska, L. Pazdera, L. Ritickova: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6th International Conference

of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184, ISBN 961–90610-1-3.

- [4] Korenska, M., Manychova, M.: *New possibilities of non-destructive testing of ceramic specimen integrity*, 2010, *Ceramics-Silikaty*, 54[1], pp. 72-77.
- [5] Pazdera. L., Topolar, L., Bilek, V., Smutny, J., Kusak, I., Lunak, M.: *Measuring of Concrete Properties during Hardening.*, proc. of 48th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, Velke Losiny, Czech Rep., May 31-June 03, 2010, pp. 311-318.
- [6] Plskova, I., Chobola, Z., Matysik, M.: *Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method*, 2011, *Ceramics-Silikaty*, 55[2], pp. 176 – 182.
- [7] Manychova, M.: *Evaluation of the Concrete Structure Integrity by Frequency Inspection*, The 41st International Conference Defektoskopie 2011, Ostrava, Czech Rep., November 9-11, 2011, in a print.
- [8] P. H. Emmons, R. Drochytka, Z. Jeřábek: *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1999.
- [9] Pytlík P.: *Technologie betonu*, Nakladatelství VUTIUM, Brno, 2000.



MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ U BETONOVÝCH PLÁTŮ RŮZNÉHO SLOŽENÍ

MEASUREMENTS OF ELECTRIC PARAMETERS OF CONCRETE SLABS OF DIFFERENT COMPOSITION

Ivo KUSÁK*, Bohumil KOKTAVÝ*, Miroslav LUŇÁK*

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

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

Abstrakt

NDT metodou impedanční spektroskopie [4] byly charakterizovány vzorky betonových plátů. Byly pozorovány rozdíly ve spektru $\tan\delta(f)$, $C(f)$ a $R(f)$ vzorků v suchém stavu. Dále byla popsána kvalita pomocí druhu ztrát dominujících v materiálu. Měřením byla ověřena reprodukovatelnost této metody a popsán vliv složení betonových vzorků na elektrické parametry.

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

Abstract

NDT impedance spectroscopy method [4] was employed to characterize concrete slab specimens. Differences in $\tan\delta(f)$, $C(f)$ and $R(f)$ spectra for dry specimens were observed. Furthermore, based on the predominant loss type, the material quality was characterized. Our measurements confirmed the reproducibility of this method. Furthermore, the influence of the concrete specimen composition on their electric parameters was assessed.

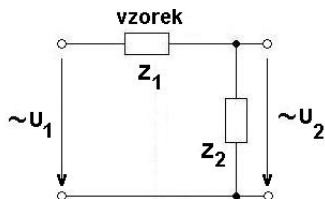
Key words: impedance spectroscopy, dielectric losses, loss factor, conductivity losses, polarization losses

1. Úvod

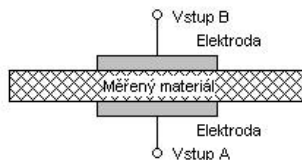
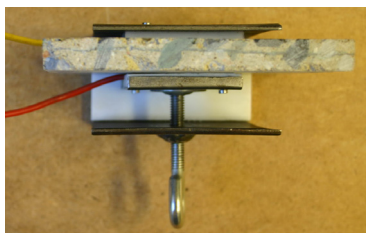
Představovaná měřící metoda impedanční spektroskopie vychází z měření elektrických impedančních charakteristik měřené soustavy, která má uspořádání **kov - stavební látka - kov**. Stavební látka se v této soustavě chová jako **dielektrikum**. Zkoumáme tedy vlastnosti tohoto dielektrika. Indikátorem vlastností jsou frekvenční závislosti reálné a imaginární části impedance měřené soustavy a zejména frekvenční závislost **ztrátového činitele** látky. Pomocným indikátorem jsou frekvenční závislosti odporu a kapacity soustavy, do které byl stavební materiál zabudován.

Metoda je zaměřena na kvalitativní a kvantitativní vyhodnocení výše jmenovaných parametrů. Z charakteru křivek je možno detekovat **vliv vlhnutí a vysoušení** na zkoumaný materiál, **změnu jeho struktury**, **změnu pórovitosti**, **ztrátu životnosti**,

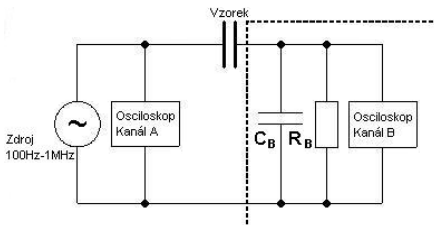
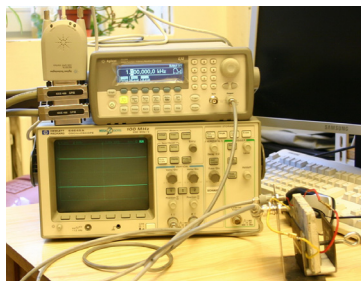
chyby v technologii výroby zkoumaného materiálu aj. Srovnáním výsledku s impedančním spektrem definovaného vzorku můžeme přesně poukázat na odchylky ve sledovaných vlastnostech. Vyčíslit stavební parametry materiálu však touto metodou nelze. Velmi dobře je však možné tuto metodu použít jako srovnávací, a po dalším rozpracování a analyzování myšlenky předpokládáme, že bude možné metodu použít i absolutně.



Obr. 1 Schéma zapojení měřené impedance Z_1 a impedance známé hodnotě Z_2 . U_1 , U_2 – elektrické napětí vstup, výstup
 Fig. 1 Circuit diagram for the unknown impedance Z_1 to be measured and the known value impedance Z_2 .
 Here, U_2 , U_1 = input, output electric voltages, respectively



Obr. 2 Systém kov-stavební látka-kov (mosazné elektrody jsou přitlačovány k povrchu měřených vzorků)
 Fig. 2 Metal – building material – metal system (Brass electrodes are pressed against the measured specimen surface)



Obr. 3 Využití přístroje firmy Agilent a HP včetně schématu jejich zapojení
 Fig. 3 Illustration and block diagram of the apparatus employing Agilent and HP measuring instruments

Frekvenční závislost veličin vyhodnocovaných při impedanční spektroskopii je zjišťována z poměru napětí (U_B/U_A) a fázového posuvu ($\Delta\varphi$) mezi vstupy A, B dvoukanálového osciloskopu.

Přesné hodnoty paralelní kombinace C_B a R_B jsou určeny vstupní kapacitou a vstupním odporem kanálu B (včetně přívodních vodičů s BNC konektory). Není tedy nutné předřazovat jinou přesnou paralelní kombinaci C a R před vstup B. Celkovou impedanci paralelní kombinace C_B a R_B označme Z_B a jí odpovídající fázi φ_B (ω -úhlová frekvence).

Fáze měřené impedance Z bude

$$\varphi_1 = \varphi_B + \arctan \frac{\sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \cos \Delta\varphi}. \quad (1)$$

Měřená impedance Z bude mít velikost

$$Z = \frac{Z_B \cdot \sin \Delta\varphi}{\frac{U_B}{U_A} - \sin(\varphi_B - \varphi_1)}. \quad (2)$$

Ztrátový činitel testované soustavy

$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi_1}. \quad (3)$$

Odpor paralelního RC obvodu tvořeného měřenou soustavou (vzorkem)

$$R = \operatorname{Re}(Z) \cdot (1 + \tan^2 \varphi_1) \quad (4)$$

a jeho kapacita

$$C = -\frac{\tan \varphi_1}{\omega R}. \quad (5)$$

2. Popis betonových plátů a jejich receptura

Pro výrobu zkušebních těles byly použity ocelové formy. Směsi byly plněny do forem vždy ve dvou vrstvách, doby hutnění jsou uvedeny u jednotlivých receptur. Naplněné formy byly uloženy v laboratoři s teplotou $20 \pm 1^\circ \text{C}$ a RV $45 \pm 5\%$. Po zavaznutí povrchu vyrobených těles byly formy překryty PE fólií. Tělesa byly doformována po 24 hodinách a následně byla uložena ve vodní lázni po dobu 28-mi dnů.

Rozměry těles byly 100x100x400 mm. Betonové pláty byly nařezány diamantovou pilou z výše uvedené normové kostky na tloušťku 10 mm. Rozměry těchto plátů tedy byly 100x100x10 mm. Podstatným parametrem je tloušťka z důvodu tlumení signálu. Referenční receptura byla navržena jako beton B20/25 s maximálním zrnem kameniva 4 mm.

R3E	množství	jednotka	R4B	množství	jednotka
	1 m ³			1 m ³	
cement CEM II 32,5 R	325	kg	cement CEM II 32,5 R	325	kg
písek 0-4 mm Bratčice	1885	kg	písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg
-	-	-	drť 4-8 Tovačov	760	kg
skutečná voda	283,7	l	skutečná voda	223,8	l
vodní součinitel v/c	0,87	-	vodní součinitel v/c	0,69	-

- mícháno strojně, ručním míchadlem
 - písek vysušený
 - po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 113,7 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
 - provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
 - hutnění 13 + 20 s na vibračním stole

- mícháno strojně, ručním míchadlem
 - písek vysušený, šterk 4-8 mm „mírně“ vlhký
 - po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 53,8 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
 - provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
 - hutnění 2 x 15 s na vibračním stole

R5E	množství	jednotka	R6B	množství	jednotka
	1 m ³			1 m ³	
cement CEM II 32,5 R	325	kg	cement CEM II 32,5 R	325	kg
písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg	písek 0-4 mm Bratčice	1125	kg
drť 4-8 Tovačov	380	kg	drť 4-8 Tovačov	253	kg
drť 8-16 Olbramovice	380	kg	drť 8-16 Olbramovice	253	kg
-	-	-	drť 16-22 Želešice	253	kg
skutečná voda	207,9	l	skutečná voda	219,2	l
vodní součinitel v/c	0,64	-	vodní součinitel v/c	0,68	-

- mícháno strojně, ručním míchadlem
 - písek vysušený, šterk 4-8 mm „mírně“ vlhký, šterk 8-16 vysušený
 - po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 37,9 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
 - provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
 - hutnění 15 + 20 s na vibračním stole

- mícháno strojně, ručním míchadlem
 - písek vysušený, šterk 4-8 mm „mírně“ vlhký, šterk 8-16 a 16-22 mm vysušený
 - po smíchání složek dle zadané receptury se směs jevila jako suchá (syká), celkem bylo přidáno 49,2 l vody na 1 m³ čerstvého betonu
 - provedena konzistence sednutí kužele – 0 cm
 - hutnění 2 x 15 s na vibračním stole

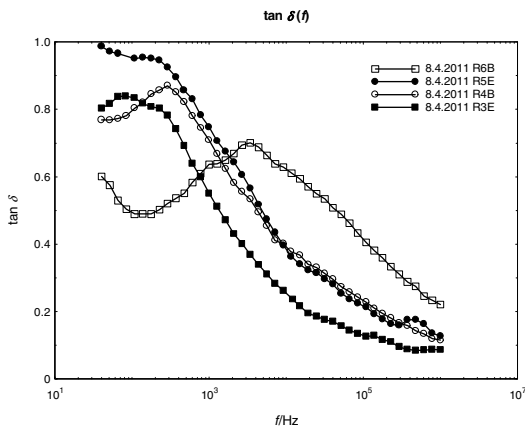
Tab. 1 Receptury jednotlivých směsí betonu
 Tab. 1 Formulas for the different concrete mixes

3. Experiment

Vzorky betonových plátů byly postupně vkládány do přípravku (viz. Obr. 2) mezi 2 mosazné elektrody o rozměrech 40x25 mm (přitlačeny pomocí šroubového mechanismu) a podrobeny impedanční analýze. Vzhledem k tomu, že se jedná o srovnávací metodu, tak je třeba, aby povrchy měřených vzorků měli stejnou drsnost a pokud možno celoplošnou přilnavost k elektrodám. Vstupní napětí bylo 5 V a měřený frekvenční rozsah 40 Hz – 1 MHz.

4. Výsledky měření

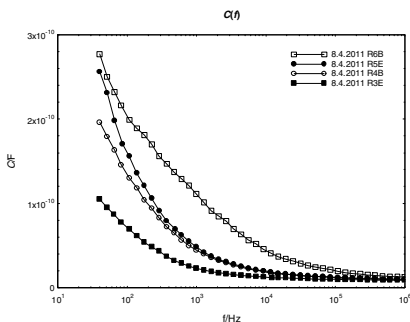
V grafech se od sebe liší křivky čtyř směsí. Nejvyšší hodnoty ztrátového činitele (Obr. 4) se vyskytují při nižších frekvencích budícího signálu, pro vyšší hodnoty použitých frekvencí pozorujeme klesající hodnoty ztrátového činitele. První detekované lokální maximum identifikujeme pro směs R3 nejbliže k levému konci frekvenční škály, druhé lokální maximum se nachází vpravo od prvního a odpovídá směsi R4. Křivka ztrátového činitele pro směs R5 je v oblasti frekvencí do 10 kHz položena nepatrně výše, než křivka pro směsi R4, křivky se téměř prolínají, mimo oblast nejnižších frekvencí. Lokální maximum ztrátového činitele pro směs R6 se nachází vpravo od uvedených maxim ostatních směsí, pozorujeme jej kolem frekvence 4 kHz. Měřené směsi se liší frakcí použitého kameniva, podle spekter ztrátového činitele usuzujeme na souvislost mezi frakcí kameniva ve směsi betonu a polohou lokálního maxima ztrátového činitele dále k vyšším frekvencím. Hodnota ztrátového činitele v takovém maximu je pro použité směsi poměrně blízká, na vzájemnou závislost mezi hodnotou $\tan \delta$ a frakcí zatím neusuzujeme.



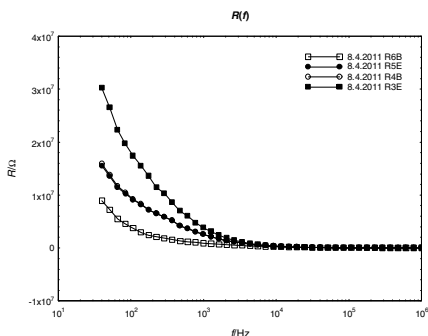
Obr. 4 Graf závislosti ztrátového činitele na frekvenci
Fig. 4 Loss factor versus frequency diagram

Přítomnost maxim ve spektrech indikuje dominanci polarizačních ztrát, jejich klesající výběžky napovídají o vodivostních ztrátách.

Graf (Obr. 5), závislost elektrické kapacity vzorků na frekvenci obsahuje plynulé křivky, výrazně se odlišující v oblasti frekvencí 40 Hz až 10 kHz, ve zbylé části spektra jsou rozdíly minimální.



Obr. 5 Graf závislosti kapacity na frekvenci
Fig. 5 Capacitance vs. frequency plot



Obr. 6 Graf závislosti odporu na frekvenci
Fig. 6 Resistance vs. frequency plot

Nejvyšší hodnoty byly naměřeny pro směs s největší frakcí kameniva, s klesající frakcí byla zaznamenána nižší hodnota elektrické kapacity vzorků. Statická permitivita ϵ_0 je vyšší u směsí s vyšší frakcí, usuzováno z hodnot elektrické kapacity.

Elektrický odpor vzorků pro různé hodnoty frekvence budícího signálu elektrického napětí má opačný trend než v předchozím případě. Hodnoty odporu jsou pro vyšší frakci nižší, pro vzorky 4 a 5 téměř splývají. Odlišnosti křivek lze pozorovat pouze v rozsahu frekvencí 40 Hz až 1 kHz. Ve zbylé části spektra jsou hodnoty na hranici měřitelnosti.

	Kapacita vzorku při frekvenci 1000 Hz C/pF	Odpor vzorku při frekvenci 1000 Hz $R/M\Omega$	Absolutní hodnota impedance při frekvenci 1000 Hz $ Z /M\Omega$	Ztrátový činitel při frekvenci 1000 Hz $\tan \delta'$	Fázorový úhel při frekvenci 1000 Hz $-\varphi^\circ$
R3E	22,90	3,80	3,81	0,55	2,28
R4B	44,20	2,56	2,57	0,71	1,56
R5E	48,30	2,44	2,45	0,74	1,45
R6B	111,0	0,90	0,91	0,63	1,46

Tab. 2 Elektrické parametry pro zvolenou (referenční) frekvenci 1000 Hz

Tab. 2 Electric parameters for selected (reference) frequency of 1000 HZ

Tabulka 2 vyjadřuje souhrnně jednotlivé hodnoty elektrických veličin vzorků pro zvolenou frekvenci 1 kHz. Hodnoty elektrické kapacity odpovídají trendu pozorovanému ve spektrech, stejně tak hodnoty elektrického odporu. Hodnoty velikosti impedance s rostoucí frakcí klesají, stejně jako u elektrického odporu, což odpovídá převaze reálné složky a je to v souladu se zjištěným fázovým úhlem vzorků při zvolené frekvenci.

Měření vystihují elektrické vlastnosti materiálu uvnitř betonových plátů a je tedy splněn předpoklad, že zvyšující se kapacita vzorku a současně snižující se odpor vzorku má za následek snižování absolutní hodnoty impedance.

Z hodnot fázového úhlu a ztrátového činitele pro frekvenci 1 kHz však nelze usuzovat na souvislost s frakcí kameniva ve vzorcích. Frekvence 1 kHz se ukazuje jako

nehodná pro rychlé vyhodnocování elektrických parametrů materiálů na cementové bázi s podobným složením.

Měření vzorky byly v suchém stavu také podrobeny kontrole reprodukovatelnosti v různých časových obdobích. Křivky se s minimální odchylkou opakovaly, což svědčí o reprodukovatelnosti této metody.

5. Závěr

Metodou impedanční spektroskopie provedena charakterizace vzorků betonu na cementové bázi, odlišujícími se přísádky kameniva s rozdílnou frakcí. Pozorovanými vzorky byly tenké pláty, elektrody byly přitlačeny na stěny. Byla nalezena spojitost mezi frakcí kameniva a elektrickou kapacitou vzorků, mezi polohou lokálního maxima ztrátového činitele a zastoupenou frakcí. Souvislost vodního součinitele s elektrickými parametry zde nebyla pozorována.

Poděkování

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

Literatura

- [1] Schauer, P.: *Impedanční spektroskopie keramiky a žuly*, sborník XI. Mezinárodní vědecké konference (str. 77-82), 18.-20. října 1999-VUT Brno, FAST
- [2] Kusák, I., Luňák, M., Impedance Spectroscopy of Ceramic (Plain) Roofing Tiles, příspěvek na konferenci I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist Intertech 2009, ISBN 978-83-926896-0-7, Politechnika Poznan, Poznan, Polsko, 2009
- [3] Kusák, I., Luňák, M., Pazdera, L., *Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu při tuhnutí*, in: NDT Welding Bulletin 2/2008, ročník 18, 22-25, vydáno 10.2008, ISSN 1213-3825
- [4] Luňák, M., Kusák, I., Pazdera, L., Non Destructive Testing of Cetris-Basic Wood-Cement Chipboards by Using Impedance Spectroscopy, příspěvek na konferenci The 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering", ISBN 978-961-90610-7-7, Slovensko drustvo, Slovinsko Ljubljana, 2009
- [5] Kusák, I., Luňák, M., Matysík, M.; Topolář, L., *Stanovení topného faktoru tepelného čerpadla*, článek v Media4u Magazine, ISSN 1214-9187, <http://www.media4u.cz/>, 2010
- [6] Luňák, M., Kusák, I.: *Impedance Spectroscopy Measurement Of Concrete Hydration By Miscellaneous Medium*, in: InterTech 2008 - I International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientist, 122-124, Politechnika Poznan, Polsko, 2008, ISBN 978-83-926896-0-7
- [7] Luňák, M., Kusák, I., Debye's model of impedance spectroscopy, příspěvek na konferenci II International Interdisciplinary Technical Conference of young scientist Proceedings, ISBN 978-83-926896-1-4, Uczelniany Samorzad Doktorantow Politechniki Poznanskiej, Poznan, 2009
- [8] Kusák, I., Luňák, M., Schauer P.: *Aparatura pro testování metodou impedanční spektroskopie*, in: Workshop NDT 2004, Non-Destructive Testing, 1.12.2004, ed. by Brno University of Technology, 2004, 99-101, ISBN 80-7204-371-4



Ultrasonic Birefringence Measurements of Elastic Anisotropy in Fatigue Damaged Brass, Copper and Aluminum Alloys

Lindsey R. Lindamood and James B. Spicer
Department of Materials Science and Engineering
Johns Hopkins University
channels@jhu.edu

Abstract

Texture produced by sheet rolling operations results in elastic anisotropy that can be measured using ultrasonic, shear wave birefringence measurements. Preferred grain orientation produces elastic modulus variations that affect ultrasonic modes propagating in various directions relative to the rolling direction. Variations in ultrasonic wave polarization relative to the rolling direction can also affect wavespeed. By fixing the propagation direction and altering wave polarization, birefringence measurements can be made. Aligned microcracking is also known to produce elastic anisotropy in materials. If these types of fields are produced during controlled fatigue loading, then shear wave birefringence techniques might be used to assess fatigue damage. Texture models indicate that shear modulus will change as a function of angle relative to the rolling direction and can be directly converted to wavespeed, such that in brass we expect a greater than 4% change in shear wavespeed as a function of polarization angle. In this work, we present shear wave birefringence measurement results on unfatigued and fatigue damaged materials assessing modulus and anisotropy variations. For these measurements, a laser line source has been used to generate longitudinal and shear waves that are detected in the through-thickness direction of rolled plate material using a Michelson-type path-stabilized interferometer allowing for high-fidelity recording of ultrasonic arrivals. The line source controls generation of particular shear polarization states in the ultrasonic pulse. We will present results for as-received and fatigued rolled sheets of brass, copper, and an aluminum alloy (2024-T351).

Key words: fatigue, ultrasound, birefringence

Introduction

Structural health monitoring and prognosis rely on diagnostic systems assessing damage accumulation in a material. Permanent ultrasonic contacting sensors are often used as one of these diagnostic systems and can provide limited information about the state of the material for an estimation of the structure's remaining lifetime. This type of system cannot isolate local damage, but it can alert the user to significant damage accumulation somewhere in the material. Early detection of material damage is critical when monitoring aircraft, bridges, and other infrastructure, and it is often very desirable that the detection be nondestructive, such that the incipient damage can be detected while keeping these structures intact and protected from further damage. The United States' Federal Aviation Administration¹ has reported on the inability to

detect widespread fatigue damage (WFD) as well as the fortuitous discoveries of WFD in numerous in-commission aircraft often during routine cosmetic maintenance or by mechanics. Some cracks discovered prior to flight have been on the order of two feet long, and if these aircraft were to take flight the result could have been severe. Ultrasonic techniques can be used to measure properties such as attenuation, wavespeed, and changes in the transmitted frequencies affected by microstructural changes that initiate material failure. The subject of our research is motivated by the need to identify damage in aircraft materials before catastrophic failure. Specifically, we aim to detect fatigue damage prior to crack formation by monitoring changes in material elasticity, thus providing a way to localize material damage for structural health monitoring applications.

Background

Ultrasound interactions with the microstructure of a material provide the basis for powerful yet nondestructive methods to monitor changes in material mechanical properties. Ultrasonic waves can be transmitted using a variety of techniques including contacting transducers, electromagnetic acoustic transducers and lasers. We will combine the theory of texture measurements developed from other ultrasonic work with a modified laser ultrasonic technique to measure shear wave birefringence. Various techniques can be used to measure the texture of a material, ultrasound being one alternative that has been implemented by many authors.^{2,4-6,10} Shear waves, propagating at various angles relative to the rolling direction, have been measured in metal alloy strips to extract texture information using the maxima and minima velocities at 0, 45, and 90 degrees between the propagation and rolling directions (rolled plates have orthorhombic symmetry while extruded bars and wires are transversely isotropic).^{2,3} Texture has also been measured using the Young's modulus of various materials as a function of angle relative to the rolling direction. Even in highly isotropic materials like aluminum and tungsten this method could still be applicable since Young's modulus can be accurately measured to 1 part in 10^4 which is beyond the ability to produce elastically isotropic, polycrystalline materials.³ Extruded aluminum was found to have a maximum velocity when the wave propagated 45 degrees from the extrusion direction and a minimum when the wave propagated parallel to this direction.⁴ Textures in copper and in copper alloys containing zinc were measured with ultrasound and compared to neutron diffraction measurements of the orientation distribution coefficients.⁵ Results did not reveal significant anisotropic behavior in pure copper, but the addition of zinc produces significant texture that can be easily characterized using ultrasound. By generating Rayleigh and bulk waves in various aluminum alloys, small changes in velocity have been observed and the stress required to cause the initial anisotropy has been calculated.⁶ Ignoring this anisotropy significantly affects the accuracy of the stress calculation.

Point source laser ultrasonic interactions with fatigue damaged materials

Previously, results on fatigue tests of the aluminum alloy 2024-T351 indicated that changes in a material's elastic properties can be measured using ultrasonics.⁷ The data shown in Fig. 1 were generated using a focused laser source to transmit ultrasound and a conical contacting transducer for detection (0.5 – 1.5 MHz). The source and receiver were located on epicenter to measure the shortest longitudinal wave arrival time. Before the test coupons fail or surface cracking becomes visible, a decrease in shear wave time-of-flight is observed (Fig.1a). Indications of a possible

birefringence effect seem to be revealed in the shear arrival of some fatigue damaged materials. Figure 1b shows ultrasonic data from the same fatigued aluminum specimen at the end of its lifetime with collection occurring in the most fatigued region. The distortion in the waveform at the minima arrival could be an indication of ultrasonic interaction with fatigue damage and the birefringence effect. There are experimental techniques that can be considered for proof of the birefringence observations. These results gathered with a point laser source have guided experimental investigations focused on measuring material anisotropy and how changes in the microstructure due to fatigue damage affect material isotropy.

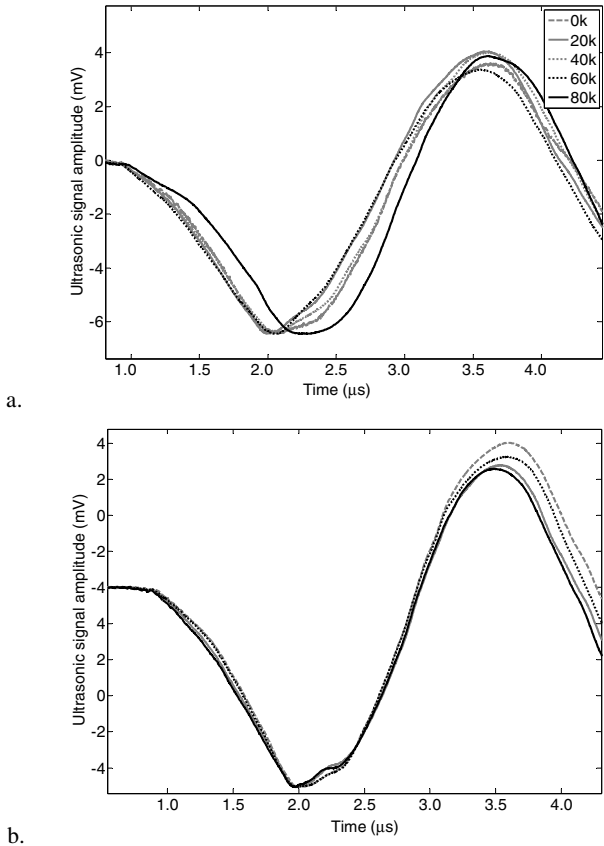


Figure 1: a. Ultrasonic waveforms for aluminum at different stages in fatigue lifetime, 0 to 80 kilocycles. A shift in the first minimum (corresponding to the shear wave arrival) is noted towards the end of life at 80 kilocycles. b. Four waveforms from the damaged region at 80 kilocycles in one of the fatigued samples shown in 1a. A distortion in the shear wave arrival (at 2.0 μ s) occurs indicating shear-specific interactions with microstructure.⁷

Toward this end, in this work, a laser line source has been used to generate longitudinal and shear waves simultaneously in the through-thickness direction of rolled plate materials. The line source enables us to isolate shear wave polarization that can be varied by rotating the line. Microscopic changes to materials that occur during fatigue processes should result in texture variations that might influence the ultrasonic properties. This paper will show experimental results of changes in wavespeed relative to the rolling direction in as-received materials using the laser-line ultrasonic technique to establish pre-fatigue baseline characteristics. These results will be used to explain how grain orientation affects ultrasonic wave propagation. Changing the propagation direction of the ultrasound to measure elastic properties of materials is a more commonly used technique.^{8,9} The work described here will focus on changing the polarization direction and maintaining the propagation direction. This method does not affect longitudinal wave propagation since neither the propagation direction nor the polarization of that wave are changed in our experiments.

This type of polarization control is analogous to earlier studies that used polarized electromagnetic acoustic transducers (EMATS) to assess shear birefringence using through-thickness resonance measurements.⁹ We have performed data analysis in the time-domain since the laser ultrasonic system bandwidth allows for the measurement of very small changes in shear wave times-of-flight that result when the line is rotated relative to rolling direction in plate samples. In general, materials can sustain one longitudinal wave polarized in the propagation direction and two orthogonally polarized shear waves. In a rolled material these shear waves each have a favored velocity when polarized either in the rolling direction or in the transverse direction. By polarizing the ultrasonic source we can isolate each shear wave, and measure the change in velocity as a function of ultrasonic polarization. Normally when the ultrasound propagates through a highly isotropic medium, such as an aluminum alloy, only one shear wave arrives. However, for a rolled plate of material, including aluminum, either both shear waves are detected, or changes in wavespeed are observed as source polarization changes, without changing propagation direction. At various orientations (usually around 45 degrees from the rolling direction) both shear wave arrivals can be isolated. These results were also seen when using a point source ultrasonic generator and receiver in a unidirectional, fiber-reinforced composite material.¹⁰ The source and receiver were aligned on epicenter but because of the dispersion effects of the material (such as occurs for fiber direction perpendicular to wave propagation) the fast and slow shear waves were detected.

Laser line sources for ultrasonic generation have been used by other authors to study wave propagation in the principal directions of a fiber reinforced composite plate while assuming transverse isotropy.¹¹ When the laser line is perpendicular to the fiber direction (anisotropic plane), stress fields are symmetric about the isotropic plane and ultrasound propagates parallel to the anisotropic plane. When the laser is parallel to the fiber direction (isotropic plane), waves propagate parallel to the isotropic plane. In general, there are three possible modes generated by ultrasound: pure shear, quasi-shear, and quasi-longitudinal. However, with a laser line source no pure shear mode is generated when polarization is perpendicular to the fiber direction.¹¹ A line source has also been used to predict the acoustic field generated in a transversely isotropic cylinder.¹²

Line source experiment and results

Materials used in these experiments include as-received rolled square plates measuring 5cm x 5cm x 0.476cm in alpha brass Cu64Zn36, and copper, as well as 5cm x 5cm x 0.635cm aluminum 2024-T351. Specimens were also cut from extruded round bars of brass, Al6061 and Al2024. The addition of copper and brass to the sample set is useful in establishing a range of detectable anisotropy based on material composition, and increasing the amount of zinc in brass is known to yield a higher anisotropic material. Each material used in this experiment has individual crystallites with cubic symmetry, but rolling gives the sample orthorhombic symmetry.

For ultrasonic wave generation, a pulsed Nd:YAG laser beam was routed through a double concave lens and a double convex lens for expansion and collimation, and then finally focused into a line with a cylindrical lens as shown in Fig. 2. The resulting line measured approximately 20mm x 0.35mm and pulse energies were adjusted to provide a low fluence for thermoelastic wave generation. Both the ultrasonic generation beam and the receiving beam were arranged to make contact with the exact center of rotation of the sample such that measurement occurred in the epicentral geometry. Data is collected at 15 degree intervals with 500 waveforms being averaged at each angle.

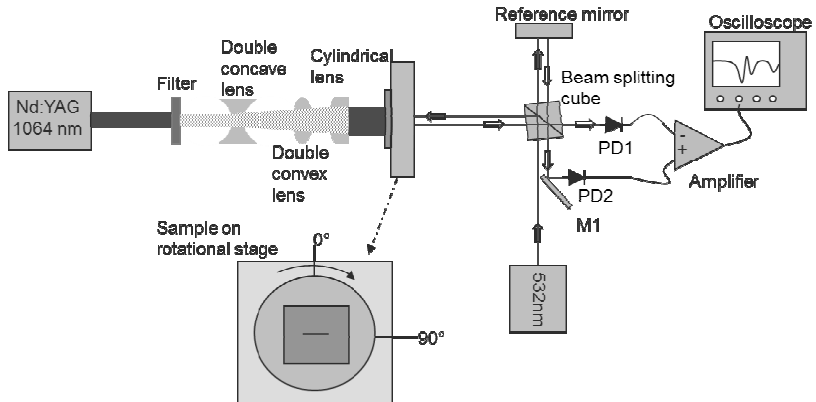
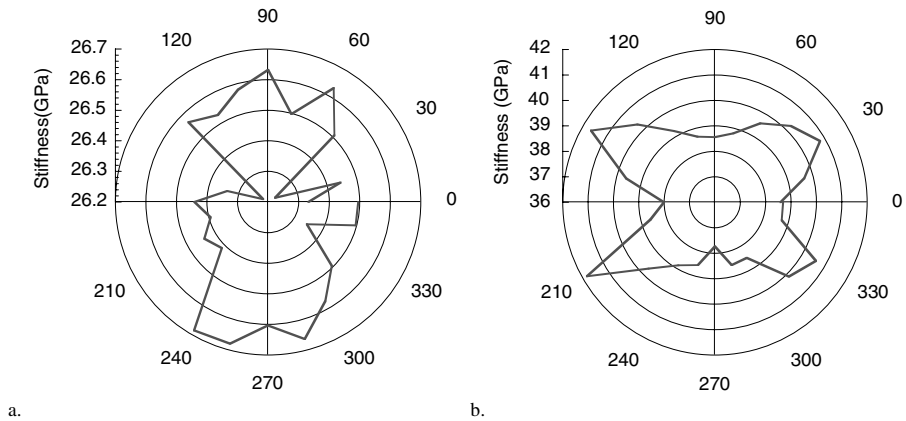


Figure 2: Laser ultrasonic system with laser line generation and optical detection using a path-stabilized, Michelson-type interferometer.

To specify the orientation of the laser line source, angles were measured between the rolling and shear wave polarization directions. A line oriented perpendicular to the rolling direction is at zero degrees since the polarization is along the rolling direction. When the line is parallel to the rolling direction, the angle is 90 degrees. The shear wave time-of-flight was determined using the minimum amplitude in the recorded ultrasonic waveform. In some cases both shear waves appear, but one dictated the waveform minimum and this arrival was used to record an effective time-of-flight. Times-of-flight were recorded and converted to velocity and stiffness using measurements of the sample thickness and values for material density.

Figures 3 and 4 show the measured results as polar plots using the angle of rotation and the velocity or stiffness calculation. Data taken in rolled aluminum plates or in samples cut parallel to the extrusion direction in bars yield two-fold symmetric plots of wavespeed versus line orientation as seen in Fig. 3a. Since polycrystalline aluminum is generally considered to be relatively isotropic compared to other cubic metals/metal alloys, these experimental results show that the small anisotropy present, approximately 1.5 percent (uncertainty $\pm 0.3\%$), can be measured using shear wave birefringence. Stiffness results of brass are shown alongside aluminum in Fig. 3b demonstrating a more defined symmetry and smaller uncertainty in all line orientations with stiffness variations up to nine percent. Velocity data on a heat treated rolled aluminum plate specimen, shown in Fig. 4a, exhibits isotropic behavior potentially due to the successful removal of rolling-induced plastic deformation. Compare this result to that of an extruded bar of aluminum with ultrasound generated transverse to the extruded direction, shown in Fig. 4b with a 1.5 percent change in velocity (shown with an elliptical fit to exaggerate symmetrical points of interest). A decrease in velocity can be observed when the shear wave is polarized in the rolling direction (line oriented perpendicular to the rolling direction).



**Figure 3: a. Aluminum 6061 extruded bar with propagation transverse to the isotropic plane
 b. Stiffness measurement using interferometric detection on 64/36**

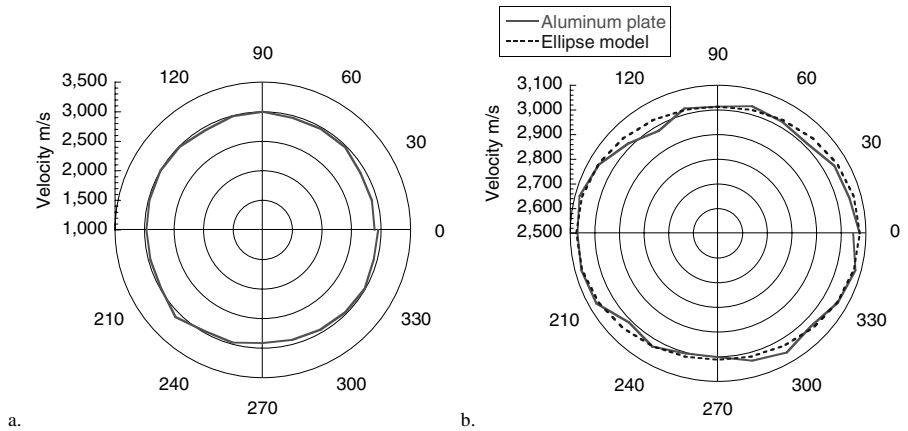


Figure 4: a. Heat treated aluminum 2024 plate b. Extruded aluminum 2024, data taken transverse to the rolling direction, displayed with ellipse

Conclusions

Successful application of laser line source for ultrasonic generation in various metal alloys has been employed as a method for detecting material anisotropy. This technique arose out of need to quantify fatigue damage prior to crack formation, and isolate initial material characteristics prior to fatigue such that small changes in elastic stiffness could be measured. Although aluminum is known to be a highly isotropic material, when it is in a cold rolled state preferred orientation of the microstructure induces enough directional anisotropy to influence variations in ultrasonic propagation.

References

1. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, "Ageing airplane program: widespread fatigue damage", *Federal Register*, Vol. 75, No. 219 (2010).
2. Papadakis, E.P., "Elastic wave velocities in various alloy strips", *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, pp. 575 (1971).
3. Alers, G.A., Liu, Y.C., "Calculation of elastic anisotropy in rolled sheet", *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 236, pp.482 (1966).
4. Tam, A.C., Leung, W.P., "Measurement of small elastic anisotropy in solids using laser-induced ultrasonic pulses", *Applied Physics Letters*, Vol. 45, Issue 10, pp.1040 (1984).
5. Foster, K., Fairburn, S.L., Leisure, R.G., Kim, S., Balzar, D., Alers, G., Ledbetter, H., "Acoustic study of texture in polycrystalline brass", *JASA*, Vol. 105, Issue 5, pp. 2663 (1999).
6. Wormley, S., Thompson, R.B., Alers, G.A., Alers, R., Warchol, M., "The influence of microstructure on the acoustoelastic measurement of stress in aluminum alloys", *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 21, pp. 1688 (2002).

7. Channels, L., Chakraborty, D., Butrym, B., Kovvali, N., Spicer, J., Papandreou-Suppappola, A., Afshari, M., Inman, D., Chattopadhyay, A. "A comparative study of fatigue damage sensing in aluminum alloys using electrical impedance and laser ultrasonic methods." SPIE Smart Structures & NDE. San Diego, California, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering volume 7295, (2009).
8. Aussel, J.D., Le Brun, A., Baboux, J.C., "Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source", *Ultrasonics*, Vol. 26, pp. 245-255(1988).
9. Dixon, S., Fletcher, M.P., Rowlands, G., "The accuracy of acoustic birefringence shear wave measurements in sheet metal", *Journal of Applied Physics*, **104**, 114901(2008).
10. Hurley, D.H., Spicer, J.B., "An Investigation of the effects of material anisotropy and heterogeneity on pulsed, laser-generated acoustic signals", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 46, No. 6, pp.1387 (1999).
11. Wang, J.J., Xu, B.Q., Shen, Z.H., Ni, X.W., Lu, J. "Numerical simulation of thermoelastic stress field and laser ultrasound in transversely isotropic plate", *The Japan Society of Applied Physics*, Vol. 47, No. 2, pp. 956-963(2008).
12. Pan, Y., Rossignol, C., Audoin, B., "Acoustic waves generated by a laser line pulse in a transversely isotropic cylinder", *Applied Physics Letters*, Vol. 82, No. 24, pp.4379-4381(2003).



EVALUATION OF THE CONCRETE STRUCTURE INTEGRITY BY FREQUENCY INSPECTION

Monika MANYCHOVA

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Structures

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

Abstract

The present paper deals with an experimental study of the frequency inspection method applicability to internal structure integrity of the concrete specimens. Our research work is focused on influence of the concrete ageing conditions on its internal structure integrity. After the concrete hardening had been completed the specimens were divided into three groups. The first specimen group was kept, in accordance with standard conditions, in water for the entire ripening period. The second specimen group was kept in air in laboratory environment conditions and the third specimen group was placed for twelve days of the ripening process into a dryer in which the air temperature was 60°C in order to increase the specimen load and get heavier structure deterioration. Non-standard concrete ageing conditions resulted in the development of micro-cracks in the specimen structure. The experiment aimed at identifying the effect of non-standard conditions of the concrete mix ripening on the structure integrity. Our measurements show that the frequency inspection method is a sensitive structure indicator, which can also be used to assessing the concrete structure integrity.

Key words: concrete ageing conditions, structure integrity, micro-cracks, frequency inspection

1. Introduction

The condition of concrete and reinforced concrete constructions, which had been put into service in the past century, became quite a serious problem. For the assessment of the actual condition of the construction, non-destructive methods are being looked for which would be able to identify the building structure defects in their early stage of development, clear them away in time and minimize their consequences [1, 2]. The absence of applicable diagnostic methods appears to be ponderous in the cases of building structure breakdowns.

Acoustic methods appear to be very promising in the field building element and structures [3 - 7]. The frequency inspection method belongs to the acoustic method family. This method is one of relatively new product structure testing methods. Any implementation of such tests requires a reference standard and its frequency spectrum to be set down. If the test specimen material properties differ from those of the reference standard (i.e., different rigidity, impurity content, structure defects, etc.), the resonance frequency will be shifted against that of the reference standard [8]. Based on the measured resonance frequency analyses, the structure changes having taken place in the products under test are assessed. The experiment aimed at identifying the effect of non-standard conditions of the concrete mix ripening on the

structure integrity. Based on the measured resonance frequency analyses, the structure changes having taken place in the products under test are assessed. In order to verify the frequency inspection results and examine their application to the concrete structure integrity, we have also determined the propagation velocity of ultrasonic waves in the specimens. The propagation velocity of ultrasonic waves in the specimen in question was determined by means of the ultrasonic impulse method. This method is based on ultrasonic pulses being periodically sent into the material under investigation. The quantity to be measured is the impulse propagation velocity. This velocity is different for various materials and varies with their properties. For example, a good-quality concrete features a higher ultrasound impulse propagation velocity than an inferior-quality one. The frequency of longitudinal oscillations in the specimens was calculated using the well-known formula:

$$f_l = \lambda / c_l \tag{1}$$

where: λ - ultrasonic wave wavelength [m]
 c_l - mean velocity of ultrasonic waves [m.s⁻¹].

2. Experiment set-up

As many as 21 specimens of dimensions 4cmx4cmx16cm were prepared from a fine concrete mix. After the concrete hardening had been completed the specimens were divided into three groups. The first specimen group (denoted V) was kept, in accordance with standard conditions, in water for the entire ripening period (28 days). In this case no water content reduction took place. The second specimen group was kept in air in laboratory environment conditions (denotation L). In consequence of water content reduction after hardening, the specimens shrank and microcracks arose in the specimen structure. The third specimen group (denoted S) was placed for twelve days of the ripening process into a dryer in which the air temperature was 60°C in order to increase the specimen load and get heavier structure deterioration. A special hammer provided longitudinal excitation. The mechanical impulse was applied at the exciter point I (see Fig. 1), a piezo-electric sensor S was used to pick up the response.

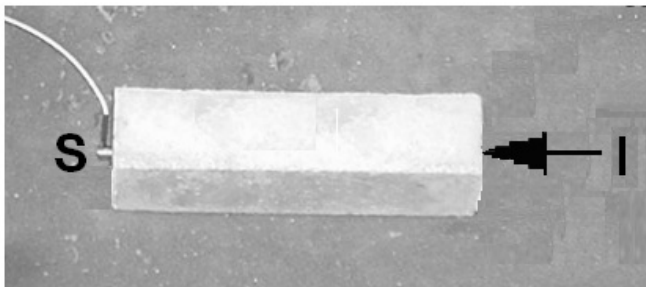


Fig. 1 Experiment set - up

3. Experimental results

The measurements results are represented in the form of the specimen response frequency spectra as shown in Figs 2 through 4.

The diagram shown in Fig. 2 pertains to V11 specimen. This specimen ripened under standard conditions in water. The longitudinal direction predominant frequency equals 10 300 Hz, whereas the calculation according Eq. (1) provides 10 270 Hz.

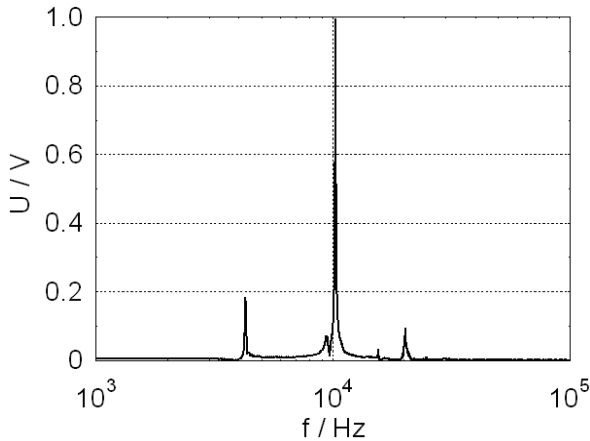


Fig. 2 Response frequency spectrum of intact specimen V11

Next Fig. 3 shows the response frequency spectrum for L3 specimen. This specimen underwent shrinking due to insufficient water content. It is seen that the predominant frequency shifted to 8 900 Hz, which corresponds to a shift of 1 300 Hz with comparison with V11 specimen. According to Eq. (1), the longitudinal oscillation frequency was calculated to equal 9 820 Hz to this L3 specimen.

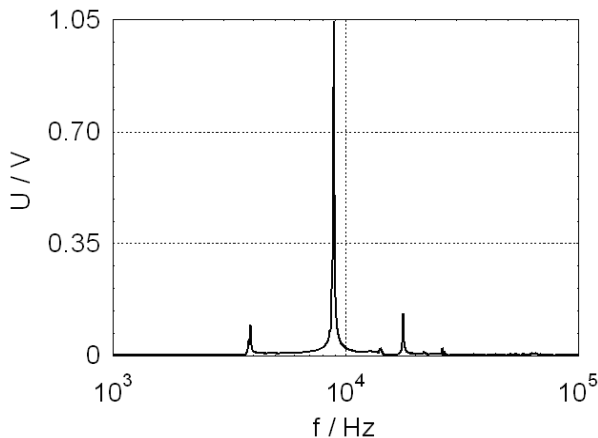


Fig. 3 Response frequency spectrum of L3 specimen, which was stressed by shrinking

The last Fig. 4 shows the behaviour of S2 specimen, which was subjected to stronger shrinking-induced stressing, being placed in a dryer. In this case the predominant frequency shifted to 8 200 Hz, which makes, in comparison with V11 specimen, a shift of 2 100 Hz. The According to Eq. (1), the longitudinal oscillation frequency was calculated to equal 8 990 Hz to S2 specimen.

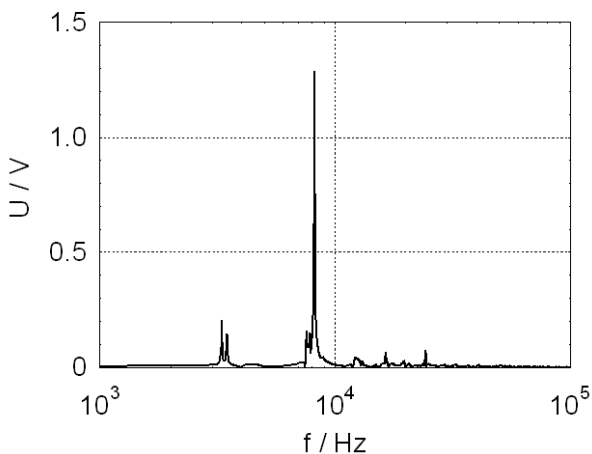


Fig. 4 Response frequency spectrum of S2 specimen which was subjected to stronger stressing

5. CONCLUSION

Our experiments aimed at verifying the frequency inspection method potential to evaluate the concrete specimen structure integrity. Three groups of specimens, made of a fine concrete mix and differing in the structure integrity degree, were tested. The first specimen group, denoted V, was – after the specimen hardening had been completed – kept in water for 28 days, in order to eliminate the shrinking induced stressing which would otherwise result from water content reduction. The second specimen group, denoted L, was kept in air at laboratory temperature. Water content reduction resulted in shrinking and micro-cracks generation in these specimens. In the third specimen group, the shrinking process was increased by drying the specimens at a temperature of 60°C for 12 days during the ripening process.

The results of our measurement proved a shift of predominant frequency components lower values in the case of the specimen shrinking-induced stressing. In order to verify the correlation frequency shift with structure damage we have also determined the propagation velocity of ultrasonic waves in the specimens. The magnitude of the velocity decreased when the shrinking-induced specimen damage degree grew up.

Acknowledgement

The research described in this paper was supported by the research project MSM 0021630511.

References

- [1] P. H. Emmons, R. Drochytka, Z. Jeřábek: *Sanace a údržba betonu v ilustracích*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 1999.
- [2] Pytlík P.: *Technologie betonu*, Nakladatelství VUTIUM, Brno, 2000.
- [3] M. Korenska, L. Pazdera, K. Pospíšil, J. Stryk, P. Vyroubal: *Detection of the Reinforcement Corrosion in Prestressed Concrete Girders*, The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 1 – 3 September 2005, Portorož, Slovenia, pp. 317 – 322.
- [4] Kořenská M., Weber Z., Smutný J., Pazdera L.: *Aplikace moderních metod frekvenční analýzy na signál akustické emise {Application of Modern Time-Frequency Analysis on Acoustic Emission Signal}*, Mezinárodní vědecká konference, 60. výročí Stavební fakulty STU v Bratislavě, Sekcia: Matematika a fyzika, Bratislava, Slovakia, November 18-20, 1998, pp. 33-36..
- [5] M. Korenska, L. Pazdera, L. Ritickova: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184.
- [6] Korenska, M., Manychova, M., *New possibilities of non-destructive testing of ceramic specimen integrity*, 2010, Ceramics-Silikaty, 54[1], pp. 72-77.
- [7] Colombo S., Forde M.C., Main I.G., Shigeishi M. 2005. *Predicting the Ultimate Bending Capacity of Concrete Beams from the "Relaxation Ratio" Analysis of AE Signals*. Construction and Building Materials. 19, 2005, pp. 746 - 754.
- [8] Korenska M., Chobota Z., Sokolar R., Mikulkova P., Martinek J.: *Frequency Inspection as an Assessment Tool for the Frost Resistance of Fired Roofing Tiles*, 2006, Ceramics-Silikáty 50 [3], pp. 185-192.



DETEKCE TRHLIN V BETONU METODAMI NELINEÁRNÍ AKUSTICKÉ SPEKTROSKOPIE DETECTION OF CRACKS IN CONCRETE USING NONLINEAR ACOUSTIC SPECTROSCOPY METHODS

Michal MATYSÍK*, Iveta PLŠKOVÁ*, Marta KOŘENSKÁ*

* Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: matysik.m@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Na základě studia nelineárních akustických efektů byly navrženy nové defektoskopické a diagnostické metody. Tyto metody využívají faktu, že trhlinou vyvolaná nelinearita je citlivý indikátor poškození materiálu. Analýza nelineárních efektů byla provedena pro nepoškozené betonové vzorky i vzorky vystavené zmrazovacím cyklům. Výsledky naznačují, že metody nelineární akustické spektroskopie jsou velmi citlivé techniky pro detekci trhlin vyvolaných zmrazovacími cykly.

Klíčová slova: *nelineární akustická spektroskopie, zmrazovací cykly, beton*

Abstract

On the basis of nonlinear acoustic effect research, new diagnostic and defectoscopic methods have been designed. These methods are using the fact that a crack-induced nonlinearity makes a sensitive material impairment indicator. The nonlinear effect analysis was carried out for both intact concrete specimens and specimens, which had been exposed to freeze-thaw cycles. Results suggest that the nonlinear acoustic methods are very sensitive techniques for crack detection caused by freeze-thaw cycles.

Key words: *nonlinear acoustic spectroscopy, freeze-thaw cycles, concrete*

1. Introduction

On the basis of non-linear effect studies, new NDT methods have been designed [1, 2, 3]. These methods are based on the elastic wave non-linear spectroscopy. Existing linear acoustic methods focus on the energy of waves reflected at structural defects, analyzing the reflected wave energy, wave velocity or amplitude variations. However, none of these "linear" wave characteristics is as sensitive to the small cracks as the specimen non-linear response [4, 5, 8]. In this way, non-linear methods thus open new horizons in non-destructive acoustic testing, providing undreamed-of sensitivities, application speeds and easy interpretation. One of the fields in which a wide application range of non-linear acoustic spectroscopy methods can be expected is civil engineering, for example for fatigue damage assessment [4, 21], micro-damage diagnostics [5,6], or monitoring of the early hydration process in concrete [7, 22]. It is predicted that these advanced techniques can contribute a great

deal to the improvement and refinement of the NDT methods in the building industry practice. [16, 17, 18]

2. Non-Linear Spectroscopic Methods

We classify non-linear acoustic spectroscopy methods to resonant and non-resonant [9, 11]. Non-resonance methods are used to study suppressed resonance specimens. These methods analyze the effect of nonlinearities on acoustic signals propagating through them. These methods can again be split into two groups [9]: measurements using a single harmonic ultrasonic signal (single exciting frequency f_1) and measurements using multiple harmonic ultrasonic signals - mostly two exciting frequencies f_1, f_2 . There is also possibility to combine one ultrasonic and one electrical signal with different frequencies [10, 19, 20].

We pay attention to single harmonic ultrasonic signal measurement method which was used in experimental part. In this case, where a single exciting frequency f_1 is used, the non-linearity gives rise to other harmonic signals, whose frequencies f_v obey the Fourier series formulas:

$$f_v = n \cdot f_1 \quad \text{where } n = 0, 1, 2, \dots, \infty \tag{1}$$

Amplitudes of f_v are falling when the n is increasing. If the nonlinearity effect is not entirely symmetrical, amplitudes of even-numbered harmonic components may be much lower than those of the odd-numbered ones. Among these emerging components, the third harmonic is the most distinctive one and its amplitude is being analyzed most often.

3. Measuring Apparatus

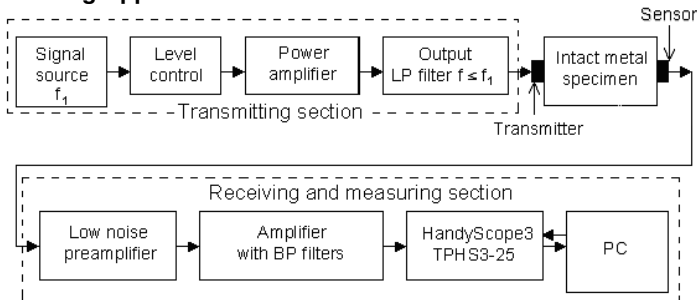


Fig. 1: Block diagram of the measuring apparatus

The transmitting section consists of four functional blocks: a controlled-output-level harmonic signal generator, a low-distortion 100 W power amplifier, an output low-pass filter to suppress higher harmonic components and ensure high purity of the exciting harmonic signal and a piezoceramic transmitter (actuator) to ensure the ultrasonic excitation.

Receiving section consists of piezoceramics sensor, low noise preamplifier with classical or differential input connector, amplifier with band - pass filters and spectral

analyzer. In our case spectral analyzer was oscilloscope HandyScope3 TPHS3-25 controlled by computer.

4. Experiment

Firstly, we studied the concrete specimen structure having been stressed by thermal shocks. Testing specimens were concrete cubes, proportions $150 \times 150 \times 150$ mm. The concrete specimens were stressed by recurrent freeze-thaw cycles. Measurements were realized before and after 30 and 60 freeze-thaw cycles.

The curve shown in figure 2 shows the BV001 specimen's pre-degradation frequency spectrum. Its shape features a gradual amplitude drop, without any non-linear effects. The transfer characteristic, figure 3, which corresponds to the same specimen having been subjected to 60 freeze-thaw cycles, does show a non-linearity. They consist in a drop of the second harmonic's amplitude and an increase of the third harmonic (3H). Figure 4 shows the high harmonics' amplitudes relative to the first harmonic's amplitude for all nine specimens together (specimens BV001 – BV009). We can see relative increasing of third and decreasing of second harmonic amplitude depending on number of freeze-thaw cycles. It is evident mainly after 60 cycles.

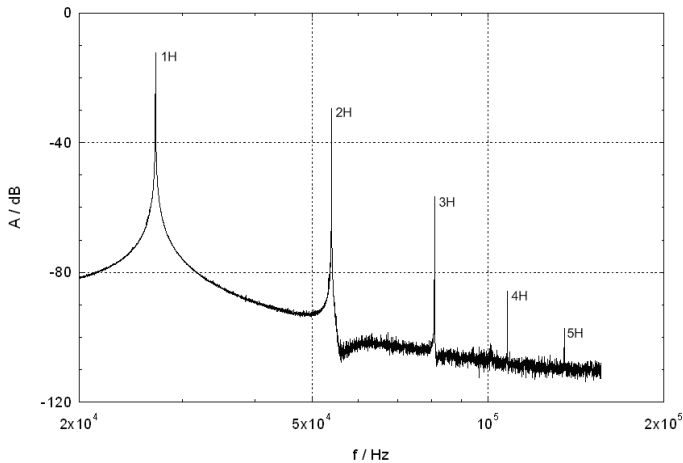


Fig. 2: Specimen BV001 before degradation – 0 freeze-thaw cycles

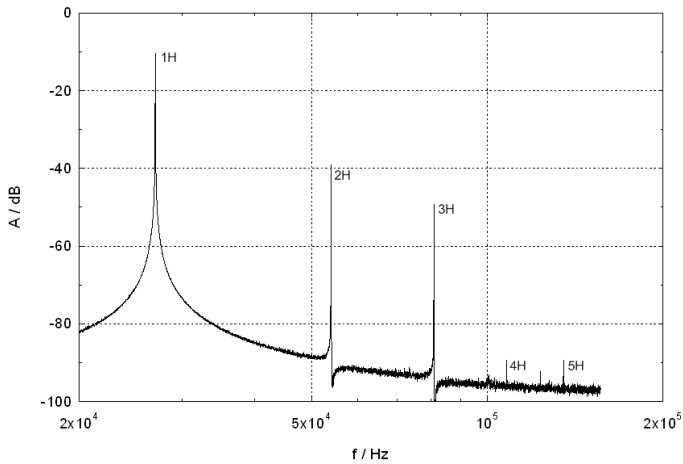


Fig. 3: Specimen BV001 after 60 freeze-thaw cycles

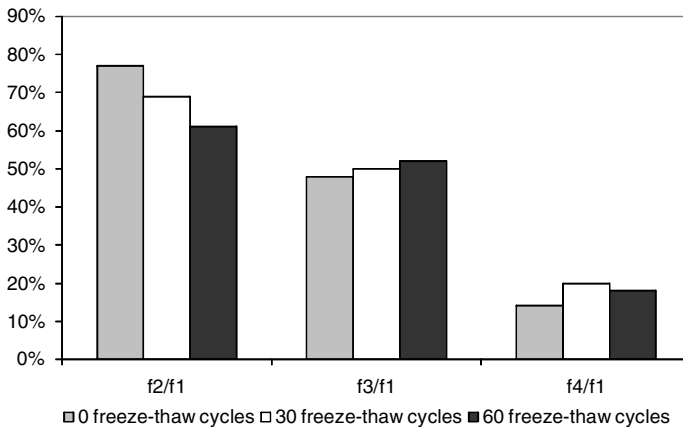


Fig. 4: High harmonics' amplitudes relative to the first harmonic's amplitude for all nine specimens

Secondly, we studied the impact of air-entrainment of concrete on results obtained by non-linear acoustic spectroscopy method with one exciting signal. Freeze-thaw durability of concrete has close relationship with its pore structure. The volume, radius, and size distribution of pores decide the freezing point of pore solution and the amount of ice formed in pores [15].

Testing specimens were concrete cubes too, same proportions as before. First group of specimens was made from the air-entrainment concrete. Second group was made from the same concrete but without air-entraining admixture. On figure 5 is a frequency spectrum obtained by single harmonic ultrasonic signal method. The specimen was made from the air-entrainment concrete.

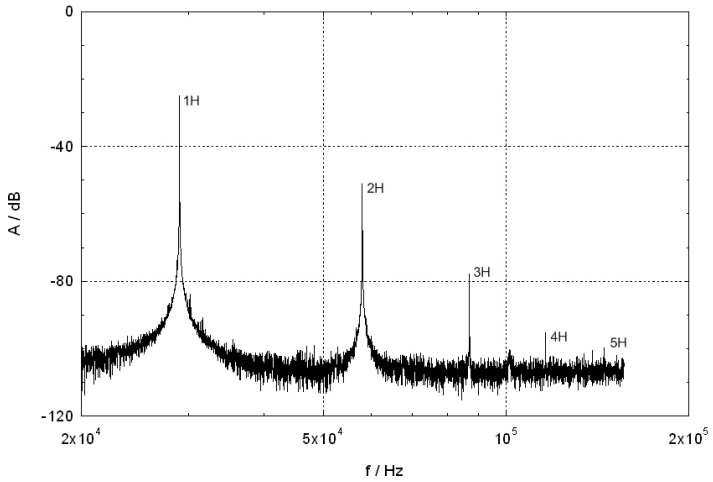


Fig. 5: Frequency spectrum – concrete specimen with air-entraining admixture

On figure 6 is frequency spectrum for the specimen which was made from the concrete without air-entraining admixture. There is no distinct non-linearity on both frequency spectrums. We can see only higher attenuation of the air-entrainment specimen.

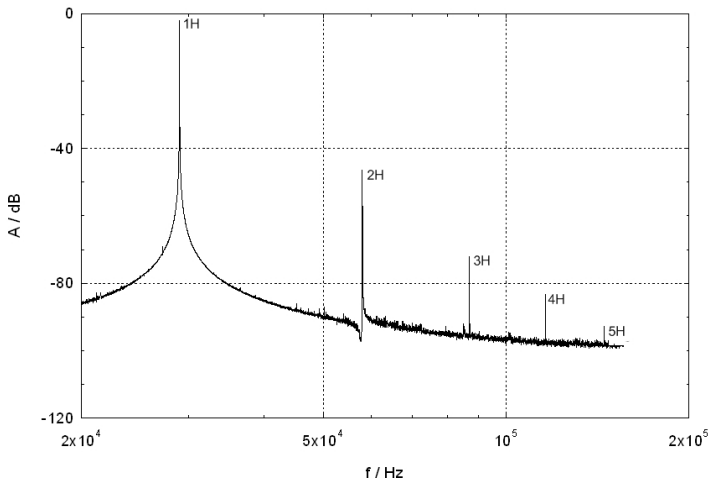


Fig. 6: Frequency spectrum – concrete specimen without air-entraining admixture

Figure 7 shows the high harmonics' amplitudes relative to the first harmonic's amplitude for all twelve specimens together. Again, there is no distinct non-linearity and we can see only higher attenuation of the air-entrainment specimens.

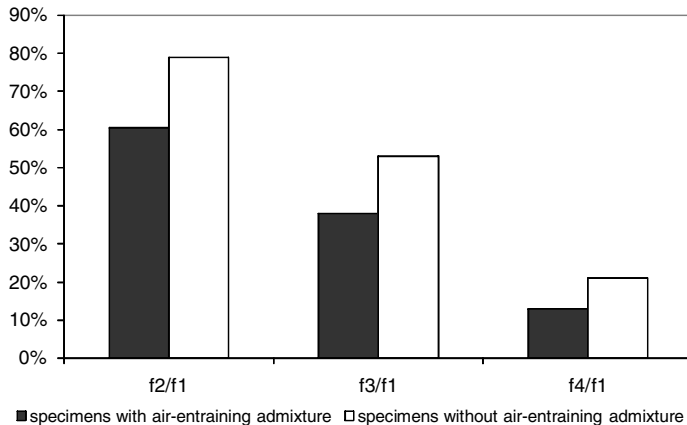


Fig. 7: High harmonics' amplitudes relative to the first harmonic's amplitude – all specimens – concrete with and without air-entraining admixture

5. Conclusion

This paper presents our results of concrete specimen structure testing by means of non-linear acoustic spectroscopy using a single exciting harmonic frequency method. Frequency spectra of freeze-thaw cycles loaded specimens showed non-linear effects to be present. Especially amplitude of third harmonic component looks like very sensitive indicator of damage caused by freeze-thaw cycles. Air-entrainment of a concrete caused only a higher attenuation of the exciting signal.

Acknowledgement

This research is supported by Czech Science Foundation - project GP103/09/P252.

References

- [1] VAN DEN ABEELE, K.E.-, JOHNSON, P.A. and SUTIN, A., 2000. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS). *Research in Nondestructive Evaluation*, **12**(1), pp. 17-30. ISSN: 09349847
- [2] VAN DEN ABEELE, K.E.-, CARMELIET, J., TEN CATE, J.A. and JOHNSON, P.A., 2000. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*, **12**(1), pp. 31-42. ISSN: 09349847
- [3] ZAITSEV, V., NAZAROV, V., GUSEV, V. and CASTAGNEDE, B., 2006. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection. *NDT and E International*, **39**(3), pp. 184-194. ISSN: 09638695

- [4] NAGY, P.B., 1998. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics*, **36**(1-5), pp. 375-381. ISSN: 0041624X
- [5] VAN DEN ABEELE, K.E.-., SUTIN, A., CARMELIET, J. and JOHNSON, P.A., 2001. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *NDT and E International*, **34**(4), pp. 239-248. ISSN: 09638695
- [6] CHEN, X.J., KIM, J.-., KURTIS, K.E., QU, J., SHEN, C.W. and JACOBS, L.J., 2008. Characterization of progressive microcracking in Portland cement mortar using nonlinear ultrasonics. *NDT and E International*, **41**(2), pp. 112-118. ISSN: 09638695
- [7] VAN DEN ABEELE, K., DESADELEER, W., DE SCHUTTER, G. and WEVERS, M., Active and passive monitoring of the early hydration process in concrete using linear and nonlinear acoustics. *Cement and Concrete Research*, . in print ISSN: 00088846
- [8] STAUFFER, J.D., WOODWARD, C.B. and WHITE, K.R., 2005. Nonlinear ultrasonic testing with resonant and pulse velocity parameters for early damage in concrete. *ACI Materials Journal*, **102**(2), pp. 118-121. ISSN: 0889325X
- [9] KORENSKA, M. and MANYCHOVA, M., 2008. Nonlinear ultrasonic spectroscopy used to detection of ceramic structure damage. *NONLINEAR ACOUSTICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, SWEDEN, 2008, pp. 541-544. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448
- [10] SIKULA, J., SEDLAKOVA, V., NAVAROVA, H., TOFEL, P., MAJZNER, J. and HAJEK, K., 2008. NDT of conducting solids by electro-ultrasonic spectroscopy, 2008, *NONLINEAR ACOUSTICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, SWEDEN, 2008, pp. 319-322. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448
- [11] HAJEK, K. and SIKULA, J., 2008. A resonance frequency shift in spectral analysis of the impact echo. *NONLINEAR ACOUSTICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, SWEDEN, 2008, pp. 525-528. ISSN: 0094243X, ISBN: 9780735405448
- [12] KORENSKA, M., PAZDERA, L., POSPISIL, K., STRYK, J. and VYROUBAL, P., 2005. Detection of the reinforcement corrosion in prestressed concrete girders. *APPLICATION OF CONTEMPORARY NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING*. 8th International Conference of the Slovenian-Society-for-Non-Destructive-Testing on the Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. Portoroz, SLOVENIA, 2005. pp. 317-322. ISBN: 9619061055
- [13] KORENSKA, M., CHOBOLA, Z., SOKOLÁŘ, R., MIKULKOVÁ, P. and MARTINEK, J., 2006. Frequency inspection as an assessment tool for the frost resistance of fired roof tiles. *Ceramics - Silikaty*, **50**(3), pp. 185-192. ISSN: 08625468
- [14] BLAHACEK, M. and PREVOROVSKY, Z., 2001. Fuzzy-probabilistic method of AE events location in dispersive media. *PREVIOUS EXPERIENCE AND CURRENT INNOVATIONS IN NON-DESTRUCTIVE TESTING*. 6th International Conference of the Slovenian-Society-for-Non-Destructive-Testing, Portoroz, SLOVENIA, 2001. pp. 191-195. ISBN 9619061012

- [15] CAI, H. and LIU, X., 1998. Freeze-thaw durability of concrete: Ice formation process in pores. *Cement and Concrete Research*, **28**(9), pp. 1281-1287. ISSN: 0008-8846
- [16] FICKER, T.; MARTIŠEK, D.; JENNINGS, H. Roughness of fracture surfaces and compressive strength of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2010. 40(6). p. 947 - 955. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [17] FICKER, T. Quasi-static compressive strength of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2011. 2011(41). p. 129 - 132. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [18] MAZAL, P.; PAZDERA, L.; DVOŘÁČEK, J. Application of acoustic emission method in contact damage identification. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS & PRODUCT TECHNOLOGY*. 2011. 41(1). p. 140 - 152. ISSN 0268-1900.
- [19] PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L.; BÍLEK, V.; SMUTNÝ, J.; KUSÁK, I.; LUŇÁK, M. Measuring of Concrete Properties during Hardening. In *ESA 2010*. 1. CZ, Palacky University. 2010. p. 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7.
- [20] PLŠKOVÁ I., CHOBOLA Z., MATYSÍK M.: Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method. *Ceramics-Silikáty* 55 [2] 2011, 176-182, ISSN 0862-5468
- [21] PLŠKOVÁ I., CHOBOLA Z., MATYSÍK M.: Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors. *Transactions on transport sciences* 3 [1] 2010, 23-28, ISSN 1802-971X
- [22] LUNAK M; KUSAK I; PAZDERA L; TOPOLAR L., BILEK V., Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties, 48th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON EXPERIMENTALNI ANALYZA NAPETI 2010, EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2010, ISBN: 978-80-244-2533-7, Pages: 233-240 Published: 2010



CO MŮŽEME ZJIŠŤOVAT PŘI NDT ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ Z POHLEDU EVROPSKÝCH NOREM. WHAT CAN WE DETECT IN NDT MATERIALS TESTING FROM THE PERSPECTIVE OF EUROPEAN STANDARDS.

Josef NEUGEBAUER

PTS Josef Solnař s.r.o

Contact e-mail: neugebauer@ptsndt.com

Abstrakt

Tento příspěvek navazuje na přednášku z minulého roku Ing. Bernarda Kopec: „Co skutečně zjišťuje nedestruktivní zkouška materiálů“.

V příspěvku se věnuji analýze platných evropských norem. Na základě této analýzy se pokouším odpovědět na otázku, kterou si klade Ing. Bernard Kopec.

Základní premisou mé úvahy je, že i když pro různé metody NDT zkoušení používáme různé fyzikální jevy, většinou obdržíme pouze příznaky (indikace). Tyto příznaky potom kvantifikujeme, klasifikujeme a hodnotíme na základě platných norem.

Tento příspěvek si klade za cíl nahlédnout na problematiku terminologie z pohledu platných norem. Není však jeho ambicí rozhodnout, zda je vhodné použít pojem vada nebo diskontinuita nebo něco jiného.

Klíčová slova: *nedestruktivní zkoušení, terminologie, evropské normy, hodnocení indikací*

Abstract

This contribution follows the lecture from last year, Ing. Bernard Kopec: "What really determines a non-destructive testing of materials".

The paper is devoted to analysis of current European standards. Based on this analysis, I try to answer the question that was asked by Ing. Bernard Kopec.

The basic premise of my reasoning is that although the various methods of NDT testing using a variety of physical phenomena, usually receive only symptoms (indication). These symptoms then quantify, classify and evaluate based on current standards.

This paper aims to look at the problem from the perspective of current terminology standards. However his ambition to decide, whether it is appropriate to use the concept of defect or discontinuity, or something else.

Key words: *nondestructive testing, terminology, European standards, evaluation of indications*

Jak je uvedeno v abstraktu tohoto příspěvku navazuji na přednášku z minulého roku p. Ing. Bernarda Kopce. Tento ve svém příspěvku s názvem: „Co skutečně zjišťuje nedestruktivní zkouška materiálů?“ předložil k diskuzi názor, že terminologie musí vycházet z fyzikálních principů NDT. Dále pak uvádí, že metody NDT jsou metody nepřímého zjišťování diagnostického znaku.

S posledním tvrzením se dá naprosto ztotožnit. Ovšem předpoklad, že terminologie musí vycházet z fyzikálních principů NDT, je nevhodný pro popis znaků parametrů, kterými popisujeme to, co skutečně zjišťuje NDT zkoušení. Shodneme se na předpokladu, že trhlina v materiálu bude trhlinou nezávisle na tom, zda ji hledáme metodou RT, UT, PT nebo ET. Z použité fyzikální metody vyplývá název parametru (měřitelné proměnné), kterou hledáme a hodnotíme. Např. změna akustického tlaku u metody UT či změna magnetického toku u metody MT,...

Podle mého názoru hodnotíme pouze parametry znaků, které obdržíme od změn ve zkoušeném materiálu. Stručně řečeno: Vyhledáváme indikace od znaků, které potom hodnotíme.

Vraťme se však k termínu „vada.“ Tento termín je již delší dobu diskutován a je s ním nakládáno značně benevolentně.

Nejlepší definice pojmu vada je podle mého názoru uvedena v normě ČSN 420015:1968:

„Vada výrobku – každá úchylna (rozměru, tvaru, polohy, hmotnosti, vzhledu, makrostruktury, mikrostruktury a jiných veličin zjistitelných laboratorními zkouškami) od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorkem. K vadám patří též úchylny v údajích na výrobcích.“

Pod tuto definici se s přehledem schovávají všechny pojmy typu diskontinuita, inperfekce,...

Vada versus indikace

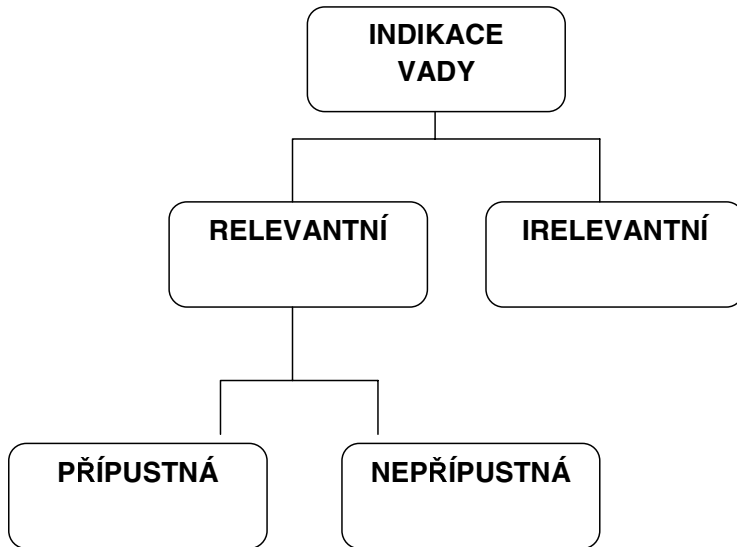
Při NDT zkoušení materiálů hledám a pak hodnotím indikace. Indikace se mohou objevit obecně ve třech variantách.

Jako první je indikace technologická. Sem patří indikace od hranice zkoušeného materiálu (protilehlý povrch), výkresem předepsané drážky nebo dutiny. Indikace takto vzniklé využívá značná část NDT metod k ověření nastavení přístrojů, či k ověření citlivosti zkoušení.

Dalším typem indikací jsou indikace od vad (ve smyslu ČSN 420015:1968). U tohoto typu je žádoucí hodnotit parametry indikace a porovnávat je s referenční hodnotou. Rozhodují o přípustnosti nebo nepřípustnosti nalezené indikace. Tento typ indikací jsme si zvykli nazývat pojmem indikace relevantní.

Posledním typem jsou indikace vznikající např. omezeními, jež jsou vlastní použité fyzikální metodě. Do této kategorie spadají např. různé transformace signálu či šumy. Nesmíme ovšem zapomenout na indikace vznikající nedodržením technologické kázně zkoušení. Tedy indikace, za které si můžeme sami. Sem patří např. nedostatečná příprava zkoušeného povrchu nebo nedodržení technologie skladování zkušebních prostředků či záznamových zařízení.

Vše výše uvedené můžeme elegantně znázornit pomocí jednoduchého diagramu.



Pro toto, ostatně všem známé rozdělení, se pokusím najít oporu v normách. Seznam norem použitých při analýze problému je uveden v Příloze č. 1.

Při analýze výrobních i všeobecných norem vyplývají stále se opakující tytéž pojmy: necelistvost, povrchová necelistvost, nespojitost, trhlina, povrchová vada, plošná vada, odkaz na ČSN EN 420015:1968,....

Navíc se zde objevují pojmy slovně popisující geometrický tvar hledaných indikací a jejich umístění ve zkoušeném (na zkoušeném) materiálu (výrobku). Jsou to například:

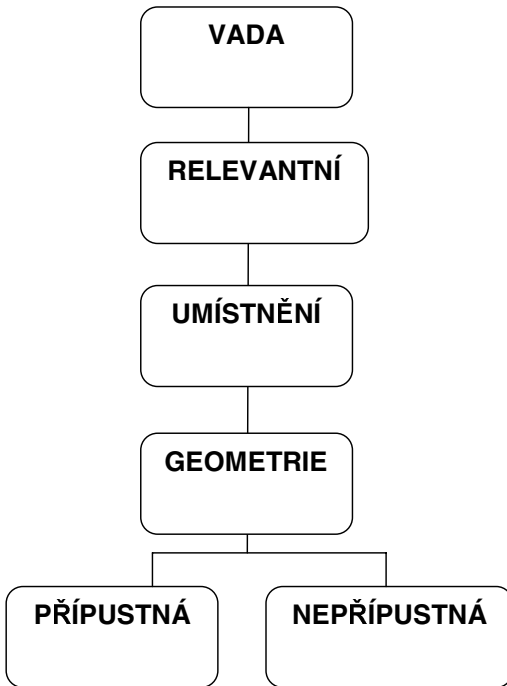
Indikace dle ČSN EN 10228-3: 2001 Nedestruktivní zkoušení ocelových výkovků - Část 3: Zkoušení výkovků z feritických nebo martenzitických ocelí ultrazvukem:

- Bodová
- Protáhlá
- Ojedinelá
- Shluk

Nebo indikace dle ČSN EN 10228-2: 2001 Nedestruktivní zkoušení ocelových výrobků - Část 2: Kapilární zkouška:

- Lineární
- Souvislá
- Okrouhlá

Následující rozdělení se tedy samo nabízí:

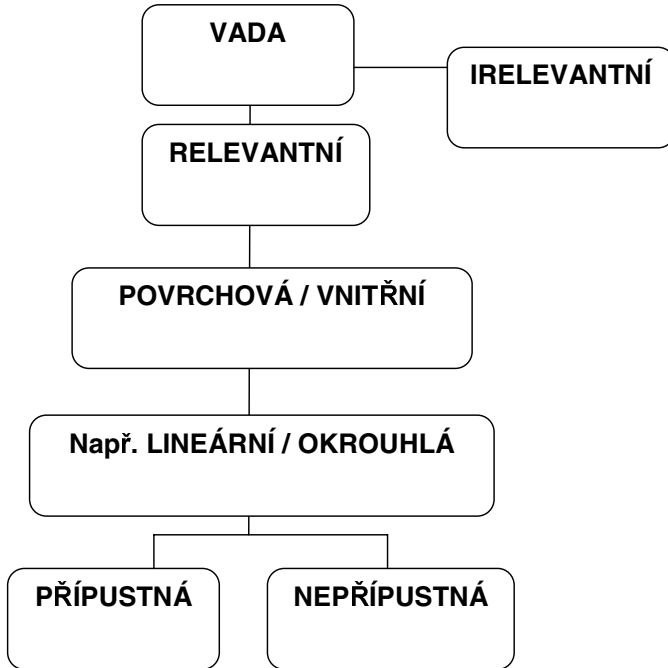


Jako příklad si uvedeme rozdělení indikací nalezených na odlitku, který je kontrolován podle ČSN EN 12680-1 Slévárství - Zkoušení ultrazvukem - Část 1: Ocelové odlitky pro všeobecné použití:

Indikace – relevantní – vnitřní – lineární – nepřijatelná (stupeň jakosti 2)

Závěr

Na závěr můžu konstatovat, že dle mého názoru (jenž se opírá o normy) při NDT zkoušení zjišťujeme (hledáme) indikace od vad různých typů. Tyto hledané indikace mohou kategorizovat podle jednoduchých kritérií uvedených na následujícím diagramu:



Rozhodování o tom, zdali se jedná o bubliny, bodliny, studený spoj, trhlina či přeložka nebo dvojitost, bych přenechal technologům.

Taktéž bych se nebál používat termín vada ve smyslu ČSN 420015:1968. Definice v ní uvedená je natolik obecná, že pojmem vada můžeme nahradit všechny ty diskontuity, inperfekce a ostatní ošklivá slova.

Tedy, co můžeme zjišťovat při NDT zkoušení materiálů z pohledu evropských norem? Indikace vad, které následně hodnotíme.

Příloha č. 1

Seznam analyzovaných norem:

ČSN EN ISO 9934-1; ČSN EN ISO 15549; ČSN EN 13554; ČSN EN 14784-2; ČSN EN ISO 12718; ČSN EN ISO 12706; ČSN EN 1330-2; ČSN EN 1330-1; ČSN EN 1330-3; ČSN EN 1330-4; ČSN EN 1330-9; ČSN EN 571-1; ČSN EN 13018; ČSN EN 10228-1; ČSN EN 10228-2; ČSN EN 10228-2; ČSN EN 10228-3; ČSN EN 12681; ČSN EN 12680-1; ČSN EN 1369; ČSN EN 1370; ČSN EN 12454; ČSN EN 1435; ČSN EN ISO 17635; ČSN EN ISO 17640; ČSN EN ISO 23279; ČSN EN ISO 23277; ČSN EN 1711; ČSN EN ISO 17637; ČSN EN 583-4; ČSN EN 583-5; ČSN 01 5028-1; ČSN 01 5028-2; ČSN 01 5028-3; ČSN 01 5028-4; ČSN EN 10246-3; ČSN EN 10246-10; ČSN EN 10246-11; ČSN EN 10246-12; ČSN EN 10246-17; ČSN EN 10246-18
Všechny uvedené normy v platném znění k 09. 2011.



IDENTIFIKACE POŠKOZENÍ SOUČÁSTÍ AUTOMOBILOVÉ PŘEVODOVKY METODOU AKUSTICKÉ EMISE AN IDENTIFICATION OF AUTOMOTIVE GEARBOX COMPONENTS DAMAGE USING ACOUSTIC EMISSION

Libor NOHÁL, Pavel MAZAL

Vysoké učení technické v Brně, FSI, Ústav konstruování

Contact e-mail: ynohal00@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt

V tomto článku jsou prezentovány výsledky z druhé série experimentů provedených na automobilové převodovce MQ 200, jejichž účelem byla detekce poškození součástí převodovky pomocí akustické emise. V experimentech, které probíhaly v laboratořích Ústavu konstruování VUT v Brně, byly vytvořeny umělé defekty ozubeného kola 5.převodového stupně. Záměrem experimentů bylo vyhodnotit možnosti identifikace poškození v produkční převodovce a ověřit metodiku měření z předchozích zkoušek pro tento typ poškození. Jako komparační parametr byla užitá metoda měření teploty na skříní převodovky. Výsledky experimentu naznačují použitelnost metodiky zkoušení i pro nově zvolený typ poškození.

Klíčová slova: akustická emise, detekce poškození, převodovka, uměle vytvořený defekt

Abstract

In this article there are presented the results of the second series of experiments with the gearbox MQ 200, whose purpose was the damage detection of gearbox components using acoustic emission method. In experiments, which took place in the laboratories of the Institute of Machine and Industrial Design of the Brno University of Technology, were created artificial defects in a cogwheel of fifth speed gear. The aim of the experiments was to evaluate the possibility of damage identification in production gearbox and verify the measurement methodology of previous tests for this type of damage. As a comparative parameter was used the temperature measured on the gearbox surface. The results from experiments suggest the suitability of the testing methodology for the newly chosen type of damage.

Key words: acoustic emission, damage detection, gearbox, artificial defect

1. Úvod

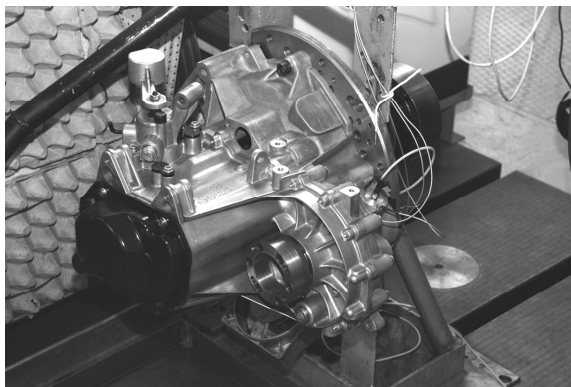
Metoda akustické emise zaznamenává velmi progresivní rozvoj nejen v již standardní oblasti lokalizace defektů tlakových nádob a zásobníků, ale je využívána v rozmanitých aplikacích ve výzkumné sféře či průmyslové praxi. Vysoká citlivost této metody umožňuje studium počáteční fáze únnavových procesů a možnost sledování počátku šíření mikrotrhlin či změn ve struktuře materiálu - mimo jiné také průběhu rozvoje pittingu, spallingu atd. [1, 2 a 3].

Problematikou identifikace poškození převodových ústrojí pomocí metody akustické emise se zabývalo několik autorů. Jde o velmi komplikovanou problematiku, jejíž obtížnost se zvyšuje se složitostí převodu. Většina autorů experimentuje na jednoduchých převodech, obsahujících pouze jeden převodový stupeň. Např. autoři v [4, 5] experimentovali na jednostupňové čelní převodovce s využitím více metod: vibrační analýza, záznam teploty, parametry signálu AE – RMS, průběhy událostí v časové a frekvenční oblasti. Snímače byly v těchto případech umístěny v blízkosti ozubeného kola, což produkční převodovka neumožňuje. Tento příspěvek navazuje na práci [6], ve které jsme prezentovali úvodní experimenty z produkční převodovkou MQ 200 a přináší výsledky ze zkoušek provedených s dalším typem poškození.

2. Experimentální zařízení a metodika zkoušek

Zkušební zařízení

Pro experimenty byla využita testovací stanice skládající se s pohonu, příruby pro upevnění převodovky, vířivého dynamometru s maximálním momentem 500 Nm simulujícího zatížení a řídicího panelu pro ovládání parametrů zkoušky. Stanice je blíže popsána v [6]. Předmětem zkoušky byla produkční převodovka (obr. 1) s označením MQ 200 užívaná ve vozidlech s krouticím momentem motoru do 200 Nm (Škoda Fabia), ve které bylo uměle vytvořeno poškození hnaného kola (evolventní kolo se šikmými zuby) pátého převodového stupně. Během všech tří zkoušek byl použit jako náplň převodovky olej s označením Gyrol 75W.



Obr. 1 Převodovka MQ 200 (VW Škoda)

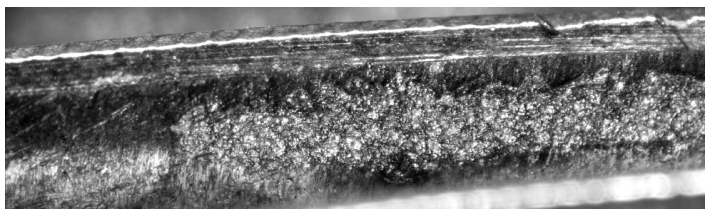
Fig.1 Gearbox MQ 200 (VW Skoda)

Použitá měřicí aparatura

Pro snímání signálu akustické emise (AE) byl použit čtyřkanálový analyzátor DAKEL XEDO. Čtyři snímače typu MIDI byly rozmístěny po obvodu skříně stejně jako v předchozí sérii měření, viz [6] a byly upevněny pomocí kyanoakrylátového lepidla k povrchu skříně převodovky. Signál z těchto snímačů byl před vstupem do analyzátoru ještě zesílen pomocí předzesilovačů. Snímače i předzesilovače jsou výrobkem firmy DAKEL a jejich charakteristika je dostupná na webových stránkách výrobce. Softwarové vybavení analyzátoru (DaeMon a DaeShow) umožňuje vyhodnocovat základní parametry AE – překmitý přes detekční prahy (county), RMS, události, trendy a pod..

Metodika zkoušek

Druhá série experimentů byla rozdělena do tří měření/zkoušek - označených „měření A, B, C“, které proběhly za stejných provozních podmínek. V měření A (délka cca 60 min) bylo použito nové ozubené soukolí s převodovým poměrem 48/39. Výsledky tohoto experimentu slouží pro porovnání získaných dat z nepoškozené převodovky s daty naměřenými v dalších zkouškách a vyloučení vlivu změny otáček či chování převodového ústrojí na vyhodnocení. V druhé zkoušce (měření B) bylo vytvořeno pomocí elektrojiskrové metody umělé poškození na záběrové straně zubu hnaného kola (viz obr. 2), lépe simulující reálný defekt než v předchozích experimentech, viz [6]. V měření C došlo k obnovení poškození z experimentu B a vytvoření dalšího poškození na protilehlé straně ozubeného kola (2. a 20. zub kola). Převodovka byla ve všech měřeních zatížena výstupním momentem 150 Nm a vstupními otáčkami 3000 min⁻¹. Teplota převodovky, jako komparační parametr, byla snímána laserovým pyrometrem z krytu 5. převodového stupně.

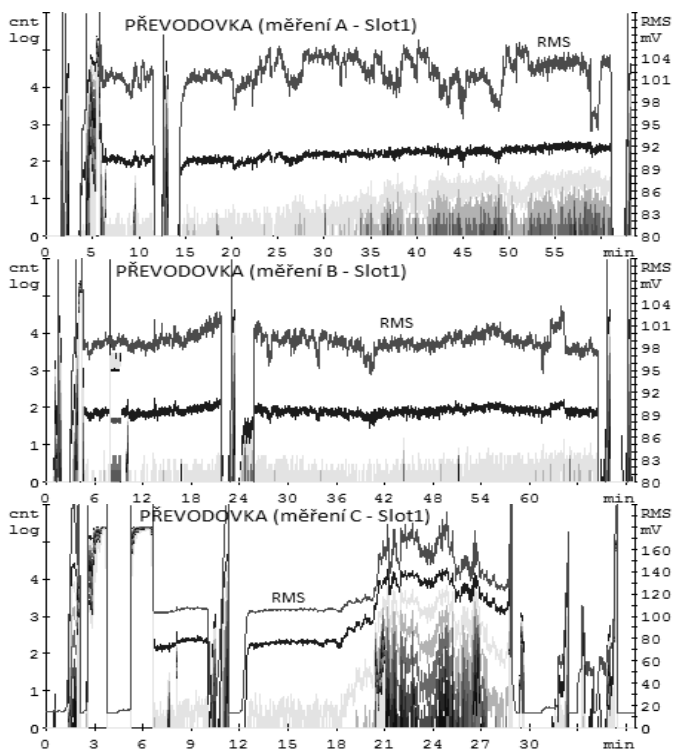


Obr. 2 Detail poškození boku zubu ozubeného kola
Fig. 2 Detail of the gear tooth damage

3. Výsledky měření

Vzhledem k podobnosti záznamů z jednotlivých snímačů (kanálů), stejně jako v [6], jsou výsledky prezentovány na kanálu 1, který je v grafech označen jako slot 1. Na obr. 3 jsou zobrazeny průběhy RMS a countů během zkoušek A až C. V průběhu experimentů bylo provedeno několik rozběhových zkoušek (zvýšení otáček z 950 min⁻¹ na 5000 min⁻¹), které se projeví výraznou skokovou změnou v hodnotách jednotlivých parametrů. Po rozběhové zkoušce v měření A dochází k rozběhu převodovky na 3000 min⁻¹ a okamžitě poté k nárůstu signálu AE, což mohlo být způsobeno odstraňováním textury po obrábění při záběhu kola. Následně se signál ustálil a další pozvolné zvyšování úrovně signálu může být připsáno vytváření záběhové stopy na bocích zubů kola. Pro měření B bylo již na záběrové straně kola vytvořeno poškození, viz obr. 2. Extrémní nárůst signálu (ve 4. minutě) je přisuzován vlivu vytvořeného poškození na záběrové straně boku zubu. V 8. minutě došlo ke krátkodobému selhání komunikace PC a analyzátoru. Během 24. minuty a ke konci měření byly opět provedeny rozběhové zkoušky. Po ukončení experimentu bylo vyhodnoceno, že v průběhu zkoušky došlo k částečnému zahlázení původního umělého poškození.

Porovnání základních časových záznamů hodnot RMS, cnt ze všech tří měření je představeno na obr. 3.

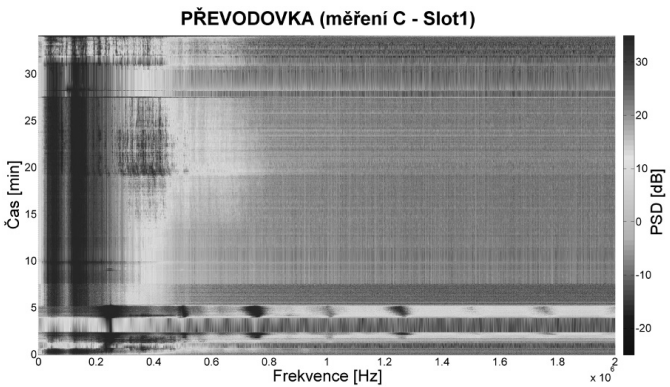
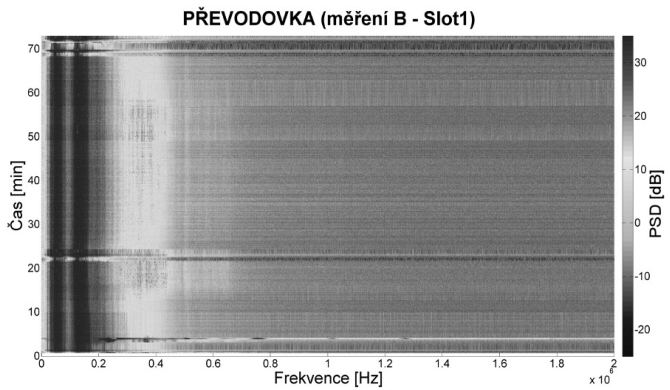
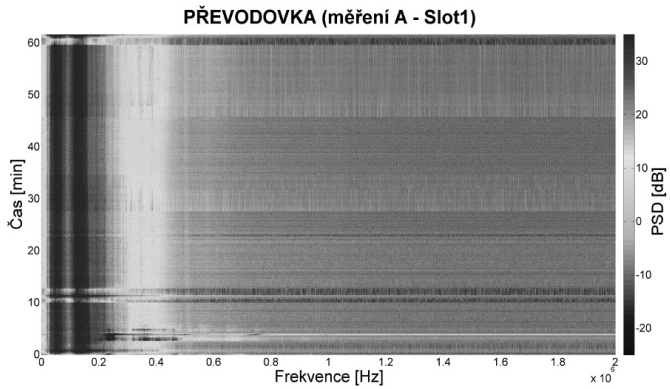


Obr. 3 Záznam signálu AE (counts, RMS) – zkoušky A, B, C

Fig. 3 Record of AE signal (counts, RMS) – tests A, B, C

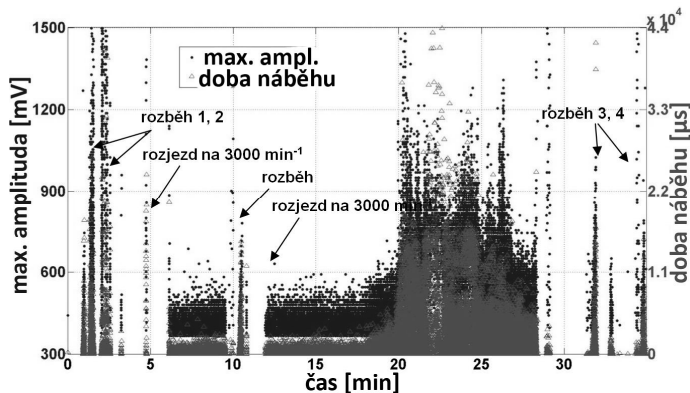
Měření C obsahuje výrazné změny parametrů signálu AE způsobené rozběhovými zkouškami, vytvořeným poškozením a zvýšením axiální vůle uložení ozubeného kola v důsledku velkého zvýšení teploty. Po rozběhové zkoušce (2. min) dochází kolem 3. min k výraznému zvýšení hodnot AE pravděpodobně v důsledku vytvořeného poškození. V páté minutě byl rozjezd na 3000 min^{-1} , po kterém se signál držel stále ve vysokých hodnotách (otěr a uhlazování poškození). Pokles nastal v sedmé minutě a zůstal stabilní až do další rozběhové zkoušky (11. minuta). Ve 13. minutě opětovný rozběh na 3000 min^{-1} – signál v normálu, od 18 minuty dochází k růstu signálu a enormnímu zvyšování teploty. Rázy v období mezi 20. až 30. minutou byly způsobeny převážně zvětšením axiální vůle na hnacím kole vlivem extrémní teploty.

Ve frekvenčních spektrech záznamů AE (obr. 4) jsou stejně jako v časové oblasti názorně vidět zejména rozběhové zkoušky a úseky se zvýšenou spektrální hustotou signálu (PSD), které se vyskytují po startu jednotlivých měření a mohou indikovat defekt a proces jeho zahlazení. Dále se ve frekvenčních záznamech objevují skoková navýšení PSD s následnými útlumy, vyskytujícími se zejména v měření A a B. Autorům není zatím zcela přesně známo, co způsobuje tyto náhlé skoky a k jejich objasnění by pomohly další série experimentálních měření. V 19. minutě měření C došlo k rapidnímu skoku signálu jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti, v níž je patrný mírný začátek už kolem 15. minuty, kde je nárůst PSD zejména v pásmu okolo 400 kHz.

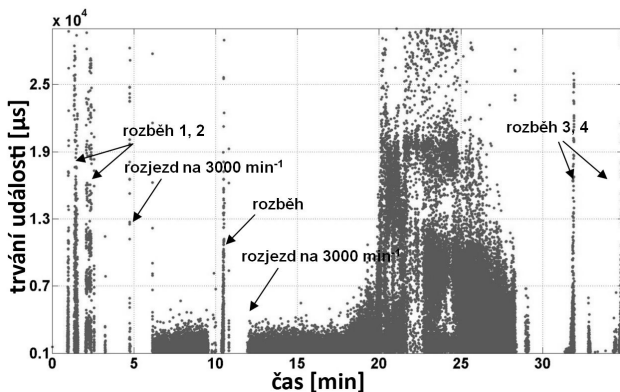


Obr. 4 Záznam frekvenčních spekter v měření A, B, C
Fig. 4 Record of frequency spectra during test A, B, C

Na obr. 5 a 6 jsou zobrazeny záznamy průběhu max. amplitudy, doby náběhu a trvání událostí během měření C, při kterém bylo obnoveno původní poškození druhého zubu a vytvořeno další nové na protilehlé straně kola. Během měření byla celkem čtyřikrát provedena rozběhová zkouška (1-4). Od 12. minuty dochází nejprve k mírnému zvýšení sledovaných parametrů, dále pak k prudkému nárůstu, který gradoval výpadkem zařazení 5. stupně v 28. minutě záznamu. Další rozběhové zkoušky v tomto měření již byly díky vibracím neúspěšné.



Obr. 5 Záznam max. amplitudy a doby náběhu během měření C
 Fig. 5 Record of peak amplitude and risetime during test C

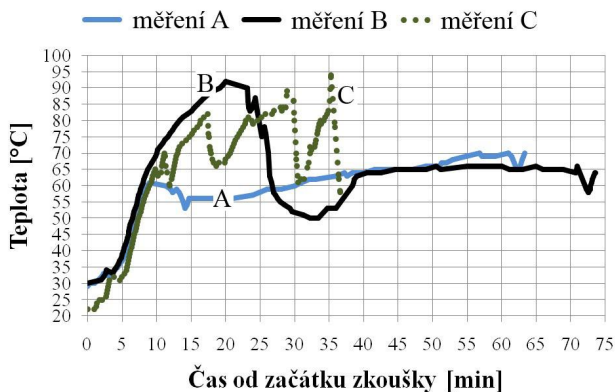


Obr. 6 Záznam trvání události v měření C
 Fig. 6 Record of event duration during test C

Výsledky měření teploty

Na obrázku 7 jsou zobrazeny průběhy teplot během jednotlivých měření A až C. V měření A je patrný nárůst teploty až do hodnoty 60° C a následný pokles způsobený rozběhovou zkouškou. Následuje mírný růst, který je zakončen výkyvem způsobeným opět rozběhovou zkouškou. V měření B dochází nejprve k nárůstu teploty, jehož gradient je přibližně shodný s měřením A. Po dosažení 92° C je zapojen externí ventilátor, který ochladí skříně na 50° C. Po vypnutí ventilátoru se teplota skříně stabilizuje na hodnotě 65°C, na které setrvá až do

konce zkoušky. V měření C dochází nejprve k stejnému nárůstu jako v předchozích dvou experimentech. Extrémní výkyvy teploty jsou způsobeny externím chlazením a častým zastavováním zkušební soustavy. V době od 20. do 28. minuty dochází k zvyšování teploty víka i přes aktivní chlazení (záznam teploty zkreslen – teplota soukolí byla výrazně vyšší).



Obr. 7 Graf teplot během zkoušek
 Fig. 7 Graph of temperature during tests

4. Závěr

Cílem druhé série experimentů bylo ověření metodiky a možnosti měření akustické emise na produkční automobilové převodovce s novým typem poškození než v předchozích případech. Experiment byl rozčleněn do tří měření, které byly realizovány za stejných provozních podmínek. V prvním měření proběhl záběh nového soukolí, v druhém bylo vytvořeno elektrojiskrovou metodou umělé poškození na záběrové straně jednoho zubu hnaného kola a v třetím měření bylo toto poškození obnoveno a vytvořeno další na protilehlé straně kola.

Na základě provedených měření můžeme konstatovat, že metody použité během zkoušek reagovaly na probíhající procesy shodně v závislosti na jejich citlivosti. Výsledky ověřily hypotézu o možnosti identifikace poškození, které není tak radikální jako v předchozí sérii experimentů. Při hodnocení výsledků je nutno si uvědomit, že identifikace poškození v reálné automobilové převodovce je extrémně složitým technickým problémem. V převodové skříní je řada zdrojů signálu AE (ložiska, kontaktní plochy, příp. i pohyb olejové náplně apod.), které se samozřejmě různou měrou podílí na snímaném výsledném signálu. V tomto článku je prezentována pouze část dosud zpracovaných výsledků z druhé série experimentů. Proto je ještě nutné analyzovat procesy, které probíhají např. při záběru poškozených soukolí. Následovat bude rozbor a vytipování dalších uzlů převodovky vhodných pro detekci poškození.

Poděkování

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

Literatura

- [1] KOPEC, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [2] HORT, F.: *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 112 s.
- [3] VLAŠIC, F.: *Hodnocení cyklického poškození slitiny na bázi Al a Mg s využitím metody akustické emise*, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, 164 s.
- [4] TOUTOUNTZAKIS T., TAN CH. K., MBA D.: Application of acoustic emission to seeded gear fault detection. In *NDT & E International*, Vol. 38, Issue 1, January 2005, Pages 27-36, ISSN 0963-8695
- [5] TAN, CH. K., MBA, D.: Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox. In: *Tribology International*, Vol. 38, Issue 5, May 2005, Pages 469-480.
- [6] HORT, F.; VLAŠIC, F.; MAZAL, P.; MAZÚREK, I.: Detekce poškození automobilové převodovky. *NDT Welding Bulletin*, p. 21 – 25, Vol.21, No.1, 2011. Tíret, Praha, ISSN 1213-3825.



CONCRETE LIFETIME MONITORING BY NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

Lubos Pazdera^{*}, Libor Topolar^{*}, Jaroslav Smutny^{*}, Pavel Mazal^{},
Vlastimil Bilek^{***}, Marta Korenska^{*}, Michal Matysik^{*},
Veronika Rodriguezova^{*}**

^{*}Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Czech

^{**}Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Czech

^{***}ZPSV a.s., Brno, Czech

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

Abstract

The quality of concrete structures is dependent on many factors such as the type of cement, the type of aggregates, water cement ratio, curing, environmental conditions etc. Considering the above requirements on testing the hardening of concrete in both new and old structures, there is need to assess the actual condition of the structures. Non-Destructive Testing techniques can be used effectively for investigating and evaluating the actual condition of the structures.

The aim of the article is to show a possibility of studying simple concrete samples by help of chosen Non-Destructive Testing Methods such as Acoustic Emission, Non-Linear Ultrasonic Spectroscopy, Impedance Spectroscopy etc.

Key words: *concrete, non-destructive testing, acoustic emission, non-linear ultrasonic spectroscopy, impedance spectroscopy*

1. Introduction

Non-destructive testing is a wide group of analysis techniques used in science and industry to evaluate the properties of a material, component or system without causing damage.[1] The terms Non-destructive examination, Non-destructive inspection, and Non-destructive evaluation are also commonly used to describe this technology. [2]

Concrete is a compound material made from sand, gravel and cement. The cement is a mixture of various minerals which when mixed with water, hydrate and rapidly become hard binding the sand and gravel into a solid mass. The oldest known surviving concrete is to be found in the former Yugoslavia and was thought to have been laid in 5,600 BC using red lime as the cement. The first major concrete users were the Egyptians in around 2,500 BC and the Romans from 300 BC. [3]

In 1756, British engineer, John Smeaton made the first modern concrete (hydraulic cement) by adding pebbles as a coarse aggregate and mixing powered brick into the

cement. In 1824, English inventor, Joseph Aspdin invented Portland Cement, which has remained the dominant cement used in concrete production. Joseph Aspdin created the first true artificial cement by burning ground limestone and clay together. The burning process changed the chemical properties of the materials and Joseph Aspdin created stronger cement than what using plain crushed limestone would produce. [6]

To track the tension changes and/or the crack generation, the acoustic emission method is used. This method allows us to follow up active (dynamic) processes inside the structure. In consequence of local tension accumulation inside the material, there arise focuses of tension and consequently potential sources of acoustic emission. If the tension reaches or even exceeds the critical value at a certain point, the accumulated energy will be released resulting in a acoustic event. This event can be accompanied by the formation of a micro-crack. The tension propagates through the material. The point at which the tension arises is called the acoustic emission source. [8,9]

The impedance of the material under investigation changes in consequence of structural changes, particularly water absorption and evaporation. The change in resistance is obvious. The capacity C of a parallel-plate capacitor is computed from

$$C(f) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot d^{-1}$$

where ϵ_r is the relative permittivity, S is the measuring electrode area, d their distance and f is the frequency. Micro-structure changes in the material make the material permittivity change. The permittivity value can also be affected by macro-cracks, which depends on the frequency. [7]

2. Experimental set up

The specimens are in the form of concrete blocks (see Tab. 1) of dimensions 10 cm x 10 cm x 40 cm. They are fabricated in special moulds whose top side is uncovered. The specimens are completed after the production and final vibration (if necessary).

mixture	kg/m ³
cement 42,5R	455
water	195
super plasticizer	2
sand 0/4	595
coarse aggregate 4/8	235
coarse aggregate 8/16	925

Tab. 1 Concrete mixture

The specimens have been monitored by the Acoustic Emission Method, the Impedance Spectroscopy and sometimes by the Non Linear Ultrasonic Spectroscopy, the Impact Echo and Ultrasonic Methods. Every time temperature was measured inside the specimens and in the surroundings by help of NTC resistors. These acoustic and electrical methods were applied as soon as possible after the

concrete mixture had been made. However, evaluation of these methods is complicated. Appropriate experiments are essential for good analyses of the recorded data by classical and modern methods. [4,5,10, 11]

Acoustic emission activity has been measured by acoustic emission analyser LOCAN. Experimental set up of acoustic emission is shown in Fig. 1.

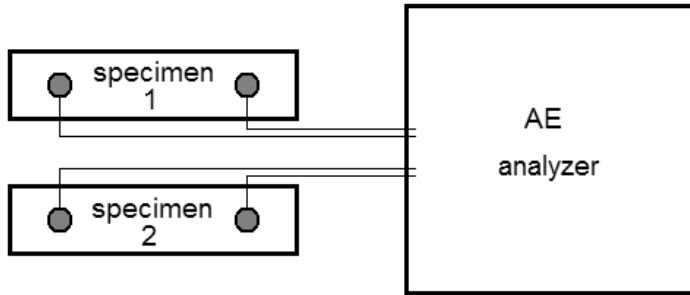


Fig. 1 Four acoustic emission sensor measurement on two samples

Negative resistance coefficient resistors, i.e. NTC thermistors, whose resistance decreases with increasing temperature, are used to measure the temperature. The sensors are placed inside the specimen.

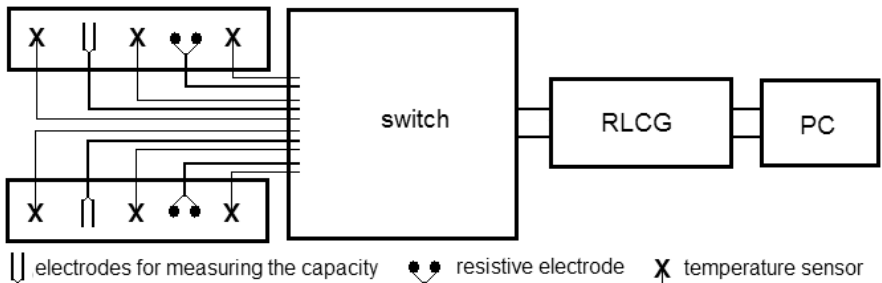


Fig. 2 Measuring of electrical properties on two samples with switch and RLCG Bridge

Two cylindrical steel electrodes of a diameter of 6 mm, buried 65 mm under the specimen surface, serve to measure the resistance. To measure the capacitance, two rectangular metal-plate electrodes of dimensions 25 mm x 45 mm are used. All electrodes are fixed in a plastic slab so that their constant configuration is guaranteed. The electrodes and the temperature sensor outputs are connected to an automated measuring device. The measurements of the capacitance, temperature and impedance are started within 15 minutes from the mixture preparation. This

phase of the experiment is carried out using an RLCG bridge and a selector switch (Fig. 2). The measurement is carried out at selected points of the frequency characteristic in the range from 100 Hz to 20 kHz.



Fig. 3 Photo of real experimental set up

Each of the electric quantities (resistance, capacitance, temperature etc.) has been measured separately. Acoustic emission sensors have been placed on the specimen surface after the specimen setting is completed, i.e., after six hours approximately. Two sensors are placed on each of the specimens, so that a total of four sensors are used. As a rule, the specimens are taken out from the moulds after 24 hours and, subsequently, the measurements continue. Measuring of moulded samples is shown in Fig. 3.

3. Results

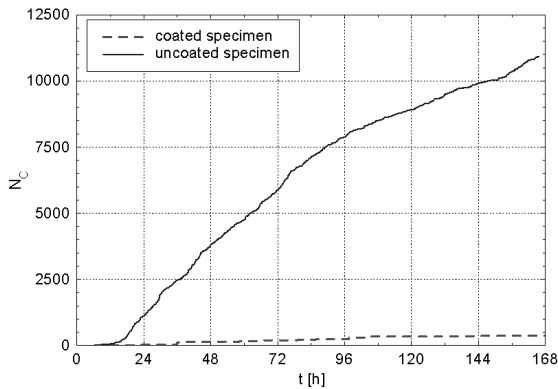


Fig. 4 Acoustic emission activity during the whole experiment

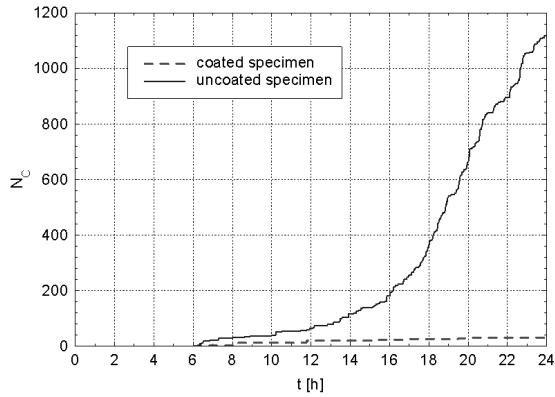


Fig 5 Acoustic emission activity during the first day of experiment

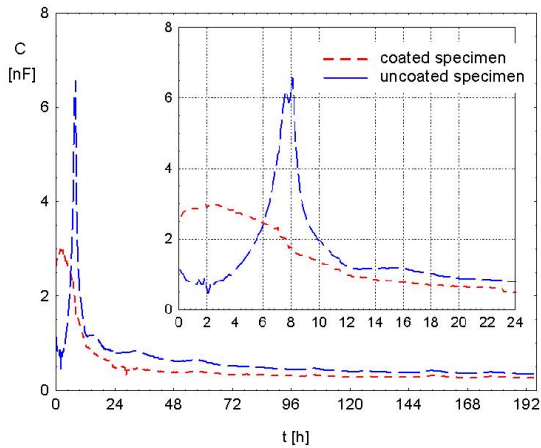


Fig 6 Impedance properties (capacity) of monitored specimens

Acoustic emission activity of coated sample is evidently lower than uncoated one. Significant changes occurred after unmolding (Fig. 2 – after the 16th hour). Electrical properties are changed mainly during the first 12 hours.

It is quite clear that coated concrete structure has better properties than uncoated (see Fig 4).

4. Acknowledgement

This research has been supported by project of GACR No. P104/10/0535 Research and Development of Selected Measuring Method and Analyses for Building Mixture Behaviour Study at Hardening and Centre for Integrate Design of Advanced Structures (CIDEAS)

5. Literature

- [1] Cartz L. *Nondestructive Testing*. A S M International, 1995
- [2] Hellier C. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill. pp. 1.1
- [3] Lunak, M.; Kusak, I.; Pazdera, L.; Topolar, L. *Monitoring of Cement-Based Material Solidification, Focusing on Electrical and Mechanical Properties. The 8th International Conference NDT - Non-Destructive Testing In Engineering Practice*, Brno, CERM. 2010
- [4] Kořenská M., Weber Z., Smutný J., Pazdera L.: *Application of Modern Time-Frequency Analysis on Acoustic Emission Signal*, International Scientific Conference at 60th Anniversary of Slovak University of Technology in Bratislava, Section: Mathematics and Physics, Bratislava, Slovakia, November 18-20, 1998, pp. 33-36..
- [5] Korenska M., Pazdera L., Ritickova L.: *Study of correlation between acoustic emission and damaging of reinforced concrete*, The 6th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, 13-15 September 2001, Portorož, Slovenia, pp. 181 – 184.
- [6] Aitcin P.C.: *High-Performance Concrete*, EBS, Prague, 2005
- [7] Lunak M, Kusak I, Pazdera L, Topolar L, Bilek V, Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties, proc. of 48th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis Location: Velke Losiny, Czech Rep. May 31-June 03, 2010
- [8] Pazdera L, Topolar L, Bilek V, Smutny J, Kusak I, Lunak M, Measuring of Concrete Properties during Hardening., proc. of 48th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, Velke Losiny, Czech Rep. May 31-June 03, 2010
- [9] Mazal P, Dvoracek J, Pazdera L, Application of acoustic emission method in contact damage identification, International Journal of Materials & Product Technology Vol. 41, Iss. 1-4, pp.140-152, 2011
- [10] Korenska M, Pazdera L, Stryk J, Vyroubal P, Detection of the reinforcement corrosion in prestressed concrete girders, 8th International Conference of the Slovenian-Society-for-Non-Destructive-Testing on the Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, Portoroz, Slovenia, September 01-03, 2005
- [11] Kalicka M., Acoustic Emission as a Monitoring Method in Prestressed Concrete Bridges Health Condition Evaluation, Journal-AE, Vol. 27, 2009



POROVNÁNÍ DETEKCE VNITŘNÍCH VAD MRAZEM POŠKOZENÝCH STŘEŠNÍCH TAŠEK AKUSTICKÝMI NEDESTRUKTIVNÍMI METODAMI

COMPARISON OF DETECTION OF FROST DAMAGED ROOF TILES INTERNAL DEFECTS BY ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE METHODS

Iveta PLŠKOVÁ*, Michal MATYSÍK*, Marta KOŘENSKÁ*, Zdeněk CHOBOLA*

* Ústav fyziky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95,
602 00 Brno

* Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology,
Veverí 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic
Contact e-mail: plskova.i@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Příspěvek popisuje výsledky našeho experimentálního výzkumu mrazuvzdornosti střešních tašek provedeného dvěma nedestruktivními akustickými metodami: metodou impact echo a ultrazvukovou impulzní metodou. K ověření výsledků akustických nedestruktivních metod byly stanoveny další fyzikální vlastnosti testovaných střešních tašek.

Klíčová slova: *impact echo, střešní tašky, mrazuvzdornost, ultrazvuková impulzní metoda*

Abstract

This paper presents the results of our experimental research of the frost resistance of roof tiles assessment performed by two acoustic non-destructive methods: the impact echo method and the ultrasonic impulse method. To verify the rightness of acoustic non-destructive methods results, additional physical parameters of the roof tiles under experiment have been measured

Key words: *impact echo, roof tiles, frost resistance, ultrasonic impulse method*

1. Úvod

Mrazuvzdornost pálených tašek a doplňků (ČSN EN 539-2) [1] patří mezi nejvýznamnější vlastnosti z hlediska trvanlivosti. Před a po ukončení zmrazování a rozmrazování jsme vzorky posoudili vizuálně, metodou Impact-echo a ultrazvukovou impulzní metodou. Nedestruktivní metoda Impact-echo je schopna upozornit na vznikající defekty ve struktuře materiálu, které nelze okem pozorovat. Za nepřijatelná poškození se považují výlom žebírek, povrchová trhлина, lom, olupování, drolení, lístkování. Ultrazvuková impulsová metoda průchodová se používá převážně tam, kde chceme zjistit pomocí rychlosti šíření ultrazvukového vlnění jakost zkoušeného materiálu, případně jeho mechanicko-fyzikální charakteristiky. [5, 6] Tato metoda je

založena na opakovaném vysílání ultrazvukových impulsů do zkoušeného materiálu a zjištění impulsové rychlosti. Z té jsou následně vypočteny dynamické moduly pružnosti. [2, 3, 4]

2. Experimentální část

Zkušební vzorky pálené střešní krytiny byly testovány metodou Impact-echo před zahájením degradace mrazíci a rozmrazovacími cykly a poté vždy po provedení série 50-ti cyklů. V získaných frekvenčních spektrech sledujeme změny dominantní frekvence. Při degradaci dochází k posunu rezonančních frekvencí, případně k nárůstu počtu dominantních frekvencí. Z toho usuzujeme na možné změny ve struktuře zkušebních těles.

Budící impuls byl vyvolán kovovým kladívkem. Odezva tašky na budící impuls byla snímána piezokeramickým snímačem umístěným na ploše tašky. Elektrický signál byl ze snímače veden na vstup digitálního osciloskopu a dále zpracováván.

Pro posouzení mrazuvzdornosti byly na vybraných sadách zkušebních vzorků, provedeny mrazíci a rozmrazovací cykly podle ČSN EN 539-2. Před zahájením mrazících a rozmrazovacích cyklů byly střešní tašky ponořeny do nádoby s vodou o teplotě $t_1 = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Bezprostředně potom byly vloženy do mrazícího boxu. Během této fáze mrazících a rozmrazovacích cyklů byla teplota vzduchu uvnitř mrazícího boxu udržována po dobu 2 hodin \pm 30 minut na hodnotě $t_2 = (-20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Stejně tak po zmrazení vzorků zůstala teplota v mrazničce po dobu (75 ± 15) minut na hodnotě $t_3 = (-20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Mrazíci cyklus byl ukončen ponořením vzorků na 1 až 2 hodiny do vody. Po ustálení byla teplota vody $t_4 = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Pro možnost verifikace vhodnosti frekvenční inspekce při posuzování mrazuvzdornosti bylo provedeno měření změn dynamického modulu pružnosti testované střešní krytiny impulzní ultrazvukovou metodou. Při realizaci ultrazvukové impulsové metody jsme sledovali průchod vlnění o frekvenci 54000 Hz. Do materiálu jsou vysílány ultrazvukové impulsy. Impulsovou rychlost šíření ultrazvukového vlnění zjistíme výpočtem z času šíření a dráhy, po které se impuls ultrazvuku šířil. Tato rychlost je různá pro různé materiály a mění se s jejich vlastnostmi. Sondy s akustickým vazebním prostředkem jsme umístili do středu bočních hran zkoumaného vzorku. Mírným pootočením sond jsme upravili akustický kontakt. Při měření je nutná aplikace akustického vazebního prostředku. Jeho tenká vrstva je místo vzduchu mezi sondou a vzorkem. [7, 8] Při jeho použití se snižuje nežádoucí odraz vln a výrazně se zvyšuje průchod ultrazvuku přes uvedené rozhraní. [9] Hodnotu dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu E_{bu} v MPa vypočítáme ze vztahu [2]

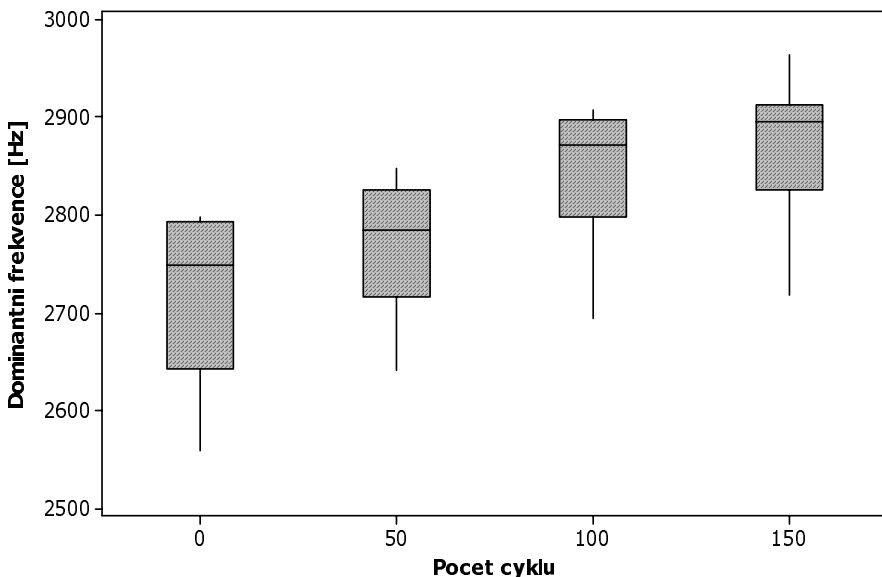
$$E_{bu} = \frac{\rho v_L^2}{k^2} 10^{-6}$$

kde: ρ objemová hmotnost materiálu vzorku v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 v_L impulsová rychlost šíření podélného UZ vlnění v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,
 k koeficient rozměrnosti prostředí, bez rozměru.

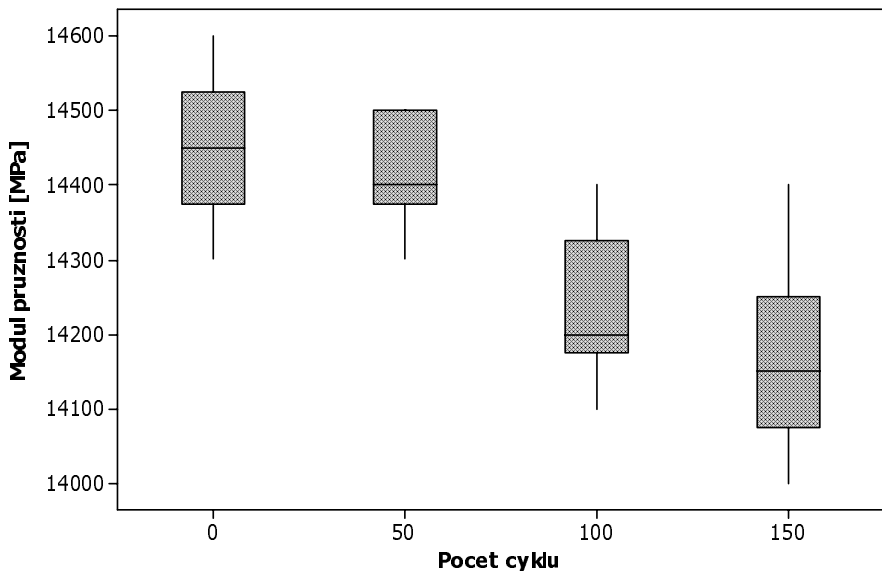
3. Dosažené výsledky

Analyzován byl soubor pálených střešních tašek. Kontrolní měření metodou Impact-echo byly provedeny před zatěžováním mrazíciemi a rozmrazovacími cykly a následně po každé sérii tj. po 50-ti, 100 a 150-ti cyklů. Naším cílem je ověření metody Impact-echo při testování mrazuvzdornosti střešní krytiny. Pozorovali jsme změny vyvolané po provedení určitého počtu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Měření ultrazvukovou impulsovou metodou bylo provedeno také před zahájením mrazíciích a rozmrazovacích cyklů a bylo zopakováno po každé sérii cyklů.

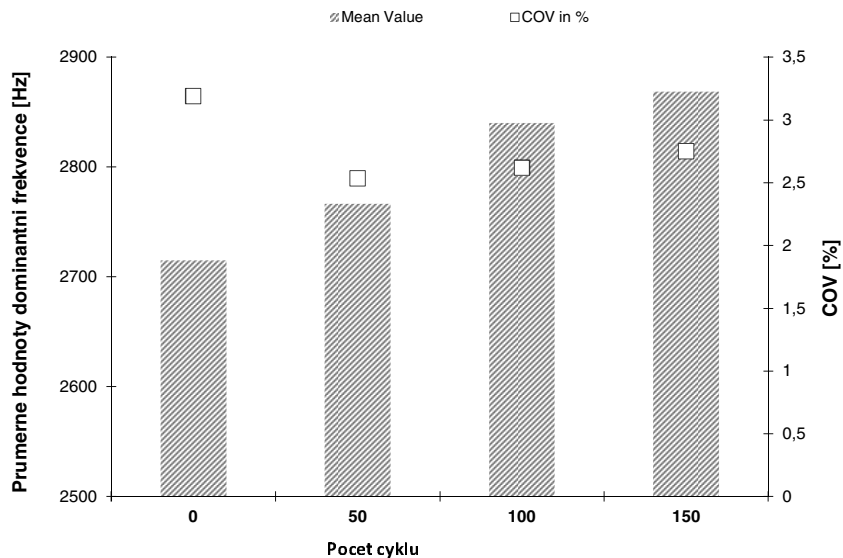
V grafu na obr. 1 jsou uvedeny získané hodnoty dominantních frekvencí v závislosti na počtu mrazíciích a rozmrazovacích cyklů. Moduly pružnosti získané z ultrazvukové impulsové metody v závislosti na počtu mrazíciích a rozmrazovacích cyklů jsou zaznamenány v grafu na obr. 2. Průměrné hodnoty dominantní frekvence a příslušné variační koeficienty jsou na obr. 3. Obr. 4 prezentuje průměrné hodnoty modulu pružnosti a variační koeficienty.



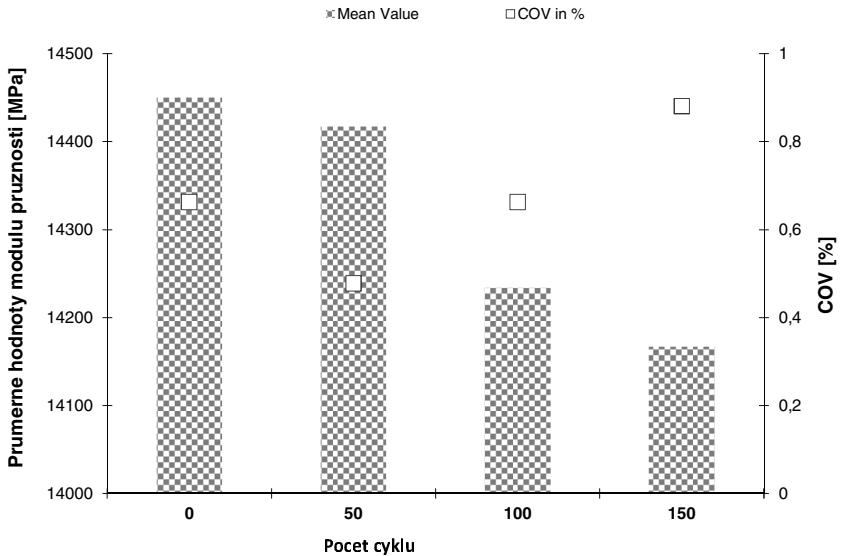
Obr. 1 Dominantních frekvence v závislosti na počtu mrazíciích a rozmrazovacích c.
 Fig. 1 Values of a dominant frequency vs. number of the freezing-and-thawing c.



Obr.2 Dynamický modul pružnosti v závislosti na počtu mrazících a rozmraz. c.
 Fig.2 Values of a elasticity modulus vs. number of the freezing-and-thawing cycles



Obr.3 Průměrné hodnoty dominantní frekvence - variační koeficient
 Fig.3 Average Values of a dominant frequency, mean values, variance coefficients



Obr.4 Průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti – variační koeficient
 Fig.4 Average values of a elasticity modulus, mean values and variance coefficients

4. Závěr

U testovaných zkušebních těles střešní krytiny byla průměrná hodnota dominantní frekvence u nových vzorků 2715 Hz. U vzorků po 50-ti zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech se zvýšila na 2770 Hz, po 100 cyklech – 2840 Hz a po 150-ti cyklech – 2870 Hz. V průběhu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů nastaly změny ve frekvenčních spektrech - došlo k posunu dominantní frekvence. U nových vzorků pálené střešní krytiny činila průměrná hodnota dynamického modulu pružnosti získaného z ultrazvukové impulsové metody 14450 MPa. U vzorků podrobených 50-ti zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům 14400 MPa, 100 cyklům – 14200 MPa a 150-ti cyklům – 14150 MPa.

Z uvedených výsledků vidíme, že v průběhu 150-ti zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů došlo ke změnám vedoucím ke zhoršení vlastností testovaných střešních tašek. Poškození vnitřní struktury vzorků se ve frekvenčních spektrech projevilo posunem dominantní frekvence a snížením dynamického modulu pružnosti. Na základě naměřených dat lze konstatovat, že obě použité defektoskopické metody jsou schopné detekovat poškození pálené střešní krytiny způsobené zmrazovacími cykly.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován díky podpoře projektu GAČR GP103/09/P247 a projektu FAST-S-11-6.

Literatura

- [1] ČSN EN 539-2 Pálené střešní tašky pro skládané krytiny - Stanovení fyzikálních charakteristik - Část 2: Zkouška mrazuvzdornosti
- [2] PLŠKOVÁ, I.; CHOBOLA, Z.; MATYSÍK, M. Assessment of ceramic tile frost resistance by means of the frequency inspection method. *Ceramics-Silikáty*. 2011. 55(2). p. 176 - 182. ISSN 0862-5468.
- [3] PLŠKOVÁ, I.; MATYSÍK, M.; CHOBOLA, Z. Optimizing the Location of Piezoelectric Sensors. *TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES*. 2010. 3(1). p. 23 - 28. ISSN 1802-971X.
- [4] JHAJEK, K. and SIKULA, J., 2008. A resonance frequency shift in spectral analysis of the impact echo. *NONLINEAR ACOUSTICS FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, SWEDEN, 2008, pp. 525-528. ISSN: 0094243X, ISBN 9780735405448
- [5] FICKER, T.; MARTIŠEK, D.; JENNINGS, H. Roughness of fracture surfaces and compressive strength of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2010. 40(6). p. 947 - 955. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [6] FICKER, T. Quasi-static compressive strength of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2011. 2011(41). p. 129 - 132. ISSN 0008-8846. (IF(2009)=2,376).
- [7] MAZAL, P.; PAZDERA, L.; DVOŘÁČEK, J. Application of acoustic emission method in contact damage identification. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS & PRODUCT TECHNOLOGY*. 2011. 41(1). p. 140 - 152. ISSN 0268-1900.
- [8] PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L.; BÍLEK, V.; SMUTNÝ, J.; KUSÁK, I.; LUŇÁK, M. Measuring of Concrete Properties during Hardening. In *ESA 2010*. 1. CZ, Palacky University. 2010. p. 311 - 318. ISBN 978-80-244-2533-7.
- [9] Lunak M; Kusak I; Pazdera L; Topolar L., Bilek V., Monitoring of cement-based material solidification, focusing on electrical properties, *48th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON EXPERIMENTALNI ANALYZA NAPETI 2010, EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS 2010*, ISBN: 978-80-244-2533-7, Pages: 233-240 Published: 2010



PROVOZNÍ KONTROLY TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK ELEKTROMAGNETICKÝMI METODAMI IN-SERVICE INSPECTION OF HEAT-EXCHANGER TUBES BY MEANS OF ELECTROMAGNETIC METHODS

Miloslav PROCHÁZKA

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: info@tediko.cz

Abstrakt

Článek popisuje způsoby kontrol teplosměnných trubek výměníků pomocí elektromagnetických metod – ET-zkoušení vířivými proudy, RFT-zkoušení ve vzdáleném poli vířivých proudů, MFL-zkoušení magnetickými rozptylovými toky. Zjišťování vnitřních a vnějších vad, volba metody v závislosti na materiálu trubek.

Klíčová slova: vířivé proudy, vzdálené pole, magnetické rozptylové toky, trubka, výměník

Abstract

This article describes the methods of heat exchanger tubes inspection by means of electromagnetic methods – ET-eddy current testing, RFT-remote field testing and MFL-magnetic flux leakage. Identification of internal and external flaws, the method choice in dependence on tubes material.

Key words : eddy current, remote field, magnetic flux leakage, tube, heat exchanger

1. Trochu historie - Část 1

Zkoušení elektromagnetickými metodami – konkrétně metodou vířivých proudů má v České republice nezanedbatelnou tradici. A ač se to zdá téměř neuvěřitelné, provozní zkoušení teplosměnných trubek výměníků vířivými proudy má historii již několika desítek let. Stejně tak technický pokrok neuvěřitelně posunul možnosti zkoušení a především hodnocení zkoušených trubek.

Zkoušení trubek výměníků, ze začátku především kondenzátorů, vedlo ke vzniku měřičích skupin především v energetice. V bývalém Československu v rámci organizačních složek státních podniků ČEZ a SEP, jakožto českého a slovenského ekvivalentu výrobců elektrické energie a tepla (malá odbočka – kdo ještě dnes ví, že název původně vznikl jako zkratka názvu České energetické závody). V České republice (tehdy socialistické) vznikla v roce 1974 (tedy již téměř před čtyřiceti lety) skupina specialistů v rámci oddělení defektoskopie v Útvaru materiálových služeb Chomutov Severočeských elektráren (ESČ), n.p., později přeměněném na Koncernové kooperační materiálové středisko (KKMS), které zajišťovalo drtivou většinu kontrol a expertiz v rámci ČEZu. Později, v osmdesátých letech, po přejmenování na Koncernové diagnostické středisko energetiky (KDSE) vznikla v tomto středisku ještě druhá paralelní skupina pro kontroly v rámci výstavby a provozu českých jaderných elektráren (v případě teplosměnných trubek se jednalo o kontrolu všech výměníků včetně kondenzátorů s výjimkou trubek parogenerátorů).

Původní skupina se přitom nadále zabývala kontrolou na klasických elektrárnách a v teplárnách. Po roce 1990 došlo k spojení do jedné skupiny a později většina činností přešla na společnost TEDIKO postupně zároveň se zánikem KDSE.

Pokud se týká Slovenska, následně po vytvoření české skupiny byla vytvořena i skupina slovenská a to v letech 1975 až 1976 v rámci podniku ORGREZ Bratislava.

Další potřeba zkoušení teplosměnných trubek se objevila zároveň s budováním jaderných elektráren, v Čechách nejdříve čtyřblokové jaderné elektrárny Dukovany a později opět čtyřblokové, avšak dodnes nedokončené a tedy dvojblokové elektrárny Temelín. Jednalo a jedná se dosud o kontroly trubek parogenerátorů. Zatímco kontroly v klasické části energetiky jsou spíše motivovány provozními a ekonomickými důvody, parogenerátory představují rozhraní mezi aktivní a neaktivní částí jaderné elektrárny a jsou tedy velmi důležité z důvodů bezpečnostních. Těsnost teplosměnných trubek parogenerátorů je velmi důležitá, aby nedocházelo k průniku primární vody (procházející trubkami) do sekundárního okruhu. Zde se samozřejmě angažoval vítkovický dodavatel parogenerátorů a jeho pracovníci prováděli příslušná měření na parogenerátorech. Na Slovensku již mezitím byly postaveny jaderné bloky v Jaslovských Bohunicích a zde se angažoval VÚJE v Trnavě. Kromě VÚJE se ale měření trubek zabýval i např. ORGREZ Bratislava.

Mimo provozního zkoušení teplosměnných trubek v energetice se začalo provádět i zkoušení v chemickém průmyslu a rafinériích, zde je možné například jmenovat podniky společnosti Chemopetrol v Neratovicích a Litvínově.

Devadesátá léta dále přinesla i vznik dalších menších měřících skupin, většinou vytvořených jednotlivci, kteří opouštěli v rámci různých privatizací mateřské firmy a snažili se najít svoji vlastní cestu.

Toto pojednání se bude zbývat kontrolou trubek s výjimkou kontrol trubek parogenerátorů a trubek ve výrobě, protože to jsou v podstatě mírně odlišné směry a přístupy, které zasluhují samostatně zpracovanou a jistě obsáhlou kapitulu.

2. Různorodost zkoušených zařízení a materiálů

Tepelné výměníky představují velice různorodou skupinu zařízení, se kterými se setkáváme v podstatě na každém kroku. Tepelné výměníky nemáme jen v elektrárnách ale i v autech, letadlech, domácnostech, prostě téměř všude. Tepelným výměníkem je vlastně i radiátor topení a je jím vybavena i obyčejná lednička. My se zde ale budeme zabývat pouze kontrolou trubkových výměníků a to ještě výměníků průmyslových. Navíc ještě pouze kontrolou vnitřní sondou, nebudeme se tedy zabývat kontrolou samostatných volných trubek tak, jak se například kontrolují ve výrobě.

Hlavními znaky, kterými se výměníky od sebe liší, jsou konstrukce, počet použitých trubek, materiál trubek a rozměry trubek. Kombinace těchto znaků vede i k volbě metody zkoušení. Dalším faktorem, který samozřejmě částečně ovlivňuje volbu metody je i účel výměníku a jeho provozování a z toho vyplývající poškození. Jaké jsou tedy jednotlivé možnosti (přehled je samozřejmě poněkud zjednodušen) :

Konstrukce

- výměník se dvěma trubkovicemi, tzn. výměník s přímými trubkami
- výměník s jednou (dělenou) trubkovicí a U-trubkami

Trubkový svazek

- vyjímatelný z nádoby
- pevně spojený s nádobou

Umístění

- vodorovná pozice
- svislá pozice

Materiál trubek

- trubky z materiálů s relativní permeabilitou $\mu_r=1$ (nemagnetické materiály – mosaz, měď austenit, mědinikl, titan apod.)
- trubky z materiálů s relativní permeabilitou $\mu_r \gg 1$ (magnetické materiály – oceli různého typu, u nás většinou třídy 11 a 12)
- trubky s duplexních ocelí (tedy trubky jehož $\mu_r >1$, avšak materiál nemá konstantní hodnotu – z hlediska zkoušení není možné postupovat jako při zkoušení nemagnetických ani nemagnetických materiálů)

Rozměry a provedení trubek

- běžně používané průměry (běžně kontrolovatelných elektromagnetickými metodami) jsou od vnitřního průměru cca 10 mm do několika desítek mm
- tloušťky se pohybují od 0,5 mm (u podélně svařovaných) do cca 3 mm (větší tloušťky se kontrolují velmi obtížně, záleží zde na materiálu a průměru trubky)
- trubky bývají většinou hladké, z důvodu zvýšení teplosměnné plochy někdy mívají vylisovaná či nalisovaná žebra, některé trubky z běžných ocelí jsou upraveny prolisováním tak zvláštním způsobem, že je nelze v podstatě těmito metodami zkoušet
- délka trubek se pohybuje od cca 1 m až po 12 m (samozřejmě jsou i výjimky)

Počet trubek

- od extrémního počtu 1 (ano, opravdu jsou výměníky s jednou trubkou, i když např. ve tvaru U !) až po například 20 000 ks a více v případě kondenzátorů páry

Další odlišnosti ovlivňující kontrolu

- počet přepážek, který se pohybuje od žádné až po několik desítek (v extrémních případech jsou přepážky od sebe jenom 15 – 20 cm)
- trubky jsou většinou tažené, tenkostěnné trubky jsou často podélně svařované z pásu

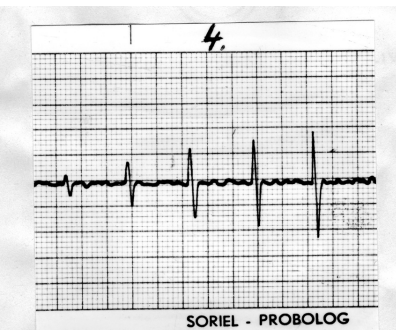
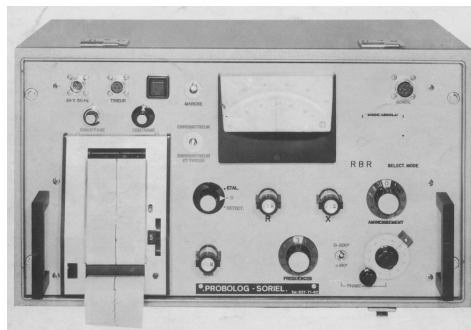
Pokud se týká vad, které se diagnostikují, jejich pestrost a mechanismus vzniku jsou velice různorodé. Jako základní rozdělení můžeme vady rozdělit na vady z vnějšího a vady z vnitřního povrchu. Vady nacházející se mezi povrchy a nekomunikující s nimi jsou vysoce vzácné a jsou to následky výroby.

Pokud se týká druhu vad, základní zjednodušené rozlišení je na vady charakteru důlků způsobených různými projevy koroze, vady charakteru trhlin včetně korozního praskání, vady charakteru erozního (způsobeného prouděním média) či úbrusy (způsobené kmitáním trubek a jejich třením o sebe případně vůči přepážkám).

3. Trochu historie - Část 2 – Přístroje

Co bylo prvním přístrojem použitým v rámci energetiky ? V roce 1974 byl pořízen (nebo lépe řečeno přidělen v rámci socialistického státního podniku) Utvarem materiálových služeb Chomutov přístroj francouzské proveniencence Soriel Probolog Modéle 71 (viz obr). Jednalo se o bedýnku, kupodivu asi tak velkou jako jsou i dnešní moderní „bedny“ vířivoproudých přístrojů (je zajímavé, že i přístroje této doby byly vlastně black nebo blue či jiné barvy boxy, jen ten počítač nebyl k dispozici – z tohoto pohledu se vlastně tak mnoho nezměnilo). Přístroj byl jednofrekvenční a jednakanálový (jednofrekvenčním se myslí použitelnost jedné frekvence v jednom

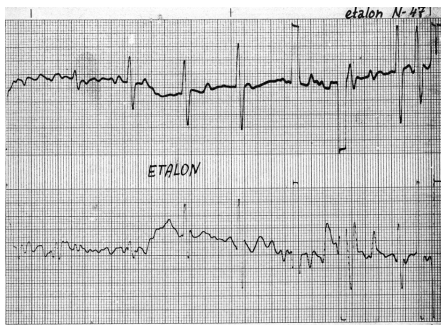
okamžiku, frekvence byly 0,5, 1, 1,5, 5, 10 a 20 kHz). Neměl žádnou obrazovku, výstup byl na papírovou pásku pomocí integrovaného zapisovače, záznam byl tepelný, jeho použitelnost (a čitelnost) byla jen o něco delší než paragony z dnešních (či lépe včerejších) tiskáren na termopapír. Jeho jednobanývý výstup umožňoval nastavit pouze jednu zapisovanou křivku s amplitudou na zvoleném úhlu. Nastavení se provádělo jednoduše na vývrtech a hodnotilo se jen amplitudově. Krátce po Chomutovu byl shodný přístroj v roce 1975 dodán i do ORGREZu Bratislava a pracovníci z Chomutova zacvičovali na tento přístroj pracovníky Orgrezu. Na následujících obrázcích je přístroj Probolog včetně příkladu záznamu pořízeného na trubce s vývrty.



V roce 1981 byl zakoupen, tentokrát již KKMS Chomutov, přístroj VETCO Probolog V202 (VETCO nahradilo Soriel). V tomto případě se jednalo o dokonalejší zařízení, s volbou frekvencí jako u Modelu 71, ale dvoukanálový, který tedy umožňoval

i fázové hodnocení, i když trochu primitivnější. Je nutné podotknout, že frekvence se ani na jednom přístroji nenastavovali, ale měnily se moduly. Záznam byl prováděn na dvoukanálovém zapisovači na termopapír. Přístroj umožňoval i použití dálkově ovládaného tahače. Tímto přístrojem kontrolovalo KKMS (později KDSE) všechny tepelné výměníky v klasické energetice a teplárenství i výměníky při výstavbě a prvních letech provozu JE Dukovany až do konce osmdesátých let. Vzhledem k záznamu na cívky, byly těchto „špulek“ se záznamy stovky a stovky. Přístroj shodného typu byl používán i jinými podniky, např. Spolanou Neratovice.





V roce 1989 došlo ke kvalitativní změně. Byl objednán nový přístroj u firmy VETCO, tentokrát Problog VS203. Firma však nebyla schopna přístroj dokončit v provozuschopném stavu a tak nakonec přístroj skončil v popelnici a VETCO do bedny s vybavením do prostoru vložila zcela jiný přístroj. Útvar KDSE tak získal přístroj Rohmann Elotest B1 a krátce po něm zakoupil i přístroj MC4 stejného výrobce. Oba přístroje, a především B1, jsou přístroje, které i dnes v mnoha ohledech ob stojí ve srovnání

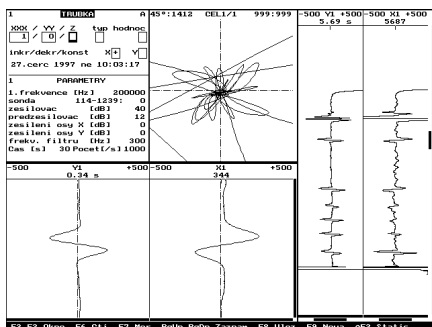
s moderními jednoduchými zařízeními, minimálně v poměrně slušné spolehlivosti a jednoduchosti, obecně jsou ale samozřejmě za zenitem, tak jako porovnání Škody Favorit a Škody Fabie. Obě dojedou, otázkou je jak.

Přístroj B1 je jednofrekvenční přístroj s integrovanou obrazovkou. Zde sluší poznamenat to, co nebylo výše zdůrazněno – přístroje Problog žádnou obrazovku neměly a tudíž při nastavování se muselo vše zapisovat na termopapírovou pásku a zde to měřit případně pravítkem (papíry byly sice s rastrem v cm a mm, ale pravítko bylo důležitým „výpočetním“ instrumentem). Přístroj již umožňoval komfortní a relativně snadné nastavování, byl jednofrekvenční, frekvence se nastavovala v širokém rozsahu, bylo možné různé zesílení v osách x a y, a z výstupu přístroje bylo možné na zapisovač (a později do PC) přivést velikost signálu v jednotlivých osách. Přístroj MC4 byl dokonce dvoufrekvencní s možností mixu vybavený obrazovkou. Na výstupu bylo možné získat signály ze všech frekvencí i mixu. Funkčnost přístroje byla podobná jako u B1. U obou přístrojů byl prováděn v počátcích záznam na papírovou termopásku.



V roce 1993 společnost TEDIKO vyvinula vlastní software, který se stal základem dodnes používaného softwaru při kontrole výměníků vířivými proudy. Postupně se obměňoval přístrojový park o přístroje dalších výrobců a veškeré záznamy od roku 1993 jsou digitální podobě a archivovány. Oba dva výše jmenované přístroje a ukázka záznamu jsou ukázány na následujících obrázcích.

Kromě výše uvedených zařízení se v Československu postupně objevily i další přístroje a to německé firmy Förster a firmy Zetec ze Spojených států. Například Förster byl používán v chemickém průmyslu, přístroje Zetec byly používány pro kontroly trubek parogenerátorů v jaderných elektrárnách.



Později se v provozním zkoušení objevily i přístroje dalších výrobců jako Hocking (dnes GE), R/D-Tech (dnes Olympus) a dalších. Společnost Tediko za svoji historii má zkušenosti především s přístroji Soriel, Vetco, Rohmann, T.M.T., Hocking, GE, R/D-Tech a Olympus, po určitou dobu ale používala v devadesátých letech i přístroje Förster a Zetec (například MIZ40), kromě jiného proběhla také i funkční měření přístrojem firmy Russel. Na trhu byly a jsou i další přístroje, včetně ve formě přístrojových počítačových karet, avšak pro provozní zkoušení v rámci chemických provozů, rafinérií, energetických provozů nepředstavují v České republice v dané době zásadní směr.

Téměř vše zatím uvedené se týká měření trubek vyrobených z nemagnetických materiálů. Začátkem devadesátých let jsme v souvislosti s výstavbou JE Temelín a některými aktivitami v chemickém průmyslu cítili, že je potřeba se věnovat i trubkám z magnetických materiálů – tedy zcela klasickým konstrukčním ocelím a také v té době již pomalu se prosazujícím obojetníkům – trubkám duplexním neboli dvoufázovým ocelím, chcete-li.

Zkoušení těchto trubek v sobě skýtá problémy. Jedinci, kteří v té době vykládali o bezproblémovosti zkoušení, se hluboce mýlili a pokud se i dnes najdou jedinci bagatelizující tuto problematiku a schopní vyzkoušet cokoliv, kdekoliv a jakkoliv, se hluboce mýlí a mýlili. Touto problematikou jsme se začali zabývat již v roce 2002 a téměř deset let trvalo, než jsme se dopracovali ke skutečně uspokojivým výsledkům a našli způsob, jak v mnoha případech měření relevantně přelst. Tím vůbec není řečeno, že TEDIKO vyvíjelo



„světoborného“. Vůbec ne. Pouze se na trhu začala objevovat zařízení, a to postupně od všech významnějších výrobců, která byla určena pro zkoušení trubek z uhlíkových ocelí, a všichni prezentovali, že to jejich zařízení je nejlepší, nejschopnější, prostě nej. Také směry, kterým se jednotliví výrobci vydali, nebyli zcela shodné. Patří dík firmě Russel, která za pomoci společnosti TSI předvedla svoje zařízení na bázi vzdáleného pole

vířivých proudů (i když systém nebylo v té době u nás možné aplikovat), což se nakonec ukázalo jako směr určující.

Mírně jednodušší byla situace v oblasti zkoušení duplexních ocelí, kde nakonec byla do systému našeho měření jistá nástavba T.M.T. a začaly být používány sondy s magnetickým sycením (magnetic bias) s permanentními magnety. Tento způsob ale není zrovna vhodný pro zkoušení běžných uhlíkových ocelí a i v případě kontroly duplexních ocelí je nutné dodržovat určitá pravidla.

Pro zkoušení metodami MFL (čili magnetickými rozptylovými toky) byly jinými subjekty používány zahraniční přístroje, avšak aplikace nebyly používány ve všech případech na vhodném místě. Ale o tom až dále.

Pokud se týká vzdáleného pole vířivých proudů neboli RFT (repote field testing, nebo též RFEC – repote field eddy current) jsme měli postupně možnost otestovat několik přístrojů v různých fázích vývoje metody. Nakonec pro nás zvítězil produkt daný na trh společnostmi R/D-Tech / Olympus /Zetec mající základ v dnes již neexistující vysoce inovativní společnosti R/D-Tech.

4. Vady teplosměnných trubek

Tak jako je různorodá konstrukce výměníků, různorodé jsou materiály, různorodost vlivu prostředí a provozních parametrů, tak různorodé jsou i vady, kterými jsou teplosměnné trubky postiženy. Trubky jsou poškozovány buď místně v závislosti na místních konkrétních poměrech nebo globálně. Obecně lze říci, že záleží na kombinaci, kterou tvoří následující vstupní položky :

- materiál trubek a způsob jejich výroby (tažené, válcované, podélně svařované,...)
- kombinace použitých materiálů (trubky x trubkovnice x přepážky x)
- způsob uchycení trubek v trubkovnici (zaválcované, zavařené,...)
- médium v mezitrubkovém prostoru a v trubkách (jeho složení a znečištění včetně mikrobiologického)
- teplota a proudění média

Základní příčiny a z nich plynoucí druhy poškození jsou na obrázcích na následující straně.

Klasickým globálním poškozením je vliv chemického složení a teploty média vedoucí např. k vnitřnímu koroznímu poškození mosazných trubek v kondenzátorech páry. Klasickým místním poškozením jsou např. trhliny v místě zaválcování trubek v trubkovnici nebo v místech kolísání hladiny média, lokální úbrusy trubek způsobené kmitáním trubek díky nevhodnému proudění páry.

Vady však nevznikají pouze provozováním. Mnoho vad pochází z výroby a montáže a je velmi důležité odlišit, zda vada vznikla a šířila se během provozu. Některé vady z výroby totiž mohou po celou dobu zůstat neměnné a nesnižují výrazně životnost zařízení. Na druhou stranu jiné vady z výroby mohou vést k relativně rychlé ztrátě těsnosti.

Shrneme-li tedy vše výše popsané, dostaneme toto základní rozdělení :

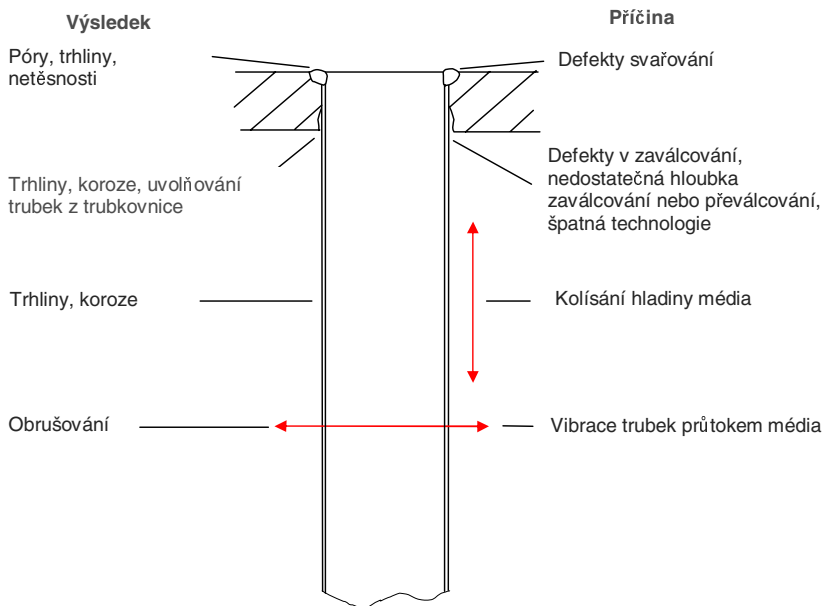
- vady z výroby a montáže (např. neprůvody u podélně svařovaných trubek) **x**
- vady vzniklé a šířící se za provozu
- vady iniciované z vnějšího povrchu **x** vady iniciované z vnitřního povrchu
- vady v místě zaválcování trubek v trubkovnici **x** vady pod přepážkami **x**
- vady na volných částech trubky
- vady způsobené kmitáním trubek vzájemně o sebe **x** kmitáním v přepážkách

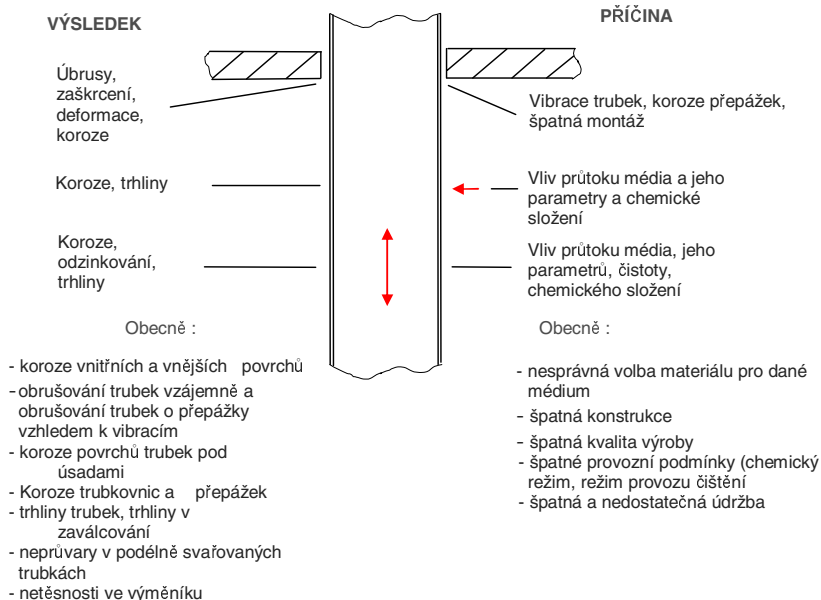
- mechanická poškození trubek **x** korozní či erozní poškození trubek
- vady ve formě korozních důlků (u některých mosazí vyplněných amorní mědí) **x** plošná koroze **x** mezikrystalová koroze
- vady ve formě důlků (např. důlková koroze) **x** trhliny (jak původu korozního tak mechanického)

Kromě toho se při kontrole může vyskytovat množství dalších „vad“ z pohledu zjišťovaných indikací, které však vadami ve skutečnosti nejsou – feromagnetické částice pevně lpící na povrchu trubky případně volně obsažené v úsadách a nečistotách, oblast nějakým způsobem tepelně ovlivněná při výrobě se změněnou strukturou apod. Ty jsou potom zdrojem falešných indikací, v mnoha případech se tvářících jako vady. Dále jsou to různá tzv. naražení, neboli místa, kde je na trubce vrub, zub apod. Ta se dají odlišit dobře avšak v taktu mechanicky poškozených místech občas vznikají trhliny a výsledná indikace je tedy superpozicí dvou vlivů ovlivňujících pole.

5. Volba metody kontroly

Jak již bylo řečeno, teplosměnné trubky jsou vyráběny z různých materiálů a různým způsobem, mají i různé provedení. Stejně tak je k dispozici několik způsobů kontroly a to nejenom zde popisovaných, kromě elektromagnetických metod také kontrola ultrazvukem, vizuální kontrola přímá a nepřímá.





Základní přehled zde popisovaných metod kontroly je v následující tabulce :

Metoda	Název	
ET	Eddy current testing	Kontrola vířivými proudy
ET MB	Eddy current testing – Magnetic Bias	Kontrola vířivými proudy s magnetickým sycením
RFT	Remote field testing	Kontrola ve vzdáleném poli vířivých proudů
NFT	Near field testing	Kontrola v blízkém poli vířivých proudů
MFL	Magnet flux leakage	Kontrola magnetickými rozptylovými toky

Použití těchto metod pro jednotlivé druhy materiálů popisuje další tabulka :

Metoda		Příklad
ET	nemagnetické materiály	austenitická ocel, titan, mosaz, mědinikl, měď,
ET MB	magnetické materiály	duplexní ocel
RFT	magnetické materiály	uhlíkové oceli
NFT	magnetické materiály	uhlíkové oceli
MFL	magnetické materiály	uhlíkové oceli

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že pro zkoušení máme na výběr více možností a v některých případech, jako u magnetických materiálů, je zcela jedno, kterou z nich zvolíme. Ale není tomu tak. Každá z těchto metod má svá omezení a také vypovídací schopnosti. Základními informacemi, které umožňují vyhodnotit indikaci získanou od vady v materiálu, jsou fáze a amplituda. Fázové rozlišení však bohužel v některých případech není k dispozici a hodnocení je možné provádět pouze na základě amplitudy, což může být velice zavádějící.

V další tabulce je uveden přehled a zároveň rozdíl v relativních rychlostech zkoušení (zkoušení vířivými proudy představuje základní-maximální rychlost) pro základní představu co je a není možné :

Metoda	Fáze	Amplituda	Rychlost zkoušení
ET	Ano	Ano	1
ET MB	Ne *)	Ano	< 1
RFT	Ano	Ano	<< 1
NFT	Ne *)	Ano	<<< 1
MFL	Ne	Ano	< 1

*) v těchto případech je obtížné mluvit o fázovém rozlišení

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že některé metody nejsou nejvhodnější, vzhledem k tomu, že chybí důležitá informace – fáze. Proč se tedy používají. To vyplývá z poslední rozlišovací tabulky :

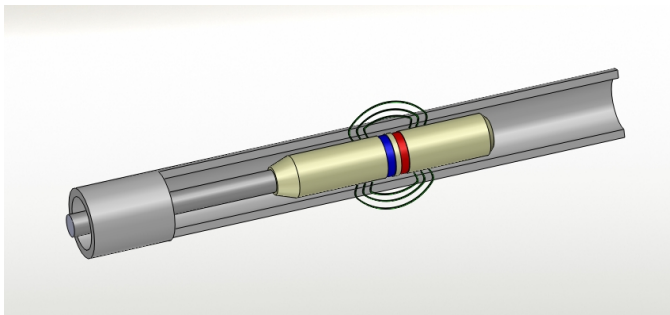
Metoda	Lze kontrolovat	Nelze
ET	v podstatě libovolnou konfiguraci, trubky s žebry i bez žeber, ohyby s rozumnými průměry oblouku	magnetické materiály
ET MB	trubky s duplexních ocelí	běžné magnetické materiály (jde o to, že je obtížné zkonstruovat dostatečně malou sondu s velkým sycením pro dané tloušťky)
RFT	feromagnetické materiály, trubky bez žeber, v podstatě nelze oblouky	trubky s žebry či přepážkami příliš blízko u sebe, vady v trubkovnici, malé vady přímo pod přepážkami
NFT	feromagnetické materiály, trubky s žebry, nelze oblouky	
MFL	feromagnetické materiály, trubky s žebry či přepážkami blízko u sebe, v podstatě nelze oblouky	trubky s větší tloušťkou stěny

Na závěr několik příkladů pro ilustraci. Máme-li například klasický kondenzátor páry (případně variantu základního ohřívače apod.), které jsou téměř vždy z trubek z nemagnetických materiálů, pak jistě použitou metodou kontroly bude metoda vířivých proudů. V případě běžných výměníků z uhlíkové oceli většinou použijeme metodu RFT, v případě, že přepážky budou blíže u sebe metodu MFL.

V případě vzduchových chladičů většinou vyrobených z uhlíkových ocelí s přidanými žebry je k dispozici MFL příp. NFT.

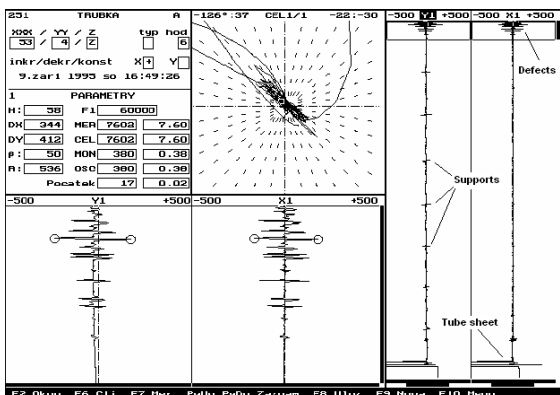
6. Principy

Konvenční vířivé proudy používané ke kontrole nemagnetických materiálů lze použít i pro kontrolu žebrovaných trubek, rychlost pohybu zkušební sondy je až 2 m/s, i když většinou se používá rychlost kolem 1 m/s. V přepravních i provozních zkouškách se většinou používá diferenční mód, tímto způsobem jsou zjišťovány vady typu pittingu a trhlin. V případě zjišťování dlouhých vad např. typu úbytku tloušťky stěny se používá absolutní mód. Pro eliminaci nežádoucích signálů se používá mixování signálu. Na následujícím obrázku je typická neohebná sonda vířivých proudů.



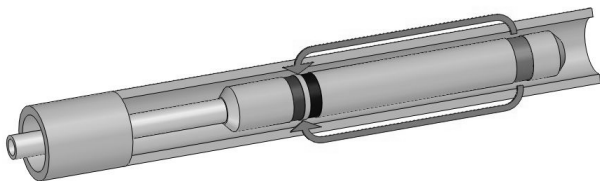
Pro měření je nejdůležitější volba správné frekvence, správný kalibrační standard vyrobený ze stejného materiálu a rozměrů, se stejnými fyzikálními a dalšími vlastnostmi. Dále je nutné zvolit správnou sondu co největším zaplněním).

Před mnoha lety jsme z těchto důvodů vytvořili charakteristiky závislosti fáze a amplitudy na frekvenci pro jednotlivé materiály a různé vady. Tyto charakteristiky jsou velmi užitečné k pochopení změn fáze indikací různých vad v závislosti na frekvenci. Fáze charakterizuje hloubku vady a je nejdůležitějším parametrem vzhledem k tomu, že fáze signálu závisí na této hloubce. Z hlediska zkušebních standardů není nutné vždy používat standardy dané normami jako je např. ASTM (ASME). Pro posuzování korozního napadení je v mnoha případech používat vyjiskřené vady a to i z vnitřního povrchu. Na následujícím obrázku je typický záznam z měření.

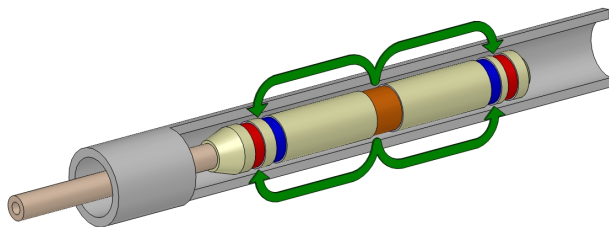


Technika zkoušení pomocí vzdáleného pole je průchozí technikou. Detekuje se pouze pole, které zcela proniká stěnou trubky. Tato nepřímá vazební dráha spojuje budič a snímač, které jsou uvnitř trubky ve vhodně zkonstruované sondě. Vyhodnocení obvykle využívá napět'ovou rovinu polárního grafu vektoru pronikajícího pole, aby se tím ohodnotily vlastnosti indikace defektu.

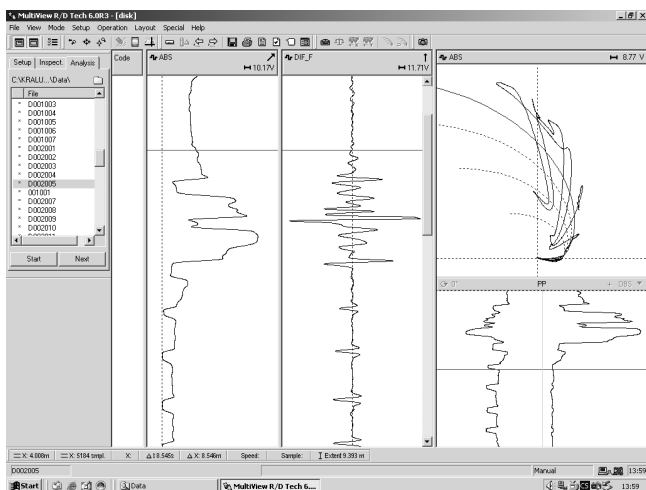
Frekvence se volí dostatečně nízká tak, aby obvodové vířivé proudy umožnily pronikat budícímu poli axiálně i radiálně od budiče. Až dosáhne pole vnější trubky, pohybuje se pak relativně bez překážek pryč od čela budiče a v případě ocelových trubek má sklon se šířit oběma směry po vnější straně trubky. Část tohoto vnějšího pole se šíří zpět stěnou trubky dovnitř a uzavírá tzv. nepřímou vazební dráhu. Ve vzdálenosti asi dvou či více průměrů trubky od budiče tak může být uvnitř trubky detekováno vzdálené pole, které prošlo dvakrát stěnou trubky a je ještě stíněno před přímou vazbou budícího pole na vnitřním povrchu trubky. Toto vzdálené pole je citlivé na vady, které se nacházejí v nepřímé vazební dráze ve stěně trubky. Vířivé proudy působící proti průchodu pole stěnou způsobují útlum a zpoždění. Plná tloušťka stěny způsobuje maximální útlum a maximální časovou prodlevu. Jakékoli defekty nebo porušení ve stěně trubky nebo kdekoli jinde v dráze šířícího se pole (např. úbytek materiálu), poruší a zdeformují tyto původní dráhy vířivých proudů. Defekty se tedy v oblasti vzdáleného pole projeví zmenšeným útlumem a kratší časovou prodlevou.



Na předchozím obrázku je sonda v tzv. provedení singl. Kromě toho se používají i sondy v provedení dual. Na rozdíl od sond vířivých proudů však sondy RFT neobsahují pouze jeden obvyklý diferenční snímač, ale dva až tři cívkové systémy - budící cívku a jeden až dva detektory umístěné ve vzdálenosti větší než dva průměry trubky od budící cívky. Případně existuje i varianta dual sondy, která má dvě budící cívky a jeden detektor.



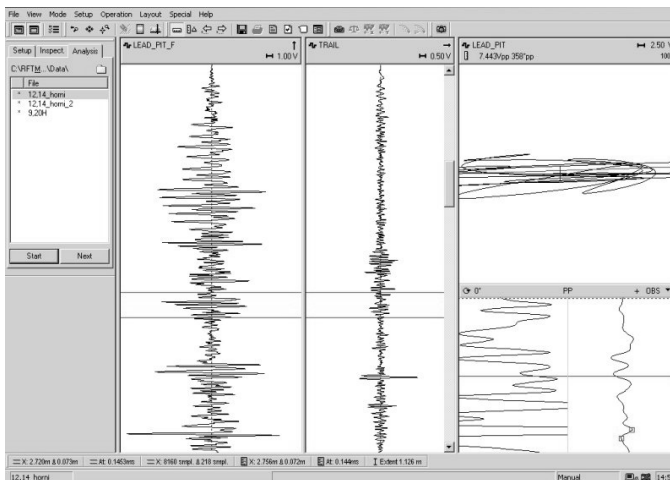
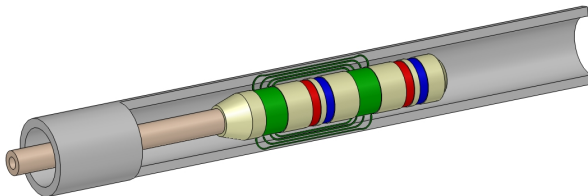
Pro zobrazení se používá tzv. napěťová polární podobná impedanční rovině používané při běžném měření vířivými proudy, není však mezi nimi vztah. V této rovině je zobrazena tzv. útlumová spirála založená na rovnici hloubky vniku. Tato útlumová spirála je prakticky stopa špičky vektoru budícího pole, když prochází napříč nepřímou vazební dráhou. Amplituda je rychle exponenciálně tlumena spolu s rostoucím fázovým zpožděním. Fázové zpoždění je úměrné tloušťce stěny, kterou pole prochází. Každé tloušťce stěny přísluší na útlumové spirále bod daný zpožděním a amplitudou. Zjednodušeně polovina fázového zpoždění nastává ve stěně trubky blízko budiče a zbývající polovina ve stěně blízko detektoru. Při kontrole trubky bez vad bude vektor pole, zaznamenávaný snímačem, většinu času v pracovním bodě plně tloušťky, který odpovídá maximálnímu útlumu a fázovému zpoždění. Vektor vady však bude mít zmenšené fázové zpoždění (pootočeno na útlumové spirále proti směru hodinových ručiček) přímo úměrně zmenšení tloušťky stěny a k tomu i odpovídající zvětšenou amplitudu. Platí tedy, že čím větší vada (jak hlubší tak rozsahem po obvodu), tím vektor vady vykazuje menší fázové zpoždění a menší útlum. Na následujícím obrázku je typický záznam z měření metodou RFT.



Kontrola trubek z vodivého materiálu pomocí techniky vzdáleného pole je v podstatě kontrolou metodou vířivých proudů neboli metodou elektromagnetickou. Trubkou se též protahuje sonda vypadající vnějškově jako klasická sonda vířivých proudů. Měřicí sondy používané pro RFT také umožňují zapojením snímačů jak absolutní tak diferenční hodnocení. Výrazným rozdílem je rychlost zkoušení, protože ta je podstatně menší. Je to především z toho důvodu, že absolutní kanál slouží k hodnocení větších a plošných vad a diferenční kanál drobnějších menších vad typu důlků. A zde při větší rychlosti výrazně klesá zjištělnost těchto vad.

Technika zkoušení pomocí magnetických rozptylových toků je založena na principu vlivu vad na magnetické pole. Tato metoda zkoušení je tedy omezena pouze na zkoušení feromagnetických materiálů. Vzhledem k principu není závislá na tom, zda trubky mají z vnější strany žebra či nikoliv, ani není závislá na počtu přepážek ve výměníku. Sonda obsahuje silné magnety, které vytvářejí magnetické pole. Pokud

se vada dostane mezi magnety, vytváří se na vadě rozptylové toky vystupující nad povrch, které jsou snímány cívkami umístěnými mezi magnety. Tzv. vlečný detektor na konci sondy slouží k detekování zbytkového magnetismu. Na následujících obrázcích je typická sonda MFL a příklad záznamu.

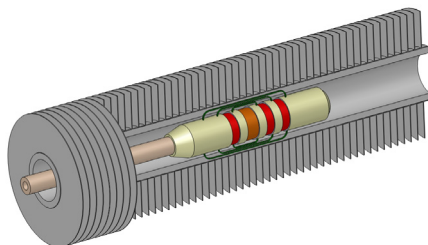


Tato metoda je velmi citlivá na vady typu pitting, příčné trhliny a úbytky stěny. Inspekční rychlost je v podstatě srovnatelná s vířivými proudy, tzn. kolem 1 m/s. Signál je ale citlivý na změnách rychlosti, proto je nutné při zkoušení dodržovat stále konstantní rychlost. Problémem metody je, že hodnocení je možné pouze na základě amplitudy. A to není nejpřesnější způsob, protože vady různého druhu různé hluboké se „tváří“ stejně, amplituda je ovlivňována jak hloubkou vady tak její velikostí a navíc i rychlostí pohybu sondy. Ze zde uváděných metod je metodou, již by se nikdy neměla dávat přednost, pokud existuje možnost zkoušení pomocí RFT. Zkušenosti nás vedou k závěru, že kontroly provedené v minulosti metodou MFL a které nereflekovaly na specifikum metody a naše společnost prováděla další provozní měření metodou RFT či MFL, nebyli jsme v mnoha případech schopni potvrdit výsledky předchozích měření, které byly většinou nadsazené. Bohužel ale např. ale

v případě zkoušení vzduchových chladičů s žebry ale jiné možnosti než MFL (případně NFT) není.

Metoda zkoušení v blízkém poli je poslední zde diskutovanou metodou. Je z nich nejnovější a je vhodná k použití tam, kde ostatní jsou nepoužitelné. Metoda MFL má totiž problémy v případě větších tloušťek stěn (ale to konečně mají všechny metody), metoda RFT má problémy s žebry. Zde je tedy ožná náhrada, která má však v daném okamžiku ten problém, že hodnocení je též především amplitudové a rychlost zkoušení je nejmenší ze všech používaných metod. Se sondami tohoto typu jsme zatím provedli několik zkušebních měření a hledáme operační okno pro jejich použití. Proto zatím nelze publikovat žádné větší informace z běžného „každodenního“ používání.

Na následujícím obrázku je ukázána typická sonda NFT.



7. Závěr

Uvedené metody slouží k předprovoznímu a především provoznímu zkoušení trubek tepelných výměníků. V energetice, teplárenství, chemickém průmyslu, rafinériích, potravinářském průmyslu atd. Toto zkoušení ale není dobré chápat ve smyslu „změřím a zapomenu“. Provozní diagnostika má určovat i trend a rychlost poškozování zařízení. Proto jedno samotné měření může ukázat maximálně okamžitý stav, tzn. výsledkem mohou být okamžitá či následná nápravná opatření. Například v případě, že zařízení vykazuje vady, které by způsobily nebo dokonce již způsobují netěsnost, zaslepení trubek. Výsledkem měření by ale také mělo být, jak dlouho je možné ještě výměník provozovat, kdy přistoupit k celkové výměně atd.

Naše společnost kontroluje ročně sto až dvě stě výměníků ročně a to od malých výměníků po velké kondenzátory s tisíci (někdy desetitisíci) trubek. Ročně to činí v průměru více než 150 tisíc jednotlivých kusů trubek. Podle provozovatele se měření provádí buď z důvodů dlouhodobého sledování stavu zařízení, z důvodu okamžitých nápravných opatření po zjištění netěsnosti, z důvodu zvýšení životnosti výměnou pouze části trubek (poškozených), z důvodu analýz založených na odhadu rizika (RBI – Risk Based Inspection). Je nutné brát v úvahu, že následky poruchy mohou být nejenom ekonomické, mohou vést i k zásadnímu poškození životního prostředí a v nejhorším případě i k poškození zdraví případně i mohou vést k celkové havárii zařízení jehož jsou součástí – například v jaderné energetice či chemickém/rafinérském průmyslu.

Součástí měření nejsou v mnoha případech pouze kontroly elektromagnetickými metodami, ale i posouzení výměníku z hlediska korozního stavu (včetně jeho konstrukčních částí), tedy vizuální kontrola přímá a nepřímá pomocí videoendoskopů, ověřování ultrazvukem případně radiograficky, zkoušení těsnosti atd. Výstupem je

potom nejenom kompletní hodnocení všech trubek a jejich rozdělení do kategorií podle poškození ale i celkové zhodnocení a doporučení k zaslepení trubek, k dalším kontrolám, výměně výměníku.

Kontroly teplosměnných trubek se z tohoto pohledu jeví jako velmi důležitá součást nedestruktivního testování ač při srovnání s ostatními metodami nezaujímá na trhu takový objem činností.

Reference

- Jiří Skotnica, Miloslav Procházka Zkoušení trubek z magnetických materiálů s využitím vzdáleného pole vířivých proudů, Konference ČNDT Defektoskopie 1996
- Jiří Skotnica, Miloslav Procházka Posouzení způsobu kontroly teplosměnných trubek vyrobených z dvoufázových ocelí metodami RFEC a metodou s magnetickým sycením, Konference ČNDT Defektoskopie 1997
- Miloslav Procházka Vady trubek tepelných výměníků a jejich zkoušení, Konference ČNDT Defektoskopie 2001
- Miloslav Procházka, Roman Beneš Technika zkoušení ve vzdáleném poli, Konference ČNDT Defektoskopie 2004
- Miloslav Procházka The Methodologies of Heat Exchanger NDT Kontrol, EFC Praha 2004



QUALITATIVE RELATIONSHIPS BETWEEN RESIDUAL MAGNETIC FIELD AND RESIDUAL STRESS

Maciej ROSKOSZ, Andrzej RUSIN, Michał BIENIEK

The Silesian University of Technology

Contact e-mail: maciej.roskosz@polsl.pl

Abstract

The impact of stress on changes in magnetisation is one of the most complex issues of magnetism. Magnetic methods make use of the impact of stress on permeability, hysteresis and magnetic Barkhausen noise, which are examined with fields with a great strength and a small frequency. The paper presents an analysis of the impact of residual stress resulting from inhomogeneous plastic deformations in the notch area on the changes in the strength of the residual magnetic field (RMF). The RMF on the surface of the component is the superposition of the simultaneous effect of the shape, the anisotropic magnetic properties of the material, as well as of the values of the components of a weak external magnetic field (most commonly – the magnetic field of the Earth). Distributions of the RMF components were measured on the surface of samples with a various degree of plastic strain. The finite element method was used to model residual stress in the samples. The impact of residual stress on changes in the residual magnetic field was shown. A qualitative correlation was found between places with residual stress and areas with increased values of the gradients of the RMF components. Further research is now in progress in order to develop the quantitative relationships.

Key words: residual magnetic field, residual stress, plastic deformation

1. Introduction

Residual stress is the stress which occurs in construction components which are not subjected to external loads. It is caused by inhomogeneous deformations which result from mechanical and thermal stresses and from the stress in the crystal lattice [1 – 3].

The possibilities of evaluating applied and residual stresses on the basis of the residual magnetic field (RMF) were indicated in [4–9]. [4–6] showed the possibility of the stress state evaluation on the basis of RMF measurements. In [5] the relationships between the gradient of the RMF normal component and stress measured with the X-ray diffraction method were studied. In [4] the impact of the degree and distribution of stress on the values of the RMF components was found for static tensile loads. For varying loads it was found that there was an influence of the stress amplitude and the number of cycles. L.H. Dong et al. [7] and C.L. Shi et al. [8] found a relationship between the gradient of the normal component and previously applied static tension load. S. Changliang et al. [9] report a considerable impact of the notch effect coefficient on the gradient of the normal component of the RMF.

The paper presents an analysis of qualitative relationships between the RMF distributions on the surface of notched samples with plastic deformations and the distributions of calculated values of residual stress.

2. Experimental details

The samples were of the form of 2-mm thick flat bars made of S235 steel whose chemical composition is given in Table 1. A notch was made in the samples in the shape of a slot in the centre of the sample – variant A in Fig. 1, and a slot on the edge of the sample – variant B in Fig. 1. The relationship between plastic strain and engineering stress for S235 steel is shown in Fig. 2. The samples were not primarily demagnetised, but they featured low values of the gradients of the RMF components.

The samples were loaded on a tensile testing machine Galdabini Sun 10P. After the desired loads were applied, the samples were unloaded and examined beyond the testing machine. The examination was carried out always at the same place and with the same position of the sample.

2.1. Residual magnetic field measurements

The magnetic field measurements were conducted in the "measurements area" marked in Fig. 1, with a scanning increment of 1 mm along vertical lines which were 4 mm apart from each other. The magnetometer TSC-1M-4 with the measuring sensor TSC-2M supplied by Energodiagnostika Co. Ltd. Moscow was used for the measurements. The instrument was calibrated in the magnetic field of the Earth, whose value was assumed at 40 A/m.

The measurements resulted in the values of 3 RMF components on the sample surface (Fig. 1):

- $H_{t,x}$ – tangential component measured in the direction perpendicular to the applied load,
- $H_{t,y}$ – tangential component measured in the direction parallel to the applied load,
- $H_{n,z}$ – normal component.

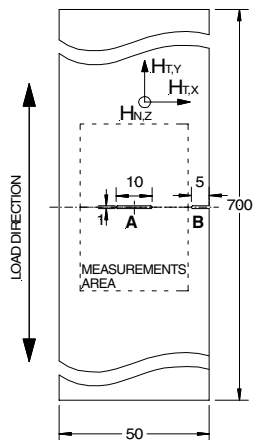


Fig. 1. Experimental sample

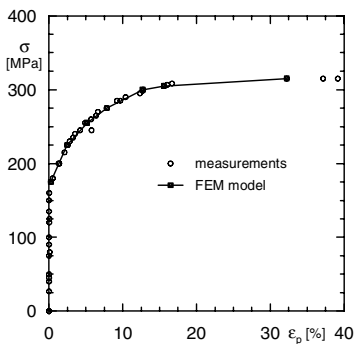


Fig. 2. Relationship between plastic strain and engineering stress for S235 steel

Table 1. Chemical composition of the sample material

Steel grade	Chemical composition of steel (%)					
	C	Si	Mn	P	S	N
S235	max 0.17	-	max 1.40	max 0.045	max 0.045	max 0.009

2.2. Residual stress calculations

The residual stress values were determined by means of the finite element method (FEM). The software package Ansys 12.1 was used.

The tensile curve for steel S235 was approximated using a multilinear model Fig. 2). The material properties were assumed as isotropic. Due to the small thickness of the samples, the problem was modelled as a two-dimensional one, assuming that it was a plane stress state. The numerical model mesh, which fully corresponded to the geometry of the samples, was built on the basis of eight-node quadrangular elements.

The boundary conditions included the fixing of the model on one hand, and the application of tensile loads corresponding to the force set by the strength testing machine on the other.

The way in which the calculations were carried out made it possible to take account of the plastic strain accumulation in each subsequent cycle of the loading of the sample, i.e. the stress-strain state determined in each calculation step constituted the initial state used to determine the stress-strain state in the next step. For the needs of the performed analyses, the results were derived for the area covered by the RMF measurements – Fig. 1.

3. Results and discussion

Due to the magnetoelastic effect, mechanical stress has an influence on the energy anisotropy of magnetic domains, which most often results in changes in permeability. The direction of the anisotropy depends on magnetostriction. For materials with positive magnetostriction, the magnetic moments tend to align in parallel to the direction of tensile stress, and perpendicular to compressive stress. In materials with negative magnetostriction, opposite phenomena occur – the magnetic moments tend to align perpendicular to the direction of tensile stress, and in parallel to compressive stress [10, 11].

The impact of uniaxial stress on the domain structure can be compared to the effect of a magnetic field with strength H_σ which is equal to the stress

$$H_\sigma(\varphi) = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \left(\frac{\Delta\lambda}{AM} \right)_T (\cos^2\varphi - \nu \sin^2\varphi) \quad (1)$$

where σ is stress, λ – magnetostriction, μ_0 – magnetic permeability of free space, M – magnetisation, φ – the angle between the stress axis and the direction of magnetic field H_σ , and ν – Poisson's ratio [10 – 14].

In order to describe the impact of the complex stress state, the notion of equivalent stress is introduced, i.e. of a fictitious uniaxial stress whose amplitude will lead to the same change in susceptibility as real multiaxial stress [15 – 20]. The problems related to the impact of a complex stress state on changes in magnetisation are issues whose description and modelling, due to potential application for stress measurements, are the subject of current research [15 – 20].

Representative results of the RMF measurements in the "measuring area" marked in Fig. 1 of samples with plastic deformations are presented in Fig. 3 for notch A, and Fig. 5 for notch B. The location and dimensions of notches A and B are presented in Fig. 1. Fig. 4 and Fig. 6 show calculated distributions of absolute values of gradients of RMF components. In further consideration, the concept of gradient will be understood as its absolute value. The FEM modelling results are presented in Figures 7a to 7e for notch A, and 8a to 8f for notch B.

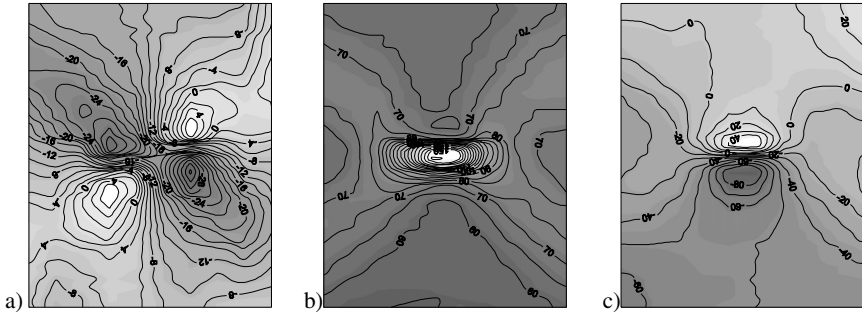


Fig. 3. Distributions of RMF components – notch A: a) $H_{T,X}$, b) $H_{T,Y}$, c) $H_{N,Z}$

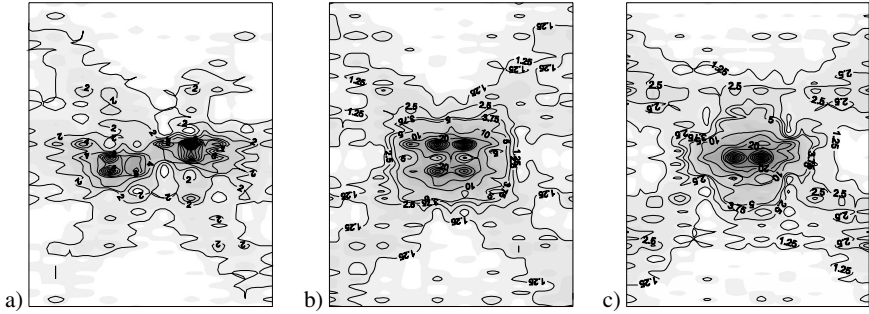


Fig. 4. Distributions of gradients of RMF components – notch A: a) $dH_{T,X}/dx$, b) $dH_{T,Y}/dx$, c) $dH_{N,Z}/dx$,

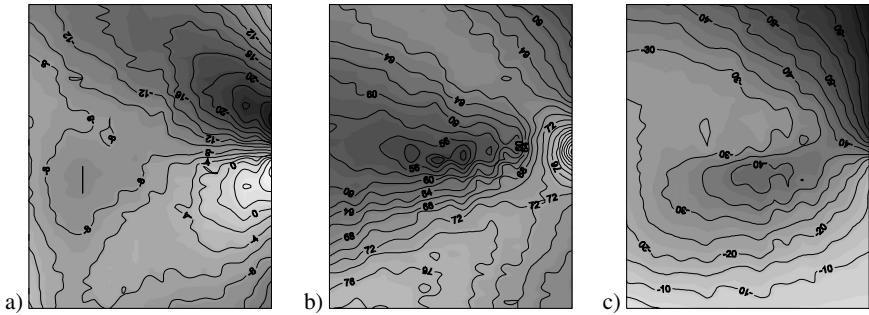


Fig. 5. Distributions of RMF components – notch B: a) $H_{T,X}$, b) $H_{T,Y}$, c) $H_{N,Z}$,

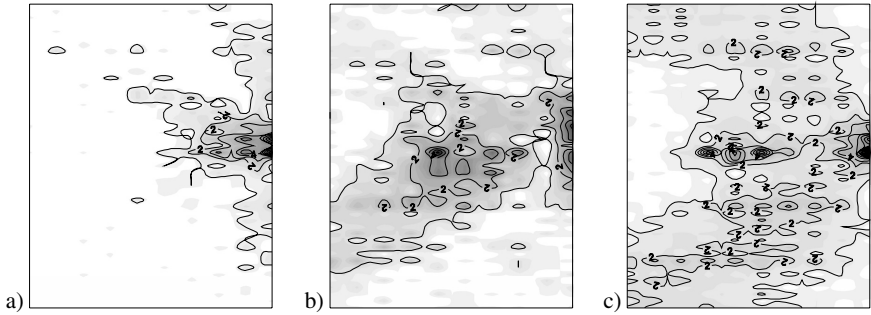


Fig. 6. Distributions of gradients of RMF components – notch B: a) $dH_{T,x}/dx$, b) $dH_{T,y}/dx$, c) $dH_{N,z}/dx$,

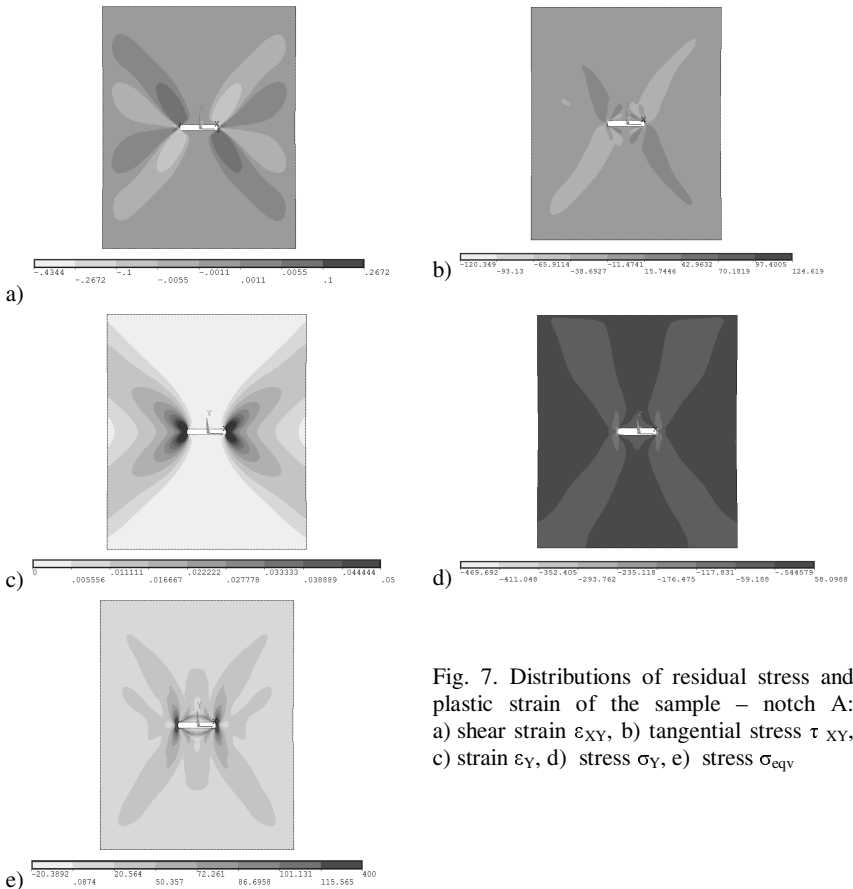


Fig. 7. Distributions of residual stress and plastic strain of the sample – notch A: a) shear strain ϵ_{XY} , b) tangential stress τ_{XY} , c) strain ϵ_Y , d) stress σ_Y , e) stress σ_{eqv}

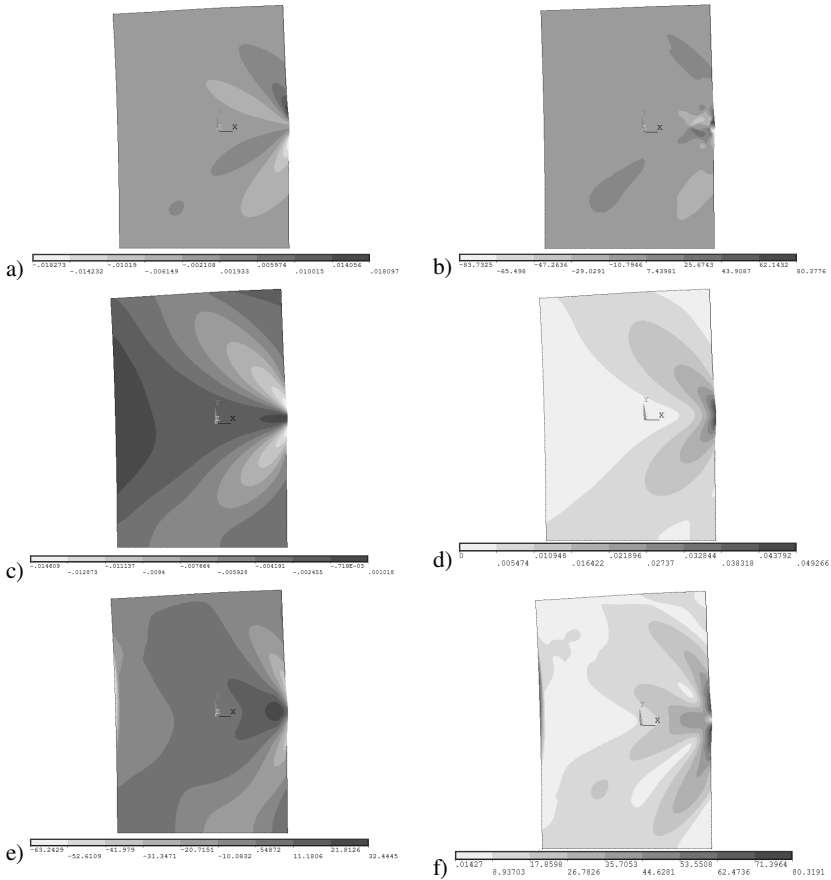


Fig. 8. Distributions of residual stress and plastic strain of the sample – notch A: a) shear strain ϵ_{XY} , b) tangential stress τ_{XY} , c) strain ϵ_X , d) strain ϵ_Y , e) stress σ_Y , f) stress σ_{eqV}

The residual magnetic field of a ferromagnetic element, also known as the Self Magnetic Flux Leakage, is the sum of the simultaneous effect of the geometry of the object and of the magnetic, electrical and mechanical properties of the material of which it was made in the magnetic field of the Earth. Due to magnetomechanical coupling, the stress which occurs in the object (both active and residual) has an impact on the RMF. Assuming invariability of the object location in the magnetic field of the Earth, invariability of the Earth's magnetic field itself (the assumption is not fully true) and lack of significant changes in geometry (there are some slight variations caused by plastic strain), the changes in the RMF of the deformed object are the result of the action of stress.

In the presented analysis, and assuming positive magnetostriction, both the negative values of residual stress σ_X and the positive values of residual stress σ_Y should cause an increase in tangential component $H_{T,Y}$.

On the basis of [3] and [21] and of the testing results presented in this paper, analogies were found between the distributions of the RMF components and their gradients and the distributions of the values of plastic strain and residual stress.

Similarities were found between the distributions of shear plastic strain $\varepsilon_{X,Y}$ (Fig. 7a, 8a) and the distributions of tangential component $H_{T,X}$ (Fig. 3a, 5a), as well as between plastic strain ε_Y (Fig. 7c, 8d) and component $H_{T,Y}$ (Fig. 3b, 5b). Also, the distributions of equivalent (von Mises) residual stress σ_{eqv} (Fig. 7e, 8f) can be compared to gradients of normal component $dH_{N,Z}/dx$ (Fig. 4c, 6c), the stress values in direction Y σ_Y (Fig. 7d, 8e) – to gradients $dH_{T,Y}/dx$ (Fig. 4b, 6b), and the values of tangential stress $\tau_{X,Y}$ (Fig. 7b, 8b) – to gradients $dH_{T,X}/dx$ (Fig. 4a, 6a). Generally, it can be stated that there are qualitative relationships between plastic deformations and the RMF magnitude, as well as between the RMF gradients and residual stress.

4. Conclusions

A relationship between the stress and strain state of a ferromagnetic and its residual magnetic field was found. There are qualitative relationships between plastic deformations and the RMF magnitude, as well as between RMF gradients and residual stress. This provides a basis for further research aiming at the development of quantitative relationships that will make it possible to evaluate the state of the material by means of RMF measurements. The results of studies focused on the development of an algorithm for the evaluation of residual stress on the basis of RMF gradients are presented in [3] and [21].

References

- [1] Altpeter I., Dobmann G., Kröning M., Rabung M., Szielasko S., Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the IInd and IIIrd order, NDT&E International 42 (2009) 283–290
- [2] P.J. Withers, M. Turski, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle Recent advances in residual stress measurement International Journal of Pressure Vessels and Piping 85 (2008) 118–127
- [3] Maciej Roskosz , Michał Bieniek Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements, NDT&E International 45 (2012) 55–62
- [4] Roskosz M. Gawrilenko P, Analysis of Changes in Residual Magnetic Field in Loaded Notched Samples, NDT&E International 41 (2008) 570-576
- [5] Masatoshi Kuroda, Shinsuke Yamanaka, Koji Yamada, Yoshihiro Isobe, Evaluation of residual stresses and plastic deformations for iron-based materials by leakage magnetic flux sensors Journal of Alloys and Compounds 314 (2001) 232–239
- [6] John W. Wilson, Gui Yun Tian, Simon Barrans Residual magnetic field sensing for stress measurement Sensors and Actuators A 135 (2007) 381–387
- [7] Lihong Dong, Binshi Xu, Shiyun Dong, Li Song, Qunzhi Chen, Dan Wang Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel NDT&E International 42 (2009) 323–327
- [8] C.L. Shi, S. Y. Dong, B. S. Xu, P. He Metal magnetic memory effect caused by static tension load in a case-hardened steel Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 413–416
- [9] Shi Changliang, Dong Shiyun, Xu Binshi, He Peng Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load NDT&E International 43 (2010) 8–12

- [10] L.L. Mierczak, D. C. Jiles, G. Fantoni A New Method for Evaluation of Mechanical Stress Using the Reciprocal Amplitude of Magnetic Barkhausen Noise IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 2, 2011 459-65
- [11] Tomohiro Yamasaki, Shinji Yamamoto, Masahiko Hirao Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel NDT&E International, Vol. 29, No. 5, pp. 263-268, 1996
- [12] D.A. Kaminski D.C. Jiles , S.B. Biner, M.J. Sablik Angular dependence of the magnetic properties of polycrystalline iron under the action of uniaxial stress Journal of Magnetism and Magnetic Materials 104-107 (1992) 382 384
- [13] Lu Li, David C. Jiles Modified Law of Approach for the Magnetomechanical Model: Application of the Rayleigh Law to Stress IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 5, SEPTEMBER 2003 3037
- [14] D. C. Jiles, "Theory of the magnetomechanical effect," J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 28, p. 1537, 1995.
- [15] K. Kashiwaya, Fundamentals of nondestructive measurement of biaxial stress in steel utilizing magnetoelastic effect under low magnetic field, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, p. 2932, 1991.
- [16] C. S. Schneider, J. M. Richardson, "Biaxial magnetoelasticity in steels," J. Appl. Phys., vol. 53, p. 8136, 1982.
- [17] M.J. Sablik, L.A. Riley, G L Burkhardt, H Kwun, P Y. Cannell, K.T Watts, R.A. Langman, Micromagnetic model for biaxial stress effects on magnetic properties Journal of Magnetism and Magnetic Materials 132 (1994) 131-148
- [18] J. Pearson, P. T. Squire, M. G. Maylin, J. G. Gore Biaxial Stress Effects on the Magnetic Properties of Pure Iron IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, NO. 5, SEPTEMBER 2000 3251-3
- [19] Laurent Daniel, Olivier Hubert Equivalent Stress Criteria for the Effect of Stress on Magnetic Behavior IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 8, AUGUST 2010 pp.3089-92
- [20] Daniel Peter Bulte The Pursuit of Hysteresis in Polycrystalline Ferromagnetic Materials Under Stress IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 45, NO. 1, JANUARY 2009 83
- [21] Maciej ROSKOSZ, Michał BIENIEK Analysis of the Similarity between Residual Magnetic Field Distribution and the Stress-Strain State for 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) Steel, JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 14 Applied Electromagnetic and Mechanics, G.Rubinacci, A.Tamburrino, F.Villone, T.Takagi (eds.) 2011 p.221-2



LOW-RESISTANCE MEASUREMENTS AS A TOOL TO DIAGNOSE THE ARMATURE CORROSION

Kristýna ŠAMÁRKOVÁ¹, Zdeněk CHOBOLA¹

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

Contact e-mail: chobola.z@fce.vutbr.cz

Abstract

This article focuses on the analysis of corrosion of reinforcing steel by measuring the electrical resistance. It describes the methodology by using the Thomson double bridge. The article presents the results of measurements obtained after applied 6 months controlled degradation in aqueous NaCl solution.

Key words: *corrosion of reinforcing steel, electrical resistance, Thomson double bridge*

1. Introduction

Given that we are dealing with corrosion study using acoustic methods, such as acoustic emission, the frequency of inspections, or the non-linear ultrasonic defectoscopy [1-7], we consider it necessary to compare the results obtained with commonly used conventional methods of study of corrosion such as monitoring changes in the extent of reinforcement, change in weight, measurement electrical resistance, and monitoring of the distribution of chemical potentials between the steel armature and free surface of concrete. This article focuses on the analysis of corrosion of reinforcing steel by measuring the electrical resistance.

Steel armature corrosion results in irreversible deterioration of constructions and impairment of their technical characteristics, which may, in the upshot, result in complete destruction of the structure in question.

Under the steel armature corrosion, chemical or electrochemical process induced impairment of the armature surface is understood. These effects are essentially omnipresent. One of the methods to protect the steel armatures against corrosion consists in their passivation on the basis of a high pH-value of concrete. Fresh concrete elements show a pH-value of 12 to 13. In this value range, the armature is corrosion protected by a passivation film on the surface being in contact with the concrete. Unfortunately, the pH-value is going down progressively in consequence of the environment aggressive effects. If the concrete pH-value drops below 9 the armature passivation ceases to work and moisture-induced corrosion processes start attacking the armature surface. It results in uniform, pitting, inter-crystal or slotted corrosion.

A number of substances occurring in the environment bring about the concrete Ph-value drop and the generation of cracks, which in turn allow the aggressive media to penetrate up to the armature surface. Chlorides, organic and inorganic acids and alkalis, both in liquid and solid state, count among the most aggressive agents. Micro-organisms, calcareous and magnesium expansion, concrete contained water

periodical frost and thaw cycles, mineral lubricants and oils as well as concrete drying-out appear to be of importance in this aspect, too.

All of them generate an irreversible degradation of the concrete. It is manifested as the concrete disintegration, spalling, crack development and infiltration of water containing in many cases some aggressive substances it brings to the steel armature. At the same time, the concrete pH-value drops significantly. Concrete is no longer able to passivate the armature which is, therefore, completely exposed to the aggressive environment.

Among the processes causing the pH-value to drop, concrete carbonation and sulphation play an important role.

One of the methods of continuous monitoring of corrosion of reinforcing steel is to measure the electrical resistance of the reinforcement. For resistance measurement method was used Thomson double bridge Fig.1.

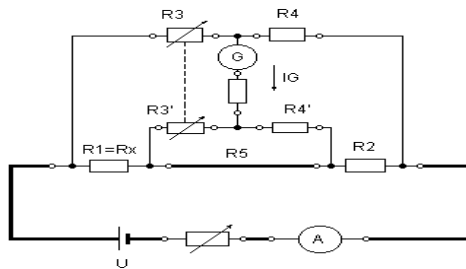


Fig.1 The principal circuit diagram of the Thomson double bridge.

If the Thomson double bridge is balanced ($I_G=0$), following formula holds,

$$R_1 = R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \cdot \left(\frac{R_3}{R_4} - \frac{R_3}{R_4} \right) = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + K, \tag{1}$$

where K is a correction term.

$$K = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \cdot \left(\frac{R_3}{R_4} - \frac{R_3}{R_4} \right). \tag{2}$$

This term will equal zero if

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_3}{R_4}. \tag{3}$$

Strictly speaking, this condition cannot be observed exactly (in view of the resistance tolerances and instability). Therefore, we minimize the value of K by minimizing the link resistance R_5 , thus increasing the measurement sensitivity. However, taking into account the fact that $R_5 \neq 0$, we must maintain the two bridge arm resistances at equal values continuously in order to keep the K-term-related error minimized when balancing the Thomson bridge. This condition also results in speeding up the bridge balancing process.

The Thomson double bridge measurement accuracy depends on the accuracy of the resistors used, the bridge sensitivity and various interferences (see above). The measurement accuracy will be virtually affected by the accuracy of the bridge arm resistors only provided the bridge sensitivity is sufficient and the interferences are suppressed by suitable measurement methodology.

2. Experimental results

The reference beam with the dimensions 40 mm x 40 mm x 400 mm reinforcement of 6 mm and 8 mm in diameter was applied to an accelerated corrosion test carried out by RILEM supports AAC 7.2. Samples were immersed for 16 hours in 5% aqueous NaCl solution, then were inserted into the electrical oven where desiccated for 8 hours at +40 °C. Measurements electrical resistance was carried out before the start of degradation and after 2, 4 and 6 months.

The use of the Thomson double bridge allowed us to obtain results with accuracy better than 1%.

Fig. 1 shows the results of monitoring changes in resistance of reinforcing steel with a diameter of 6 mm within 6 months of controlled degradation.

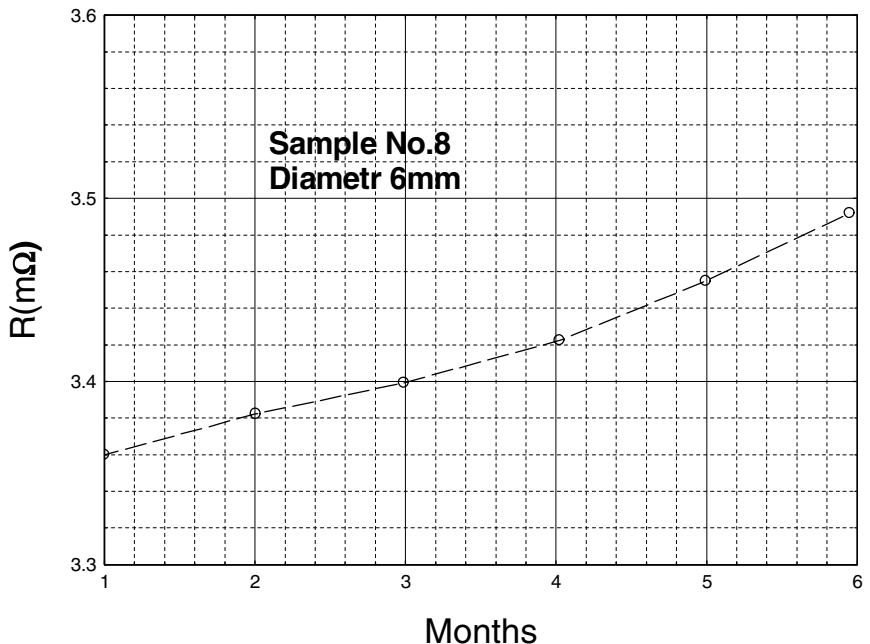


Fig.2 Change of resistance of steel reinforcement within 6 months of controlled degradation.

We followed a set of 20 pieces steel reinforcement embedded in concrete the beam. The measurement result of sample No. 6 we can on Fig. 2. The average value of electrical resistance of all 20 samples prior to degradation was $R_1 = 3,38 \text{ m}\Omega$ and after degradation $R_2 = 3,47 \text{ m}\Omega$. After 6 months there was a change of electrical resistance of $\Delta R = 0,09 \text{ m}\Omega$. This represents a change of 2,6%.

3. Conclusion

In the article, we presented the results of measuring changes in electrical resistance of steel reinforcement in concrete beams subjected to accelerated degradation by aqueous solution of NaCl. Measurements were carried out using a double Thomson bridge. The average value of the resistance groups of 20 the samples changed from $R_1 = 3,38 \text{ m}\Omega$ to $R_2 = 3,47 \text{ m}\Omega$. During 6 months of degradation occurred increased electrical resistance of reinforcement by 2,6%. It is obvious that the measurement of electrical resistance of reinforcement is a sensitive method for assessing the state of corrosion of reinforcing steel in reinforced concrete structures, and so it can be used to compare the results of corrosion monitoring using acoustic methods.

4. Acknowledgement

This research is supported by Czech Science Foundation – project SV RC: FAST – S – 11-6, IC: 1083.

5. References

- [1] Pliskova I., Chobola Z., Matysik M., Martinek J. in: EWGAE 2008 - Proceedings of the 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, p. 322 – 327, Ed. Kanji Ono, European Working Group on Acoustic Emission and Cracow University of Technology, Cracow 2008.
- [2] Pliskova I., Matysik M., Chobola Z. in: Proceedings The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-destructive Testing, p. 333 – 340, Ed. Grum J, Slovenian Society for NDT, Ljubljana 2009.
- [3] Lunak M., Kusak I. in: Defektoskopie 2009 - NDE for Safety, p. 269 – 274, Ed. Mazal P., BETIS, Praha 2009.
- [4] Martinek J. in: Physical and material engineering 2006, p. 121 – 124, Ed. Palackova A., Slovak university of technology, Bratislava 2006.
- [5] Pazdera L., Smutny J., Topolar L., Korenska M., Bilek V.: NDT Welding Bulletin (special issue), 18 (2010).
- [6] Korenska M., Chobola Z., Sokolar R., Mikulkova P., Martinek J.: Ceramics-Silikáty 50 (3), 185 (2006).
- [7] Plíšková I., Chobola Z., Matysík M., Ceramics-Silikáty 55 (2), 176-182 (2011).



PŘÍSPĚVEK KE KALIBRACI PŘÍSTROJŮ ŘADY DOMENA BENEFIT TO CALIBRATION APPARATUS SERIES DOMENA

Břetislav SKRBĚK, Pavel LHOTÁK, Michal FLANDERKA

Technická univerzita v Liberci, bretislav.skrbek@tul.cz.

Abstrakt

Nedestruktivní testování struktury. Magnetická strukturoskopie ocelí a litin. Princip metody magnetické skvrny. Reference – aplikace. Omezující faktory. Využití absolutní hodnoty, gradientu, rozdílu opakovaných hodnot H_m . Úkony při nastavování (kalibraci) přístroje před měřením podle kalibračního „vzorku“. Nepříznivý vliv materiálu kalibru na stabilitu procesu měření. Zbytková opakovaná magnetizace spojitých a nespojitých feromagnetik různé tepelně zpracovaných. Návrh materiálu pro nastavování přístrojů DOMENA.

Klíčová slova

Nedestruktivní měření, metoda magnetické skvrny, kalibrace.

Abstract

Non-destructive testing textures. Magnetic structuroskopie steel and cast iron. Principle method magnetic spot. Reference – application. Restrictive factors. Usage absolute value, gradient, difference repeated values H_m . Acts at setting movement (calibration) apparatus before metering according to calibration „sample“. Unfavourable influence material calibre on stability of the process metering. Residual repeated magnetization connected and disconnected ferromagnetic body variously heat - treated. Proposal material for setting movement apparatus DOMENA.

Key words

Stability of the process, method magnetic spot, calibration

1. Úvod

Obor nedestruktivního testování materiálu tvoří defektoskopie a strukturoskopie. Defektoskopie nalézá v materiálu defekty – vady typu nespojitostí nebo jejich projevy. Strukturoskopie hledá charakteristiky spojitě hmoty. Příspěvek ukazuje na jeden z problémů magnetické diagnostiky struktury

2. Strukturoskopie

Z běžně používaných metod je normovaná RTG difrakce. Ostatní metody v rámci strukturoskopické aplikace předmětem norem nejsou. Jedná především o UT, ET a MT. Jejich praktické využití spočívá ve vytvoření konkrétní efektivní úlohy výzkumem, aplikačním vývojem dané problematiky.

2.1. Metoda magnetické skvrny

Zaměřuje se na lokální měření vlastností zbytkového magnetizmu s balistickým (impulzním) způsobem magnetizace [1]. V oceli se stejně magneticky orientované atomy soustřeďují v doménách, které tvoří jakési subzrna v zrnech struktury. Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky (zdroj Barkhausenova šumu). Po zániku vnějšího magnetického pole H_0 se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní

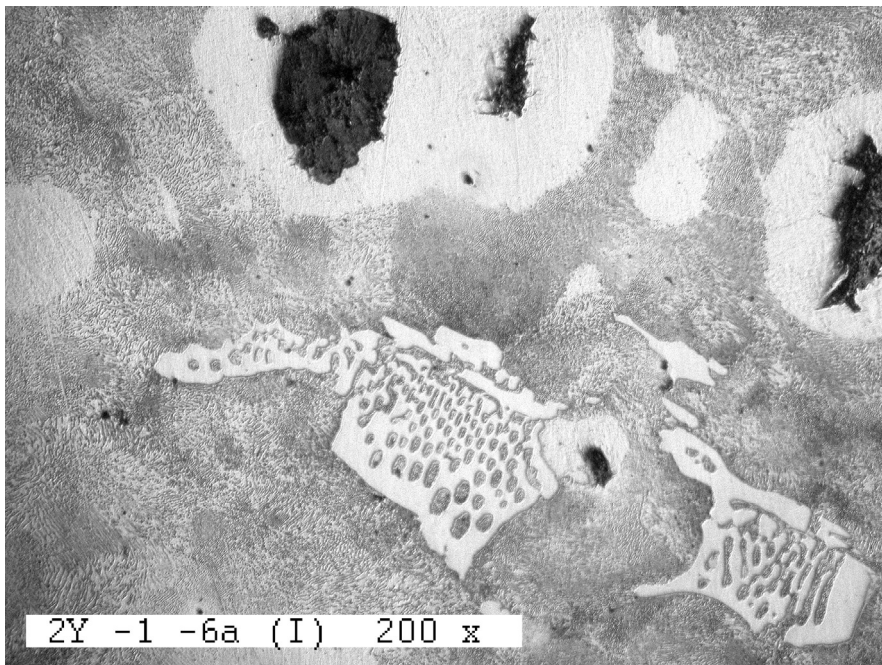
magnetické pole o intenzitě H_r . Vratným změnám brání atomy feromagnetika vázané v molekulách a atomární. napětí, mřížkové poruchy. Proto složky struktury, které obsahují karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace I_r .

$$H_r = H_o - N \times I_r / \mu \quad [A/m] \quad (1)$$

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

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

$$H_r = \sum m \times t_i \times dH_{ri} \quad [A/m] \quad (2)$$



Obr.1. Typické strukturální složky litin. Fig.1. Typical structure of cast irons.

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r . V praxi do $t=12\text{mm}$. V tenkých stěnách se tak energie pulzu soustředí do menšího objemu zrn. Hodnota H_r do hodnoty L krioste podle experimentálně stanoveného modelu.

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

Slitiny železa (oceli a litiny) tvoří spektrum nejrozšířenějších konstrukčních materiálů. Feromagnetické vlastnosti lze přiřadit jejich drtivé většině. K hodnotě H_r se přiřazuje tvrdost nebo podíl v % některé ze strukturních složek dle obr.1 mimo grafit. Znalost hodnot mechanických vlastností v kriticky namáhaném místě u exponovaných dílů převládá nad potřebou integrální informace o vybrané mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů má lokální magnetická strukturoskopie významné postavení v spektru ostatních metod. Aplikacní rozšíření našla ve formě impulzní magnetické kontroly hlavně v Rusku a Čechách.

Charakterizuje ji vysoká produktivita kontroly s cílenou dostatečnou citlivostí ke kontrolovanému strukturnímu parametru. V západní Evropě se pro tuto oblast materiálů využívá výhradně metod ET. Střídavé vířivé proudy však popisují více povrchové partie

2.2 Přístroje

V aplikaci nejrozšířenější jsou přístroje DOMENA B3 (obr.2). Řídí je vlastní procesor. Ukazuje přímo na displeji hodnotu měřené veličiny podle do paměti vložené úlohy. Jednodušší DOMENA NC měří jen s PC obvykle notebooky. DOMENA PROMAG je samostatný strukturoskop. Magnetickou skvrnu nevytváří balisticky vybíjením kondenzátoru do magnetizační cívky, ale cyklem předem naprogramovaných pulzů z výkonového zesilovače. Princip magnetizace ukazuje obr. 4.. Měří se obvykle systémem, který eliminuje rušivá magnetická pole. Buď sondou s jednou hallovou sondou v ose pro snímání normální nebo tečné (rozložení tečné složky magnetické skvrny ukazuje graf obr.6 v příloze) složky H_r . Pak se provádí magnetizace v opačných polaritách a výslednou hodnotu H_r tvoří součet absolutních hodnot opačné polarity. Nebo se používá k potlačení rušivých vlivů polí dvou hallových snímačů k měření gradientu tečné nebo normální složky H_r . Na obr.3. je DOMENA NC – varianta GR se snímači pro snímání tečného a normálního gradientu pole H_r .

2.3. Nastavení před měřením

Na reprodukovatelnost měřícího procesu způsob kalibrace před měřením. Reprodukovatelnost měření se tvoří stabilitou magnetizace a přijímače hallova signálu. Při kondenzátorové magnetizaci skvrny závisí její velikost na proudu, impedanci magnetizačního obvodu, neboť velikost napětí U na kondenzátoru je stabilizovaná. Impedanci zvyšuje teplota, přítomnost feromagnetika v magnetickém obvodu – přiložením sondy k odlitku. Proto magnetizace tenkých stěn, hran (menší impedance) vytvoří větší hodnoty H_r

Kondenzátorové Domény se proto seřizují po přiložení etalonu z tvrdé oceli, litiny. Cejchování má několik úkonů. Předem se zvolí kalibrační hodnota. Postup cejchovacího protokolu u Domen NC:

Možnost cejchování probíhá v programu při každém spuštění po nastavení konstant:

Nastav cejchovní režim -T- DOMENy stiskem klávesy T !

Není-li nutné cejchovat magnetickou sondu, nastav měřicí režim -L- DOMENy stiskem klávesy L !

Režim -T- (hodnota -a- se stanoví měřením etalonu)

Nastav hodnotu etalonu:

$M_0 =$ (nutno zapsat známou hodnotu)

Změř hodnotu:

$M =$ (proběhne změření)

Opravný koeficient:

$a = M_0/M$

(porovnání zadané a změřené hodnoty)

Režim -L- (hodnota -a- se pamatuje pro etalon M_0)

Ukáže Etalon

$M_0 =$

Opravný koeficient
Poté probíhá vlastní měření

a =

DOMENA PROMAG dodává výkonovým elektronickým zdrojem do magnetizační cívky konstantní proud, který nezávisí na její impedanci. Tato nesporná výhoda stability procesu je vykoupena špatnou energetickou účinností, napájením ze sítě, menší mobilitou.

Po spuštění DOMENY – PROMAG, jejího řídicího programu v PC a zadání názvu měřeného souboru dat se nastaví:

- Kombinace zapojení Hallových sond (dvě sondy/jedna sonda; normálové, tečné měření; gradient pole/složka pole)
- Tvar impulsu (Jednoduchý trojúhelník, Trojúhelníky s menší zápornou amplitudou, jednostranné trojúhelníky s klesající amplitudou, dvojité trojúhelníky)
- Amplituda magnetizačního proudu (2, 4, 6, 8, 10 A)
- zesílení zesilovače [dB]

Následuje předstart měření spočívající v magnetizaci dvakrát kladnou a dvakrát zápornou polaritou magnetovacího pólu.

Po přepnutí na kladnou polaritu magnetizačního pólu lze spustit měření dle řídicího programu.

DOMENA PROMAG se neseřizuje podle „cejchovního kamene“.

Používané cejchovní ocelové nebo litinové kameny „kondenzátorových“ DOMEN vykazují podobně jako ostatní „železa“ pokles H_r po opakované magnetizaci. Tento jev se využívá pro rozlišení struktur (obr.5) [3], Správnému nastavení DOMEN NC a B a reprodukovatelnosti procesu však neprospívá..

Dalších výzkumné práce [1, 2, 4] objevily materiály, které nevykazují pokles H_r po opakované magnetizaci. Pro cejchovní kameny DOMEN lze doporučit některé stavy austenitických ocelí a tepelně zpracované hliníkové bronzy .

Výsledky rozboru v procentech hmotnosti konkrétního polotvaru pro nové „cejchovní“ kameny:

Fe	Mn	Al	Ni	Cu zbytek
3,80	1,15	14,3	0,00	

3. Závěr

Pro dosažení vysoké reprodukovatelnosti měření přenosnými přístroji DOMENA B a NC nutno používat cejchovní kameny z Al bronzů nebo speciálních (ventilových) ocelí po zpracování. Stabilní kontrolní pracoviště doporučuji vybavit přístroji DOMENA PROMAG.

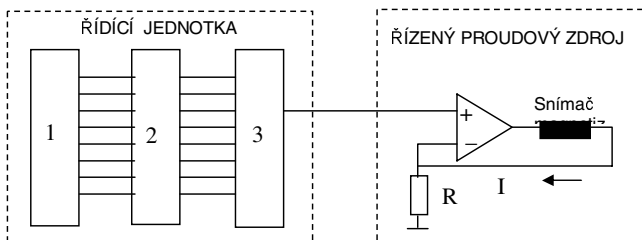
Příspěvek byl vypracován za podpory VZ MSM 4674788501.



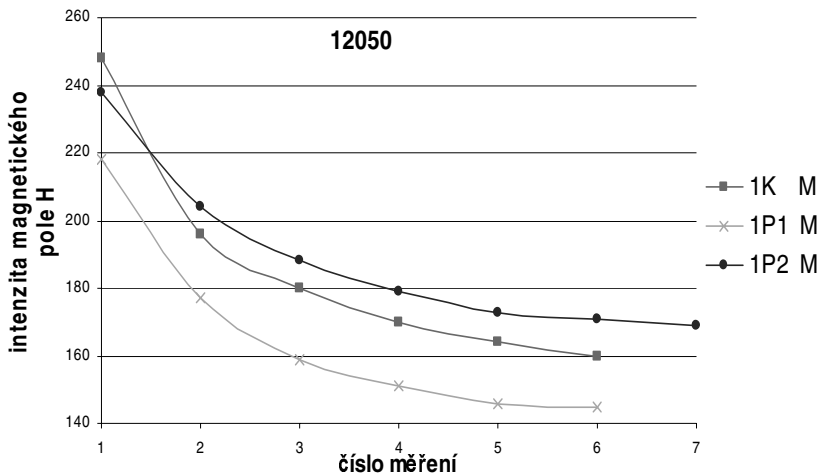
Obr.2. DOMENA B3. Fig.2. DOMENA B3



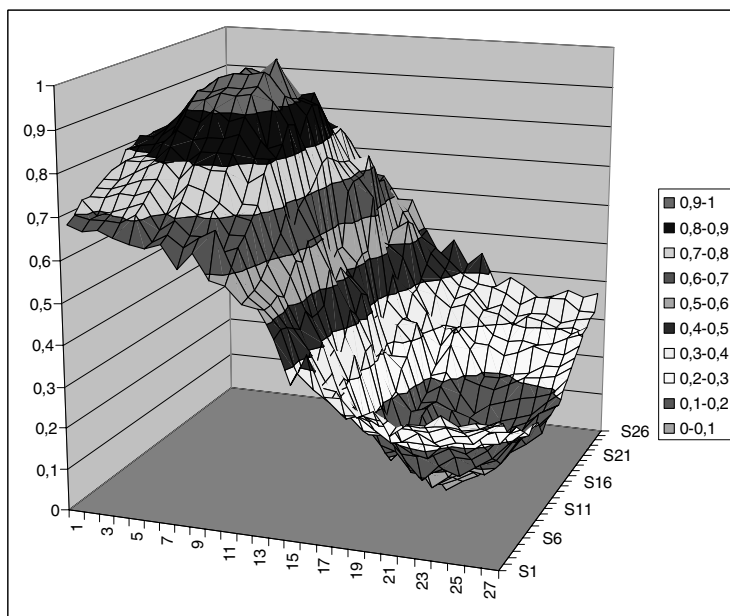
Obr. 3. DOMENA GR (DOMENA NC). Fig.4. DOMENA GR (DOMENA NC)



Obr. 4. Blokové schéma magnetizace DOMENA PROMAG. Fig.3. DOMENA PROMAG - princip magnetization.



Obr.5. Fig.5.



Obr. 6. Rozložení H_r . magnetické skvrny. Fig.6. H_r arrangement magnetic spot.

Literatura:

- [1] SKRBEK, B.: NDT diagnostika strukturních změn austenitických ventilových ocelí
In: Sborník semináře "Provozní degradace austenitických ventilových ocelí"
Liberec : TU KMT, 2006, p. 58-62, ISBN 80-7372-113-9.
- [2] SKRBEK, B.: Výzkum diagnostiky jemné disperze. Mezinárodní konference
METAL 2008, Sborník abstrakt a CD, 13.-15. 2008 , Hradec nad Moravicí, ČR,
paper 98, ISBN 978-80-254-1987.
- [3] SKRBEK, B.: Rozlišení struktur opakovanou magnetizací. Mezinárodní
konference DEFEKTOSKOPIE 08, Brno, 4.-6.11. 08. [Sborník], s. 203-206, ISBN
978-80-214-3759-3.
- [4] SKRBEK, B., NOSEK, V., KYSEL, M., and SLÁMA, P. Solution of modern pair of
guide and valve of piston engines. In 1st International Conference about Recent
Trends in Structural Materials. Dobřany : COMTES FHT a.s., 2010, p. 31-32
[Including CD ROM with fulltexts]. ISBN 978-80-254-8683-2



SROVNÁVACÍ NEDESTRUKTIVNÍ TESTY MATERIÁLU AUTODÍLŮ COMPARATIVE NON-DESTRUCTIVE TESTS OF AUTOMOTIVE MATERIALS

Břetislav Skrbek, Vladimír Nosek

Technická univerzita v Liberci, bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt

Srovnávací testy užitých vlastností důležitých ocelových a litinových dílů pohybového ústrojí automobilů. Využití tradičních a nových metod nedestruktivní strukturoskopie. Magnetoinduktivní, ultrazvukové metody, metoda magnetické skvrny. Příklad – experiment; litinové spojkové a brzdové kotouče. Porovnání odolnosti vůči teplotní únavě. Měření modulu pružnosti, pevnosti, tvrdosti. Výsledky z brzdových kotoučů deseti značek osobních automobilů vyráběných v Japonsku a Evropě. Rozbor, porovnání, poznatky.

Klíčová slova

Nedestruktivní testování, teplotná únav, brzdové kotouče, litiny.

Abstract

Comparative non-destructive tests of useful properties of important steel and cast iron automotive motion system parts. Usage of conventional and new methods of non-destructive structuroscopy. Magnetoinductive, ultrasonic and magnetic spot methods. Example – experiment; cast iron clutch and brake disks. Comparison of resistance against thermal fatigue. Measurement of elasticity modulus, strength, hardness. Results of brake disks of ten marks of personal cars produced in Japan and Europe. Analysis, comparison, piece of knowledge.

Key words

Non-destructive testing, thermal fatigue, brake disks, cast iron

1. Úvod

Shodu materiálové jakosti technické dokumentace (odběratele odlitků) s odlitkem (vyrobeným slévárnou) obvykle deklarují mechanické vlastnosti naměřené na zkušební tyči předkládané atestem. Uživatele odlitků zajímají hodnoty mechanických vlastností v konkrétních partiích (stěnách) odlitku, zejména pro pevnostní výpočty a návrhy nových výrobků. Ty se od hodnot atestu mohou významně odlišovat. Na pomoc přichází nedestruktivní strukturoskopie. Umožňuje porovnávat konstrukční výsledky funkčně identických dílů různých týmů [1 - 4].

Námětem tohoto článku se staly brzdové kotouče z litiny s lupínkovým grafitem (LLG).

Pro výborné třecí vlastnosti, láci a vysokou odolnost vůči teplotní únavě je tato litina stále používaná [5].

2. Akustické vlastnosti litin

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

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

Čím více útvary grafitu matici oslabují (čím jsou štihlejší a delší), tím větší je hodnota akustické dráhy L_u ve srovnání s přímou dráhou (tloušťkou prozvučované stěny) L . Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$c_L = c_{L0} \times L / Lu = 5920 \times L / Lu \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

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

Úpravou (1) lze získat zjednodušený výraz

$$E = (K \times L / Lu)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

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

3. Tepelná odolnost

Mechanická pnutí vytvořená při nerovnoměrném ochlazování (nebo brzděných tepelných dilatacích) a ohřevu různých partií jedné součásti, mohou vést k trvalým deformacím za dané teploty a pak k tepelné únavě. Odolnost vůči tomuto namáhání charakterizuje Eichelbergův faktor EF.

$$EF = R_m \times \lambda / (\alpha \times E) \quad [\text{W/m}] \quad (4)$$

λ ... tepelná vodivost

α ... koeficient délkové roztažnosti

E ... modul pružnosti

Čím vyšší hodnota EF, tím odolnější materiál vůči tepelné únavě (kokily, hlavy válců, výfuková potrubí, skříně turbodmychadel... brzdové a spojkové kotouče). U brzdových a spojkových kotoučů se vyžaduje i odolnost vůči kontaktnímu opotřebení, pevnost.

4. Experiment

Katedry strojírenské technologie a materiálu Technické univerzity v Liberci byly požádány o materiálový, případně technologický průzkum brzdových kotoučů osobních automobilů – v provedení plném i větřaném.

Celkově bylo na programu posouzení 16 kotoučů. Z tohoto počtu se podařilo v opravnách ve vozech proměřit 10 variant. Měření 1 až 8 přísluší straně A ve směru hodinových ručiček. Strana A třecí plochy kotouče je při vysazené vnitřní přírubě. Místa 9 až 16 přísluší straně B proti směru hodinových ručiček. Proti sobě tedy leží místa 1A-9B, 2A-10B... Místa 17 a 18 přísluší vnitřní přírubě. 17 úhlově souhlasí s 1(9) a 18 s 5 (13).

Seznam proměřených kotoučů uvádí

Tab.1

Číslo vzorku	Typ vozu	Číslo dílu
1.	Citroen	96404033; A280101
2.	Mercedes	A 220 421 08 12
3.	Suzuki	55211-65D11
4.	Toyota	43512-05030
5.	Mazda	GA4Y-33-25XJ
6.	Hyundai	51712-38100
7.	Peugeot	4246.R7
8.	O Fa	14''
9.	O	15,5''
10.	Fe	13''

Provedeny byly některé plánované práce, a to:

- rozbor nedestruktivními metodami
- proměření tvrdosti
- fotodokumentace
- studijní práce

Tvrdość kotoučů byla měřena metodou Brinell, a to kuličkou $\varnothing 5$ mm se zatížením 750 kg proto, že tloušťka větraných kotoučů byla poměrně malá a při měření kuličkou $\varnothing 10$ mm se zatížením 3000 kg by mohlo docházet ke zkreslování či chybám měření průhybem v místě měření.

Pevností a elastické vlastnosti materiálu kotoučů byly zjišťovány

- ultrazvukem a následným výpočtem
- přímým měřením tvrdosti
- měřením hodnot metodou magnetické skvrny [1].

Měřících míst bylo u každého kotouče – pokud to konstrukce kotouče dovolila – celkem 18, a to 8 míst na jedné straně (A), 8 míst na druhé straně (B) brzdících ploch a 2 místa na přípeňovací přírubě.

1) **Stanovení hodnot počátečního modulu pružnosti v tahu E_0**

Hodnoty E_0 se vypočítávají ze vzorce

$$E_0 = (437,8 \times v_r)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

přičemž ke stanovení relativní rychlosti šíření ultrazvuku $v_r = L/L_u$ je třeba naměřit jednak tloušťku materiálu posuvným měřítkem v měřeném místě L a dobu návratu vyslaného signálu po odrazu vyjádřenou hodnotou tloušťky L_u – měření se uskutečnilo přístrojem T-SCOPE DL, dvojitou sondou 5 MHz.

2) **Stanovení hodnot pevnosti litiny v tahu R_m (Mpa):**

Hodnota R_m se vypočítává ze vzorce $R_m = f(L/L_u \cdot HB)$.

$$R_m = 1,37 \cdot \left[7,211 \cdot \left(\frac{L}{L_u} \right)^{2,278} \cdot HB^{0,75} \right] - 72,5 \quad [\text{MPa}] \quad (22)$$

3) **Stanovení charakteru kovové matrice** v měřených místech se uskutečňuje výpočtem na základě naměřené hodnoty remanentního magnetizmu M [A/m] – měření se uskutečnilo přístrojem pro metodu bodového pólu DOMENA 2. K hodnotě M přispívá podíl P a disperze perlitu Pd v matrici, ale též ji ovlivňuje tloušťka stěny L. Díky experimentálně stanovenému matematickému modelu $M=f(P, Pd, L)$ lze odhadovat strukturní stav %P, Pd matrice kotoučů.

Naměřené hodnoty hodnocených 10 druhů kroučů jsou statisticky zpracovány do reprezentativních hodnot tabulky 3.

Tabulka 2. Brzdový kotouč Citroen. BRAKE DISK Citroen.

7,45	134	247	1A	236	322
7,22	132,9	251	2	237	319
7,08	133,3	248	3	237	321
6,75	129,9	254	4	237	310
6,7	128,9	257	5	237	307
6,8	131,2	256	6	238	315
7,5	140,2	253	7	237	346
7,47	131,3	250	8	237	315
6,55	126	260	1B - 9	237	297
6,7	132,1	269	10	237	317
6,85	130,2	267	11	237	311
7,15	131,6	264	12	237	315

7,2	131,9	263	13	237	315
7,19	126,7	274	14	238	297
6,6	126,3	265	15	237	298
6,56	127,6	268	16	237	303
6,21	127,3	267	P1 - 17	231	295
6,13	124,4	264	P5 - 18	232	286
L mm	Eo Gpa	M A/m	místo	HB5-750	Rm Mpa

Tab3.

Typ kotouče		L (tloušťka)		Eo		Perlit		HB 5/750		R _m	
		(mm)		(Gpa)		Podíl-disper				(MPa)	
		min.	max.	min.	max.	P %	Pd μ	min.	max.	min.	max.
1	Citroen	6,55	7,50	126,0	140,2	100	0,3/5	236	238	297	346
2	Mercedes	7,70	8,82	111,0	121,5	100	0,3	224	226	231	271
3	Suzuki	6,90	7,37	113,4	121,1	100	0,3(5)	213	214	218	257
4	Toyota	7,44	8,30	119,6	129,7	100	0,5/1, o	214	214	245	262
5	Mazda	7,44	8,23	117,0	121,9	100	<0,3	222	223	244	265
6	Hyundai	7,71	8,52	121,0	146,7	100	0,5/o. 3	212	215	256	345
7	Peugeot	7,36	8,46	128,3	139,5	100	0,3/o. 5	232	234	299	337
8	O-Fa	6,91	8,43	103,6	116,5	100	0,5	181	185	177	210
9	O	8,25	8,64	103,4	112,4	100	0,3/o. 5	187	194	180	207
10	Fa (nevětráný)	12,78	12,85	120,3	126,3	100	0,5/1	220	223	262	281

4.1. Diskuze výsledků

-litina typu ČSN 42 2420 na spodní mezi: kotouče 8 a 9

-litina typu ČSN 42 2420 na horní mezi: kotouče 2,3,4,5

-litina typu ČSN 42 2425 na středu a horní mezi: kotouče 1,6,7,11

Rovnoměrností naměřených hodnot tvrdostí po obou stranách kotoučů a celé brzdné ploše vynikají kotouče 3 (Suzuki), 4 (Toyota) a 5 (Mazda) a prakticky i 6 (Hyundai), které dále vynikají též i nejmenšími rozdíly v tloušťkách obou brzdných ploch, což svědčí o vysokém stupni zvládnutí metalurgie i technologie.

Pro zařazení litiny kotoučů podle Eo (množství a tvaru grafitu) platí:

	42 2410	15	20	25	30
Eo GPa	86	97	110	124	140

Platí pro stěny 15mm. Tenké stěny hodnoty Eo mají vyšší pro stejnou jakost.

Nejvyšší tuhosti litiny tak dosahuje kotouč PEUGEOT (litina "třícítka"). Naopak O ozn.8 nedosahuje ani jakosti 42 2420.

Hodnota intenzity pole H zbytkového magnetizmu nad magnetickou skvrnou je vyjádřena číslem M , které měří přístroj DOMENA 2. Charakterizuje matici litiny. Pro porovnání jednotlivých hodnot M_i doporučuji provést korekci M podle tloušťky stěny L na M_s .

$$M_s = M / (81 \times L^{-2.91} + 1) \quad [A/m] \quad (7)$$

5. Závěr

Proměřované kotouče lze rozdělit materiálově do tří jakostních skupin (zejména podle stanoveného E_o), tvrdosti HB5/750 a částečně dle R_m , která vyjadřuje pevnost v tahu v standartních podmínkách.

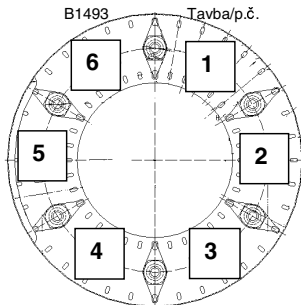
Tab. 4.

Kotouč	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_m/E	2,41	2,16	2,16	2,02	2,13	2,26	2,37	1,76	1,8	2,2

Pro čistě tepelné namáhání se doporučuje co největší poměr R_m/E_o – viz.tab.4. Z hlediska tohoto kritéria jsou nejlepší kotouče francouzských aut. Nejtvrdší matrice přísluší kotoučům CITROEN. Nejměkčí kotoučům O. Minimální rozptyly (2-3 HB) tvrdých kotoučů souvisí patrně s jejich legováním. Příspěvek byl vytvořen za podpory VZ MSM 4674788501

Literatura

- [1] ŘEZÁČ, Z.: *Pevnost přepážek válců motoru z různých období. Diplomová práce TU v Liberci*, 2007.
- [2] SKRBK, B., NOSEK, V.: Materiál sedel ventilů In METAL 2005 14. mezinárodní konference metalurgie a materiálů, Ostrava : Tanger. s.r.o., 2005, Paper no.2, pp.1-5, ISBN 80-7849-972-5.
- [3] SKRBK, B.: Slitiny železa na výfuková potrubí spalovacích motoru - trendy. In Metal2006 15. mezinárodní konference metalurgie a materiálů Sborník přednášek. Ostrava : Tanger s.r.o., 2006. Paper 114. pp.5, ISBN 80-86840-18-2.
- [4] SKRBK, B.: NDT diagnostika strukturních změn austenitických ventilových ocelí In: Sborník semináře "Provozní degradace austenitických ventilových ocelí" Liberec : TU KMT, 2006, p. 58-62, ISBN 80-7372-113-9.
- [5] DOČEKAL, J., SKRBK, B. NON-DESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY OF BRAKE AND CLUTCH DISKS. 15 World Wheelset Congress, Prague Congress Centre, September 23-27, 2007, CD. ISBN nemá.



Obr.1. Brzdový kotouč. Fig.1. BRAKE DISK.

Dokonalá zrna karbidu křemíku připraveného metodou vysokoteplotní samošířící se syntézou (VSS)

PERFECTION OF SILICON CARBIDE GRAINS PREPARED WITH SELFPROPAGATING HIGH TEMPERATURE SYNTHESIS (SHS)

Lubomír SODOMKA, Adhesiv, TUL Liberec

Abstrakt

V článku je ukázané, že nová ekologická technologie přípravy keramických materiálů může připravit dokonalá zrna. Ty se užívají jako vysokoteplotní materiály, případně pro svou tvrdost jako abrazivní či erozivní materiály pro brusné a řezné nástroje. Jedním z neznámějších je karbid křemíku (SiC). Ten se vyskytuje ve dvou hlavních modifikacích a jeho klasická příprava je obvyklými metodami energeticky náročná spolu s další úpravou na homogenní prášky. Mezi významné keramické materiály, vynikající vysokou tvrdostí, počítáme vedle karbidů ještě nitridy, boridy a další vysokoteplotní keramiku. Vznikají otázky, zda je možné vytvořit energeticky méně náročné technologie a jak je to s dokonalostí vytvářených zrn. Dokonalost určuje tvrdost a další mechanické výhodné vlastnosti. Obě odpovědi jsou předmětem tohoto článku.

Abstrakt

In the paper the new simple, nondestructive method of semiquantitative estimation of perfection of crystalline grains and its application is being demonstrated on crystal grains of cubic silicon carbide of sphalerite type.

1. Úvod

Předmětem tohoto příspěvku je uvedení nové technologie přípravy vysokoteplotní keramiky a hodnocení produktů této technologie. Začneme karbidem křemíku. Karbid křemíku (SiC) má dlouhou historii. Je zajímavé, že se vyskytuje v dosud známých 240 polytypech. Nejdůležitější z nich jsou kubický β -(3C) SiC se strukturou sfaleritu a hexagonální, α - (6H)SiC a 4H-SiC se strukturou wurtzitu. Ostatní polytypy jsou méně rozšířené a jsou modifikace těchto tří struktur. V příspěvku jsou zpracované struktury SiC, připravené jejich novou nízkou energetickou technologií nazývanou vysokoteplotní samošířící se syntéza (VSS) a hodnocené novou jednoduchou metodou rentgenové difrakce dokonalosti získaných zrn.

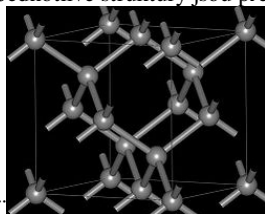
2. Základní vlastnosti tří důležitých struktur SiC

Přehled významných strukturálních veličin a vlastností má ukázat význam keramiky SiC a jsou shrnuté v tab.1

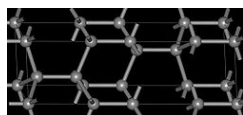
Tab.1 Vybrané charakteristiky karbidu křemíku SiC [1]

Vlastnosti	polytypy			
	β - (3C)SiC	4H SiC	α - 6H SiC	
Struktura (nm)	a = 0,45596	a=0,30730, c=1,0053	a=0,30730	c= 1,511
Hustota $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$	3,21	3,21	3,21	
E modul (GPa)	250	220	220	
Zakázaný pas energií (eV)	3,6	3,7	4,9	

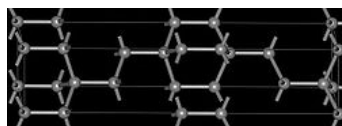
Jednotlivé struktury jsou představené na obr. 1a,b, c



Obr. 1a β - (3C)SiC



Obr. 1b 4H SiC



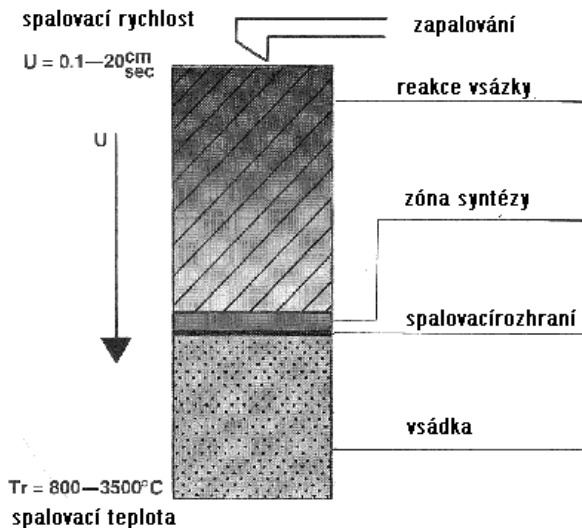
Obr. 1c α - 6H SiC

První z nich β - (3C)SiC je krychlová sfaleritického typu, obě druhé jsou hexagonální wurtzitického typu. Oba typy SiC se stávají aktivací dusíkem a fosforem polovodiče typu n, aktivací hliníkem, borem, galiem a beryliem typu p, aktivací hliníkem a borem se stávají supravodivými při 1,5K.

3. Nízko energetická příprava SiC

Klasická metoda přípravy karbidu křemíku (SiC) spočívá v přípravě směsi písku (SiO_2) a grafitu v stechiometrickém poměru a směs se nechá procházet proud v elektrické peci. Výsledkem je kusový sintrát, který je nutné rozbít a rozmílit a roztřídit podle velikostí zrna v prášky stejné zrnitosti.

Mnohem výhodnější je nízko energetická syntéza, objevená I.P. Boroviskou a A.G. Meržanovem v Ústavu molekulových syntéz AVSSSR v roce 1967 a nazvaná samošířící se vysokoteplotní syntéza (SVS), anglicky **self propagating high temperature synthesis**, SHS, ruský samorozprašňajusčijisa vysokotemperaturnyj syntéz) [2], díl2, kap28. Syntéza využívá tepla získaného exotermickou reakcí v tenké zóně o teplotě 800 až 3500°C, která se postupně šíří materiálem rychlostí 1 až 200mm/s. Pro SVS technologii karbidu křemíku se vytvoří směs nanočásticového křemíku a uhlíku ve stechiometrickém poměru. Tato směs je



Obr. 2. Podstata VSS

snadno zápalná vnějším zdrojem obvykle rozžhavenou destičkou, nebo výkonovým laserem. Zapálí se povrchová vrstva, která vytvoří reakční zónu. Ta předává exotermní energii sousední vrstvě a reakční zóna se tak postupně přesouvá materiálem a reakcí vytváří zrna SiC. Princip metody ilustruje obr.2. Válcová nádoba se naplní stechiometrickou směsí křemíku a uhlíku (Si +C). Na jednom konci se plošně zapálí, takže se vytvoří reaktivní zóna, která se šíří rychlostí materiálů v ose válce a vytváří přímo SiC různé zrnitosti podle nastavených podmínek. Tato technika má mimo energetickou úsporu také výhodu, že výsledkem je přímo hotový produkt bez dalšího zpracování. Otázkou je, jak dokonalá jsou zrna vytvořeného karbidu křemíku, SiC. To je předmětem další části článků. Jako metoda určování dokonalosti zrn SiC byla navržena a vyzkoušená metoda rentgenové difraktografie.

4. Podstata jednoduchých rtg difrakčních metod určování stupně dokonalosti zrn

Dokonalost krystalů se určuje obvykle na monokrystalech a hodnotí se hustotou poruch [2], díl 1, kap.2., které se určují různými metodami [2], díl 1. kap.3. Mnohem obtížnější je určovat dokonalost zrn práškových materiálů. I když existují metody určování poruch z profilů difrakčních záznamů, jde o metody matematicky velmi náročné [3]. Proto byla navržena jednoduchá semikvantitativní metoda k číselnému hodnocení dokonalosti zrn prášků. K tomuto účelu byl zaveden stupeň dokonalosti SD, jehož údaje jsou získávány z difrakčních záznamů. Dochází-li k difrakci rtgz na dokonalém krystalu, který je dokonale periodický, pak intenzita difraktovaného záření, která závisí na difrakční (interferenční) funkci $G^2(h,k,l)$, která je typu

$$G^2 = \prod_{n=1}^3 \sin^2(\pi N_n h_n) / \sin^2(\pi h_n) \quad (1)$$

V ní jsou h_n , $n=1,2,3$ Millerovy indexy difrakčních rovin (h_n) = (h,k,l). Pro průběh interferenční funkce G^2 v okolí bodů (h,k,l) (difrakčních maxim) dostaneme pro průběh G^2 a jednoduchých úpravách [3] výraz

$$G^2 = \prod_{n=1}^{n=N} \sin^2(\pi N_n \varepsilon_n) / (\pi \varepsilon_n)^2 \quad (2)$$

Malé veličiny ε_n určují okolí roviny představované bodem (hkl) v recipročním prostoru [2], [3], [6], takže pro body ($h + \varepsilon_1, k + \varepsilon_2, l + \varepsilon_3$). Průběh funkce (2) v závislosti na celých číslech N_n přechází pro $N_n \rightarrow \infty$ v Diracovu δ -funkci [5], což pro difrakční maxima znamená, že tvoří kolmé přímky bez šířky. To je první kritérium dokonalosti krystalitu (zrna).

Dalším kritériem dokonalosti zkoumaného vzorku je, že šířka difrakčního maxima se blíží nule. Dokonalý krystal musí mít konstantní mezirovinové vzdálenosti d. Diferencováním Braggovy rovnice

$$2d \sin \theta = n \lambda, \quad (3)$$

θ je Braggův úhel, λ vlnová délka užitého rtgz, n celé číslo řád difrakce a po jednoduché úpravě [3], získáme pro změnu mezirovinové vzdálenosti Δd v závislosti na změně Braggova úhlu $\Delta \theta$ vztah

$$\Delta d/d = - \Delta \theta \cot \theta \quad (4)$$

Poněvadž pro $\Delta d \rightarrow 0$, jde o dokonalý krystal a pro $\Delta \theta \rightarrow 0$ je také $\Delta \theta \rightarrow 0$, rovnice (4) druhým kritériem dokonalosti měřeného vzorku.

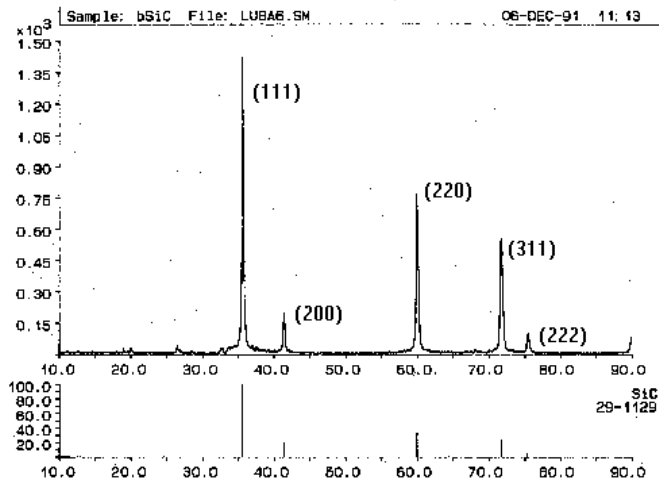
Další informace o dokonalosti měřeného vzorku lze získat z pozadí difrakčního záznamu. Zvýšené pozadí je způsobené existencí ve vzorku neperiodických nebo malých částic, které rozptylují záření do všech směrů a vytvářejí pozadí. V rozptýleném pozadí jsou ukryté různé neperiodické části vzorku, které přispívají k jeho nedokonalosti. Mírou této nedokonalosti v daném úhlu θ je výška pozadí I_p . K hodnocení dokonalosti lze užít stupeň dokonalosti SD definovaný vztahem

$$SD = I_d / \Delta d \cdot I_p \cdot I_{\max} \quad \text{nebo} \quad SD = I_d / \Delta \theta \cdot I_p \cdot I_{\max} \quad (5)$$

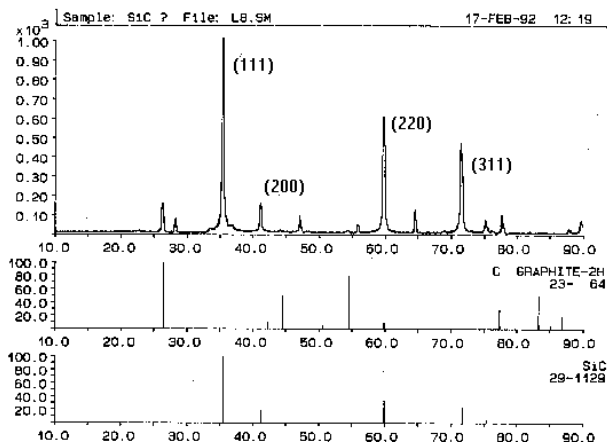
kde I_d je intenzita difrakčního maxima příslušné difrakční čáry (hkl) a I_{\max} je maximální hodnota difraktované intenzity z celého difrakčního záznamu a $\Delta \theta$ je podle vztahu (4) úhlová šířka difrakčního maxima.

5. Difrakční snímky zrn karbidu křemičitého

Difrakční záznamy byly prováděny na difraktometru Siemens na VÚAnChu v Ústí nad Labem [4]. Pro difrakci byly připraveny vzorky postupně β -SiC, 4H-SiC a α -SiC, slisované do tablet průměru 30mm. Difrakční záznamy jednotlivých vzorků jsou uvedeny na obr.3, 4, 5.



Obr.3 Difraktogram β -3C SiC



Obr.4 Difraktogram SiC s příměsí grafitu

Vzorky SiC byly získané na Ústavu molekulových syntéz AVSSRA.G.Meržanova. V horní části obr.3. a obr.4. jsou vlastní difrakční záznamy, v dolní části jsou ideální struktury z Hanavaltových tabulek. Ideální difrakční čáry jsou přímkami představující Diracovu δ -funkci. Z obou difrakčních diagramů je zřejmé, že v obou případech je pozadí záznamu téměř nulové, takže dokonalost zrna SiC neovlivňuje rozptýlení na nano a amorfních částicích a krystalitů SiC vzorků jsou bez vnitřního pnutí. Oba tyto faktory ovlivňují pozadí a nepřispívají k dokonalosti zrna.

V obou diagramech dochází k Braggově reflexi druhého řádu pro $n=2$ v Braggově rovnici. Jde o reflexe $(200) = 2(100)$, $220 = 2(110)$ a $(222) = 2(111)$. Diagramu na obr.4 se kromě SiC vyskytují v něm rozpuštěné klastry grafitu, jak dokazuje ideální záznam z Hanavaltových tabulek ve spodní části obr.4.

Hodnoty mezivzrostových vzdáleností $d(hkl)$ lze snadno vypočítat z parametru krychlového SiC, který má hodnotu $a = 0,45596 \text{ nm}$. Mezivzrostové vzdálenosti příslušející difrakčním čarám lze určit užitím vzorce

$$1/d^2(hkl) = (h^2 + k^2 + l^2)/a^2 \quad (5)$$

a pro $d(100)$, $d(110)$, $d(111)$, $d(311)$ dostaneme tyto hodnoty:

$$d(100) = 0,45596 \text{ nm}, d(110) = 0,45596/1,414 = 0,322 \text{ nm}, d(111) = 0,316 \text{ nm}, d(311) = 0,137 \text{ nm}.$$

6. Vyhodnocování dokonalosti vzorků SiC

V části 4. článku jsme ukázali, že k hodnocení dokonalosti zrn je možné využívat jednoduchou semikvantitativní metodu difrakce rentgenového záření jako jedné z nedestruktivních metod. Zatím se neobjevila žádná jednodušší nedestruktivní a jednodušší metoda k hodnocení krystalitů, než je navržená rentgenová difrakční metoda. Aplikujme nyní tuto metodu na krystalitů zrna SiC, připravené metodou VSS (odst.3). K dispozici jsou difraktogramy na obr.3 a obr.4. Z nich je třeba učít stupeň dokonalosti podle (5). Ze zvětšeného obr.4 byly naměřené hodnoty I_d a $\Delta\theta$. Poněvadž je vliv pozadí zanedbatelný zjednoduší se vztah (5) v tomto případě na

$$SD(hkl) = I_d / \Delta\theta \cdot I_{\max} \quad (6)$$

kde je přímo vyjádřené, že SD závisí na Millerových indexech příslušné roviny, takže:

$$SD(111) = 1,25, \quad SD(100) = 0,10, \quad SD(110) = 0,351, \quad SD(331) = 0,27.$$

Z uvedených hodnot je zřejmé, že $SD(hkl)$ závisí na orientaci normály mřížkové roviny, což svědčí o jeho anizotropii. Nejdokonalější jsou v pořadí roviny (111), (110), (331) a (100) v tomto pořadí, což souvisí s hustotou mřížkových bodů v těchto rovinách.

7. Závěr

Hodnocení dokonalosti krystalitů (zrna) krychlového karbidu křemičitého ukázalo, že krystality připravené metodou vysokoteplotní samošřícení syntézou v stechiometrickém poměru křemíku a grafitu jsou dokonalá krystalová zrna vysoké kvality pro abrazivní účely. Stupeň dokonalosti byl určen z obr.3. Z obr.4 pak vyplývá, že SiC vznikl s přebytkem grafitu, jehož zrna jsou stejně jako zrna SiC dokonalé krystality a vyskytují se jako směsi krystalitů SiC a grafitu ve výsledném produktu. Při nastavení vhodných podmínek je možné dalším postupem vytvořit z SiC zrn i dokonalé monokrystalové [2].

8. Literatura

- [1] Google/silicon carbide
- [2] Sodomka, L., Fiala, J.: Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi 1,2 Adhesiv, Liberec 2003 díl 1, kap2, kap3, díl 2, kap 28
- [3] Sodomka, L.: Rentgenová difraktografie pevných látek, SNTL Praha 1960, str.87-90.
- [4] Difrakční záznamy se prováděly ve spolupráci s RNDr. B.Knobem VÚANCh Ústí nad Labem
- [5] Madelung, E.: Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers.
Ruský překlad: Matěmatičeskij apparat fiziki. Gos.Izd fiz.-mat lit. Moskva 1961, str.36
- [6] Sodomka, L.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Adhesiv, Liberec 2005 kap.13



**Výuka fyziky jedním z pilířů materiálového inženýrství, podstatou
nedestruktivních zkušebních metod a nanotechnologie**
**PHYSICS LECTURES THE SUPPORT OF NONDESTRUCTIVE
TESTING, MATERIAL ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY**

Lubomír SODOMKA, Adhesiv,TUL Liberec

Abstrakt

Fyzika je již od 18. století základní disciplína při vysokoškolském studiu technických věd jako je strojírenství, nauka o materiálech, technologie, chemie, elektrotechnika, medicína a v poslední době i rozšířená nanotechnologie. Poněvadž většina měřících a zkušebních metod je založená na fyzikálních základech, je důležité znát jejich fyzikální podstatu známých zkušebních metod pro případnou jejich modifikaci a jejich vyhodnocování a jednak k možnosti realizace nových zkušebních a měřících metod. Přednášky fyziky je třeba zaměřit pro jejich využití v uváděných oborech. Kromě toho nelze vynechat podstatné obecné fyzikální zákony k poznávání souvislostí. Konečně je třeba zdůrazňovat i význam fyziky k řešení filosofických otázek. Během 20. století vznikly nové objevy a disciplíny fyziky, které je nutné přenést do soudobých aplikací. Existuje excelentní kniha s takovým zaměřením trojice autorů M. von Ardennea, G.Musiola a S.Rebala : *Efekte der Physik und ihre Anwendungen* vydané VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1988, která se blíží vytčeným požadavkům, jejíž obsah je však třeba rozšířit o nové metody a poznatky a nové koncepce. V tomto duchu byla vytvořena příručka fyziky, která je věnována základům fyziky se zaměřením na výše uvedené aplikace, založenou na dlouholetých přednáškách fyziky na vysokých školách s technickým zaměřením s přihlédnutím k současným zkušebním metodám a rozšiřovanou o nanotechnologii, jejíž koncepce je předmětem této prezentace.

Abstrakt

One can say that the physics is creating pillar for technique especially for nondestructive testing and medicine and today also on biology and nanotechnology. Therefore it is necessary to change the content of physics lecture on orientations for applications. In the 20th century there are appearing the new physical discovery as the discovery of X-rays, quantum physics, nanotechnology and others changing the old conceptional physical system offering quite new applications. Therefore it is necessary to change also the physical lecture programs oriented on applications of physics also on such fields as nondestructive material testing, on material technology and nanotechnology. In the contribution there is made the proposal as one of the attempt of such new lectures program of physics oriented in this direction.

1. Úvod

Již od vzniku vysokých škol technických zvláště pak strojních, stavebních, chemických i textilních jedním ze základních předmětů byla fyzika. Dokonce i na významných vysokých školách s filosofickým zaměřením byla předešlá fyzika a dokonce i přírodověda. Na středních školách kromě specializovaných škol jako jsou školy hotelové, kuchařské je všude jedním z předmětů fyzika. Je skutečností, že fyzika dnes integruje spolu s matematikou, chemií, biologií a technickými vědami v jeden celek. Během vývoje vznikly na vysokých školách vynikající učebnice fyziky ve jazycích, nejvíce a nejproslulejší jsou v angličtině z tradičních anglických univerzit. Velmi významné a dokonalé učebnice vznikaly v Německu v němčině a později i v SSSR a nyní v Rusku. Odráželo to skutečnost vyspělosti vysokých škol a jejich výzkumné činnosti. Autorů těchto vynikajících učebnic fyziky byli většinou

špičkoví fyzici dokonce i laureáti Nobelových cen za fyziku jako např. L.D.Landau (SSSR) a R. Feynman (USA). Ti si uvědomovali nutnost aplikací fyziky. Je základem nejen fyzikálně technických věd (FTV), ale silně zasahuje také i do medicíny a všech druhů technologie, kde se její použití ukazuje nejdůležitější. Vývoj fyziky na vysokých školách v ČR ovlivňovaly učebnice německé, ruské a anglické. Z nich jako příklady lze uvést německé G.Joos: Einführung in theoretische Physik, Grihmsehl, E.: Lehrbuch der Physik I,II,III,IV, Rennert, P., et al.: Kleine encyklopedie: Physik a další, ruské Kitajgorodskij : Kurs Fiziky, Sivuchin: Kurs Obščej fiziki, Javorskij , Detlaf : Kurs fiziki, z anglické Kittel, Ch. et al.: Berkeley Physics Course, Feynman: Feynman lectures on physics, Tipler, Mosca: Physics for scientists and engineers a ruská učebnice fyziky vhodná pro aplikátory : detlaf, Javorskij: kurs fiziki. z angličtiny a ruštiny bylo přeloženo několik učebnic, z nichž v poslední době lze uvést překlad autorů Halliday, Resnick, Walker: Fyzika , vysokoškolská učebnice fyziky. Z učebnic v ČR lze uvést Nachtigalovu fyziku, Horákovu et al: Základy fyziky a méně známých dalších autorů z univerzity a techniky. Všechny mají nevýhodu, že jsou to rozšířené učebnice středoškolské za použití matematického aparátu. Podrobnější přehled učebnic s přesnými citacemi lze najít např. v [1], [2]. Převahu již dříve vydaných těchto knih tvoří klasická fyzika a pro moderní partie potřebné pro nanofyziku nezbylo již místa, natož na aplikace.

Poněvadž soudobé technologie se orientují na materiálové inženýrství a nanotechnologii, je třeba tímto směrem orientovat i přednášky a učebnice (příručky) fyziky. Pochopitelně, že součástí aplikací jsou měřící metody, přístrojová technika, zvláště pak nedestruktivní zkoušení materiálů a pro tyto aplikace má směřovat fyzika pro tyto obory. Nelze se již spokojit se všeobecnou fyzikou, kde bez ohledu na použití se přednášejí všechny části fyziky podle programů v prošliých letech. V roce kolem roku 1967 jsem narazil na sovětskou knížku Krátkij spravocnik po fizike. Zaujala mne proporcemi obsahu. Klasická fyzika zabírala 1/3 obsahu, ostatní část se věnovala moderním partiím. V té době byl aktuální Mössbauerův jev a ten ní byl již dobře vysvětlený. Navrhl jsem ji k překladu a v roce 1970 vyšla pod názvem Přehled fyziky a je dodnes aktuální. Při přednáškách fyziky se m i stala vzorem svou schopností vyložit ty nejsložitější partie současné fyziky. V tomto směru jsem se snažil koncipovat přednášky fyziky a výsledkem se stala příručka Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Pojmem nanotechnologii se snažím zdůraznit aktuálnost nanotechnologie a zdůraznit ty části fyziky, které jí slouží, i když je v ní zařazena i femtotechnologie.

2. K čemu má sloužit fyzika nefyzikům

Přednášky fyziky na vysokých školách technických a medicíně mají především těm oborům, které jsou na příslušné vysoké škole nosné. 1. Nemají zaměřené na podrobné zpracování probírané látky beze vztahu k použití. 2. Mají být soustředěné více na jevovou stránku vedoucí k aplikacím. 3. v složitějších partiích se uchýlit i k populárně vědeckému výkladu na úkor přesnosti. 4. Těžiště přenášek a příruček přenést do neklasické oblasti fyziky důležité pro nanotechnologii jako je atomová, molekulová fyzika a fyzika kondenzovaných látek a do metodiky jejich zkoušení, zvláště pak nedestruktivní. 5. Uvádět aplikace. Také aplikace je třeba se učit, když jsou známé a ne je teprve objevovat. 6. Přednášky by měly obsahovat podstatu všech závažných nedestruktivních metod. 7. Fyzika by měla sloužit jako východisko k objevným aplikacím 8. Měla by vyzbrojit posluchače teoreticky k budoucím výkladům měřících metod a technologií.

Takovou příručku není jednoduché sepsat a ještě nesnadnější jí pak vydat. Je to dlouhodobý proces, který je možné řešit vytvořit velkého kolektivu a pracovat paralelně, nebo dlouhodobě jednotlivcem. Jaké jsou tedy ideální přednášky a texty ke splnění bodů 1. až 8. Není jednoduché najít ideální přednášky a i učebnici. Přesto taková učebnice existuje a lze jako ideální učebnici označit v současnosti učebnici autorů Triplera a Moscaa: Physics for scientists and engineers. Je rozsáhlá kolem 1300 stran zvětšeného formátu, opatřená velkým množstvím dokonalých obrázků s realistickými motivy fyzikálních jevů. I když jsou v knize

i aplikace, nejde o systematicky uváděné aplikace. Ideální učebnice musí být zaměřena co nejvíce na jevy více než na odvozování i když užitečných vztahů, které jsou nutné pro technologii.

2. Jakou fyziku potřebuje nedestruktivní zkoušení

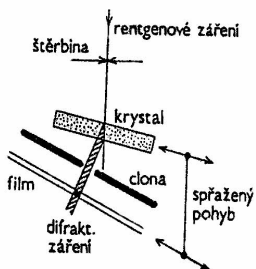
Nedestruktivní zkušební metody jsou ve většině založené na fyzikálních jevech a zákonech. V mechanice jde o v praxi důležité tření, pružnost a pevnost. Otevřené problémy jsou při testování těchto veličin pro mikro a nanovláčna. Důležité je také testování anizotropie mechanických a reologických vlastností. Z mechaniky jsou zajímavé jevy kmitů kolem rezonance, infrazvuk, zvuk a ultrazvuk. Velké naděje jsou vkládané absorpci a emisi zvuku a ultrazvuku k hodnocení vlastností materiálů. Z hydrodynamiky je důležitá viskozita. Z tepelných pak tepelný vodivost, přestup a prostup tepla. Magnetismu se již velmi brzy po objevu užívalo k nedestruktivním zkouškám železa a jeho slitin. Zajímavé je rovněž použití vířivých proudů k hodnocení mechanických vlastností ocelí. Elektrických jevů se využívá běžně k měření teploty, a to odporově nebo termoelektricky termočlánky (Seebeckův jev). Peltierův termoelektrický jev se využívá k udržování stálé teploty, k chlazení a ohřevu zkušebních a měřicích zařízení. Daleko nejrozšířenější pro nedestruktivní zkušebnictví jsou metody využívající elektromagnetického záření, a to všech vlnových délek. Pro materiálové zkušebnictví jsou nejrozšířenější metody optické, mikroskopické a interferometrické. Jako zkušební diagnostiky v nanoměřítcích jsou rozšířené metody rentgenografické, založené na difrakci rentgenového záření. Těmito metodami lze přímo určovat fázovou analýzu, velikosti krystalitů v látkách a nepřímé určování poruch v krystalech, teplotní kmitů atomů v pevných látkách a provádět rentgenovou spektrální analýzu. Snem každého pracovníka, pracujícího v materiálové fyzice bylo zviditelnit jednotlivé atomy a jejich chování v materiálech. K tomu byly postupně objevené metody počínaje elektronovými mikroskopy, řadkovacími elektronovými mikroskopy, iontovými mikroskopy a projektory [3], emisními mikroskopy, přes holografické rentgenové metody, až po tunelové řadkovací mikroskopy a atomové silové mikroskopy. Poněvadž všechny uvedené metody jsou založené na fyzikálních principech a objevech, je vhodné, aby již v základech fyziky se objevovala podstata těchto metod, na které by pak snadněji navazovaly monografie těchto metod jako např. [4]. V ní jsou podrobněji a rozsáhleji zpracované uvedené metody.

V současné době je aktuální vypracovat zkušební metody nanotechnologie vláken a textilií. Jako ilustraci výsledků uváděných metod jsou uvedené některé obrázky z této publikace jako např. Langova metoda rentgenové topografie poruch na obr.1,2., příklady rentgenové interferometrie (obr.3,4) výsledky atomové silové mikroskopie (obr.5,6), záznam akustické emise při namáhání textilií (obr.7) a odstředivý tribometr k určování anizotropie textilií (obr.8):

3. Jaké řešení

Současný stav literatury fyziky pro technické vysoké školy je takový, že každá fakulta si vydává svá skripta, což je jak ekonomicky tak i odborně nevýhodné. Chybí celostátně vydávané knihy, neboť nakladatelství jsou malá a těžko si mohou dovolit malé náklady poměrně drahých knih. Jednou z cest by byly překlady. Pro ně je třeba vybrat vhodný titul a tým překladatelů, aby byl překlad hotový za rok. Jako první návrh překladu se jeví kniha Manfreda von Ardenne et al: *Efekte der Physik* 1988 aktualizovaný o nové jevy po roce 1988 vlastními autory. Zde jde o knihu již monografickou. Jako základní pomůcku pro pochopení fyzikálních principů nedestruktivních zkušebních metod obecnější pomůcku, která by nejen představila fyzikální základy nedestruktivních zkušebních metod, ale přispěla i širšímu rozhledu po fyzice. Proto byly vytvořené *Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii (ZFPA)*, aby byla k dispozici publikace, ve které by byly aplikace. K ilustraci mohou sloužit

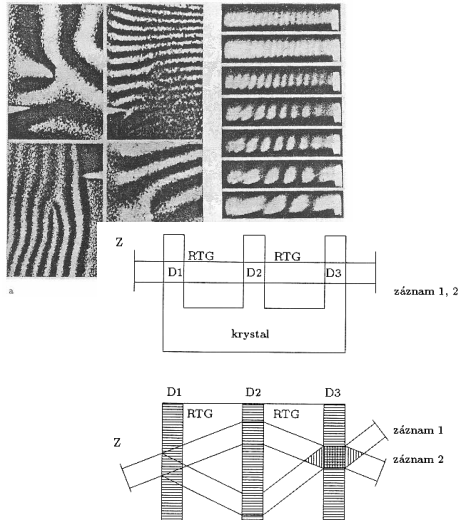
názvy 24 kapitol: 1.díl 1. Úvod, 2.Předmět fyziky a rozdělení fyziky, 3. Využití matematiky ve fyzice, 4. Mechanika, 5. Kmitání a vlnění 6. Termodynamika, molekulová a statistická fyzika 303 stran, 2.díl 7.Elektrodynamika, 8. Optika, 9.Relativita, 10. Atomová a molekulová fyzika, 11. Kvantová fyzika. 3.díl 12. Jaderná fyzika, 13. Fyzika kondenzovaných látek, 14. Biofyzika, 15. Měřicí a přístrojová fyzika, 16. Geofyzika, 17. Kosmická fyzika, astrofyzika, 18. Počítačová fyzika, 19. Unitární teorie, teorie všeho, 20.Teorie superstran, 21 Synergetika, 22. Fyzika a filosofie, 23. Fyzika makrostruktur, 24.Univerzální konstanty a tabulky. Kromě klasického pojetí jsou uvedené v ZFPAN od kapitoly 11 i kapitoly důležité pro nanotechnologii a kapitoly o nových disciplínách fyziky.



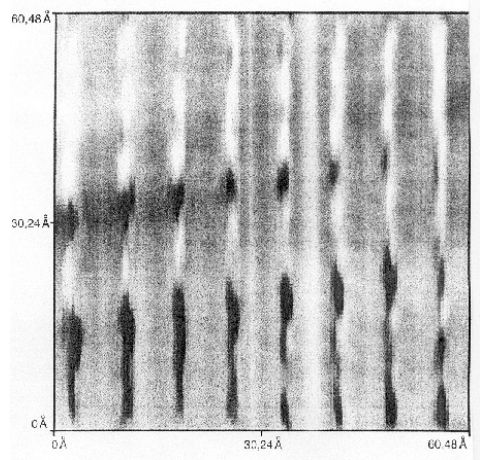
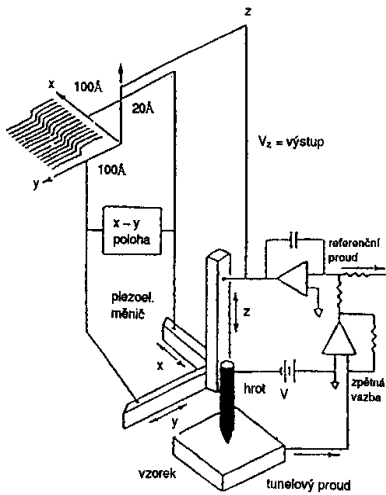
Obr.1. Langova topografie



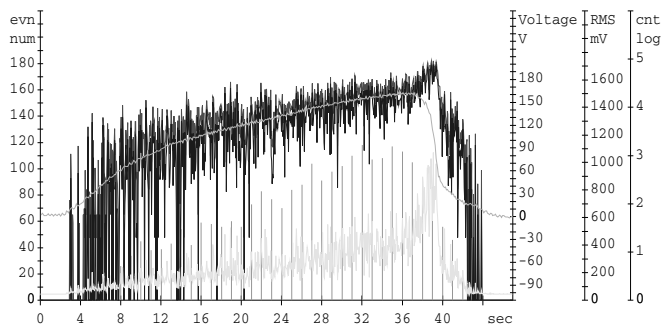
Obr.2 Poruchy v monokrystalech křemene



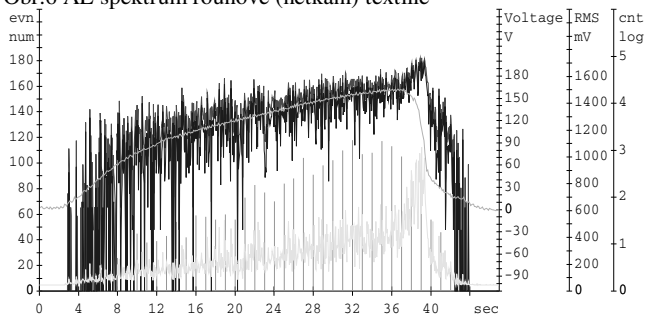
Obr.3.4 Rentgenová interferometrie



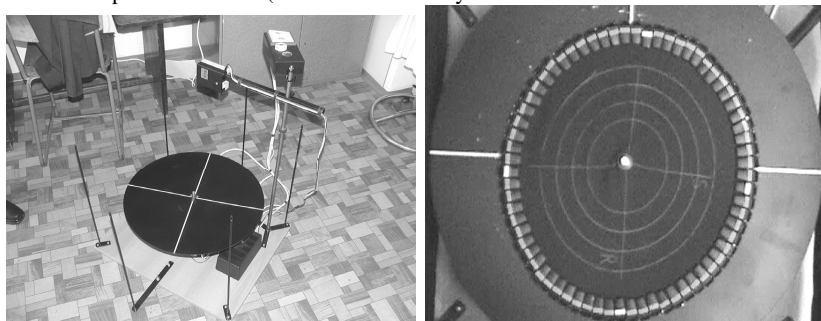
Obr.5.Princip atomového silového mikroskopu (ASM) Obr.6 Povrch PTFE pořízeného ASM



Obr.6 AE spektrum rounové (netkaný) textilie



Obr.7 AE spektrum textilie (maňšetrové tkaniny)



Obr.8 Odstředivý dynamometr s výsledkem měření anizotropie textilie

4. Literatura

- [1] Sodomka,L.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Adhesiv Librec 2005, díl 1,2,3 na CD
- [2] Sodomka,L., et al.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Díl 1.Adhesiv Librec 2007, str.10
- [3] Sodomka,L.: Struktura a vlastnosti pevných látek. SNTL Praha 1967. Anglický překlad. Structure and properties of solids. Illife. London 1970
- Ardenne, M. von.: Effekte der Physik und ihre Anwendungen VEB Deutsche Verlag der Wissenschaften, Berlin 1988
- [4] Sodomka,L., Fiala,J.: Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi, díl1,2,3. Adhesiv. Librec 2002,2003



**METODA EXPRESNÍ DIAGNOSTIKY
PRUŽNOPEVNOSTNÍCH PARAMETRŮ A OKAMŽITÉHO
NAPĚTODEFORMAČNÍHO STAVU MATERIÁLU
ULTRAZVUKEM
A NEW METHOD FOR RAPID NON-DESTRUCTIVE
DIAGNOSIS OF ELASTIC-STRENGTH PARAMETERS AND
FOR DETERMINATION OF AN INSTANTANEOUS STRESS-
STRAIN STATE OF A MATERIAL BASED ON ULTRASOUND
MEASUREMENTS**

Jan VALÍČEK*, Dalibor SOLNAŘ, Marta HARNIČÁROVÁ*****

*HGF, VŠB-TU v Ostravě, **PTS Josef Solnař, s.r.o.,

***CNT, VŠB-TU v Ostravě

jan.valicek@vsb.cz

Abstrakt

Metoda expresní a nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních parametrů a okamžitého napětodeformačního stavu, včetně konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ϵ , využívá nového analytického přístupu k hodnocení vlastností materiálu v procesu jeho přetváření vlivem vnějších destruktivních sil ultrazvukem. Navrhovanou metodou na nové teoretické bázi stanovujeme ekvivalenty fyzikálně-mechanických parametrů, tj. ekvivalenty tabulkových parametrů materiálu a navíc také jejich průběhové změny v čase vlivem strukturně deformační alterace materiálu během přetvárného procesu. Jde o i-té hodnoty parametrů, které jsou funkcí zatěžujícího napětí σ_{zat} , intenzity deformace a času t . Metodou expresně a nedestruktivně stanovujeme ekvivalenty všech nejdůležitějších pružně-pevnostních charakteristik materiálů, které jsou potřebné pro projektanty, konstruktéry, pro defektoskopii a pro další výzkum v oblasti fyzikálně-mechanických vlastností technických materiálů.

Klíčová slova: *mechanické ekvivalenty materiálu, ultrazvuk, nedestruktivní diagnostika, zatěžovací diagram σ - ϵ*

Abstract

A new method for rapid non-destructive diagnosis of elastic-strength and defectoscopic parameters and for determination of an instantaneous stress-strain state of a material including theoretical construction of a load diagram σ - ϵ presents a new analytic approach to evaluation of material properties in the process of its deformation due to external destructive forces using ultrasound. The proposed theoretical framework of this method enables to

determine equivalent physical-mechanical parameters, i.e. equivalent tabulated values of material parameters and also their changes over time due to structural alteration leading to the material deformation during the deformation process. It shall in particular be parameters, which are a function of a loading stress σ_{zat} , intensity of deformation and time t . With this rapid and non-destructive method can be determined the equivalents of the most important elastic-strength characteristics of materials, which are necessary for designers, engineers, for defectoscopy and for future research in the field of physical-mechanical properties of engineering materials.

Key words: mechanical equivalents of materials, ultrasound, non-destructive diagnosis, load diagram σ - ε

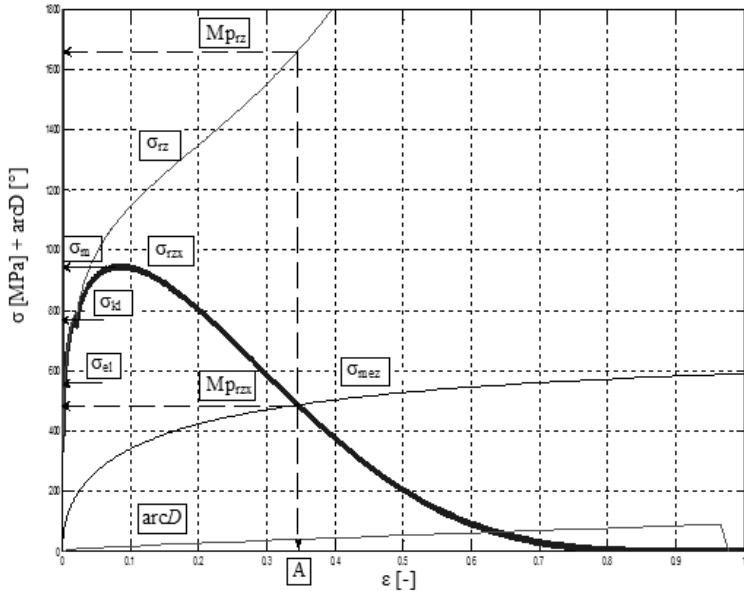
1. Úvod

Na základě dlouholeté spolupráce firmy PTS Josef Solnař, s.r.o. s Institutem fyziky, HGF, VŠB-TUO vzniklo v tomto roce rozšíření ve firmě o vědecko-výzkumné a inovační aktivity. V současné době máme společný projekt za podpory MSK. V předmětném projektu řešíme vytvoření nového způsobu stanovení statických a dynamických hodnot mechanických ekvivalentů z měření ultrazvukových vln. Cílem nové metody stanovení mechanických ekvivalentů materiálů na základě měření ultrazvukových vln bude vývoj nového přístroje pro expresní nedestruktivní diagnostiku pružnopevnostních a defektoskopických parametrů a okamžitého napětíodeformačního stavu materiálu včetně teoretické konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ε a dalších analýz na základě ultrazvukového měření. Za tímto účelem bude vyvinut nový typ snadno přenosného ultrazvukového přístroje použitelného jak v laboratorních podmínkách, tak i v podmínkách in-situ. Přístroj bude mít jako software implementován algoritmus nového způsobu operativního výpočtu okamžitých pružnopevnostních a defektoskopických parametrů materiálů. Navrhovaný způsob se bude vyznačovat novou teoretickou bází stanovení ekvivalentů fyzikálně-mechanických a defektoskopických charakteristik, tj. ekvivalentů tzv. tabulkových hodnot materiálů a navíc bude expresně vyhodnocovat také jejich průběhové změny v čase vlivem strukturně deformační alterace materiálu během přetvárného procesu při technologickém a funkčním namáhání

2. Metoda nedestruktivní diagnostiky mechanických parametrů

Vyvíjená metoda nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních parametrů využívá nového analytického přístupu k hodnocení interakce ultrazvuku s materiálem v procesu jeho přetváření vlivem vnějších destruktivních sil. Navrhovanou metodou na nové teoretické bázi stanovujeme ekvivalenty fyzikálně-mechanické charakteristiky, tj. ekvivalenty tabulkových hodnot materiálů. Jde o nejdůležitější parametry, které jsou potřebné pro projektanty a konstruktéry, jako jsou: pevnost v tahu smluvní (σ_{Tm}), pevnost v tlaku smluvní (σ_{Dm}), pevnost v tahu skutečná (σ_{TSK}), pevnost v tlaku skutečná (σ_{DSK}), modul pružnosti (E_{mat}), modul pružnosti průběhový ($E_{(i)}$), napětí na mezi pružnosti (R_e), dolní mez kluzu (σ_{Pd} 0,2), horní mez kluzu (σ_{Ph} 0,2), meze únavy, vývoj napětí a deformace v pružné i v plastické přetvárné oblastí, hustota materiálu (ρ), modul pružnosti ve smyku (G_{mat}), Poissonova konstanta (μ), relativní podélné prodloužení (ε), smykové napětí (τ), tažnost (A), případně také z lomových charakteristik houževnatost (K_{IC}) a Griffithovu funkci (G_{IC}), aj. včetně analytických výsledků chování materiálu při různých způsobech zatěžování

s umožněním interaktivního matematického modelování. V rámci předmětného vývoje budou prováděny konstrukce diagramu σ - ε pro konstrukční materiály, a to i takové jejichž vstupní parametry E_{mat} , σ_m , ρ jsou extrémně odlišné, tj. pro celé spektrum kovových (oceli, kovy a jejich slitiny) a nekovových (elastomery, polymery, dřevo, horniny, stavební materiály, umělé hmoty, sklo, keramika, plasty) technických materiálů. Postup řešení bude spočívat v tvorbě pracovního algoritmu pro komplexní diagnostiku materiálu na základě vstupních hodnot, kterými bude rychlost šíření podélných a příčných ultrazvukových vln materiálem. Tvorba algoritmu bude realizována podle výsledků vlastních analytických a laboratorních prací. Pracovní algoritmus bude implementován do přenosného ultrazvukového přístroje vlastní prototypové konstrukce. Na základě tabulkových hodnot, materiálových listů, kontrolních laboratorních zkoušek a údajů podávaných výrobcí budou naměřené hodnoty prokazatelně verifikovány. Nutno také kriticky zdůraznit, že zkoušky v různých laboratořích probíhají při různých subjektivních a objektivních podmínkách, proto jsou výsledky na jednom materiálu často nesrovnatelné a taktéž to, že tabulkové hodnoty udávané vždy s velkým rozptylem lze brát pouze jako orientační, a proto nemohou být pro konkrétně využívaný materiál prokazatelné. Přetvárný charakter každého materiálu má pro potřebu projektanta základní význam a má být co nejpřesněji vyjádřen také zatěžovacím diagramem σ - ε a prokazatelně platnými fyzikálně-mechanickými parametry materiálu [1-7]. Ze současných laboratorních zkoušek vychází nikoliv skutečné, nýbrž tzv. smluvní parametry diagramu σ - ε a tyto jsou následně také uváděny v materiálových tabulkách. Problematika pružnoplastické a plastické oblasti přetváření je teoreticky nedostatečně dořešena. To platí také pro vyhodnocení a predikci mechanických a strukturních únavových změn probíhajících v konstrukčních materiálech v čase vlivem druhu a způsobu funkčního namáhání. Způsob a zařízení pro expresní zjišťování potřebného komplexu hodnot pro posouzení okamžitého mechanického a strukturního stavu materiálu dosud nebyly pro potřeby praxe na národní i mezinárodní úrovni uspokojivě vyvinuty. Žádané materiálové hodnoty mohou tak být operativně a expresně podle potřeby naměřeny nově vyvíjeným ultrazvukovým přístrojem přímo v provozech, poloprovozech, ve výzkumných a projektových laboratořích a mohou být ihned k dispozici projektantům na stejné úrovni jako tzv. hodnoty tabulkové. Mohou vstupovat do výpočtových rovnic týkajících se dimenzování, stabilitních a konstrukčních výpočtů a umožňovat matematické modelování. Operativně a expresně mohou sloužit jako defektoskopická měření nebo pro zjišťování a kontrolu okamžitého stavu materiálu namáhaných hotových konstrukcí a staveb v terénu a také pro výstupní kontrolu jakosti polotovarových a hotových výrobků. Naměřené výstupy budou ve formě numerické a grafické bezprostředně ukládány v paměti přístroje a zobrazovány na displeji přístroje nebo napojeného počítače. Zatěžovací diagram σ - ε pro daný materiál určený z naměřených hodnot přímým dosazením rychlosti podélných ultrazvukových vln v materiálu $v_{UZ,L}$ jako vstupní hodnoty do algoritmu je na obr. 1.



Obr. 1 Ekvivalent zatěžovacího diagramu σ - ε oceli ČSN 16 343, $E_{mat} = 171200$ MPa; $Mp_{sml}(\sigma_m) = 930$ MPa, $Mkl(\sigma_{kl}) = 760$ MPa expresně zkonstruovaný na základě měření podélného ultrazvukového vlnění. Zde je: Mp_{rz} – napětí na mezi pevnosti skutečné [MPa], σ_{rz} – napětí v materiálu skutečné [MPa], σ_{rzx} – napětí v materiálu měřené [MPa], Mp_{rzx} – napětí na mezi pevnosti měřené [MPa], $Mp_{sml}(\sigma_m)$ – mez pevnosti smluvní [MPa], $Mkl(\sigma_{kl})$ – mez kluzu [MPa], Mel – mez pružnosti [MPa], σ_{mez} – napětí v materiálu mezní [MPa], $arcD$ – úhel vnitřního tření [°], A – tažnost [-].

Fig. 1 Equivalent of the load diagram σ - ε with $E_{mat} = 171200$ MPa, $Mp_{sml}(\sigma_m) = 930$ MPa, $Mkl(\sigma_{kl}) = 760$ MPa being fast created on the basis of longitudinal ultrasound measurement (for steel ČSN 16 343). Where: Mp_{rz} – true stress at the ultimate strength [MPa], σ_{rz} – true stress in a material [MPa], σ_{rzx} – measured stress in a material [MPa], Mp_{rzx} – stress at the measured ultimate strength [MPa], $Mp_{sml}(\sigma_m)$ – proof stress [MPa], $Mkl(\sigma_{kl})$ – yield point [MPa], Mel – limit of elasticity [MPa], σ_{mez} – ultimate stress in a material [MPa], $arcD$ – angle of internal friction [°], A – elongation [-].

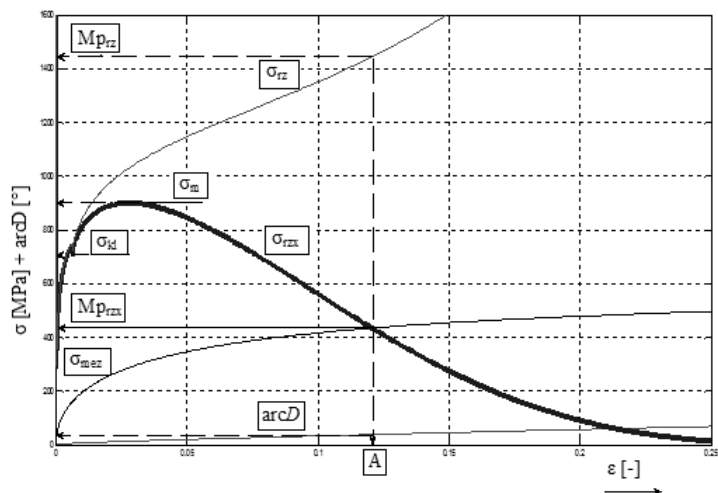
S velkou mírou citlivosti reaguje prezentovaná metoda mechanické diagnostiky materiálů na změnu hustoty materiálu ρ . Známa hodnota ρ může být totiž vstupním parametrem do výpočtu diagramu σ - ε stejně dobře jako parametr drsnosti povrchu Ra , nebo tabulková či naměřená hodnota modulu pružnosti E_{mat} , resp. tabulková, či expresně naměřená hodnota $v_{UZ,L}$. Podle potřeby lze doplnit závislosti vstupních parametrů dalšími technologickými parametry, které jsou se vstupními ve fyzikálně-mechanické korelaci a to i průběhově. Tak lze vytvořit klasifikaci materiálových skupin podle různých technologických potřeb, týkajících se pružnostní, pevnostní,

deformační charakteristiky, vrtatelnosti, řezatelnosti apod. Velmi dobrá citlivost metody na změnu objemové hustoty ρ (g/cm^3 , změny řádově 10^{-3}) má také velký význam zejména pro defektoskopickou praxi, nebo pro řešení vlivu koroze na změnu strukturně-mechanického stavu materiálu. V tab. 1 je uvedena změna vybraných parametrů nízkolegované ocele ČSN 14 220 podle expoziční doby koroze pro stavy a, b, c, d podle expoziční doby v silně korozivním prostředí a ilustrativně příslušné σ - ϵ diagramy pro stav a s expoziční dobou 0,5 roku (obr. 2) a pro stav d s expoziční dobou 3 roky (obr. 3). V tab. 1 jsou

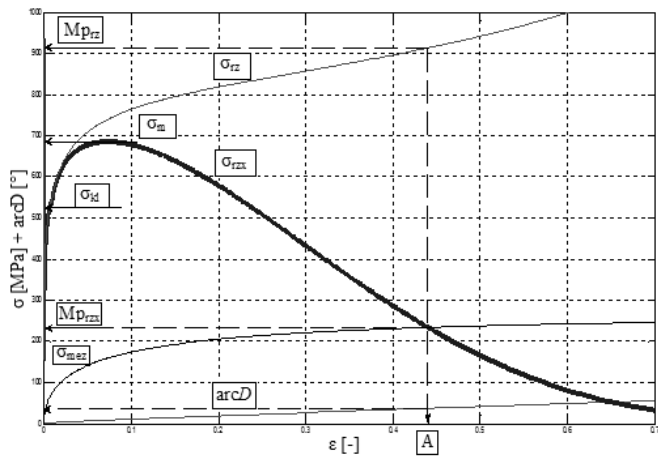
Tab. 1 Podle metody, tj. ze změny rychlosti podélné ultrazvukové vlny, teoreticky určená změna vybraných materiálových parametrů ocele ČSN 14 220 podle expoziční doby koroze. Zde je: K_{plmat} – koeficient plasticity materiálu [μm], E_{mat} – Youngův modul pružnosti [MPa], ρ_{sur} – hustota povrchové vrstvy [g.cm^{-3}], $v_{UZ,L}$ – rychlost podélných ultrazvukových vln [m.s^{-1}].

Tab. 1 According to the method, i.e. if the velocity of longitudinal ultrasonic waves changes, it is theoretically determined a change of the selected material parameters of steel ČSN 14 220 according to corrosion exposure time. Where: K_{plmat} – plasticity coefficient [μm], E_{mat} – Young's modulus of elasticity [MPa], ρ_{sur} – density of surface layer [g.cm^{-3}], $v_{UZ,L}$ – velocity of longitudinal ultrasonic waves [m.s^{-1}].

Expoziční doba[rok]	Materiál ocele ČSN 14 220	σ_m [MPa]	K_{plmat} [μm]	E_{mat} [MPa]	σ_{kl} [MPa]	ρ_{sur} [g.cm^{-3}]	$v_{UZ,L}$ [MPa]
0.5	Stav a	900	39,681	158 756	700	6,299	5414,2
1	Stav b	800	63,489	125 500	620	5,601	5 006.2
2	Stav c	750	68,880	120 580	580	5,490	4 939.9
3	Stav d	685	87,297	107 703	525	5,189	4 757.4



Obr. 2 Zatěžovací diagram σ - ϵ ocele ČSN 14 220 pro stav a; korozivní expozice 0,5 roku.
 Fig. 2 Load diagram σ - ϵ of steel ČSN 14 220 for the state a; 0.5 years of corrosion exposure



Obr. 3 Zatěžovací diagram σ - ϵ ocele ČSN 14 220 pro stav d; korozivní expozice 3 roky.
 Fig. 3 Load diagram σ - ϵ of steel ČSN 14 220 for the state d; 3 years of corrosion exposure.

Průběhy závislosti σ - ε ocele ČSN 14 220 v zatěžovacích diagramech na obr. 2 a obr. 3 a odečtené numerické hodnoty sledovaných parametrů potvrzují výrazné snížení materiálových charakteristik pevnosti, zvýšení plasticity a tažnosti v závislosti na expoziční době v silně korozivním prostředí. Zatímco strukturně-mechanické změny materiálových parametrů vlivem koroze probíhají v čase plynule, vlivy defektoskopického charakteru by se v naměřených diagramech projevil skokem. Vyšetřením časové funkce $\varepsilon = f(t)$ lze stanovit životnost a stupeň stability staveb a konstrukcí podle druhu provozního zatěžování, expozice v korozivním prostředí nebo podle naměřené intenzity defektoskopických změn a navrhnout tak účinná preventivní opatření.

3. Využití v technice a bezpečnosti

Předkládaný způsob nedestruktivní diagnostiky bude umožňovat:

- expresní stanovení ekvivalentů základních materiálových parametrů a konstant,
- konstrukci zatěžovacího diagramu σ - ε , resp. F - Δl a identifikaci okamžitého napětově-deformačního stavu a dalších přetvárných vlastností materiálů,
- sledování, kontrolu a predikci změn parametrů důležitých pro napětově-deformační diagnostiku a monitorování materiálů při provozním zatěžování,
- exaktní kvantifikaci průběhu funkčních závislostí napětově-deformačního stavu až do porušení struktury materiálu podle vnějšího provozního namáhání,
- stanovení změn mechanických parametrů materiálů vlivem koroze, defektů nebo výrobních vad,
- expresní diagnostiku stavu materiálů ultrazvukem s přímou konstrukcí zatěžovacího diagramu σ - ε a okamžitého napětově-deformačního stavu materiálu,
- stanovení stupně stability, okamžitého stupně bezpečnosti a prognózu životnosti staveb a konstrukcí z hlediska únavových změn jádra materiálů vlivem funkčního zatěžování,
- aplikaci teorie pružnosti a pevnosti, v pružné, pružně-plastické a plastické fázi deformace,
- matematické modelování okamžitých napětově-deformačních stavů materiálů v čase podle druhu provozního namáhání,
- diagnostiku mechanického chování v projekci nově vyvíjených materiálů,
- využití doplněných informací o materiálech při projektování strojů, staveb a technických zařízení,
- tržní uplatnění.

4. Závěr

Účelem předmětného projektu je vyvinout ultrazvukový přístroj, v němž bude implementován nový způsob nedestruktivní diagnostiky pružnopevnostních a defektoskopických parametrů a okamžitého napětově-deformačního stavu materiálu včetně konstrukce zatěžovacího diagramu σ - ε a dalších analýz přetvárnosti funkčně namáhaných materiálů, jakož i interaktivního modelování okamžitých napětově-deformačních stavů materiálu na základě měření podélných a příčných ultrazvukových vln. Předpokládáme také okamžité zavedení do praxe a tržního tuzemského a zahraničního prostředí. Nový přístroj bude snadno přenosný a bude

umožňovat expresní měření v provozech, poloprovozech, ve výzkumných a projektových laboratořích na hotových konstrukcích a stavbách v terénu. Předpokládaná technická charakteristika vyvíjeného přístroje by měla dosáhnout, vzhledem k nedostatkům současného stavu měřické techniky v dané oblasti, velkého aplikačního využití téměř ve všech hlavních oblastech současné technické praxe, v projektových a výzkumných ústavech a v bezpečnosti provozovaných staveb, konstrukcí nebo v důležité operativní kontrole stability, stupně bezpečnosti a funkční životnosti nosných konstrukčních prvků. V komerční sféře předpokládáme zájem odborníků a tržní uplatnění nového originálního přístroje jak na tuzemské, tak i na zahraniční úrovni, rozšíření stávající výroby a tvorbu nových pracovních míst.

Poděkování

Příspěvek byl podpořen projekty GA ČR 101/09/0650, MSK reg. č. RRC/04/2010/34, RMTVC reg. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0040, IT4Innovations reg. č. CZ.1.05/1.1.00/02.0070, MŠMT reg. č. MSM6198910016, a MEB051021.

Literatura:

- [1] Strnadel, B.: Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství. Ostravské tiskárny a.s., Ostrava, 1998
- [2] Kříž, R., Vávra, P.: Strojírenská příručka, svazek 3. Nakladatelství SCIENTIA, spol. s.r.o., Praha, 1993
- [3] Leinveber, J., Vávra, P.: Strojnické tabulky, Albra-pedagogické nakladatelství, Úvaly, 2005-10-24
- [4] Obraz, J.: Zkoušení materiálu ultrazvukem. SNTL, Praha, 1989
- [5] Trebuňa, F., Šimčák, F., Jurica, V.: Pružnosť a pevnosť I, II. Viena, Košice, 2000
- [6] Green, R.: Nondestructive characterization of materials VIII, Plenum Press, New York, 1998
- [7] Valíček, J.; Borovička, A.; Hloch, S.; Hlaváček, P.: Způsob navrhování technologie hydroabrazivního dělení materiálů PV2010-571; Z 7626; Česká republika, 2011.



COMPARATIVE STUDY OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS FROM WOOD SPECIMENS UNDER STATIC BENDING LOAD

David VARNER^{*}, Miroslav VARNER^{}**

^{*} Department of Engineering and Automobile Transport, Faculty of Agronomy, Mendel University, Brno, Czech Republic, ^{**} CorrosionFatigue Association

Contact e-mail: info@davar.cz

Abstrakt

V článku jsou prezentovány výsledky měření signálů akustické emise během standardní ohybové zkoušky dřevěných vzorků. Pro pět typů dřeva byly identifikovány typické průběhy vzniku akustické emise. Na základě těchto poznatků bude v průběhu dalšího výzkumu proveden odhad chování jednotlivých vzorků a vznik porušení při ohybovém zatížení. Ortotropní vlastnosti dřeva ovlivňují významnou měrou možnost použití známých technik monitorování a vyhodnocení signálů AE. Při měření byly u vzorků zjišťovány další vlastnosti, zejména modul pružnosti, mez pevnosti, délka namáhání a hustota. Výsledky budou prezentovány v rámci disertační práce zaměřené na nedestruktivní diagnostiku porušení dřeva metodou akustické emise.

Klíčová slova: dřevo, zkouška statickým ohybem, akustická emise

Abstract

In this innovative study, acoustic emission signals were captured during commonly used static bending test of wood specimens. For five different wood types, typical AE patterns were identified in the acoustic emission records to further describe the under-the-stress behavior and failure development. Orthotropic properties of wood were found to be rather complicated to conform within known AE techniques. Evaluated properties of the material included MOE (modulus of elasticity), MOR (modulus of rupture), TTF (time to failure), and density. Results of the study will be included in a dissertation thesis focused on non-destructive diagnostics of wood using acoustic emission method.

Keywords: wood, static bending test, acoustic emission

Introduction

Acoustic emissions are the stress waves produced by the sudden internal stress redistribution of the materials caused by the changes in the internal structure. Possible causes of the internal-structure changes are crack initiation and growth, crack opening and closure, dislocation movement, twinning, and phase transformation in monolithic materials and fiber breakage and fiber-matrix debonding in composites. Most of the sources of AEs are damage-related; thus, the detection and monitoring of these emissions are commonly used to predict material failure. [2]

In technical diagnostics, AE method has been used to monitor rotational part status (friction and cavitation of bearings/gears), detection of micro-cracks, pressure vessel defects, tubing system defects, aircraft structure evaluation/testing, and bridge status diagnostics. AE technique has proven useful in fatigue testing and destruction experiments.

Major advantages of AE include continuous monitoring of the object, time savings, and failure forecast abilities. On the other hand, AE wave source is not always obvious, as the emitted energy may result from several phenomena inside of the part. Further variable factors include shape of the object, surface area, material structure, and homogeneity level. [2]

Two important issues in AE monitoring technique during bending tests are source identification and damage quantification. A standard bending test samples were used in the experiments. For damage quantification, two methods were used to analyze experimental data: b-value analysis and intensity analysis. [1]

Loading conditions during the static bending might be crucial for the stress distribution and response of the specimen. MOE (modulus of elasticity) and MOR (modulus of rupture) may differ based on the loading configuration. Two types of loading were established: LR beams (annual rings horizontal, load applied to LT face) and LT beams (annual rings vertical, load applied to LR face). The size of the specimens was 10 x 10 x 150 mm. It was found that the variation of MOE and MOR was lower with loads applied to the longitudinal-radial face than the longitudinal-tangential face. Additional information was received about the influence of earlywood and latewood on the tension/compression surfaces. [3]

Methodology based on count and properties of annual rings was used in series of experiments including static bending test of cypress wood samples. Relationship between number of annual rings in the specimen cross-section, wood density, and strength properties of the wood specimens was calculated together with modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR). [4]

It is apparent that the span/depth ratio for bending test specimens can influence the test as well. This behavior was examined with specimens made from Japanese fir. Several material properties were evaluated during modified three-point and four-point bending tests. These included Young's modulus, proportional limit stress, and bending strength. Deflection was measured using three different methods. Authors found that the span/depth ratio should be larger than 20 to produce bending properties conforming well to the elementary bending theory. The changes of the ratio seemed to have significant influence on measurements of Young's modulus. [5]

Experimental Setup

According to the standard [7], static bending test procedure is performed to find ultimate static bend load causing permanent damage of the tested specimen. Testing specimens must be in form of regular-shaped boxes with base dimensions of 20 x 20 mm and length of 300 mm. The fiber direction has to correspond with length dimension. The bending strength is calculated in N/m^2 or kp/cm^2 . Calculated values are usually adjusted to 12% moisture content.

For the actual static bending test, 50 specimens were used. The wood types used were 3 hardwoods (beech, oak, poplar) and 2 softwoods (spruce, pine). For each wood type, 10 specimens were prepared. The specimens were carefully selected with maximum possible uniformity requirements in mind. However, not every specimen had exactly the same structure as the others. Sometimes the annual rings were slightly angled; some specimens had different surface roughness etc.

As far as the specimen moisture content is concerned, the specimens had been stored in a storage facility with stable ambient conditions.

In static bending test procedure, the specimen was placed on two supports at the ends while the third point provided downward pressure in the midpoint. The forces from above acted in radial direction, i.e. the rings were close to horizontal. This test is called three-point bending test in some publications. It has been used for testing of wide range of materials including steel and plastics. There are some variations of the test, e.g. the rings can be vertical in the loading position.

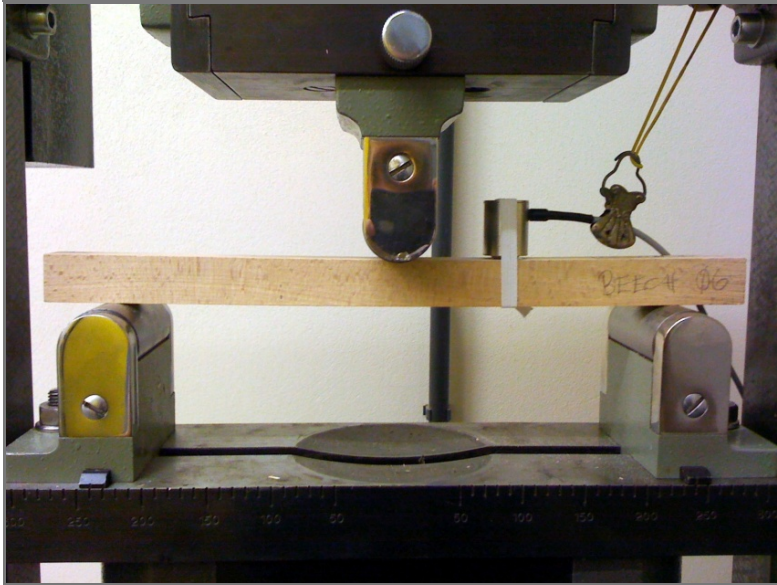


Figure 1: Position of a wood specimen on the bending test machine. Note the AE 767 acoustic emission sensor attached to the specimen via a rubber band and secured against fall-down using a security clamp.

Prior to actual testing, several issues had to be addressed including synchronous recording of the bending test machine and AE signal. Sensor safety precautions were taken into account as well. Preliminary trial test runs revealed possibility of total destruction of the specimen (probably due to internal imperfections or defects). In such case, the remains of the specimen could fall down from the bending machine resulting in severe sensor damage. A simple sensor holder was used to prevent this scenario: a clamp was attached to the sensor cable and fixed using a rubber band. In case of specimen destruction, the sensor was supposed to remain hanging on the machine frame. The actual static bending test procedure was as follows:

- Specimen was selected from the storage facility and designated by wood type and number. Specimen dimensions and weight were measured.
- A slight film of silicone grease was applied to the contact surface and a single sensor was fixed to the specimen using a rubber band, with the distance from the midpoint being 10 cm.
- The specimen was placed onto the bending test machine. The appropriate position was adjusted visually.

- The test run was performed until final breakage of the specimen. After starting the test, the AE monitoring was simultaneously triggered. The bending test progress was viewed on-screen of the PC. During the test, several photos were taken to follow the change of shape and fracture development. Average test run time was 90 seconds.
- Then, specimen was removed from the bending test machine and photographed. Pressure traces on the specimen contact surfaces were measured.
- Data from the bending test were logged and merged into the Dakel Daeshow software. AE RMS vs. time plots were created for individual testing runs.
- Supplementary properties of the testing specimens were calculated including MOE (modulus of elasticity), MOR (modulus of rupture), and density.

Instrumentation and Equipment

The acoustic emission was monitored using Dakel XEDO AE analyzer, a single Dakel sensor and Dakel Daemon software. A 35 dB pre-amplifier was connected to a special low frequency slot in the Dakel XEDO analyzer. The slot was adjusted to cover the frequency range of 10 - 200 kHz. A cylinder-shaped Dakel AE 469 sensor was used for all the bending test runs.

For the static bending test, the ZDM 5/51 machine was used. This machine uses electric power unit and spiral gear drive to lift the bridge with lower support assembly. The device has been installed in the Department of Wood Science laboratory. The ZDM 5/51 bending test machine was equipped with a PC terminal with the M-Test 1.77 software for test control purposes.

Static Bending of Wood

Behavior of the specimen during the static bending test is quite variable with respect to orthotropic nature of the material. The longitudinal axis L is parallel to the wood fiber (grain); the radial axis R is normal to the growth rings (perpendicular to the grain in the radial direction); and the tangential axis T is perpendicular to the grain but tangent to the growth rings. Each of the directions holds unique property set.

During the static bending test, the wood specimen is exposed to compression stress on one surface and tensile stress on the other. This complicated distribution of stress results in a various shear displacements within the cross-section of the beam. Due to anisotropic structure, acoustic emission generated during clear wood damage process shows parameters dependent on loading type and its orientation with respect to grain direction.

When tensile load is being applied in the grain direction, the acoustic emission is expected to come from several sources including separation of cellulose micro fibrils and lignin matrix, actual micro fibril breakage, and final fracture of the entire cell wall.

In perpendicular direction, the cell walls are less reinforced with micro fibrils and overall cell wall strength is reduced. When a tensile loading is applied in this direction, it is likely that acoustic emission signals originate in degradation-related changes of cell wall lignin mass.

Final stage fracture always generates peak acoustic emission bursts (even in audible spectra range). This moment corresponds to MOR (modulus of rupture) ultimate loading conditions.

The procedure listed above applies to wood in general. Obviously, there are different bending failure mechanisms for hardwood and softwood as defined by different wood structure. Microstructure of a hardwood specimen contains vessels, fibers and parenchyma cells, while the tracheids are very few in numbers. In softwood however, there are just two cell types sharing support, conduction and storage functionality: parenchyma cells and tracheids.

Sources of Acoustic Emission during the Static Bending Test

In general, acoustic emission may come from several sources in context of the static bending test: bending machine noise, contact-surface friction noise, gradual collapsing of wood cell walls, and final fracture of the specimen body.

The first two noise types in the list are obviously undesirable. To reduce their influence, it was decided to carry-out a low-friction modification of the static bending test using a low-friction material (10 mm wide Teflon tape) on the contact surfaces. The presumption was that the Teflon tape would not only act as a friction reduction element, but as an "acoustic barrier" as well. After the testing, acoustic emission RMS vs. loading force plots were compared for regular specimens and T (Teflon-tape) specimens.

Results

As expected, the experiment showed quite a different behavior of individual wood type specimens subject to static bending test. In this very first phase of the research, acoustic emission RMS vs. loading force plots were created for each of the 50 regular specimens and 5 Teflon-tape specimens. The aim was to overview the plots and find typical patterns for future observations.

Property parameters of the specimens and static bending test itself included actual moisture content, density, TTF (time to failure), Fmax (maximum loading force at ultimate strength level), MOE (modulus of elasticity in bending) and MOR (modulus of rupture in bending). As far as the low friction modification of the static bending test is concerned, no significant influence was indicated from the plots. Below you can find table with overview of average property values.

Wood Type	MC (%)	Density (kg/m ³)	TTF (sec)	Fmax (N)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Oak	7,6	662,5	59,4	2178,5	11076,5	106,8
Beech	6,2	670,9	73,1	2998,3	11866,7	129,4
Poplar	7,6	383,8	74,7	1394,7	6880,0	66,7
Pine	6,8	499,0	100,4	2085,3	10662,1	94,3
Spruce	8,7	525,0	73,3	1875,7	9233,0	84,7

Table 1: Average property values for individual wood type groups.

OAK Specimens can be divided into 2 behavior-specific groups. 3 specimens showed no AE activity was recorded during the entire bending run; they remained silent until the major fracture. The rest of the testing group showed strong pulses in 80% of ultimate load. The OAKT specimen bore the highest loading force value of 3151 N with very

silent pre-fracture phase until 90% of ultimate load. OAK wood breakage resembled to simple-tension type failure with short horizontal portions parallel to grain and vertical bridging perpendicular to grain. On some specimens, kinking bands were visible under upper loading support. Typical OAK specimen plot can be seen in figure below.

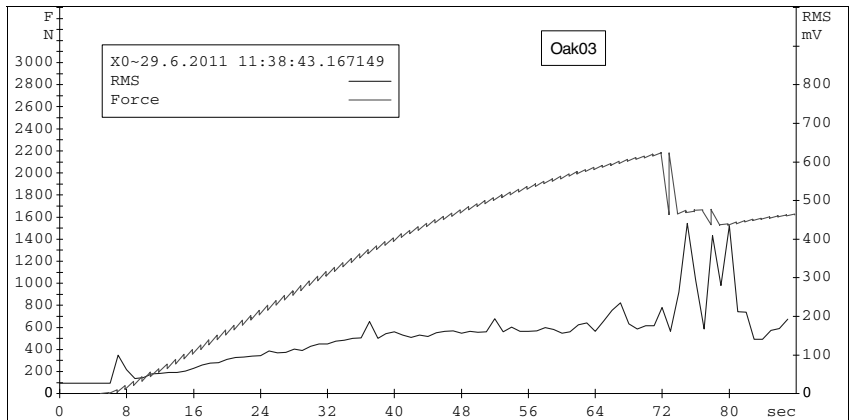


Figure 2: Typical plot of loading force vs. AE RMS for OAK specimen group.

BEECH Specimens showed Live AE activity during transition from elastic to plastic phase and very high values of loading force. BEECH09 specimen withstood the highest loading force of the entire testing set of 50 specimens, reaching value over 3700 N. The BEECHT specimen showed significant differences, reaching loading force value of 3070 N. Fracture type was simple tension (6 specimens) and cross-grain failure (4 specimens). Typical BEECH specimen plot can be seen in figure below.

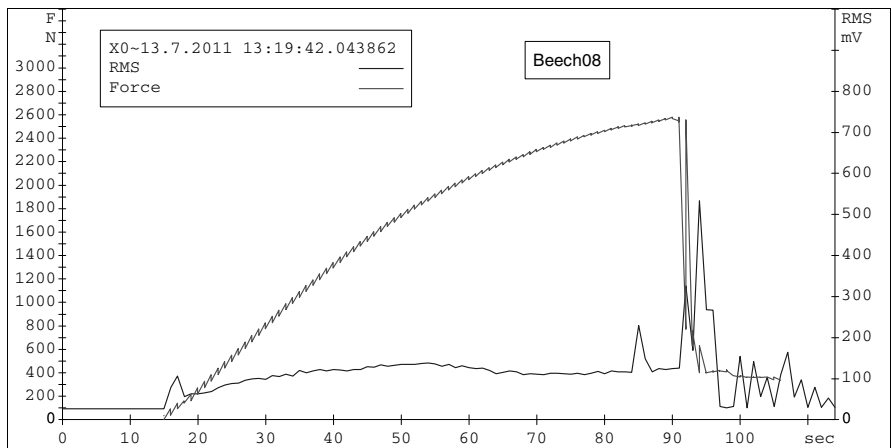


Figure 3: Typical plot of loading force vs. AE RMS for BEECH specimen group.

POPLAR was the final hardwood type to be subject to the static bending test. As indicated by table 1 data, the specimens reached the lowest MOE/MOR values from all the wood types. Fracture types included splintering tension (6 specimens), simple tension (3 specimens), and massive cross-grain failure (1 specimen). Loading force vs. AE RMS plots of POPLAR specimens show high level of uniformity with only one exception: POPLAR01 specimen showed short extreme AE activity around 25% of ultimate load. The reason for this unstable behavior is not known, most probably there was some external unwanted source of AE signals. The POPLAR specimen was perfectly uniform with the rest of the group. Typical POPLAR specimen plot can be seen in figure below.

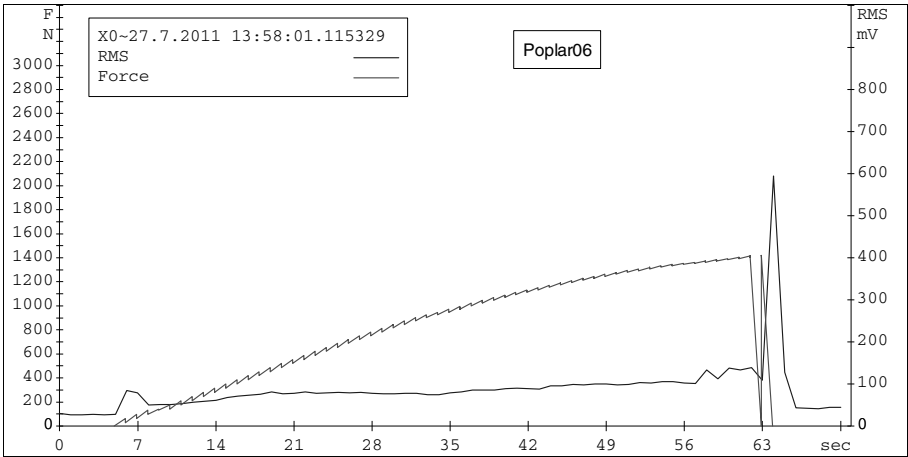


Figure 4: Typical plot of loading force vs. AE RMS for POPLAR specimen group.

PINE specimens showed very distinctive behavior under severe static bending load. 7 out of 10 specimens registered strong AE activity starting from 20% of ultimate load. The Teflon-equipped PINET specimen was described by a flat AE response with 5 isolated peaks of AE activity. As far as the fracture of specimens is concerned, the PINE group showed strong affinity to parallel-to-grain delamination along annual rings (7 specimens out of 10). The rest of the specimen failed in non-specific manner. It is worth noting that PINE group specimens were found the most “compressible” with ratio of 1/10. Typical PINE specimen plot can be seen in figure below.

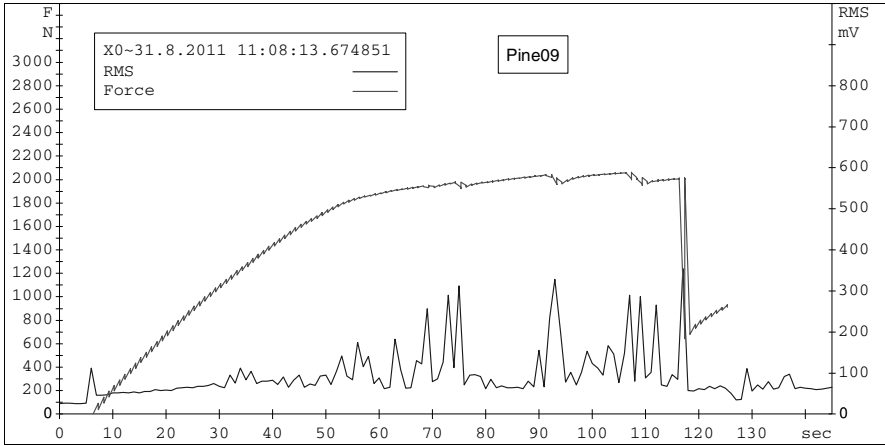


Figure 5: Typical plot of loading force vs. AE RMS for PINE specimen group.

SPRUCE specimen group represented the most diversified set of under-the-load behavior. 3 specimens showed interesting trend of multiple minor failures and hardening prior to final master failure. The minor failures marked the ultimate strength of the specimen. However, there was a strong residual rigidity in comparison with other wood type groups. As far as the fracture type of PINE group is concerned, it was rather difficult to find a pattern there as well. Most of the specimens failed in a combination of plain tension and massive cross-grain destruction.

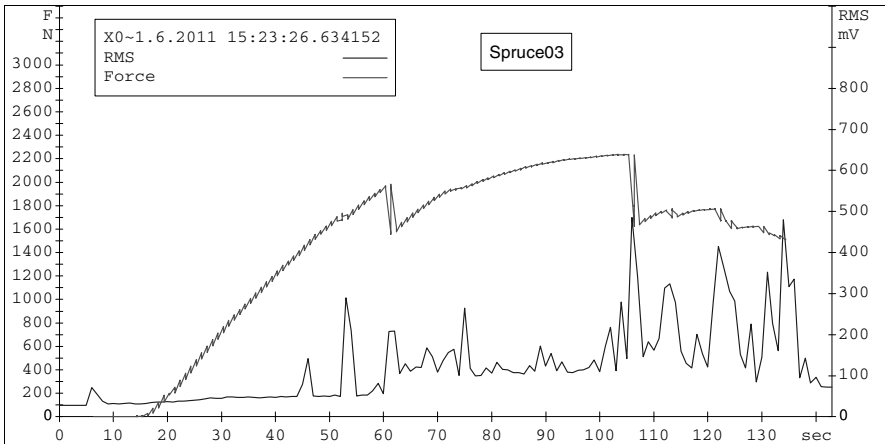


Figure 6: Typical plot of loading force vs. AE RMS for SPRUCE specimen group.

Conclusions

Acoustic emission method has been used to describe under-stress behavior of 5 wood type specimens during a static bending test. Essential methodology guidelines were elaborated with respect to complicated material properties and structure of wood. However, not all issues were successfully resolved.

As there is no way of performing a perfectly "standard" bending test, some compromises are needed to establish general rules for the procedure. On the other hand, this experiment simulates "real-life" conditions and materials that can be found in the wood processing industry.

Next phase of research will include analysis of frequency variations for individual AE events recorded from different wood types. Results of this study will form an integral part of dissertation thesis dedicated to assessment of wood properties using acoustic emission method.

References

- [1] KAPHLE, S. R.; TAN, A. C. C.; Thambiratnam, D. P; Chan, T. H.T.: Study of Acoustic Emission Data Analysis Tools for Structural Health Monitoring Applications. In: Progress in Acoustic Emission XV : Proceedings of the 20th International Acoustic Emission Symposium [online]. Kumamoto, Japan. 2010
- [2] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. Technická diagnostika. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2006
- [3] GROTTA, T. A.; LEICHTI, R. J.; GARTNER, B. L.; JOHNSON, G. R.: Effect of growth ring orientation and placement of earlywood and latewood on MOE and MOR of very-small clear Douglas-fir beams. Wood and Fiber Science, 37(2). 2005
- [4] KIAEI, M.; VEYLAKI, M.: Relationship Between Number of of Annual Rings In Sample Cross-Section And Static Bending Strength of Cypress Wood by Linear and Power Models. World Applied Sciences Journal 13 (2). 2011.
- [5] YASHIHARA, H.; KUBOJIMA, Y.; ISHIMOTO, T.: Several examinations on the static bending test methods of wood using todomatsu (Japanese fir). Forest Products Journal. 2003
- [6] POŽGAJ, A.: Štruktúra a vlastnosti dreva. 1.vyd. /. Bratislava : Príroda, 1993. 485 pages. ISBN 80-070-0600-1.
- [7] ČSN 49 0115. Wood. Determination of ultimate strength in flexure tests. Praha : Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1979. 6 pages.

Acknowledgements

Authors would like to thank the Dakel ZD Rpety Company for AE equipment support.



OPTIMISATION OF ULTRASONIC TESTING OF WWER RPV DURING IN-SERVICE INSPECTIONS

OPTIMALIZACE ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ TNR TYPU VVER PŘI PROVOZNÍCH KONTROLÁCH

Jan VÍT, Zdeněk SKÁLA, Lukáš STAINER, Jakub SAMEK

ŠKODA JS a.s., divize Servis JE, Provozní prohlídky a kontroly

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

Abstract

Operators of WWER nuclear power plants strive to increase the amount of electrical energy produced and delivered to the electricity supply system. The shortening of planned outages of operated units is one of possibilities to achieve this aim effectively.

During planned outages with extended fuel exchange (formerly usually called extended general repair), the non-destructive testing of the reactor pressure vessel (RPV) from the inner surface is usually on the critical path of the outage.

The paper summarises parameters influencing the testing time length and analyses the possibilities of WWER RPV testing optimisation. The main attention is paid to the ultrasonic testing, which is the most time-demanding. The optimisation of testing by other NDT methods, eddy currents and visual, is also mentioned.

Keywords: reactor pressure vessel, ultrasonic testing, eddy currents, visual testing, testing optimisation

Abstrakt

Provozovatelé jaderných elektráren typu VVER se snaží zvyšovat množství vyráběné a dodávané energie do elektrizační soustavy. Jednou z možností, jak tohoto cíle efektivně dosáhnout, je zkracování délky plánovaných odstávek provozovaných bloků.

Při plánovaných odstávkách s rozšířenou výměnou paliva (dříve se zpravidla označovaly jako rozšířené generální opravy) leží obvykle nedestruktivní zkoušení tlakové nádoby reaktoru (TNR) z vnitřního povrchu na kritické cestě odstávky.

V příspěvku jsou shrnuty parametry, které mají vliv na délku doby zkoušení a analyzovány možnosti optimalizace zkoušení TNR typu VVER. Hlavní pozornost je věnována zkoušení ultrazvukem, které je časově nejnáročnější. Zmíněna je i optimalizace zkoušení dalšími metodami NDT, jako jsou vířivé proudy a vizuální kontrola.

Klíčová slova: tlaková nádoba reaktoru, zkoušení ultrazvukem, vířivé proudy, vizuální zkoušení, optimalizace zkoušení

1. ÚVOD

Provozní kontrola tlakové nádoby reaktoru (TNR) leží obvykle při plánované odstávce bloku JE s reaktory typu VVER na její kritické cestě. Provozovatelé bloků JE využívají v současné době všech prostředků ke zkracování délky plánovaných odstávek, včetně požadavku na minimalizaci využití hlavních jeřábů (polárních nebo mostových) na reaktorovém sále JE.

2. RYCHLOST POHYBU ZKUŠEBNÍ HLAVICE

Zkušební hlavice se obvykle pohybuje při ultrazvukovém zkoušení odrazovou technikou po stěně TNR meandrovitým způsobem. Využití maximální možné rychlosti plynulého pohybu zkušební hlavice je asi nejjednodušším požadavkem optimalizace metodiky zkoušení. Rychlost zkoušení, tj. plynulého pohybu sond po zkušebním povrchu spojeného se záznamem dat, je ovlivněna následujícími požadavky:

- Maximální rychlost do 150 mm . s⁻¹.
- Zajištění kvalitní akustické vazby.
- Jednoduchost a spolehlivost držáků sond.
- Minimální hmotnost pohybujících se částí manipulátoru.

Maximální rychlost zkoušení pro odrazovou techniku je již historicky limitována hodnotou **150 mm . s⁻¹**, která vychází z požadavků ASME Code starších edicí, kde je přesně definována jako 6 palců za sekundu. Dnes dodavatelé kontrol obvykle používají kvalifikované metody a zařízení pro nedestruktivní zkoušení. Součástí těchto technických kvalifikací je i prokazování vhodnosti zvolené rychlosti zkoušení odrazovou technikou, která zpravidla nedosahuje uvedené maximální hodnoty. Při zkoušení difrakční technikou ToFD a technikou Phased Array (PA) se používají rychlosti pochopitelně nižší.

Výhodou TNR typu VVER je skutečnost, že mají oba povrchy dostatečně opracované pro zkoušení ultrazvukem. Volba **akustické vazby** tedy není ničím limitována a můžeme používat i nejjednodušší vazbu – a to kontaktní. Na vnitřním povrchu TNR během provozu vznikají povlaky či nánosy; na vnějším povrchu se můžeme setkat s korozí nebo vykrystalizovanou solí kyseliny borité. To vše má vliv na kvalitu akustické vazby. Nerovnosti povrchu, které mohou způsobovat nepravé (falešné) indikace necelistvostí, lze dnes jednoznačně identifikovat, což dříve bylo velmi obtížné nebo prakticky nemožné kvůli množství a interpretaci zaznamenávaných dat.

Na **držáky sond** jsou vyvíjeny zcela protichůdné požadavky: na jednu stranu jednoduchost a spolehlivost a na stranu druhou co nejvíce stupňů volnosti a tím co nejlepší vedení sond po zkušebním povrchu. Nesmíme zapomenout i na pravidla pro zabránění vpádu cizího předmětu (tělesa) do otevřené technologie JE a požadavky na rychlost montáže (demontáže) a dekontaminaci manipulátoru.

Rychlost pohybu závisí na konstrukčním provedení manipulátoru; na jeho tuhosti a **hmotnosti** pohybujících se částí. Například součástí manipulátoru USK-213, který se používá pro zkoušení spodní hladké válcové části reaktorů VVER 440 typ V-213 z vnějšího povrchu, je také otočné biologické a tepelné stínění. Celková hmotnost dosahuje cca 40 t.

To má zcela zásadní vliv nejen na maximální rychlost měřicího (snímání UT dat) pohybu, ale i na plynulost rozjezdu a dobrždování. Obdobná situace nastává i v případě, kdy plynulý (měřicí) pohyb je realizován pomocí teleskopického sloupu. Je-li pro měřicí pohyb použita další jednotka menších rozměrů na hlavici teleskopického sloupu, potom je hmotnost pohybujících se částí výrazně menší, ale vzhledem k jejím limitovaným rozměrům to přináší další komplikace. Při zkoušení difrakční technikou ToFD musíme vzít do úvahy potřebou značnou vzdálenost bodů výstupu sond (velká tloušťka stěny TNR).

3. ŠÍŘKA KROKU ZKUŠEBNÍ HLAVICE

Při zkoušení meandrovitým způsobem má šířka kroku, tj. vzdálenost dvou měřicích pohybů se sběrem dat, ještě větší význam, než rychlost plynulého pohybu. Logickou snahou je co největší šířka kroku zkušební hlavice. Uvádíme některé možnosti jak toho efektivně dosáhnout:

- Korekce poklesu akustického tlaku na okraji řádky.
- Sdružené sondy.
- Sondy s posunutým bodem výstupu.
- Trojitě úhlové sondy podélných vln.
- Náhrada dvojitých sond sondami jednoduchými.
- Volba umělých necelistvostí, předepsaných k registraci.

Závislost mezi šířkou kroku zkušební hlavice, **poklesem akustického tlaku** a dráhou ultrazvuku je pro konkrétní ultrazvukovou sondu vlastně speciálním vyhodnocovacím diagramem. Teoreticky je rozměr ultrazvukového svazku nejmenší na dráze odpovídající délce blízkého pole u jednoduchých sond nebo maximální citlivosti u dvojitých fokusujících sond. Při tomto zjednodušení zanedbáváme vliv vedlejších laloků a také celé blízké pole ultrazvukových sond. Jako příklad zde uvádíme speciální vyhodnocovací diagram pro ultrazvukovou sondu typu 60°ET1 (Siemens – KWU) – viz Obrázek 1 na následující stránce.

Termínem **sdužená sonda** je označena např. sonda 2x 0°SEL. V pouzdře ultrazvukové sondy (rozměry 40x40 mm) jsou dvě dvojitě přímé sondy (typ 0°SEL) s posunutým bodem výstupu o polovinu šířky kroku zkušební hlavice. Sonda obsahuje celkem čtyři měniče, dva jsou vysílače a dva přijímače. Teoreticky je možné zdvojnásobit šířku kroku zkušební hlavice.

Obdobného efektu lze dosáhnout použitím **sond s posunutým bodem výstupu** proti jejich geometrickému středu. Výsledek je stejný jako v předešlém případě, ale potřebujeme jedno místo ve zkušební hlavici navíc. Tento způsob se často využívá také u sond vířivých proudů (ET), které jsou určeny pro detekci zejména podélně orientovaných indikací necelistvostí.

Trojité úhlové sondy (např. typ 70°SESL) byly před lety vyvinuty a vyrobeny ve firmě Siemens – KWU (Německo). Sondy se skládaly ze dvou přijímacích měničů a jednoho vysílacího měniče, který byl umístěn uprostřed. Konfigurace umožňovala zvýšit šířku kroku zkušební hlavice na dvojnásobek proti standardním sondám typu 70°SEL. Určitě velmi zajímavý podnět.

Jednoduché sondy, obvykle díky svému většímu rozměru ultrazvukového svazku, umožňují zvětšit šířku kroku zkušební hlavice. Obdobný efekt má i snížení jmenovité frekvence ultrazvukových sond, ale v obou případech musíme očekávat i snížení citlivosti ultrazvukového zkoušení.

Zásadním faktorem, který ovlivňuje šířku kroku zkušební hlavice, je volba **umělých necelistvostí**, předepsaných k registraci. Není jistě nutné připomínat rozdíly mezi náhradní vadou (Dn), bočním válcovým vývrtem (Dc) a zářezem (h). Zde lze také zohlednit rozsah provozní kontroly, a to nejen z hlediska objemu zkoušeného materiálu TNR, ale i v použití metod NDT.

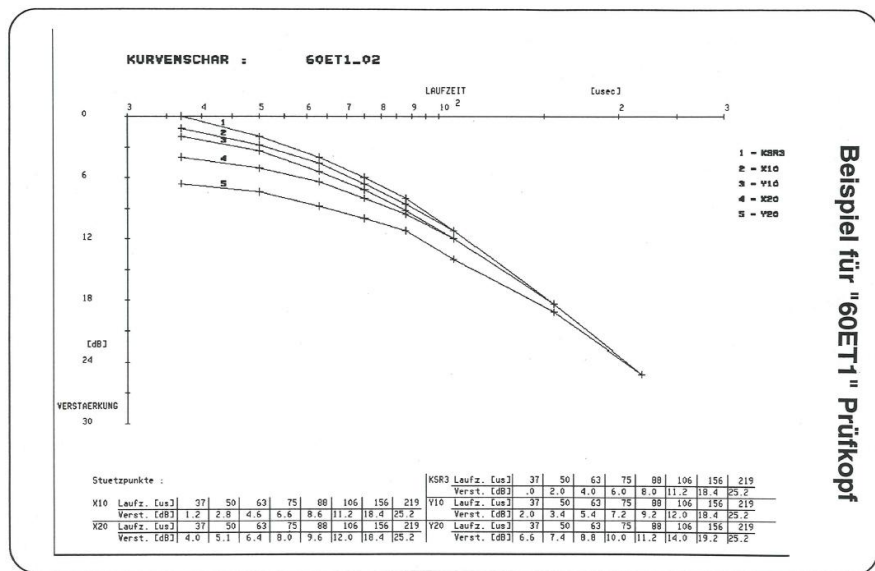


Fig. 1: Probe type 60° ET1
Obr. 1: Sonda 60° ET1

4. KONSTRUKCE MANIPULÁTORU

Pozorný čtenář nebude jistě překvapený, že na konstrukci manipulátoru jsou kladeny zcela protichůdné požadavky. Některé z nich, které mohou ovlivnit délku provozní kontroly TNR, jsou zde naznačeny:

- Závislost na hlavním (mostovém či polárním) jeřábu JE.
- Uspořádání sond ve zkušební hlavici.
- Možnost souběžného zkoušení více hlavicemi nebo více moduly.
- Rozměry hlavních částí manipulátoru.
- Snadná dekontaminace.

Požadavky na co nejmenší **závislost na hlavním** (polárního nebo mostového) **jeřábu** je jedním z důvodů, které upřednostňují manipulátory malých rozměrů – jako např. tzv. ponorky (ROV), modulární koncepce pro zkoušení z vnějšího povrchu TNR (magnetická kolečka) nebo manipulátor s decentrálním (koaxiálním) sloupem. Manipulátor ZMM 5 (AREVA NP) byl doplněn o hydraulický systém nezávislého polohování a zvedání centrálního sloupu. Nový manipulátor (zkušební systém) MKS (ŠKODA JS) také bude splňovat tento požadavek, který je preferován zejména na JE s reaktory typu VVER 1000.

Uspořádání sond ve zkušební hlavici – tj. jejich počet, orientace a rozmístění – má zcela zásadní dopad na rozsah pohybu hlavice manipulátoru po zkušebním povrchu (prozkoušenou oblast). Rozměr hlavice musí být optimalizován zejména s ohledem na tzv. překážky v jejím pohybu (např. rozdělovače toku, dělící prstenec, hrdla TNR, dno TNR atd.). Uspořádání sond ve dvou řadách a použití sond stejného typu může omezit rozsah skenování v axiálním směru TNR o jejich vzdálenost v držáku sond.

Zkoušení více hlavicemi najednou naopak vyžaduje co nejužší konstrukční provedení manipulátoru – např. systém s centrálním sloupem (nový manipulátor firmy Inetec nebo ZMM firmy Siemens – KWU). Výjimkou je zkušební systém švédské firmy AF Kontroll – viz Obrázek 2. Zde současně zkoušejí TNR z vnitřního povrchu tři moduly. Nevýhodou jsou vyšší nároky na počet lidí ve směně, náročnější montáž a demontáž, delší časy pro nastavení a kontrolu citlivosti a v neposlední řadě požadavek na počet ultrazvukových sond a tím i kanálů ultrazvukového přístroje. U reaktorů typu VVER lze zkoušení z vnitřního povrchu dvěma hlavicemi najednou použít při zkoušení hladké válcové části TNR a také při zkoušení hrdel DN 500 (DN°850), kde lze spojit zkoušení válcových i rádiusových částí těchto hrdel. Nezbytné je tento způsob zkoušení zahrnout do návrhu manipulátoru, protože dodatečné úpravy zpravidla nepřinášejí očekávané časové úspory.

Rozměry hlavních částí manipulátoru by měly být co největší a spolehlivě zajištěné – princip zabránění vpádu cizího předmětu (tělesa) do otevřené technologie. To je v rozporu s požadavky na minimalizaci použití hlavního (polárního nebo mostového) jeřábu). Velikost částí manipulátoru ovlivňuje i rychlost a jednoduchost montáže a demontáže manipulátoru. To vše je pochopitelně zahrnuto do celkového času provozní kontroly TNR.

Dekontaminace manipulátoru, jeho částí či modulů, představuje důležitou část provedení provozní kontroly TNR typu VVER. Existuje zásada, že manipulátor je dekontaminován na úroveň stejnou, nebo nižší, jako na začátku provozní kontroly. Náročnost a dobu dekontaminace ovlivňují nejen rozměry částí (modulů) manipulátoru, ale i materiály, z kterých jsou díly materiálu vyrobeny.

5. ZÁVĚR

Autoři příspěvku se snažili poukázat na šíři a hloubku problematiky, jakou je bezesporu optimalizace ultrazvukového zkoušení TNR typu VVER při provozních kontrolách, včetně dopadů i na další metody NDT (ET či VT). Nechtějí nabízet jednoduchá a jednoznačná řešení, protože taková neexistují. Každá mince má dvě strany – rub a líc. Nesmějí se zaměřovat pojmy optimalizace a minimalizace.

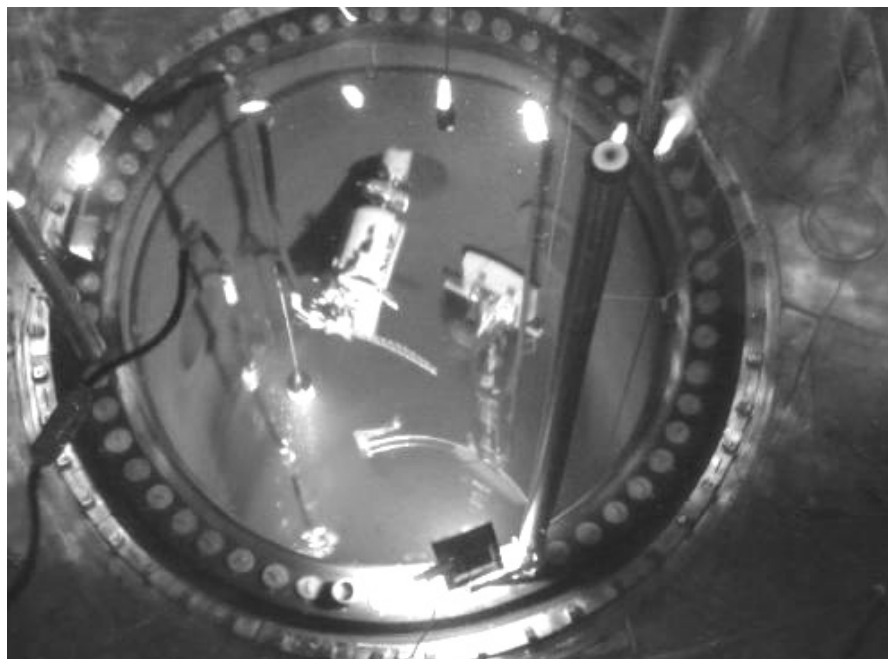


Fig. 2: Ringhals, September 2010
Obr. 2: JE Ringhals, září 2010

POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] 25 Jahre RDB- Prüfung – Rückblick und Ausblick
G. Engl a W.Rathgeb, Siemens – KWU, 25. MPA-Seminar, říjen 1999.
- [2] Zkoušení základního materiálu, obvodových svarů a rozhraní návaru a základního materiálu tělesa tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 ultrazvukem – celkový postup
kolektiv autorů, ŠKODA JS a.s., instrukce, květen 2009.
- [3] Modulární kontrolní systém (MKS)
I. Rausch, ŠKODA JS a.s., popis úvodního návrhu, leden 2010.
- [4] Zkoušení základního materiálu, obvodových svarů a rozhraní návaru a základního materiálu tělesa tlakové nádoby reaktoru VVER 440 ultrazvukem – celkový postup
kolektiv autorů, ŠKODA JS a.s., instrukce, květen 2010.
- [5] Ultrazvukové zkoušení tlakových nádob reaktorů typu VVER při provozních a předprovozních kontrolách
J. Vít, ZČU v Plzni, disertační práce, srpen 2010.
- [6] Development of New Manipulators for PWR Vessel Inspection
M. Wendel a T. Sjö, Dekra Industrial, prezentace, květen 2011.



DETEKCE ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ V KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLECH VYUŽITÍM METODY AKUSTICKÉ EMISE

FATIGUE DAMAGE DETECTION IN CONSTRUCTION MATERIALS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

František VLAŠIČ, Libor NOHÁL, Pavel GEJDOŠ, Pavel MAZAL

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Contact e-mail: yvlasi01@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt

Článek se zabývá monitorováním cyklické degradace konstrukčních materiálů ve vysokocyklové oblasti využitím nedestruktivní metody testování - akustické emise. Naměřené výsledky slouží především ke studijním účelům a tvorbě podkladů pro výuku na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Společně se záznamem rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL Cracktronic lze získat názorné ukázky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin ve zkoumaných materiálech.

Klíčová slova: akustická emise, únavové zatěžování, šíření trhliny, rezonanční frekvence

Abstract

The article deals with monitoring of construction materials cyclic degradation in high-cycle area using non-destructive method - acoustic emission. The measured results used primarily for creation of teaching materials and educational purposes at the Faculty of Mechanical Engineering in Brno. The demonstration of early identification of fatigue cracks creation and propagation in the tested materials may be obtained together with the record of resonant frequency of loading equipment RUMUL Cracktronic.

Key words: acoustic emission, fatigue loading, crack propagation, resonant frequency

1. Úvod

V praxi jsou většinou strojní součásti namáhány kmitavým nebo nepravidelně opětovaným zatížením. Tato namáhání navíc nepůsobí samostatně, ale naopak většinou současně jako kombinace dvou i více namáhání (např. tah a ohyb, nebo tah, ohyb a krut). V materiálu pak dochází ke vzniku nevratných procesů, projevujících se jako mikroplastické deformace a po určitém počtu zátěžných cyklů dojde k porušení materiálu při napětím menším než mez kluzu či mez pevnosti. Velké procento poruch kovových součástí ve strojírenské praxi je způsobeno právě tímto jevem, který označujeme jako „únavu materiálu“ [1, 2, 3].

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].

Na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (FSI VUT v Brně) je aplikaci této defektoskopické metody v oblasti materiálového inženýrství věnována již řadu let velká pozornost, ale ve studijních podkladech kurzů (předmětů), zaměřených na defektoskopii či nedestruktivní testování, je tato problematika prezentována pouze okrajově a na teoretické úrovni. Zejména monitorování statického a cyklického poškozování materiálů během mechanických zkoušek nejenom touto metodou v učebních materiálech pro studenty chybí. Proto vznikl projekt, který má především vysokoškolským studentům, zajímavým se o defektoskopii, přiblížit praktickými ukázkami důležitost a využitelnost těchto nedestruktivních nástrojů v technické praxi, které mnohdy tvoří významnou součást jednotlivých etap výroby a podílí se rozhodujícím způsobem na kvalitě finální produkce. Tento projekt je zaměřen na vytvoření studijních podkladů pro výuku problematiky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin v konstrukčních materiálech pomocí metody AE a záznamu průběhu zatěžující (rezonanční) frekvence vzorku na zařízení RUMUL Cracktronic.

2. Metoda AE

V tom nejširším pojetí představuje metoda AE velmi širokou třídu možných aplikací, a to od základních nejjednodušších aplikací, kdy je cílem AE pouze kvalitativně odpovědět na otázku přítomnosti/nepřítomnosti aktivity AE, na otázku počátku či konce aktivity až po aplikace špičkové s využitím techniky digitalizace signálu, jeho pokročilého matematicky náročného vyhodnocení a ještě náročnější interpretaci naměřených dat. Konkrétně se jedná o oblasti provozních kontrol konstrukcí, zařízení, aparátů, strojů, při monitorování technologických procesů a v poslední době v oblasti výzkumu a vývoje, kam spadají také mechanické zkoušky materiálů [6].

Akustickou emisí nazýváme akustické (elastické) vlny, generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa. Tyto vlny vznikají v materiálu během interakce jeho strukturálních defektů (např. dislokací, mikrotrhlin) s vnějším napětíovým polem (stimulem). Napětíové vlny se šíří tělesem od místa zdroje na volný povrch.

Mezi typické znaky metody AE, které ji vymezují oproti jiným akustickým metodám, především patří:

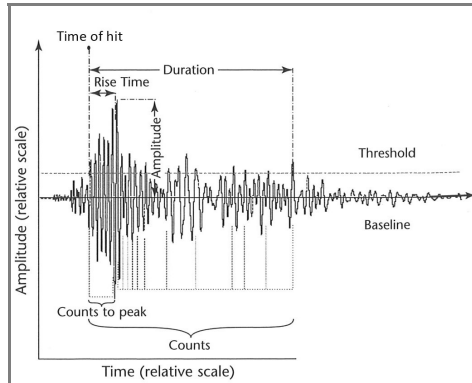
- pasivní monitorování probíhajícího procesu - nevznáší do konstrukce žádné aktivní buzení
- frekvenční pásmo detekovaných vln pohybující se od 30 kHz do 1 MHz (nejčastěji v pásmu cca 100 ÷ 300 kHz)
- detekce frekvenčně širokopásmových procesů (s cílem maximální citlivosti detekce sledovaných procesů) pomocí rezonančních snímačů ve vhodně vybraném frekvenčním okně [6]

V oblasti měření a vyhodnocování signálu AE se používají základní výrazy (pojmy):

- *událost AE* - fyzikální jev, který způsobuje vznik AE (např. posun dislokace, dynamický vznik mikrotrhliny a další)
- *zdroj AE* - fyzikální původ jedné či více událostí AE (proces plastické deformace, mikroposkoky čela trhliny, dvojčatění či posuvy hranice zrna)

- *hit signálu AE* (praskavý, spojitý) – vzniká detekcí rázové vlny jedné události AE

Základními časovými charakteristikami signálu AE obvykle bývá spojitost či praskavost signálu, délka trvání hitu a doba náběhu signálu hitu do maxima. Hity nespojitého (praskavého) signálu ze signálu vybíráme a vyhodnocujeme samostatně. Základní parametry hitu AE jsou znázorněny na obr. 1.



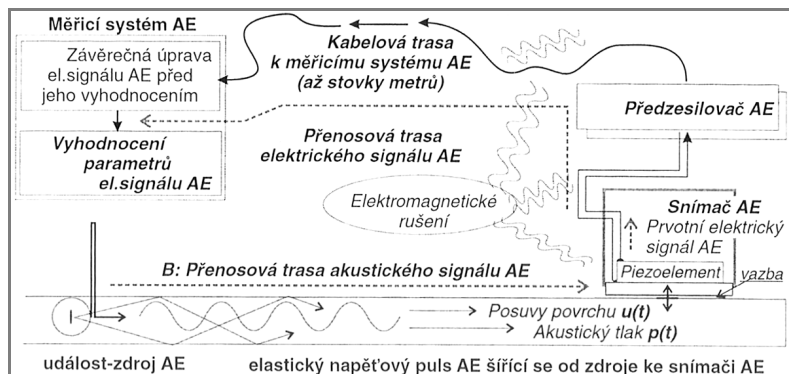
Obr.1 Typické parametry hitu AE [5]

Fig.1 Typical acoustic emission signal [5]

Obecné schéma přenosu signálu od zdroje AE k výslednému signálu je znázorněno na obr. 2. Základní části tvoří:

- *snímač AE* - nejužívanější snímače k detekci AE vln jsou piezoelektrické
- *předzesilovač AE* - zesiluje primární signál ze snímače AE a provádí základní frekvenční filtraci
- *kabelová trasa* - prostředek přenosu zesíleného signálu z předzesilovače k měřicímu systému, který může dosahovat až stovek metrů
- *měřicí systém AE* - závěrečná úprava analogového signálu před vyhodnocením (digitalizace a následně zpracování signálním procesorem)

V oblasti základního výzkumu únavového poškození materiálů se vědecké práce zaměřují zejména na monitorování jednotlivých stádií únavového procesu. Jedná se především o fáze iniciace, šíření, uzavírání krátkých a dlouhých trhlin nebo práce zaměřené na (vizuální) klasifikaci signálů podle jejich časových a frekvenčních průběhů. Během únavových zkoušek je signál AE způsoben různými mechanismy – pohybem dislokací, cyklickým zpevněním, iniciací či uzavíráním trhlin nebo až samotným lomem vzorku.



Obr. 2 Zjednodušené schéma přenosu signálu AE [6]

Fig. 2 Simplified scheme of the AE signal transfer [6]

3. Metodika měření

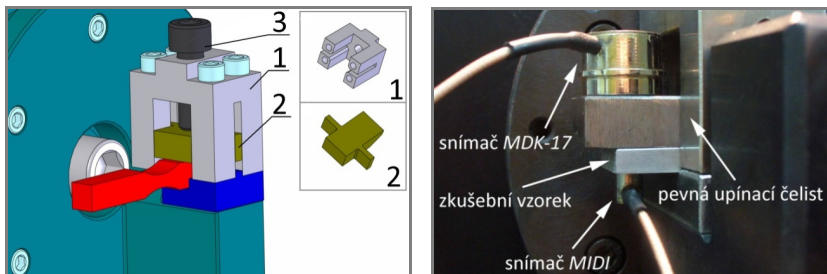
Prezentované ukázky z měření signálu AE během únavových zkoušek byly realizovány na diagnostických systémech firmy ZD Rpety – Dakel. Pro sběr a zpracování dat byly použity dva typy analyzátorů - *Xedo* a *IPL*. První jmenovaný je určen spíše pro záznam signálu v případě dlouhodobějších měření (týdny, měsíce) s poměrně malými nároky na velikost naměřených dat (obr. 3 vlevo). Zařízení *IPL* je využíváno zejména během krátkodobých měření (minuty, hodiny). Tento typ analyzátoru umožňuje 12-bitové synchronní kontinuální vzorkování 4 kanálů frekvencí 2 MHz a nepřetržitě ukládání navzorkovaných dat do paměti PC. Data jsou na disk ukládána rychlostí kolem 16 MB/s, což představuje zhruba 56 GB na hodinové měření. Hlavní výhodou oproti systému *Xedo* je možnost po sběru naměřených dat pozměnit jakýkoli parametr AE (práh detekce hitů AE, hodnoty mrtvé doby, atd.) a uskutečnit tak nový výpočet se všemi uloženými daty, jakoby měření probíhalo znovu. Díky této možnosti můžeme offline výpočet opakovat tak dlouho, až budeme s výsledným výstupem (grafem) spokojeni (obr. 3 vpravo).



Obr. 3 Měřicí aparatura *Xedo* (vlevo) a *IPL* (vpravo)

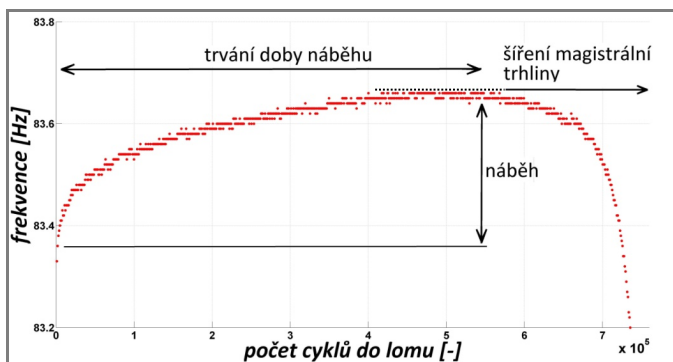
Fig. 3 Measuring system *Xedo* (left) and *IPL* (right)

Únavové zkoušky probíhaly na univerzálním elektrozvukovém pulzátoru RUMUL Cracktronic firmy Russenberger Prüfmaschinen AG. Zařízení umožňuje zatěžovat vzorky v osové tahu-tlaku, ohybu či krutu a CT tělesa. V tomto příspěvku jsou prezentovány výsledky realizovány za podmínek ohybového střídavého symetrického cyklu ($R = -1$) ve vysokocyklové oblasti a teploty okolí (obr. 4).



Obr. 4 Upínací část zařízení RUMUL (vlevo) [7] a detail uchycení snímačů AE (vpravo)
 Fig. 4 Clamp part of RUMUL machine (left) [7] and fixing detail of AE sensors (right)

Společně se záznamem rezonanční frekvence zatěžovacího zařízení RUMUL lze získat názorné ukázky včasné identifikace vzniku a šíření únavových trhlin ve zkoumaných materiálech (obr. 5).



Obr. 5 Příklad záznamu rezonanční frekvence ze zařízení RUMUL
 Fig. 5 Example of a resonant frequency record from device RUMUL

4. Výsledky

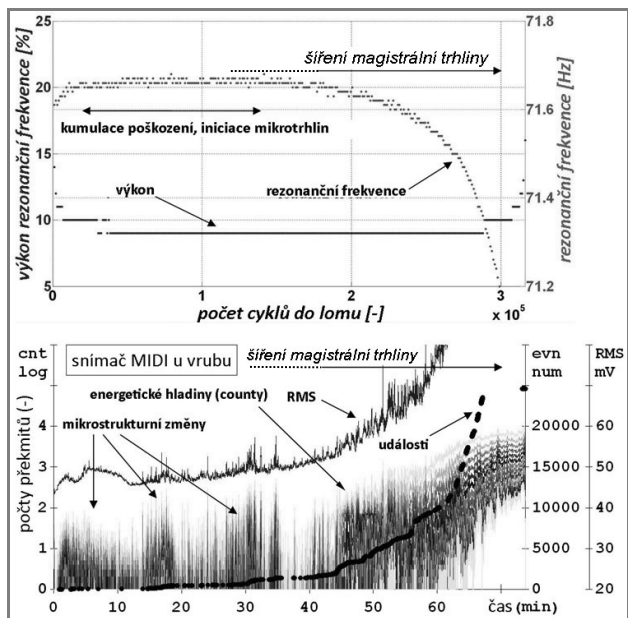
Průběh rezonanční frekvence zkušební vzorku ze zatěžovacího zařízení RUMUL napomáhá zejména s určením počátku šíření magistralní trhliny, který se projevuje evidentním poklesem tuhosti celé soustavy. Z předchozích měření bylo zjištěno, že okamžik počátku klesajícího trendu rezonanční frekvence (např. při $N = 5,5 \times 10^5$ cyklů z obr. 5) neznamena začátek šíření magistralní trhliny, jak bylo původně uvažováno, ale až období nekystalografického šíření trhliny končící náhlým lomem.

Z toho vyplývá, že vznik a začátek šíření magistralní trhliny probíhá už daleko dříve než v uvažovaném momentu poklesu frekvence.

Během únavových zkoušek se sledují především tyto průběhy a parametry AE:

- záznam rezonanční frekvence zkušebního tělesa ze zatěžovacího zařízení RUMUL
- počet cyklů do lomu
- emisní aktivita (energetické hladiny - county)
- RMS - efektivní hodnota charakterizující energii nebo výkon signálu
- kumulativní četnost hitů a jejich základní parametry (rise time, amplituda, délka)
- vývoj frekvenčních spekter

Na obr. 6 je typická ukázka záznamu signálu AE z analyzátoru Xedo včetně průběhu rezonanční frekvence vzorku. Kolem $1,72 \times 10^5$ cyklů, což odpovídá při průměrné rezonanční frekvenci 71,66 Hz 40. minutě záznamu signálu AE, dochází k viditelnému poklesu tuhosti zkušebního vzorku, který se projevuje rostoucí aktivitou signálu AE až do jeho lomu. Jak již bylo konstatováno výše, v tomto okamžiku už probíhá nekystalografické šíření trhliny.

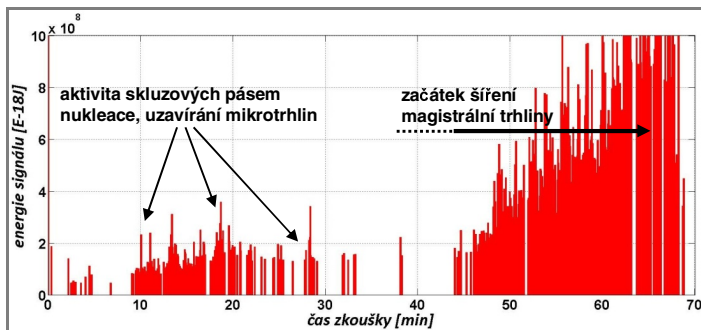


Obr. 6 Záznam rezonanční frekvence zařízení RUMUL (nahore) a typický záznam signálu AE (dole) z vrubu během únavové zkoušky v ohybu (Al slitina 2017A/T4, $\sigma_a = 210$ MPa, $N_f = 315\,000$ cyklů, symetrický cyklus)

Fig. 6 Record of resonant frequency from device RUMUL (up) and typical record of AE signal (down) during the fatigue bending test (aluminium alloy 2017A/T4, $\sigma_a = 210$ MPa, $N_f = 315,000$ cycles, symmetrical cycle)

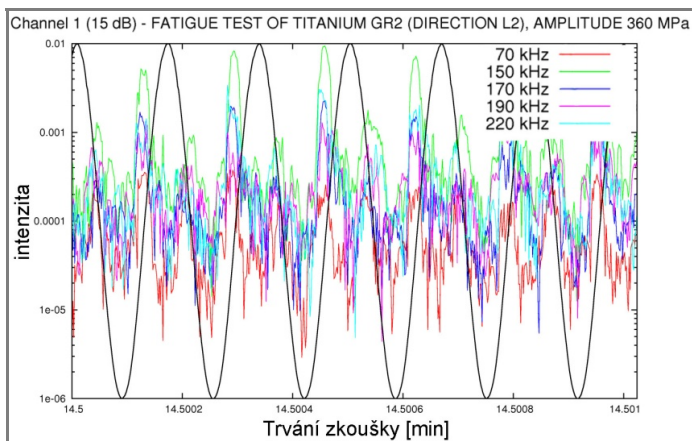
Na záznamu signálu AE můžeme také nalézt místa, která vykazují zvýšenou aktivitu ve stádiu iniciace trhlin (na obr. 6 kolem 16. a 30. minuty), kde můžeme očekávat koncentraci cyklické plastické deformace na povrchu vzorku. Tento proces vede k nukleaci únavových mikrotrhlin, vznikajících většinou v únavových skluzových pásech, na hranicích zrn nebo na rozhraní mezi inkluzemi a maticí. Nicméně identifikovat přesně okamžik vzniku těchto mikrotrhlin na základě signálu AE je zatím velmi obtížné.

Vyhodnocování a zobrazování typických průběhů signálu AE z analyzátoru Xedo se provádí v programu DaeShow, viz. obr. 6. [9] Naměřená data lze také exportovat do textové, příp. binární podoby a zpracovávat je v jiných programech, např. Matlabu. Ukázka této možnosti je na obr. 7, kde je zobrazen průběh energie signálu v čase.



Obr. 7 Průběh energie signálu AE během únavové zkoušky v ohybu (titan Gr2, $\sigma_a = 360$ MPa, $N_f = 424$ 100 cyklů, symetrický cyklus)

Fig. 7 Course of changes energy of AE signal during the fatigue bending test of titanium Gr2 (symmetrical cycle, $\sigma_a = 360$ MPa, $N_f = 424, 100$ cycles)



Obr. 8 Ukázka vývoje intenzity frekvenčních spekter během únavové zkoušky

Fig. 8 Example of trend intensity of frequency spectrum during the fatigue test

Ukázka záznamu signálu AE z analyzátoru IPL, umožňující kontinuální vzorkování a ukládání dat do PC, je na obr. 8. Jedná se o krátký úsek únavové zkoušky titanu Grad 2, kde je zobrazen vývoj intenzity frekvenčních spekter na vybraných frekvencích v čase společně s průběhem amplitudy ohybového napětí 408 MPa.

5. Závěr

Uvedené příklady ukazují na rozsáhlé možnosti využití metody AE v oblasti mechanických (únavových) zkoušek materiálů. Rozšířený soubor naměřených dat včetně videoukázek z měření bude sloužit pro tvorbu studijních podkladů na FSI VUT v Brně. Studenti tak mohou získat na konkrétních experimentech nejnovější poznatky z oblasti únavového poškození materiálů a uvědomit si tak významný přínos NDT v technické praxi.

Ze získaných poznatků lze usoudit, že obor nedestruktivního testování materiálů může zásadním způsobem promluvit do procesu únavového poškození a obohatit dosavadní vědomosti o další přístupy a výsledky.

Poděkování: Příspěvek vznikl za podpory projektu FRVŠ "3070/2011/G1" - Detekce počátku šíření únavových trhlin pomocí metody akustické emise a změny frekvence zatěžování.

Literatura

- [1] MICHNA, Š. et al. *Aluminium Materials and Technologies from A to Z*: Alcan Děčín Extrusions, s r. o., 2007. p. 613. ISBN 978-80-89244-18-8.
- [2] KLESNIL, M., LUKAS, P. *Fatigue of metallic materials*. Amsterdam: 2. rev. vyd.: Elsevier, 1992. p. 270. ISBN 0-444-98723-1.
- [3] FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Praha: Academia, nakladatelství Akademie věd ČR, 2003. str. 561. ISBN 80-200-1223-0.
- [4] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. str. 406. ISBN 80-730-0158-6.
- [5] 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.
- [6] KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. str. 571. ISBN 978-807-2045-914.
- [7] BERAN, P. *Modifikace upínací části zkušebního zařízení RUMUL Cracktronic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. str. 57. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [8] VLAŠIC, F.: Hodnocení cyklického poškození slitin na bázi hliníku a hořčíku s využitím metody akustické emise. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. str. 170. Disertační práce, školitel Pavel Mazal.
- [9] Mazal P.; Dvoracek J.; Pazdera L.: *Application of acoustic emission method in contact damage identification*, International Journal of Materials & Product Technology, Vol. 41, Iss. 1-4, p. 140-152, 2011, ISSN 0268-1900

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

HISTORIE „MUSEUM RENTGENEK” NA OPOLSKÉ POLYTECHNICKÉ UNIVERZITĚ

HISTORY OF „X-RAY TUBES MUSEUM” ON THE OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Grzegorz JEZIEFSKI

Opole University of Technology

Contact e-mail: grzegorz.jezierski@elopole.bot.pl

Muzeum rentgenek (lamp) vzniklo v roce 2005, kdy jsem náhodou dostal první dvě průmyslové lampy Super Liliput. Další tři jsem dostal od varšavské firmy Sławomira Józwiaka - NDT System, potom další cenné lampy z Opolské University a Institutu Śwątęń w Gliwicach od dr. Janusza Czuchryje. A tak se začalo. Nejdřív jsem vše ukládal v garáži. A tehdy se začala vytvářet koncepce muzea. Na štěstí nápad získal „požehnání” od tehdejšího rektora Opolské polytechniky prof. dr. hab. inž. Jerzego Skubisa.



Obr. 1. Začátky „Kolekce Rentgenek” (rok 2006)

V roce 2007 měla kolekce už 330 exponátů. 31. července 2007 r. bylo symbolicky otevřeno muzeum „Lamp Rentgenowskich” (rentgenek).



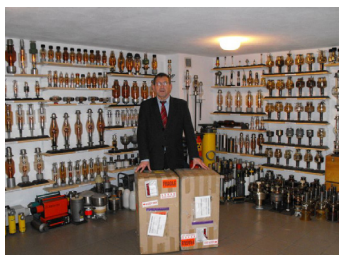
Obr. 2. Symbolické otevření „Kolekci Lamp Rentgenowskich“ 31.08.2007r.

Nejdříve jsme chtěli sbírat jen lampy, ale postupně přicházeli i pomocné přístroje jak kolimátory, měřící přístroje, Gamma přístroje, ochranné brýle proti rentgenovému záření, rukavice, zástěry, různé etalony a také odbornou polskou literaturu např. z poválečných let. Dnes máme exponáty z celého světa, Čech a Slovenska, dokonce z Indie a Austrálie nebo Japonska i Číny, celkem z 304 institucí a od 326 soukromých osob.

Někdy máme i formální problémy. Například dostali jsme lampy z berylový okénkem a protože beryl je toxickým materiálem podléhá zvláštním předpisům.



Obr. 3. Předávání exponátů od pana Janusza Czuchryja z Institutu sváření v Gliwicz



Obr. 4. Zásilka z Austrálie (Australian X-ray Tubes Pty Ltd.)



Obr. 5. Fragментy poškozených rentgenek

Aktuálně (srpen 2011) kolekce obsahuje více než 1100 exponátů.

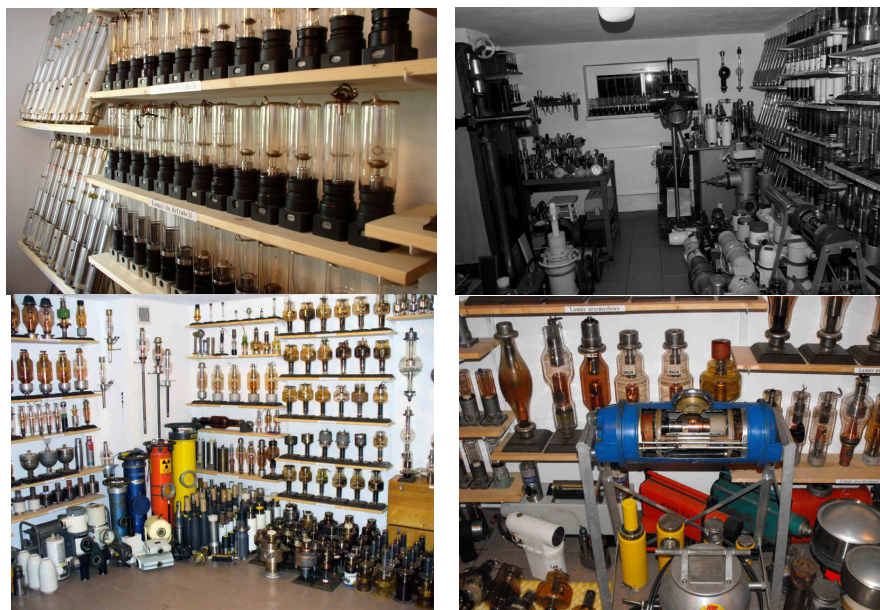
Zde musím dodat, že svůj podíl má v naší sbírce i moje žena Stanislawa, která vždy pozvané převezde dárce k nám domů, pohostí jak nejlépe umí. A opravdu to umí.

Spolupracujeme s muzei, které mají rentgenové lampy jako část svých sbírek jako např. slavné Museum Roentgena v Německu – Remscheid-Lennep (od r. 1932), soukromá zbirka dr.Zahi N. Hakima v Bejrutu (Libanon) nebo soukromá kolekce Udo Radtke v Bielefeld (Německo) a také Lamps & Tubes, a virtual museum - Georgio Basile v Nivelles (Belgie).



Obr. 6. Iontová lampa z Jagellonské University v Krakově (vlevo) a vakuová lampa z Gdaňské polytechniky (vpravo)

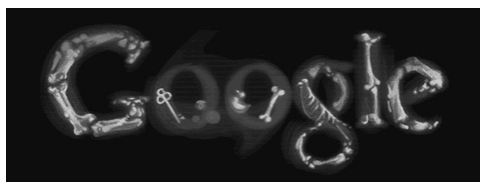
Od 1 února 2010 máme i vlastní internetovou stránku Krzysztofa Beszta: www.xraylamp.webd.pl, kde registrujeme okolo 2000 návštěv měsíčně).



Obr. 7. Vybrané fragmenty kolekce



Obr. 8. Kompletní rentgeny

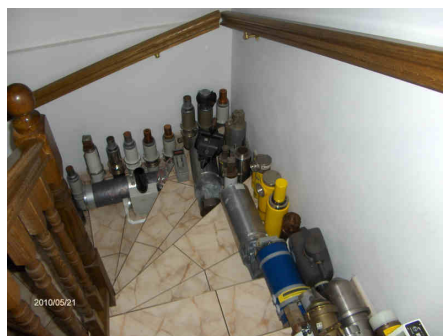
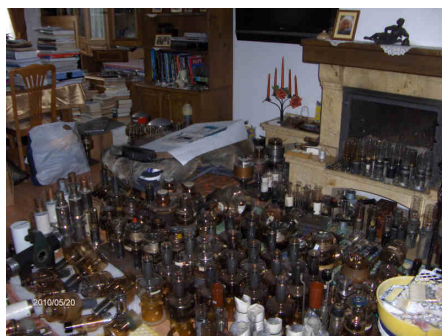


Obr. 9. Radiografie GOOGLE



Obr. 10. Fragments kolekce uměleckých fotografií.

Zajímavým doplněním naší kolekce rentgenek jsou i rentgenové umělecké fotografie květů, ryb a mušlí.



Obr. 11. Povodeň v roce 2010. Nahoře lampy přenesené do salonu a na schody. V museu bylo do 40 cm vody



Obr. 12. Fotografie „Večeru z Rentgenem“ – 8 listopad 2010



Obr. 13. Brzy se přeneseme do budovy Opolske Polytechniky

Do češtiny přeložil Piotr Sullik



BADANIE KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH NDT OF RAILWAY WHEELS

Władysław Michnowski, Jarosław Mierzwa, Piotr Machała, Patryk Uchroński

1. Wstęp

Dyrektywa 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 29 kwietnia 2004 roku oraz jej uzupełnienie w postaci dyrektywy 2008/110/WE z dnia 16 grudnia 2008 mają za zadanie wprowadzenie interoperacyjności kolei we wszystkich państwach członkowskich. Warunkiem jest zapewnienie na terenie tak całej Unii jak i każdego kraju niezbędnego poziomu bezpieczeństwa. Do realizacji tego celu ma służyć:

- a) powołanie „krajowej władzy dla regulacji i nadzoru bezpieczeństwa kolei”,
- b) powołanie „stałe funkcjonującego podmiotu, niezależnego od podmiotów branży kolejowej” badającego przyczyny wypadków w zakresie bezpieczeństwa.
- c) „raporty z badań wypadków oraz wszelkie ustalenia i rekomendacje powinny być dostępne publicznie na szczeblu Wspólnoty”.

termin wprowadzenia aktualnego etapu realizacji wspomnianych dyrektyw minął, 31.08.2011 Polska jest w gronie siedmiu krajów, które do tej pory nie wprowadziły jeszcze tych zaleceń (m.in. Niemcy, Wielka Brytania i Czechy).

2. Wprowadzenie

Realizacja Interoperacyjności kolei na obszarze Unii to zadanie wielowątkowe i bardzo różnicowe tematycznie, np. niektóre problemy organizacyjne i techniczne to miliardowe inwestycje realizowane w wieloletnim trybie czasowym. W tym kontekście sprawa stanu technicznego i badań eksploatowanego zbioru zestawów kołowych nie jest chyba traktowana należycie, a podjęte kroki usprawniające wydają się niewystarczające. Tym bardziej że tragiczna katastrofa w Vareggio dowiodła konieczności przyznania priorytetu w tym zakresie. Obecnie w Unii Europejskiej panuje system normatywny uznaniowy. W Polsce i prawdopodobnie w pozostałych krajach członkowskich nie ma jednolitego systemu norm lub procedur dotyczącej badań nieniszczących sprzętu kolejowego na etapie produkcji i eksploatacji. Efektem tego jest używanie przez zakłady wykonawcze i naprawcze taboru kolejowego według różnych dokumentów (np. w Polsce polskie normy branżowe z lat siedemdziesiątych, niemiecka instrukcja VPI 04, austriacki plan badań wg AAE). Wszystkie te normy są na różnicowanym poziomie technicznym i proceduralnym. W efekcie występują istotne różnice w uzyskanym poziomie bezpieczeństwa w zbiorze eksploatowanych zestawów kołowych i istnieje powszechna znajomość że :

- w eksploatacji kolejowych zestawach kołowych często występują pęknięcia osi,
- brak jakichkolwiek wiarygodnych informacji na ten temat,
- w wyjątkowo opublikowanym komunikacie dotyczącym katastrofy w Viareggio (pismo Prezesa UTK NrTTN-512-129/JN/09) oraz załączonym zdjęciu brak opisu farketograficznego, wyników badań materiałowych: wytrzymałościowych, strukturalnych, odporności na pęknięcie itd.

W przedstawionym stanie przygotowań do tworzenia polityki dla określenia minimalnych wymagań obowiązujących, w badaniach nieniszczących jak widać zrobiono nie wystarczająco, a nawet niewiele pomimo siedmiu lat od ustanowienia Dyrektywy 2004/49/WE oraz dwóch lat od katastrofy w Viareggio.

Brak takiej polityki przy częstych awariach indukuje podejścia nadmiarowe np. w normie DIN 27201-7 występuje określenie iż „jako obszar badania należy potraktować całą powierzchnię wału zestawu kołowego, przy czym główny punkt ciężkości należy położyć na przejścia przekrojów wału”.

Wydaje się że podejście to może przynieść spodziewany efekt zmniejszenia ilości awarii zestawów kołowych, ale istotnie zwiększa się zakres badania osi i w konsekwencji przedłuża czas badania co w praktyce powoduje konieczność albo bardzo drogiej pełnej automatyzacji albo przemyślanej „inteligentnej” mechanizacji badań. Istnieje więc zapotrzebowanie na opracowania sprzętu umożliwiającego szybkie, tanie i wiarygodne przeprowadzanie badań. Ogromna większość taboru kolejowego jest zaopatrzona w osie pełne. Jednak coraz to częściej pojawiają się także osie drażone.

3. Stanowisko (wzorcowe) do badań nieniszczących osi zestawów trakcyjnych z elementami linii remontowej

3.1 Badania

W kolejowych zestawach kołowych badaniom nieniszczącym podlegają oś zestawu i wieniec (koło). Pozostałe elementy tj. zespoły łożysk podlegają wymianie na nowe lub regenerowane. Badania te są badaniami porównawczymi z nacięciami wzorcowymi określonymi dla właściwego wzorca. Wzorce ściśle określone w normach/procedurach/instrukcjach są po wykonaniu certyfikowane (poświadczenie wykonania i zbadania wzorca).

3.1.1 Etapy badania osi

Badanie osi jest przeprowadzane najczęściej w następujących etapach:

- a) Przygotowanie wstępne zestawu – piaskowanie,
- b) metoda VT,
- c) metoda MT,
- d) przygotowanie do badań UT (toczenie stref przyłożenia głowic)
- e) badanie UT,
- f) wykończenie (toczenie bieżnika i czopów),
- g) ewentualny ultradźwiękowy pomiar naprężeń w wieńcu ,
- h) uzbrojenie w łożyska +malowanie.

Warunkiem przejścia osi do kolejnego etapu badań jest stwierdzenie, iż oś jest dobra na danym etapie. Wynik badania powoduje selekcję dobry/zły i jest dla każdej osi archiwizowany w bazie danych, która umożliwia automatyczny wydruk protokołu badania.

3.1.2 Badania UT osi

Badania osi jak wspomniano przeprowadza się trzema metodami tj VT, MT, UT. Metoda UT jest tu metodą podstawową ze względu na wykrywalność nieciągłości skrośnych i powierzchniowych.

3.1.3 Etapy badania osi metodą UT

Generalnie badanie takie można podzielić na następujące etapy:

- **skalowanie głowicy ultradźwiękowej na zwykłym wzorcu.** Celem skalowania na zwykłym wzorcu (np. W1) jest określenie niektórych parametrów głowicy istotnych w badaniu. Najczęściej są to: pole martwe głowicy, geometryczne usytuowanie środka ultradźwiękowego głowicy, etc. Skalowane to nie przeprowadza się dla każdego badania, tylko w określonych odstępach czasu.
- **skalowanie na elemencie badanym.** Stosuje się najczęściej w przypadku badań wieńca i w niektórych badaniach osi np. przez wykorzystywanie echa dennego i jego korekcję
- **skalowanie głowicy na wzorcu kontrolnym.** To podstawowe skalowanie obejmujące przewidziane kroki (etapy) badania w których dobiera się różne: głowice, ich położenie na wzorcu i nastawy defektoskopu z przyjętej procedury. Zapisane nastawy są wykorzystywane w badaniu właściwym osi. Istotnym usprawnieniem jest tu możliwość zapisu nastawów w pamięci defektoskopu.
- **badanie właściwe.** W badaniu właściwym osi wykorzystuje się nastawy defektoskopu (wzmocnienie zasięg) uzyskane podczas skalowania.
- **dokumentowanie badania.** Badania każdej osi daną metodą kończy sporządzenie dokumentu. Zwartość, treść i formę, tego dokumentu określa przyjęta procedura. W dokumencie powinny się znaleźć dane które jednoznacznie identyfikują badaną oś, decyzja o zakwalifikowaniu elementu oraz zarejestrowane niezgodności (akceptowalne – oś dobra i nie akceptowalne – zła).

3.1.4 Efektywność badań

Zwiększenie efektywności badania możliwe jest poprzez pełną lub częściową automatyzację i mechanizację, a także poprzez usprawnienia np. wprowadzenie procedury-programu w defektoskopie. Procedura taka w połączeniu z bardzo prostym ręcznym przełącznikiem głowic przyspieszenia dość tanio proces badawczy i to dwu trzykrotnie.

Ponadto zalety takiego rozwiązania są następujące:

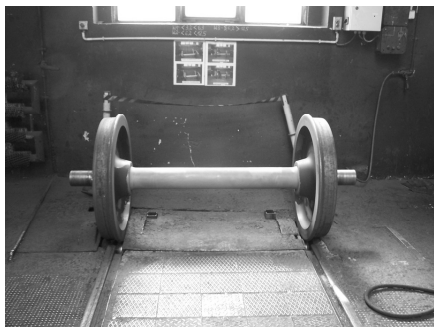
- **procedura** prowadzi badanie w kolejnych krokach tj kolejno dobiera nastawy defektoskopu do miejsca badana osi:
 - dla każdego kroku nastawy badania (głowica, zasięg wzmocnienie) są włączane zgodnie wcześniejszą (okresową) kalibracją na wzorcu,
 - wyświetlane są informacje: opis kroku, szkic wiązki, wyniki dobry/zły,
 - automatyzuje rejestracja wad,
 - archiwizację wynik badania w komputerowej bazie danych,
 - automatyczne tworzenie raportów i statystyk na podstawie zapisów w bazie danych.
- **przełącznik głowic.** Jedną z cech badania osi jest konieczność użycia wielu głowic w badaniu. Przełącznik głowic ułatwia, i przyspiesza badanie oraz „oszczędza” wtyki.

3.1.5 Mechanizacja i automatyzacja.

Mechanizacja zapewniająca ruch obrotowy oraz transport poziomy i pionowy to właściwie podstawowy współczesny standard stanowiska do badań zestawów kołowych, a brak takiej mechanizacji chyba by został zakwestionowany przy pierwszym audycie. Natomiast automatyzacja wykraczająca poza tę mechanizację niewątpliwie zwiększa efektywność badań i ich wiarygodność ale jest związana z niesłychanie wysokimi kosztami.

4. Przykład wzorcowego rozwiązania

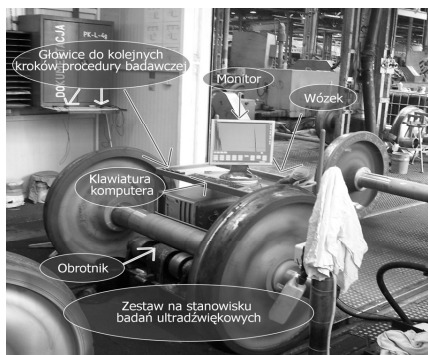
Dla zilustrowania dobrze zorganizowanego stanowiska badania kolejowych zestawów kołowych przedstawiono poniżej kilka zdjęć.



Rys.1 Stanowisko VT - na obrotniku zestaw, widoczna plansza ocen nie widoczna instalacja oświetlenia.



Rys.2 Stanowisko MT - na obrotniku część środkowa osi badana metodą magnetyczno proszkową mokrą.



Rys.3 Badanie UT - ultradźwiękowe badanie zestawu



Rys.4 Badanie UT - wydzielone stanowisko ultradźwiękowych badań zestawów kołowych

Przedstawione w artykule stanowisko wzorcowe do badania osi metodą manualną pokazuje jak za pomocą niewielkich nakładów finansowych znacznie poprawić wydajność badań oraz zwiększyć wiarygodność. Poruszono również problemy związane z procesem certyfikacji w sektorze kolejowym w Polsce, które są podstawą działań mających na celu dostosowanie się do wymogów unijnych.

5. Osie drążone

Kolejowe osie drążone posiadają otwór na całej długości osi, najczęściej o średnicy 60 lub 90 mm. Nie wpływa on jednak na osłabienie wytrzymałości osi. Osie drążone są coraz bardziej popularne, duża część nowych zestawów kołowych jest właśnie w nie wyposażona. Otwór pozwala na badanie ultradźwiękowe takiej osi bez demontażu całego zestawu. Badanie osi drążonej wykonuje się na całej objętości materiału, głowicami wprowadzanymi do tego otworu. Ponieważ jest to miejsce trudno dostępne konieczne jest wykonywanie badań specjalnie przeznaczonym do tego układem. Więcej na temat badania osi drążonych w rozdziale 6.

6. Badania osi drążonych

Badanie kolejowych osi drążonych przeprowadza się dwoma głowicami o częstotliwości 2 MHz i kącie wprowadzania wiązki 45° skierowanymi przeciwbieżnie.

Pewnymi problematykami podczas badania kolejowych osi drążonych jest:

- a) **poprawna identyfikacja wskazań chwilowego miejsca badania** jest możliwa poprzez zewnętrzne pomiary odległości i kąta obrotu, ale znacznie wygodniej i precyzyjniej jest użyć rozwiązań konstrukcyjnych z układem identyfikacji położenia UIP. Na przykład sprzęt Zakładu ULTRA w którym głowice badawcze są usytuowane przegubowo na końcu dyszla. Ponadto posługuje się on trzecią głowicą wewnątrz osi. Cała objętość otworu osi pomiędzy korkiem na końcu osi, a głowicami zostaje zalana olejem. W korku usytuowana jest trzecia głowica normalna o częstotliwości 1 MHz, która pracując metodą echa określa położenie głowic badawczych wzdłuż osi. Ponadto zastosowany inklinometr określa położenie kątowe głowic mierzone np. na godzinie 3 lub 11 itd. Operator ręcznie ustala położenie głowic na wybranej odległości i wykonuje ruch obrotowo zwrotny $\pm 180^\circ$. Jeśli od wybranego punktu przesunie wzdłuż osi dyszel z głowicami np. o 5 mm to po wykonaniu ruchu obrotowego ma zbadany następny przekrój osi. Operator na ekranie podzielonego na części może równocześnie obserwować:
 - wskazania ewentualnych ech od dwóch głowic pomiarowych,
 - wzdłużny przekrój schematu osi na którym ma zaznaczone obydwie chwilowe punkty aktualnie badane oraz poprzez zróżnicowanie szarości długość zbadaną i do zbadania, ponadto kontrole ustawiania skoku wzdłużnego,
 - aktualny przekrój poprzeczny osi i położenie obydwu chwilowymi punktów badania w położeniu kątowym.
- b) **konieczność pewnego kontaktu** głowicy z osią,
Zalanie osi olejem jest skutecznym, najlepszym z możliwych kontakt głowic z osią.
- c) **wskazania od miejsca zmiany średnicy** osi mogące wprowadzać pomyłki.
Wskazania od miejsca zmiany średnicy osi różnią się od wskazań wad tym, że występują na całym obwodzie osi, jeśli dokonamy obrotu o 360° .

7. Kolejne oferowane usprawnienia układu to:

System przesuwu wzdłużnego hydrauliczny napędzany pompą ręczną, a jeden cykl odpowiada wepchnięciu lub wyciągnięciu głowic pomiarowych dowolną wartością.

Dalszym ułatwieniem jest zastosowanie elektrozaworów i napędu elektrycznego. Po naciśnięciu przycisku system hydrauliczny wsuwa lub wysuwa dyszel o stałą wartość, zależną od nastawnych ilości skoku pompy.

Na życzenie układ automatycznego obracania dyszla z głowicami.

8. We wszystkich wersjach rejestracja

Układ cyfrowy urządzenia rejestruje i archiwizuje wynik badania wszystkich badanych punktów osi. Pozwala to w dowolnym czasie odtworzyć wszystkie informacje całego procesu badań danej osi.

9. Zastosowania

Urządzenie do badań osi drążonych uruchomiono i wykorzystywane jest m.in. w zakładach Depas w Wilnie, a jako pomoc dydaktyczna służy w ośrodku szkoleniowym w firmie Lucchini Polska w Mińsku Mazowieckim.

10. Kwalifikacja i certyfikacja personelu

Obecnie w Polsce istnieją dwie normy dotyczące certyfikacji. Norma PN-EN 473 dotyczy kwalifikacji i certyfikacji personelu badań nieniszczących. W normie przedstawiono (miejscami nawet szczegółowego) etapy procesu certyfikacji personelu na stopień 1, 2 i 3 w różnych metodach badań nieniszczących. Norma zawiera m.in. wymagania stawiane jednostkom certyfikującym, warunki ubiegania się o certyfikację (szkolenia, praktyka), ogólne wymogi egzaminu kwalifikacyjnego, warunki powtórnej certyfikacji.

Druga norma PN-EN 17024 zawiera ogólny spis wymagań stawianych jednostkom certyfikującym osoby (min. dotyczące prowadzenia dokumentacji, personelu jednostki certyfikującej, itd).

10.1 Aktualne poczynania

„Po tragicznym wypadku w Viareggio, Europejska Agencja Kolejowa (3), krajowe urzędy ds. bezpieczeństwa transportu kolejowego (NSA) oraz Wspólny Komitet Sektora Kolejowych Przewozów Towarowych zdecydowały o podjęciu przez Zespół Zadaniowy ERA Task Force działań na rzecz opracowania ogólnoeuropejskich, ujednoczonych kryteriów oraz natychmiastowego wdrożenia średnioterminowych działań na rzecz dalszego podniesienia poziomu bezpieczeństwa kolei.” (cytat z dokumentu 4):

Dnia 30 lipca br. Wspólna Grupa Sektorowa dla Zespołu Zadaniowego ERA Task Force do spraw utrzymania wagonów/osi (zwana w skrócie JSG) opublikowała raport dotyczący Europejskiego Programu Działań mającego na celu uniknięcie powtórzenia się sytuacji z Viareggio. Program składa się z 3 części (5):

- inspekcja wizualna osi wagonów towarowych (EVIC) ,
- nieniszczące badania wyrywkowe osi (zwanym w skrócie SPI V2),
- wprowadzenie jednolitego obowiązkowego rejestru osi wagonów towarowych.

Udział (dobrowolny) w programie zadeklarowało wiele firm z Polski i Europy. Pierwsza część programu jest już wdrażana (przeprowadzono szkolenia, wydano podręcznik wdrażania w wielu językach), druga część wystartowała w maju, natomiast są problemy z wdrożeniem trzeciej części. Należy podkreślić iż program obejmuje głównie działania organizacyjne w celu poniesienia bezpieczeństwa na kolei.

Podkreślone słowa tj. badania wyrywkowe osi budzą sprzeciw, ponieważ byłoby to działanie zupełnie nieskuteczne i bardzo odległe od konieczności wyselekcjonowania ze zbiorów eksploatowanych **wszystkich osi niebezpiecznych**. Autorzy mają nadzieję że jest to nieporozumienie.

10.2 Stan przygotowań do certyfikacji personelu w sektorze kolejowym w Polsce.

Z inicjatywy Transportowego Dozoru Technicznego (6) podjęto kroki w celu szkoleniowa oraz certyfikacji w sektorze kolejowym operatorów badań nieniszczących zgodnie z normami PN-EN 17024 i PN-EN 473. Szkolenie obejmuje metody VT MT i UT. Szkolenia już zostały uruchomione w siedzibie firmy Lucchini Poland w Mińsku Mazowiecki. Odbył się już również pierwszy egzamin, co zapoczątkowało proces certyfikacji personelu w sektorze utrzymania ruchu kolei w Polsce.

LITERATURA:

1. <http://wiadomosci.wp.pl/kat,1356,title,To-glownie-polskie-wagony-wybuchly-we-Wloszech,wid,11269639,wiadomosc.html>
2. <http://www.vpihamburg.de>
3. http://europa.eu/agencies/community_agencies/era/index_pl.htm
4. EVIC – Program badań wyrywkowych, Podręcznik wdrażania V2.0
5. <http://www.igt.pl/aktualnosci/inspekcja-wizualna-osi-wagonow-towarowych-evic-obowiazkowa-dla-wszystkich-uczestnikow-avv-juz-od-1-grudnia-2010r,29/>
6. <http://www.tdt.pl>



Rentgenové záření jako diagnostický prostředek materiálového inženýrství a nanotechnologie

X-ray as diagnostics means of material engineering and nanotechnology

115 let od objevu, 110 let od udělení 1. Nobelovy ceny za fyziku

115 years from the discovery and 110 years from the award trough the first Nobel Prize for physics

Lubomír SODOMKA, Adhesiv,TUL Liberec

Abstrakt

From the discovery of X-rays in the year 1895 by W.C.Roentgen has been gone over more than 115 years. For this discovery W.C.Roentgen has been awarded trough first Nobel prize for physics in the year 1901. The fundamental properties of X-rays have been determined their linear propagating and penetrating trough materials and with electromagnetic radiation identified. Further wave properties as diffraction, interference and others have been discovered later (1914 M.v.Laue, 1915 Braggov0, 1917 Barkla, 1927 Compton, 1962 DNA, 1979 CT). The important application in NDT technique is diffraction, which is also the fundamental for the for the physics of condensed state. The important application of X-ray is in medicine as well as in technique. The contribution to the development of x-ray physics a its application of Czech scientist is being also presented.

Abstrakt

Od objevu rentgenového záření (rtgz) ke konci října roku 1895 uplynulo již 115 let. Význam objevu rentgenového záření Wilhelmem Conradem Röntgenem byl potvrzený ihned po objevu snímkem se zviditelněnou kostrou ruky a první Nobelovou cenou (NCF) za fyziku v roce 1901. Tím vzniklo další výročí, a to 110. od udělování Nobelových cen. Rentgenové záření získalo ihned využití v medicíně. Během vývoje byly objevené další vlastnosti rentgenového záření, které našly využití ve vědě i technice. Šlo nejprve o vlastnosti zjištěné již samotným Röntgenem jako je jeho přímočaré šíření, absorpce různými materiály a jeho užití k diagnostice v lékařství i materiálech. Další objev vlnových vlastností jako je difrakce (NCF M.von Laue 1914, Braggové1915.) a polarizace (NCF Ch. Barkla, 1917) a rozptyl rentgenového záření (NCF Compton,1927). Mezi další objevy vlastností rtg záření byla jeho interference. Rentgenové difrakce se užívá k určování struktury látek. Vlnové vlastnosti rtg záření prokázaly, že jde o elektromagnetické záření o vlnových délkách v oblasti $2 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$ až $1 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$ Mezi významné aplikace rtgz patří bezesporu zjištění dvojspirálové struktury molekul DNA (DNK) (Crick, Watson, Wilkins NCFM 1962). Další významnou aplikací rtg záření v medicíně využívající zprvu rentgenového záření je i počítačová tomografie (CT, A.Cormack, NC1979), využívána v lékařské diagnostice. Nechybí ani rentgenové lasery (xasery). V poslední době se objevila další rentgenová nanodiagnostika nazvaná ptychografie, což je bezčočkové zobrazování rentgenovým zářením. Došlo i k využití rentgenového záření v kosmu zobrazováním jeho zdrojů a založení rentgenové astronomie.

Také v ČSR se pěstovala fyzika a využití rentgenového záření téměř od samého začátku po objevu. Mezi významné pracovníky v tomto oboru je možné zařadit na KU v Praze prof. Dolejška, Kunzla, ve Škodových závodech A.Kochanovskou, J Bačkovského, kteří vchovali alespoň dvě generace následovníků. Fyzika rentgenového záření se pěstovala jak na vysokých školách, výzkumných ústavech, tak i na větších závodech. Přístrojové vybavení zajišťovala v ČSSR firma Chirana Praha Modřany.

Účelem tohoto příspěvku je ukázat, jak velký vliv měl objev rtg záření na rozvoj vědy, techniky a společnosti a jak společnost obohatil a tím i nepřímo ukázat především na vliv NC za fyziku, chemii a medicínu a fyziologii, nanedestrktivní diagnostiku a na život celé společnosti.

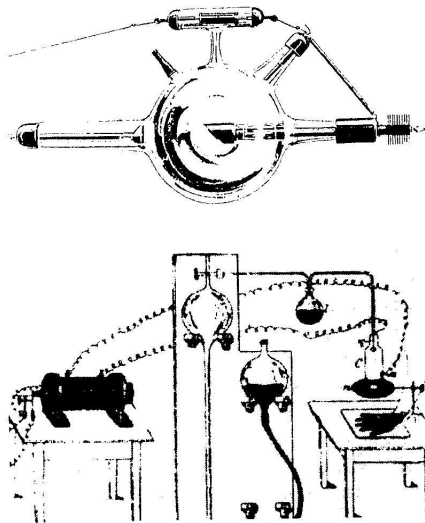
1. Úvod

I když v kosmickém prostoru je atmosféra tvořena také rentgenovým zářením, musela být tato skutečnost zjištěna až po objevu rtg záření v laboratoři na zemském povrchu. To se stalo ke konci října v roce 1895 mimo jiné i na Würtzburšské univerzitě v laboratoři W. C. Röntgena. Ten konal pokusy s výboji v plynech. K tomu užíval trubici Crooksova typu. V trubici byly umístěny tři elektrody katoda, antikatoda a anoda. Antikatoda a anoda byly elektricky propojené a mezi katodou a anodou bylo připojované napětí nad 10kV (obr.1). V horní části je původní Röntgenova trubice. Vlevo je katoda, vpravo antikatoda a anoda. Nahoře je tlakoměr plynu v trubici, která je čerpaná. Celková uspořádání Röntgenovy aparatury je ve spodní části obr.1

I když sám Röntgen zjistil řadu významných vlastností vedoucích bezprostředně k využití v lékařství, bylo třeba ještě dalších objevů, zvláště pak vlnových vlastností rtg záření, a to difrakce, polarizace a interference, což bylo předmětem dalších NC za fyziku. Kromě toho se začaly vlastnosti rtg záření využívat téměř ve všech oborech vědy a techniky. Z podstatných aplikací rtg záření je třeba ještě v úvodu uvést vyřešení struktury molekul deoxyribonukleové kyseliny (DNK, DNA), které mají výjimečný význam při studiu dědičnosti živých organismů (NC Crick, Wilkins, Watson 1962, [1], [2]) a vynález rentgenové tomografie (Cormack NC 1979, [1], [2]). Jinak využití rtg záření vedlo k četným patentům a výrobě rtg přístrojů a zařízení využívaných v lékařství k určování struktury materiálů rentgenovými spektrálními a difrakčními metodami.



Conrad Wilhelm Röntgen



Obr.1

Obr.1 Röntgenova trubice, která se v dnešní technické podobě nazývá rentgenka, horní část obr.1. V dolní části je celková Röntgenova aparatura. V levé části obrázku je zdroj vysokého napětí, induktor, ve středu čerpací aparatura, vpravo rentgenka se zobrazovanou rukou na fotodesce.

2. Prehistorie objevu rtg záření

Prehistorie rtg záření začíná studiem výbojů v plynech, kterými se zabývala velká většina významných fyziků a významných laboratoří v Německu, Anglii a Francii již od roku 1850. Patřila mezi ně taková jména, která se vyskytují v učebnicích, jako W. Crooks, J.W.Hittorf, H. Hertz, P.Lenard, N.Tesla, T.Edison, J.J.Thomson a řada dalších. Výboje v plynech studovali ve vyčerpaných trubcích s vnitřními elektrodami, které vynalezl Crooks. K objevu rtg záření měla velmi blízko celá řada z uvedených fyziků, zabývajících se hlavně katodovým zářením, které bylo identifikované jako proud záporně nabitých částic, elektronů. Nebylo jednoduché vedle podobných účinků katodového záření oddělit nový typ záření.

3. Z historie rtg záření

W. C. Röntgen po příchodu na Würzburgskou univerzitu, kde se stal ředitelem laboratoře se ihned pustil do výzkumné práce ve výbojích v plynech. Navázal na práce Lenarda a Hertze ve studiu katodového záření. Lenard opatřil výbojovou trubici tenkou hliníkovou folií, takže katodové paprsky pronikaly ven z trubice a způsobovaly luminiscenci v jejím okolí do vzdálenosti 30 až 80mm. Zatímco paprsky sledované Röntgenem pronikaly do mnohem větší vzdálenosti než paprsky katodové a nebylo je možné odchylovat magnetem.Röntgen si uvědomil, že jde o nový typ záření, které nazval paprsky X. Röntgen začal zkoumat jejich vlastnosti a zjistil: šíří se přímočaře pronikají materiály, pro jiná známá záření nepropustné, pronikají i lidskou tkání a jsou schopné zobrazit i část kostry, jak dokázal na snímku ruky na obr.2. v uspořádání na obr.1. Na něm jsou zobrazeny části kostry ruky spolu s prstenem. To svědčí i o přímočařem šíření paprsků X, které byly později nazvané v některých státech na jeho počest rentgenovým zářením a o různé absorpci v materiálech. Objev rtg záření dal

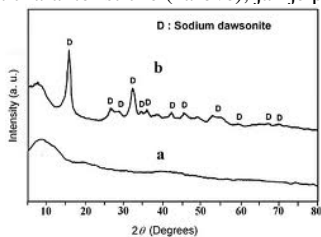
podnět k objevům dalších druhů záření, což se podařilo A.Bequerelovi objevem záření uranových solí, které nazval záření beta (NCF 1902) a manželům Curieovým objevem radiaktivního záření (NCF 1903).



Obr.2 Snímek ruky rentgenovým zářením, který dal okamžitý podnět k využití v lékařské diagnostice. Expoziční doba byly v té době kolem jedné hodiny.

4. Vlastnosti rtg záření

Röntgen na základě experimentu si sám odpověděl na otázky: 1. Šíří se rtg záření přímočaře? 2. Podléhá zákonu lomu a odrazu? 3. Liší se od katodových paprsků? 4. Jde o záření částic nebo o elektromagnetické vlnění? Odpovědi : Rtg. záření se šíří přímočaře, jak dokazuje projekce ruky. Zákon lomu ani odrazu neprokázal. Prokázal však, že jde o jiný druh záření než je záření katodové. Katodové záření odchyluje magnet, rtg. ne. Rtg. záření proniká masivnímu tloušťkami materiálů, zatímco katodové jen tenkými foliemi hliníku a do krátkých vzdáleností. Postupně byly zkoumány další vlastnosti rtg záření. Ukázalo se, že rtg. záření je příčné elektromagnetické vlnění o krátkých vlnových délkách od zlomků po stovky nanometrů na základě jeho difrakce a byly potvrzeny i jeho interferencí na krystalové mřížce a polarizací, jak bude ukázáno v dalším textu. Spektrum rtg. záření je spojité (brzděné) a charakteristické (čárové), jak je patrné z obr.3. Na něm je také vidět, že spojité spektrum rtg.

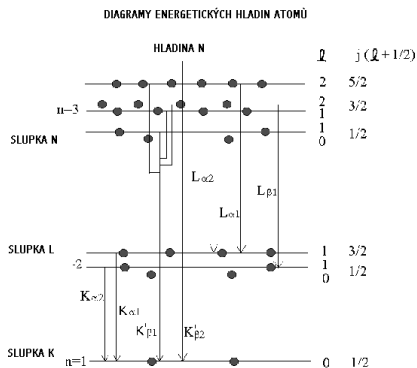


Obr.3. Spojité (a) a čárové (b) spektrum rtg záření

záření vzniká až při určitém kritickém potenciálu U_k , který určuje krátkovlnovou hranici rtg záření, vystupující z rentgenky. U_k je určené mechanismem, kdy elektrostatická energie elektronu eU_k s přeměnění celá na foton rentgenového záření, takže

$$h\nu_k = eU_k, \quad \nu_k = c/\lambda_k, \quad \lambda_k(\text{nm}) \approx 1,2345/U(\text{kV}) \quad (1)$$

Ve vztahu (1) je h Planckova konstanta $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s, c je rychlost světla $c = 2,997 \cdot 10^8$ m/s, ν_k a λ_k jsou kritická frekvence a krátkovlnová hranice rtg záření je napětí na elektrodách rentgenky. Zatímco spojité (brzděné) záření vzniká klasicky zabrzděním náboje elektronu na anodě, čárové spektrum vzniká podobně jako spektrální čáry světla přechodem na vnitřní



Obr.4 Hladiny energetických hladin k výkladu rtg čárových spekter energetické hladiny atomů K, L, M, N, ...

4.1 Absorpce

Absorpce (pohlcování) rtg. záření patří mezi nejjednodušší a přitom nejrozšířenější využití rtg. záření, a to především v diagnostice materiálů a v medicíně. Využívání absorpce v lékařské diagnostice bylo zahájeno jen několik dní po jeho objevu pořízením zobrazení ruky na obr.2. Metoda je založena na různé absorpci materiálů definované exponenciálním Lambertovým- Beerovým zákonem ve tvaru

$$I(x) = I(0) \exp(-\mu x) \quad (1)$$

kde $I(0)$ je intenzita dopadajícího záření o lineárním absorpčním součiniteli μ procházejícím tloušťkou materiálu x a má na výstupu hodnotu $I(x)$, jak znázorňuje obr.5. Pro teoretický výpočet absorpčního součinitele je výhodnější hmotový součinitel absorpce $\mu_h = \mu/\rho$, kde ρ je objemová hmotnost (hustota) absorbujícího materiálu. Výhoda hmotového absorpčního součinitele spočívá v tom, že při zastoupení atomů o protonovém čísle Z_x, Z_y, Z_u v materiálu je možné spočítat hmotový absorpční součinitel užitím vztahu, který je lineární kombinací jednotlivých hmotových součinitelů v materiálu přítomných atomů o protonovém čísle $Z_{x,y,u}$

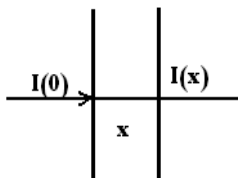
$$\mu_h(Z_x, Z_y, Z_u) = X \mu_h(Z_x) + Y \mu_h(Z_y) + U \mu_h(Z_u) + \dots \quad (2)$$

kde X, Y, U jsou relativní hmotnostní zastoupení prvků $Z_{x,y,u}$ v látce o hmotovém absorpčním součiniteli $\mu_h(Z_x, Z_y, Z_u)$. Hmotový absorpční součinitel závisí na vlnové délce a na protonovém čísle Z v materiálu přítomných atomů empirickým vztahem:

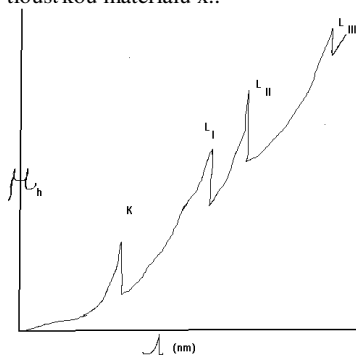
$$\mu_h = k \lambda^n Z^m, \quad (3)$$

v němž $n \sim 3$ a $m \sim 4$. Průběh $\mu = \mu(\lambda)$ není tak monotonní podle (3), ale pro vlnové délky serie K, L, M, N dochází

ke skoku v závislosti $\mu(\lambda)$, jak znázorňuje obr.6.



Obr.5 K zákonu absorpce $I(0)$ intenzita dopadajícího záření, $I(x)$ intenzita prošlého záření tloušťkou materiálu x .



Obr.6. Nemonotónní průběh $\mu = \mu(\lambda)$

Hmotový absorpční součinitel ukazuje, že na absorpci rtg. záření se podílí pouze zastoupení jednotlivých prvků bez ohledu, jak jsou navzájem vázané. Na absorpci se a tedy i v absorpčním činiteli μ podílejí jednak vlastní absorpce, kdy se rtg. záření přemění v jiné formy energie nejčastěji v tepelnou a z látky nevystupuje a na složku rozptylu, kdy se záření odchýlí od původního směru a do něho pak již při výstupu z materiálu nepřispívá.

Zákony absorpce neprokázaly jednoznačně částicový či vlnový charakter rtg. záření.

4.1 Lom, odraz

První pokusy zjistit lom a úplný odraz byly neúspěšné. Byly prováděné na hranolu vytvořeném z vodného roztoku bisulfidu uhlíku v obalu slídy. Rovněž i čočky vytvořené z ebonitu lom neprokázaly [3]. Také úplný odraz rtg záření nebyl z počátku zjištěný. Drude – Lorentzovou teorií bylo později prokázáno, že index lomu n_L se liší od jedničky pouze v pátém až šestém řádu, takže

$$n_L = 1 - \delta, \delta \approx N e^2 / 2\pi m v^2 \approx 1,67 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

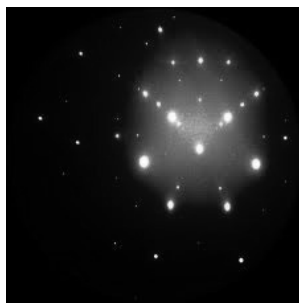
N je počet elektronů v jednotce objemu, e náboj, m hmotnost elektronu, v je frekvence rtg záření $v \approx 10^{18} \text{ Hz}$ [4]. Tato malá odchylka svědčí o tom, že lom rtg záření je velmi těžko měřitelný. Rovněž i mezní úhel úplného odrazu je velmi malý, takže i úplný odraz je těžko pozorovatelný.

4.2 Difrakce

Jev, který prokázal vlnový charakter rtg záření byla jeho difrakce (ohyb) na krystalové mřížce. S myšlenkou použití difrakce rtg záření na krystalové mřížce přišel Max von Laue (obr.7) předpokládaje, že vlnové délky rtg záření jsou srovnatelné s mezimřížkovými vzdálenostmi v krystalech. Experiment, který dokázal difrakci na krystalech modré skalice uskutečnili v roce 1912 W Friedrich a P.Knipping se spojitým rtg zářením a získali difrakční obrazce jejichž souměrnost odpovídala souměrnosti krystalu (obr.8). M.von Laue získal NCF pro rok 1914 a je zajímavé, že Friedrich a Knipping, který experiment uskutečnili, se na něj nepodíleli a bez nich by k objevu nedošlo.



Obr.7. Max von Laue



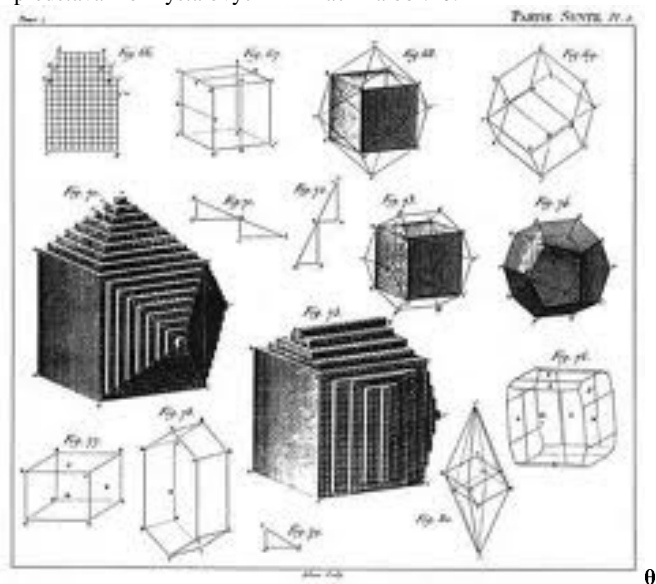
Obr.8. Difraktogram

Podrobnosti myšlenkových pochodů, které vedly k objevu difrakce rtg záření na krystalové mřížce lze nalézt ve vlastní excelentní a stručné publikaci M.von Lauea [5].

Důležitým výsledkem Laueova objevu byla získaná souvislost mezi rtg zářením a krystalovou mřížkou. Difrakce rtg záření na krystalu prokázala 1.vlnovou podstatu rtg záření 2.souměřitelnost vlnové délky a rozměru periodicity krystalové mřížky, 3. difrakční rovnice umožnily měřit mřížkové parametry, 4. difrakce na známé krystalové mřížce umožňuje provádět rtg spektrální analýzu chemikálií, která je mnohem jednodušší než optická spektrální analýza.

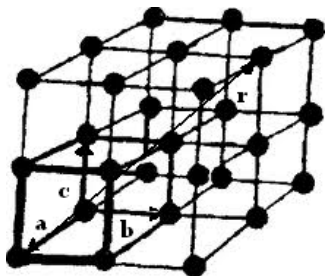
4.2.1 Základní představy krystalové struktury a její popis

Ve vědě platí zásada, že náhoda přeje připraveným. Max von Laue nenechával však nic náhodě. Sledoval ze zájmu výsledky krystalografie, která již prostřednictvím René-Just Haüya od roku 1784 přišla s periodickou představou struktury krystalů a vytvořila zákon racionálních indexů, který později vedl k zavedení Millerových indexů, tj. třech celých čísel k označování krystalových rovin. Krystalové roviny jsou roviny vytvořené mřížkovými body v krystalové rovině. Haüyovy představy o stavbě krystalů jsou uvedené na obr.9, které vedly k představám o krystalových mřížkách na obr.10.

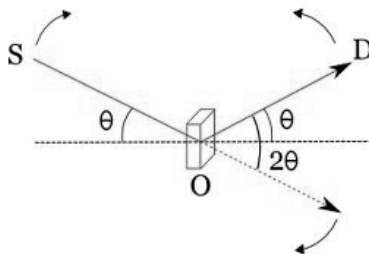


Obr.9. Haüyovy představy o stavbě krystalů.

Z těchto představ vznikla postupně mřížková struktura krystalů uvedená na obr.10.



Obr.10



Obr.11

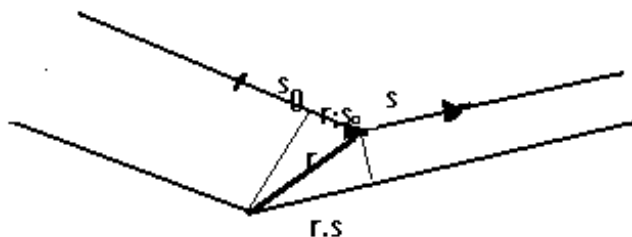
Obr.10. Hypotetická struktura krystalové mřížky, která byla experimentálně potvrzena difrakcí rtg záření navrženou M.von Lauem. Obecná mřížka krystalů. **a,b,c** mřížkové parametry, **r** polohový vektor mřížkového bodu $\mathbf{r} = m \mathbf{a} + n \mathbf{b} + o \mathbf{c}$, *m,n,o* celá čísla."

Obr.11. Podstata pokusu difrakce rtg záření. S dopadající paprsek, O krystal, D difraktovaný paprsek odchýlený od S o úhel 2θ . Slouží k určení Lauovy difrakční rovnice.

Podstatou difrakce rtg záření bylo určit hodnoty mřížkových parametrů a, b, c v obr.10. Laueova hypotéza spočívala v předpokladu, že mřížkové parametry tvořící krystalovou mřížku a vlnová délka rtg záření λ jsou v hodnotě srovnatelné tj. $a, b, c \approx \lambda$. Podstata důkazu difrakce je na obr.11. K určení kvantitativních vztahů $a, b, c \approx \lambda$ je třeba vyjádřit difrakční podmínku. K tomu vybereme dva mřížkové body z mřížky na obr.10 v bodech $\mathbf{r} = \mathbf{0}$ a $\mathbf{r} = \mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}$, jak znázorňuje obr.12 a určíme difrakční podmínku pro libovolné body mřížky $\mathbf{r} = \mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}$. (4)

Na krystalovou mřížku dopadá záření ve směru určeném jednotkovým vektorem \mathbf{s}_0 a vystupujícím po difrakci ve směru o jednotkovém vektoru \mathbf{s} . Vystupující paprsek splňuje difrakční podmínku, je-li dráhový rozdíl obou paprsků L rovný celému počtu n vlnových délek λ , takže platí

$$L = \mathbf{r} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{s}_0 = \mathbf{r} \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) = n\lambda \quad (\text{obr.12}) \quad (5)$$



Obr. 12. K odvození Laurových rovnic a Braggovy rovnice.

Dosazením za \mathbf{r} ze (4) a \mathbf{S} za $\mathbf{S} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)/\lambda$, upravíme rovnicí (5) na

$$(\mathbf{m}\mathbf{a} + \mathbf{n}\mathbf{b} + \mathbf{o}\mathbf{c}) \cdot \mathbf{S} = n, \text{ kde } n \text{ je celé číslo, řád difrakce.} \quad (6)$$

Po dosazení za \mathbf{r} postupně mřížkové vektory $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$, dostáváme trojici rovnic představujících difrakci na třech lineárních mřížkách jako v optice:

$$a (\cos(\mathbf{a}, \mathbf{s}) - \cos(\mathbf{a}, \mathbf{s}_0)) = n_a \lambda \quad (7)$$

Vztahy (7) jsou Laueovy rovnice. Rozepsáním skalárního součinu vztahu (6) a uvážením, že podle obr. 12 je $l/(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) = 2d \sin\theta$ a výrazy $a(\cos(\mathbf{a}, (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0)))$ určují mezivzdálenost d soustavy rovnoběžných rovin, na kterých dochází k difrakci (k reflexi (obr.11)), takže výsledkem je jednoduchá rovnice, nazývaná Braggova rovnice, která vysvětluje mechanismus difrakce ve spojení s obr.11 jako odraz na krystalových rovinách o mezivzdálenostech d a je tvaru

$$2d \sin\theta = n\lambda, \quad (8)$$

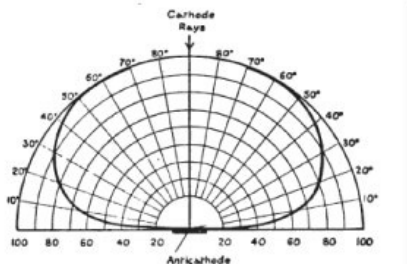
v níž n je celé číslo, řád difrakce.

Za výklad mechanismu difrakce jako reflexe na rovnoběžných krystalových rovinách o mezirovinových vzdálenostech d získali otec a syn Braggové Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1915. Difrakce prokázala, že rtg záření je vlnový děj, zda jde o podélné nebo příčné vlnění rozhodla teprve až polarizace záření.

Ukážeme, že další objevy kolem rtg záření vedly také k dalším Nobelovým cenám za fyziku. A jejich aplikace k Nobelovým cenám za medicínu a vytvoření nového oboru rentgenové astronomie.

4.3 Polarizace

Z difrakčních experimentů není zřejmé, zda prokázané vlnění rtg záření je podélné nebo příčné. Důkazu se ujal Ch.G. Barkla v roce 1905. Soustavou clonek a orientaci rentgenky vzhledem ke katodovému záření prokázal jeho polarizaci, naměřenou na obr.13



Obr.13 . Naměřená polarizace rtg záření jako důkaz příčného vlnění.

Za tento důkaz byla udělená Bartlovi Nobelova cena za fyziku v roce 1917, což byla třetí NC za fyziku v oblasti rtg záření. Následovaly však i další.

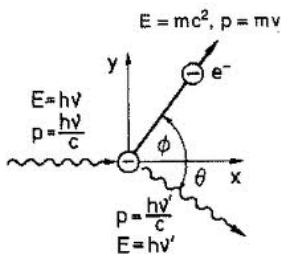
4.4 Rozptyl

V článku 4.1 o absorpci bylo zmíněno o tom, že se na absorpci podílí i změna směru záření uvnitř absorbátoru, rozptyl rtg záření. Jedním z mnoha mechanismů rozptylu rtg záření je Comptonův jev (rozptyl). Význam tohoto jevu spočívá v tom, že jej lze vyložit také částicově a využít k teorii mechanismu srážek v mechanice. Foton rtg záření jako částice narazí na elektron (obr.13) a na základě zákonů zachování hybnosti a energie lze již odvodit vztah pro úhel rozptylu θ , který se shoduje s úhlem naměřeným Comptonem [6], [7] a naměřenou vlnovou délkou λ' :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (2h/mc) \sin^2 (\theta/2), \quad (9)$$

m je hmotnost elektronu, λ' je vlnová délka rozptýleného, která se rozptylem prodlužuje. Comptonův rozptyl je fyzikálně důležitý, neboť ukazuje na částicově (korpuskulárně) vlnový dualismus rtgz.

Za takto významný objev a jeho teoretický výklad získal Compton další Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1927 v oboru rentgenového záření.

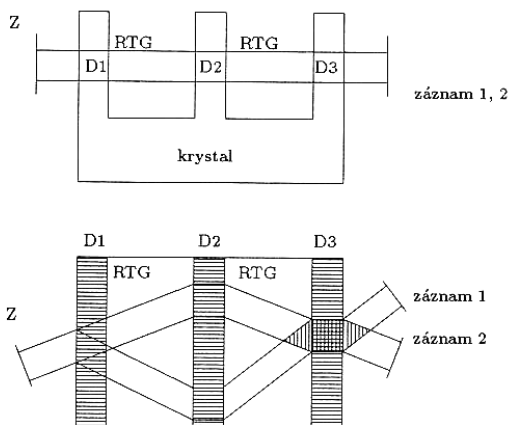


Obr.13. K výkladu mechanismu Comptonova jevu.

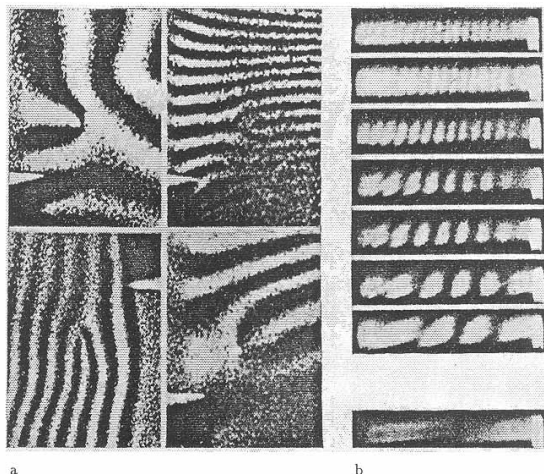
4.5 Interference

Interference rtg záření patří rovněž jako difrakce k potvrzení jeho vlnových vlastností. Uskutečnění rtg interference není však tak jednoduché jako difrakce. Podobně jako ve vlnové optice došlo k uskutečnění rtg interference mnohem později až po 41 letech v roce 1963 po difrakci. K interferenci rtg. záření byly použity analogie z optiky, a to odraz na krystalové mřížce a analogie Youngova pokusu. Tyto experimenty uskutečnili Hart a Bonze s použitím dokonalých krystalů křemíku. Podstatu takového rtg interferometru pochopíme z obr.14. Rtg. interferometr je tvořen blokem dokonalého krystalu křemíku, na němž jsou vyfrézované destičky tak, aby jejich silně difraktující roviny byly kolmé k jejich povrchu a tvořily s původním blokem krystalu kompaktní celek [8].

Dopadá-li monochromatické rtg záření na přední destičku pod Braggovým úhlem, je záření rozděleno na dvě části, procházející a difraktovanou. Tyto oddělené svazky dopadají na druhou destičku, která je po difrakci přivede opět do společného prostoru. Poněvadž jde o koherentní svazky, nastává v tomto prostoru interference. Interferometrem lze získat tzv. moaré obrazce stočením nebo posunutím třetí destičky v bloku. Takovým interferometrem lze



Obr.14. Rtg. interferometr (Z - zdroj rtg. monochromatického záření, $D1$, $D2$, $D3$ -destičky vystupující z jednoho bloku krystalu obvykle křemíkového, RTG - svazky rtg. záření)

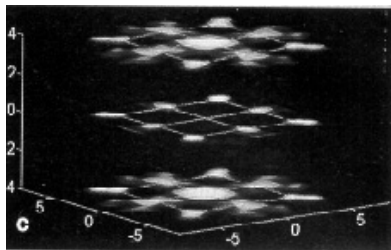


Obr.15. Moiré obrazce vzniklé na dislokacích v destičce monokrystalu,
 b) moiré obrazce při stočení destičky $D3$ vzhledem k $D1$ a $D2$

dosáhnout přesnosti v měření mezivinových vzdáleností až 10^{-8} m a v měření úhlů až $0,1''$. Podrobnosti o rtg interferometrii najde čtenář např. v [8].

4.6 Xasery

Název xasery užíváme pro kvantové generátory koherentního rtgz, které se nazývají také rentgenové lasery. Jsou obdobou laserů, kvantových generátorů ve světelné oblasti. Jak vyjadřuje teorie těchto koherentních zdrojů pravděpodobnost jejich realizace klesá s rostoucí třetí mocninou jejich frekvence a tedy s třetí mocninou jejich převrácené vlnové délky. Přes tyto nepříznivé podmínky, došlo k realizaci těchto zdrojů vysoko energetického záření. Kromě toho je možné jejich použitím uskutečnit rentgenovou holografii, která umožní přímé pozorování dynamiky krystalové mřížky, jak o tom snili fyzici pevných látek. To se uskutečnilo tzv. vnitřní holografií [8]. Snímek pořízený touto metodou je zachycený na obr.16.



Obr.16. Rentgenový hologram krystalové mřížky $SrTiO_3$ [?]



Obr.17. Laserové zařízení v Praze

Dnes existují velké a vysoko výkonové xasery pro diagnostiku a technologii materiálu. Jeden takový laser je instalovaný i na fyzikálním ústavu AV v Praze (obr.17).

4.7 Ptychografie

Po dlouhou dobu sloužila jako hlavní optická metoda zobrazování paprsková optika. Obrazy se vytvářely čočkami, založenými na zákonech paprskové optiky odrazu a lomu. Z celého spektra elektromagnetického záření mají rentgenové a gama záření index lomu velmi blízký jedničce, takže lom rentgenového záření je nepatrný a nelze pro něj zkonstruovat čočky podle zákona lomu. Na základě vlnových znalostí elektromagnetického záření a tedy i světla se ukázalo (J.B.Fresnel) [6],[7], že je možné nahradit zobrazování paprskovou optikou, optikou vlnovou a později i optikou kvantovou. Ve vlnové optice jsou zobrazovací čočky nahrazeny Fresnelovými zónálními destičkami. Zobrazování probíhá na základě zákonů difrakce světla [6],[7].

Metoda difrakčního zobrazování je pak použitelná pro krátkovlnové záření jako je rentgenové a gama záření. Bezčočkové zobrazování rentgenovým zářením se nazývá ptychografie [9].

4.8 Mimozemské zdroje rtgz

Poněvadž ve Vesmíru se nacházejí tělesa s teplotou až $\sim 10^7 \text{K}$, což odpovídá energii rtgz, mohou taková tělesa být zdrojem rtgz v kosmickém prostoru. Ke studiu takového záření je třeba se dostat nad zemskou atmosféru, aby se zabránilo jeho absorpci atmosférou. V roce 1949 byla provedena první mimozemská měření rtgz na vypuštěné raketě. V roce 1956 navrhl Riccardo Giacconi zahájit projekt rentgenové astronomie. K tomu sestrojil „rentgenový dalekohled“, který ve spojení s družicí měl provádět snímkování zdrojů rtgz. Družice byla vypuštěna v roce 1999 a tím vznikl nový obor rtgz rentgenová astronomie. Rentgenovým dalekohledem (reflektorem) Giacconia byly pořízené snímky rtgz zdrojů dvojhvězd, supernov a předpokládá se, že bude možné roztou technikou i pozorovat černé díry. Za zavedení rentgenové astronomie byla udělena Giacconiovi NCF pro rok 2002 [1], [2], [7].

5. Využití rtgz záření

Během 115letého výzkumu rtgz se dosáhlo jeho významných aplikací. Mezi první je nutné uvést využití v lékařské diagnostice, založené na absorpci rtgz. V principu stejné techniky se používá v diagnostice nejrůznějších technických konstrukcí prozařováním [4].

Velmi významné je využití rtgz díky jeho krátkým vlnovým délkám srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi v kondenzovaných látkách k určování jejich atomové struktury podstatné pro využití v technologii jejich přípravy [4], [8] a různých jejich fyzikálních charakteristik (velikost zrna, vnitřní pnutí, textura apod.). Důležitost znalosti struktury prokázali F.Crick, J.Watson, M.Wilkins (obr.18) rentgenodifrakční technikou, když zjistili spirálovou strukturu DNK (NCMF 1962), která hraje důležitou úlohu v genetice. Dalším významným využitím rtgz je počítačová rentgenová tomografie známá pod zkratkou jako CT metoda (NCMF 1979, Cormack, [1], [2], [10]).



Francis Harry



James Dewey



Maurice Hugh

6. Rentgenové záření v ČSR

Vědci se začali zabývat rentgenovým zářením v poměrně krátce po jeho objevu v roce 1895 ještě za Rakouska-Uherska. V národních listech se objevila zpráva, že k pořízení snímku ruky rentgenovým zářením bylo třeba až hodinové expozice. Další zpráva v Tržištích senzací pocházela od Egona E.Kische.

První se vědecky začal zabývat rtgz profesor na pražské technice Ivan Puluj, který si dělal také nárok na prvenství objevu paprsků X. První chirurgický zákrok po diagnostice hřebíku v žaludku rentgenem provedl chirurg Karel Maydl. První laeogramy získaly na monokrystalech Bohuslav Ježek s Karlem Teigem. V letech 1916 až 1920 byly obhájeny dvě disertace R.Šimánka a A.D.Kašparové. Po roce 1918 se zabývali rentgenovým zářením v ČR František Ulrich a Václav Posejpal, profesor České univerzity v Praze. Ten se stal v roce 1925 autorem první publikace o rentgenovém záření s titulem Rentgenovy X paprsky.

Soustavným studiem rentgenového záření ČSR se začaly zabývat dvě skupiny vedené Václavem Dolejškem. Obě se zabývaly aplikacemi Braggovy rovnice, jedna rtg spektroskopii a druhá rentgenovou difraktoografií. Spektroskopická skupina pracovala na pražské univerzitě a druhá skupina (A.Kochanovská a Jindřich Bačkovský se spolupracovníky) v ústavu Škodových závodů, kterou vedla po smrti Dolejška A.Kochanovská, autorka dvou knižních publikací Radiokrystalografie a Zkoušení jemné struktury materiálů rentgenovými paprsky. Ředitelem Ústavu technické fyziky ČSAV po jeho založení se stal Jindřich Bačkovský. Ten se tam rovněž zabýval rentgenovým zářením a jeho difrakcí na monokrystalech a strukturou monokrystalů. Výpočetní a experimentální techniku pro řešení struktury monokrystalů zajišťovali Alan Líněk a J. Drahokoupil.

A.Kochanovská i J.Báčkovský vychovali další dvě generace rentgenových fyziků. A.Kochanovská v první generaci J.Šedivého, V.Synečka, M.Simmerskou, J. Čermáka, v druhé generaci pak J.Waňkovou, M. Polcarovou, H.Šíchovou, L.Sodomku a další.

A.Kochanovská iniciovala rovněž i založení společnosti „Rentgenografické rozhovory“, které po dlouhou dobu předsedala. Společnost se zachovala do současnosti pod nynějším názvem „Krytalografická společnost“. Na závěr ještě uveďme první dámu rentgenografie A.Kochanovskou při práci (obr.19)



Obr. 19. A. Kochanovská při justaci rtg aparatury

7. Závěr

Při 115.výročí od objevu rtgz a 110. výročí od udělení NCF za tento objev W.C. Röntgenovi je třeba si připomenout jednotlivé objevy fyziky rentgenového záření a zopakovat si jejich podstatu, aby neupadly v zapomnění. Důležitost objevů fyziky rtgz potvrdily NCF udělované za jejich objevy. Ukázalo se, že rentgenové záření skýtá i významné aplikace, pro

kteří je ještě otevřené objevitelské pole. Ukazuje se, že rtgz je stále ještě mocným nástrojem k určování struktury látek a pro rozvíjející nanotechnologii, založenou na chemii a fyzice kondenzovaných látek [7], [8]. Byly představené i některé hlavní světové osobnosti a byli připomenuti vybraní fyzici, kteří se věnovali tomuto rozsáhlému a užitečnému oboru, který skrývá ještě mnohá tajemství v ČSR a ČR. Je zajímavé uvést, že z oboru fyziky rentgenového záření bylo udělené zatím celkem devět NC, což kvalifikuje fyziku rtgz a jeho aplikace mezi přední obory fyziky.

7.Literatura

- [1] Sodomka,L., et al.: Kronika Nobelových cen I,II, Adhesiv Liberec 2002
- [2] Sodomka,L., et al.: Kronika Nobelových cen .Knižní Klub, Praha 2004
- [3] Assmus , A.: Early history of X-rays. Google, Google/A.Kochanovská
- [4] Sodomka,L.: Rentgenová difraktografie pevných látek. SNTL Praha 1960
- [5] Laue, M. von .: Dějiny fyziky . Orbis Praha 1959
- [6] Karjakin, N.I., Bystrov,K.N., Kirejev,P.S.: Přehled fyziky SNTL Praha 1970, str.299
- [7] Sodomka,L.: Základy fyziky pro aplikace a nanotechnologii. Adhesiv Liberec 2005, díl 2 na CD
- [8] Sodomka,L., Fiala,J.: Fyzika a chemie kondenzovaných látek s aplikacemi, díl1. str.148
- [9] Dierolf, M., et al.: Ptychography a lensless X-ray imaging.Europhysicsnews 39, 2007, č.1, str.22
- [10]Sodomka,L., Sodomková, Mag.: Nobelovy ceny za fyziku. Set Out Praha 1997

Poznámka o vzniku rtgz působením ultrazvuku. Návrh vytvoření skupiny k ověření této skutečnosti jako Grant.



MOŽNOSTI POUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ PŘI VYUŽITÍ TĚŽNÍCH STROJŮ V POVRCHOVÉM HORNICTVÍ POSSIBILITY OF APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING IN THE USE OF MINING MACHINES IN STRIP MINES

Lesław SOZAŃSKI

Politechnika Wroclawska

Contact e-mail: leslaw.sozanski@pwr.wroc.pl

Abstrakt

V příspěvku jsou charakterizovány některé základní přístupy k využití metod nedestruktivního zkoušení v oblasti kontroly těžních strojů v oblasti povrchového hornictví.

Klíčová slova: *povrchové hornictví, těžní stroje, magnetická metoda, vizuální metoda.*

Abstract

In the contribution are characterized some of the basic approaches to the use of methods of non-destructive testing in the control of mining machines in the field of surface mining.

Key words: *strip mining, mining machine, magnetic testing, visual testing*

1. Úvod

Součásti strojů v povrchovém hornictví pracují v velmi těžkých podmínkách (ohromná dynamická zatížení, agresivní korozní a erozní prostředí) [1]. Jejich životnost je počítána na několik málo desítek let. V této situaci výskyt exploatačních vad je prakticky jistý. Potřebujeme tedy co nejrychlejší a nejjistější jejich vykrytí [2]. Metody nedestruktivního zkoušení jsou významnou skupinou kontroly. Tyto metody mají však svá omezení. K nim náleží například příprava povrchu zkoušeného místa, časté nevýhody přístupu k místu zkoušení, atmosferické podmínky a také často prostoj stroje. Nespolehlivost měření veličin jak délky, úhlu nebo teploty jsou v praxi jednoznačné. Z uvedených důvodů vyplývá, že hodnocení výsledků nedestruktivního zkoušení je více komplikované. Takovéto hodnocení výsledků jsou součástí konečné práce a často i nabídek na vykonání zkoušení.

2. Provozní zkoušení

Zkoušení během exploatace je vykonáváno podle ustálených procedur a instrukcí, které byly napsány na základě různých předpisů [3]. Vykonávají je zkušební certifikovaní pracovníci, kteří mají k dispozici kontrolované přístroje, které mají požadovanou přesnost měření. Zkušební pracovník při oceňování přesnosti zkoušky jednak bere v úvahu i podmínky zkoušky jako např. příprava zkoušeného povrchu, technické podmínky jako použití žebříků, samojízdných plošin a také atmosférické

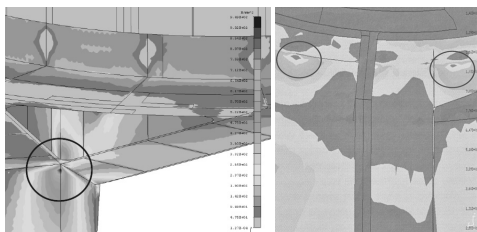
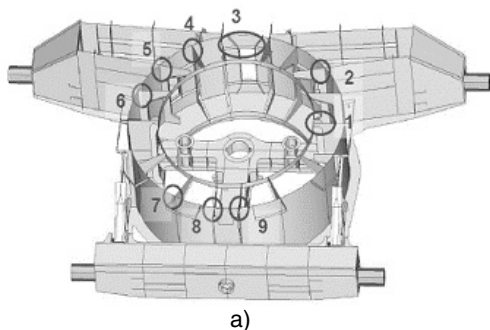
podmínky, které se mohou během zkoušení radikálně změnit. To vše může mít vliv na konečný výsledek.



Obr. 1. Hornické rypadlo - základní stroj v povrchovém hornictví. O velikosti stroje svědčí skupina pracovníků označená kolečkem
 Fig.1 Mining excavator - basic machine in strip mining.

2.1. Výběr zkušebních míst

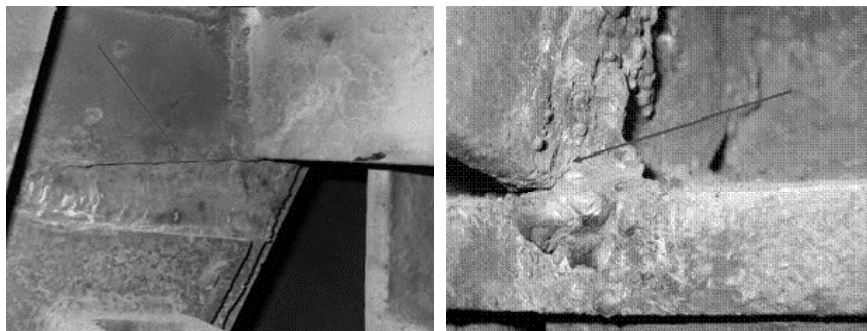
Exploatační zkoušení se obvykle dělá na vybraných místech vyznačených na základě zkušenosti uživatelů [2] a konstruktérů [3] (obr. 2a) a v kritických místech vyznačených počítačovou simulací prutů [4] (obr. 2b).



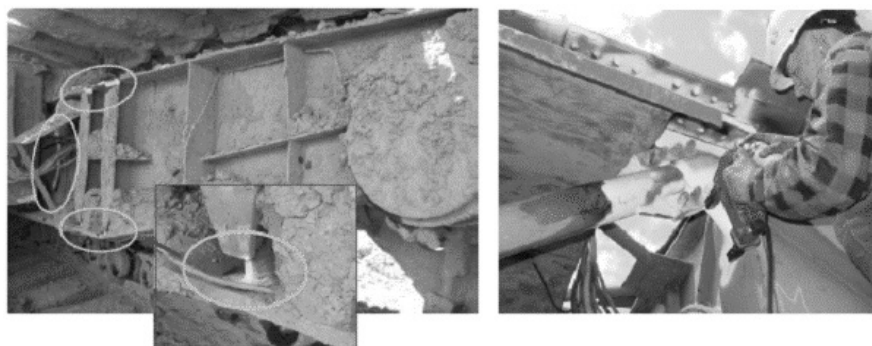
Obr. 2 Schema rozmístění míst měření portálu podvozku (a) a kritická místa, vyznačená počítačovou simulací stavu napětí (b).
 Fig. 2 Schema of placement of measured points of chassis (a), and the critical points identified by the computer simulation of stress (b).

2.2. PŘÍPRAVA POVRCHU

Příprava povrchu zkoušených elementů je často rozhodujícím činitelem a někdy je i velmi těžko proveditelná. Delší prostoje stroje jsou plánovány, ale zkušenosti nás učí, jak je někdy těžké se vejít do vymezeného času. Nalezení prasklin při provádění vizuálních zkoušek je možné, avšak povrch musí být řádně očištěn a připraven (obr. 3). Znečištěním (obr. 4a) je např. v čase sucha tvrdá vrstva drobných částic zeminy nebo výtěžku, která se po dešti změní ve vrstvu bláta.



a) b)
Obr. 3. Trhliny detekované při vizuálních zkouškách [5].
Fig. 3. Cracks detected by visual testing [5].



a) b)
Obr. 4. Příprava povrchu pro magneticko-praškové zkoušky: a – místně na podvozku, b – konstrukční uzel výložníku
Fig. 4 Preparation of the surface for magnetic testing (MT).

Kapilární zkoušky jsou obvykle brány jako prostá a celkem levná technická kontrola. Musíme zdůraznit, že rozhodujícím faktorem zjištění vad je vhodná příprava zkoušeného povrchu. Tento faktor při zkouškách v exploataci má velkou pracnost (obr. 5). Získané výsledky jsou pro nás informací jen o jakosti a ne o množství vad. Indikace vad neodpovídají povrchovým rozměrům, ale především jejich objemu.



Obr. 5 Příprava povrchu k kapilární zkoušce
Fig. 5 Preparation of the surface for capillary test

3. SOUHRN

Hlavním cílem nedestruktivního zkoušení v exploatační kontrole hornických strojů je zjišťování polohy a rozměrů zejména povrchových vad. Místa zkoušení jsou vybrány na základě zkušenosti z exploatace a nebo vyznačené počítačovou simulací stavu prnutí v konstrukci stroje. Kromě zde popsaných způsobů zkoušení VT, MT i PT používáme i UT a RT. Třeba dodat, že použití těchto dvou metod je více pracné a časově náročné.

Stroje pracující v povrchovém hornictví jsou počítány na několik desítek let exploatace a proto máme na tomto místě na zakončení prosbu ke konstruktorům těchto strojů, aby při své práci již na etapě konstruování brali v úvahu eventuální NDT zkoušení.

Článek byl připraven jako součást rozvojového projektu č. 03 0039 06: *Strategie provozu, zvýšení bezpečnosti práce a spolehlivosti strojů s vysokým stupněm rizika vzniku technické degradace* – projekt je realizován EU na roky 2007 až 2013.

LITERATURA

- [1] Babiarz S., Dudek D. : Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym. Wrocław 2007, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
- [2] Sozański L.: Defektoskopia eksploatacyjna elementów maszyn podstawowych. Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn. Szklarska Poręba, OW. PWroc. 1999.
- [3] Kowalczyk M., Szewczyk B. : Instrukcja kontroli stanu technicznego elementów, zespołów i urządzeń koparki KWK-1200M. SKW Biuro Projektowo-Techniczne. Zgorzelec 2002.
- [4] Rusiński E., Dudek K., Moczko P.: Degradacja ustrojów nośnych dźwigarów pierścieniowych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego. Transport Przemysłowy 2006 nr 2.
- [5] Moczko P., Przybyłek G.: Badanie stanu konstrukcji koparek typu SRs-1200 Sprawozdanie IKEM PWr 2010. Praca niepublikowana.

Do českého jazyka přeložil Piotr Sullik.



NEDESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ MATERIÁLU ENERGETICKÝCH KOMPONENT NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF POWER PLANT PARTS

Zbyněk BUNDA^{a,b}, Josef VOLÁK^{a,b}

^aZápadočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní,

^bVýzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Abstrakt

Příspěvek se zabývá nedestruktivní metalografií, sahající do oblasti povrchových a optických metod, která je výjimečná především díky své operativnosti a rychlosti. Její využití je velmi rozsáhlé. Článek pojednává především o aplikacích z oblasti energetiky, tj. kotlové trubky, parovody, turbínové rotory a lopatky a také turbínová tělesa.

Klíčová slova: nedestruktivní metalografie, repliky, kontrola mikrostruktury

Abstract

The article deals with method of non-destructive metallography. This method is useful for its quickness and simplicity. Its range of applications is very wide. This contribution discuss above all about utilization of this perspective method in the field of power plant components i.e. boiler tubes, steam piping, pressure vessels, turbine rotors and also turbine body.

Key words: nondestructive metallography, replicas, microstructure inspection

1. Úvod

V současném energetickém průmyslu je kladen největší zřetel zejména na maximální bezpečnost a ekonomičnost provozu. Náklady spojené s odstávkami zařízení, následnou kontrolou stavu jednotlivých částí a popř. opravou vadných komponent, jsou značné. Tyto náklady se zvětšují s prodlužováním doby odstávky, ať už z jakéhokoli důvodu. Na jedné straně je tendence ušetřit co nejvíce finančních prostředků, což vede k tomu, že např. nejsou provedeny všechny potřebné kontroly soustrojí, na druhé straně potom stojí otázka bezpečnosti zařízení a hlavně lidských životů. Z tohoto hlediska je naopak nutné provést co nejvíce materiálových analýz a kontrol, aby se vyloučilo selhání zařízení. Je třeba najít optimální řešení mezi těmito dvěma mantinely, které se v převážné většině, bohužel, odvíjí od množství finančních prostředků provozovatele zařízení.

2. Popis metody

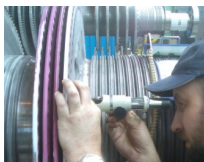
Tato metoda v podstatě stojí na rozhraní nedestruktivní – semidestruktivní, jelikož je potřeba povrch součásti vhodným způsobem připravit, zpravidla broušením a leštěním, což je určitý zásah do materiálu. Pokud si ale uvědomíme, jak velké součásti se touto metodou v elektrárnách kontrolují, pak můžeme směle považovat tuto metodu za prakticky nedestruktivní. Odbroušení několika desetin milimetru materiálu na ploše 1 cm² nehraje roli u výrobků, jako jsou tuny vážící tělesa turbín, parovodní potrubí nebo ventily.

Postup otisku pro povrchové zkoušení slouží k určení stavu povrchu. Hodnotí se tvar, vzhled, struktura, nehomogenity, drsnost povrchu. Zaměříme se na kontrolu mikrostruktury jednotlivých součástí. Mikrostruktura je sledována metodou replik, která je následně analyzována, ať už přímo na místě v provozu, nebo v laboratoři.

3. Příklady kontrolovaných dílů



Obr. 1 Rotor
Fig.1 Rotor



Obr. 2 Kontrola mikrostruktury
Fig.2 Microstructure inspection

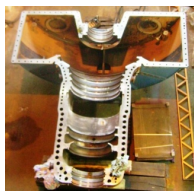


Obr. 3 NT rotor
Fig. 3 Low pressure rotor

Kontrolu mikrostruktury provádíme jak na rotorech a lopatkách (obr. 1, 2, 3) parních turbín, tak i na vnějších skříňích (horní i spodní díl, obr 4, 5, 6) a také na regulačních a rychlozavěrných ventilech (obr. 6, 7, 8, 9). V případě dobře přístupného dílu, je možné k mikroskopu připojit kameru a strukturu vyfotografovat bez použití repliky (obr. 8).



Obr. 4 Turbinová skříň
Fig. 4 Stator casing



Obr. 5 Horní těleso turbíny
Fig. 5 Stator casing



Obr. 6 Pohled na rozebrané soustrojí
Fig. 6 Turbo set



Obr. 7 RZ ventil
Fig. 7 Steam valve



Obr. 8 Dokumentace
mikrostruktury
Fig. 8 Documentation of the
microstructure

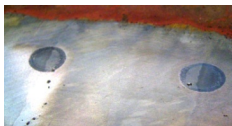


Obr. 9 Ventily
s označenými místy
kontroly 1,2 a 3
Fig 9 Steam valves

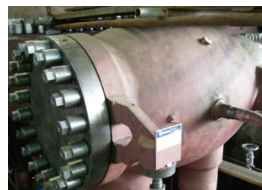
Běžně se provádí také kontrola svařovaných rotorů, potrubí i ventilů. Předmětem kontroly je základní materiál, svarový kov, přechodová oblast a tepelně ovlivněná zóna svarového spoje (obr 10, 11, 12).



Obr. 10 Kontrola svaru
ventilu
Fig 10 Inspection of welds

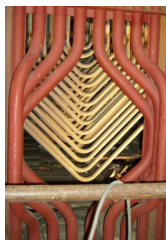


Obr. 11 Detail svaru, ventilu
Fig. 11 Weld on the steam
valve



Obr. 12 Ventil
Fig. 12 Steam valve

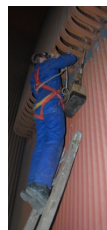
Kotlové trubky (obr. 13), přehříváky a tlakové nádoby jsou kontrolovány přímo v elektrárnách u tuzemských i zahraničních zákazníků. Obr. 14 byl pořízen při kontrole na elektrárně v Chile. Kontrolované lokality jsou mnohdy špatně přístupné (obr.15).



Obr. 13 Kotlové trubky,
průlez
Fig. 13 Boiler pipes,
inspection chamber



Obr. 14 Vnitřní kotlové trubky
Fig. 14 Inner boiler pipes



Obr. 15 Kontrola
stěnového přehříváku
s jištěním
Fig. 16 Inspection of the
pipe with belay

Další příklady použití metody na konkrétních dílech jsou uvedeny na obr. 16, 17, 18. Na obr. 19, 20, 21 jsou příklady fotografií mikrostruktur pořízených v laboratoři z replik.



Obr. 16 Vodní kruh
Fig. 16 Water circle



Obr. 17 Kontrola mikrostruktury Cu součástí po zapájení
Fig. 17 Inspection of Cu parts after soldering



Obr. 18 Generátorová obruč
Fig. 18 Generator ring

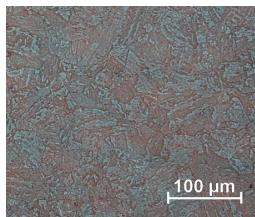
4. Příprava povrchu

Povrch musí být důkladně očištěn, odmaštěn a vysušen. To docílíme opakovaným omytím vhodným rozpouštědlem a osušením horkým vzduchem. Zkoumání struktury povrchu je možné po vhodné přípravě, zahrnující broušení, leštění popř. naleptání povrchové vrstvy součástí. Broušení se provádí speciální přenosnou metalografickou bruskou. Následuje leštění, které je možné provést mechanickou cestou (za pomoci metalografické brusky a lešticího kotoučku), nebo elektrolyticky (za použití přenosné elektrolytické leštičky). Po těchto krocích povrch naleptáme vhodným činidlem, nebo provedeme elektrolytické leptání.

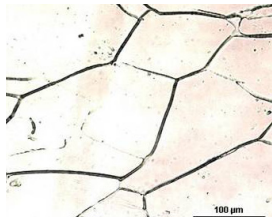
Při přípravě povrchu není nutný větší úběr materiálu o více než 0,2 mm. V mnoha případech je tento úběr výrazně menší. Během opracování je nutné se vyhnout nadměrnému zahřívání povrchu, nebo zpevnění povrchové vrstvy. Z těchto důvodů nesmí být použita příliš velká přitlačná síla. Při jednotlivých po sobě jdoucích stupních opracování povrchu je třeba kolmo měnit směr opracování součástí. Po každém kroku musí být z povrchu odstraněny zbytky po broušení.

5. Kontrola mikrostruktury

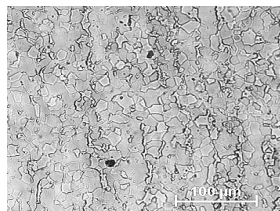
Mikrostrukturu hodnotíme buď přímo na místě za použití přenosného mikroskopu, nebo odebereme otisk mikrostruktury metodou replik a zkoumáme v laboratoři (např. obr. 19, 20, 21). Nejrychlejší metodou je v současné době vyfotografování mikrostruktury přenosným mikroskopem a následná analýza.



Obr. 19 Kotlová trubka
Fig. 19 Boiler tube



Obr. 20 Obruč generátoru
Fig. 20 Generator ring



Obr. 21 Přehřívák
Fig. 21 Overheater

6. Otisky do folií

Folie (repliky) jsou vyrobeny na bázi vhodné umělé hmoty a musí mít nejmenší tloušťku 0,06 mm. Na folii je potřeba nanést rozpouštědlo, aby došlo k jejímu změkčení. Po určité době působení je folie přiložena ke zkoumanému povrchu. Pro zajištění těsného kontaktu s povrchem musí být folie ve směru ze středu k okraji pečlivě přitlačena. To umožní únik přebytečného rozpouštědla a zabrání nechtěnému prohnutí folie nebo tvorbě vzduchových bublin [1].

7. Závěr

Příspěvek podává přehled o využití provozní metalografie v praxi. Jsou uvedeny příklady aplikací na konkrétních částech energetických zařízení s příslušnou fotodokumentací. I přes zdánlivou jednoduchoost má tato perspektivní metoda do budoucna velký potenciál.

Literatura:

[1] DIN 54150 Abdruckverfahren für die Oberflächenprüfung (Replica-Technik)



METODA MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU

MAGNETIC MEMORY METHOD

Václav Svoboda, Zdislav Olmr

Preditest s.r.o.

Abstrakt:

Metoda Magnetické paměti materiálu je NDT metoda založená na měření a analýze rozložení zbytkových magnetických polí v kovových materiálech odrážejících technologickou historii materiálu. Využívá se pro určení **SCZ (Stress Concentration Zones)**, poruch a heterogenity v mikrostruktuře materiálu a svarových spojů.

Abstract:

Magnetic Memory method is a NDT method based on the measurement and analysis of the distribution of residual magnetic fields in metallic materials reflecting the technological history of material. It is used for determination of the SCZ (Stress Concentration Zones), disorders and heterogeneity in the microstructure of materials and welded joints. Some experimental results are shown.

Magnetická paměť materiálu reprezentuje jev, který nastává v materiálu ve formě zbytkové magnetizace **vlivem procesu výroby**, tepelného zpracování, ochlazování, tváření, ohýbání, tvarování, lisování, sváření apod. v prostředí zemského magnetického pole **a vlivem provozního zatížení**. Principem metody je scanování **intenzity magnetického pole H_p těsně nad povrchem materiálu** pomocí scanovacího zařízení – je to vozíček, na kterém jsou upevněny snímací sondy, opatřené kolečky pro snímání vzdálenosti **L_x** a příslušnou elektronikou pro zesílení a digitalizaci signálů ze sond.



Příklady využití MMM metody



Elektrárny, plynovody, naftovody



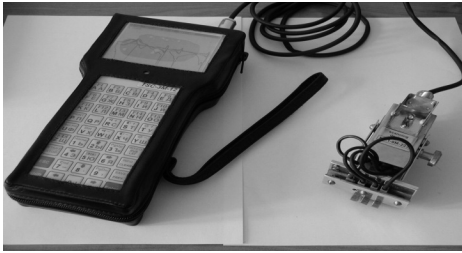
Kovové konstrukce, doprava, letectví

Lodě, zdvihací stroje, strojní součásti



Metalurgie, vědecká výzkumná činnost

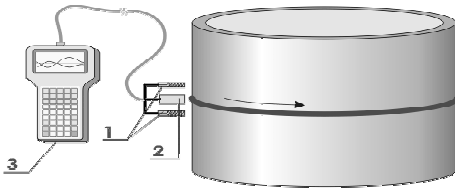
Měření metodou MMM



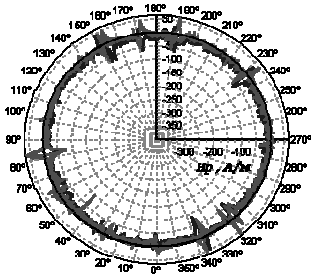
Přístroj pro měření metodou MMM

Snímací část se sondami

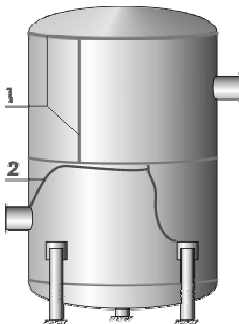
MMM



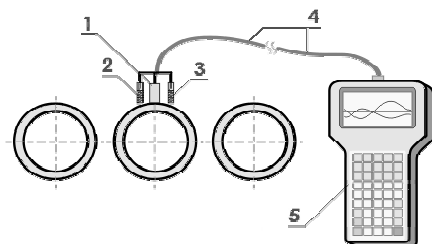
Měření na potrubí



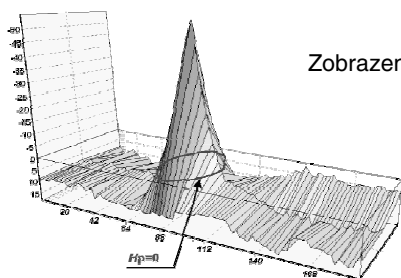
Magnetogram



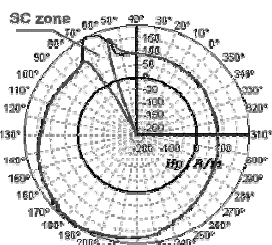
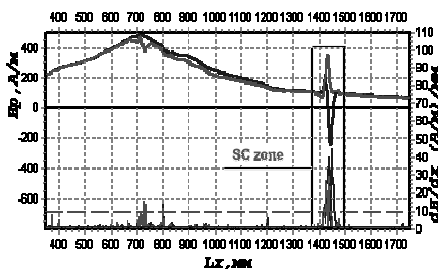
SC line – čára zobrazující koncentraci napětí



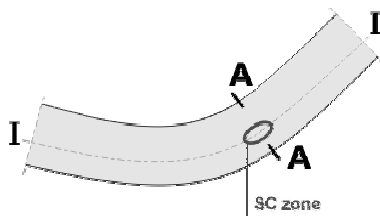
Podélná diagnostika potrubí



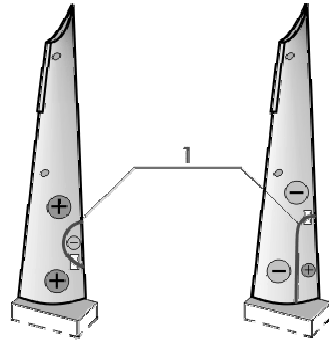
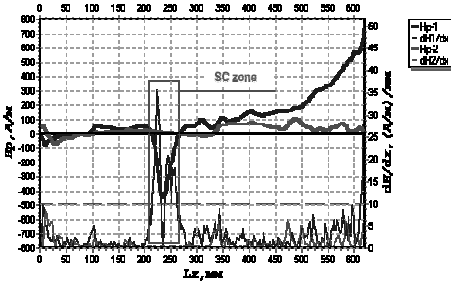
Zobrazení SCZ – zóny se zvýšenou koncentrací napětí



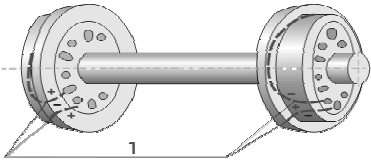
Diagnostika potrubí



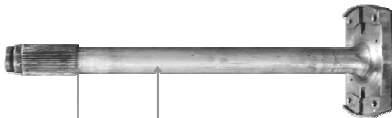
SC zóna na potrubí



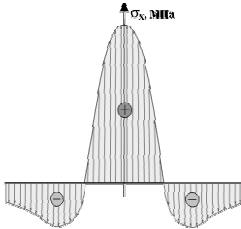
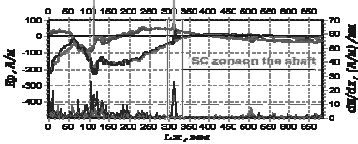
Diagnostika lopatky turbíny



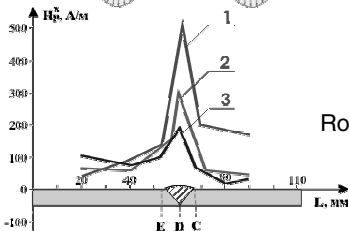
Diagnostika kol kolejových vozidel



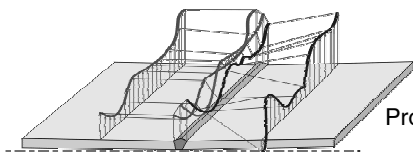
Diagnostika hřídele



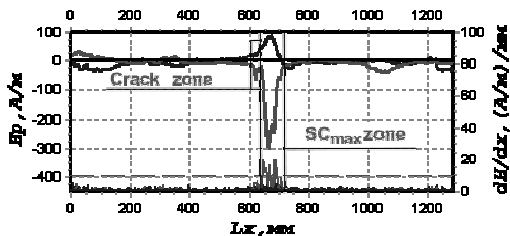
Kontrola svarů – typické rozložení zbytkových napětí



Rozložení jednotlivých složek měřeného magnet. pole



Prostorové zobrazení průběhů magnetického pole



Příklad inspekce trhliny v materiálu

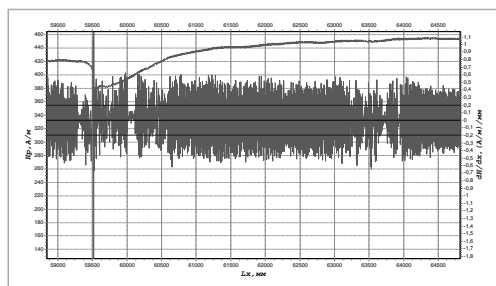
Diagnostika potrubí uložených v zemi



Praktické provádění inspekce potrubí uloženého v zemi



Místo nad potrubím s výskytem anomálního signálu



Typický záznam signálu v závislosti na vzdálenosti



Mechanický defekt v místě anomálie



Důlkový defekt korozního typu



Podélný defekt na potrubí – trhlina

Závěr:

Metoda magnetické paměti materiálu (MPM) má široké oblasti použití, ale i dílčí omezení, vlivem vysoké citlivosti.

K limitujícím faktorům patří: nemagnetické materiály, uměle zmagnetované kovy, přítomnost cizích magnetických materiálů v těsné blízkosti kontrolovaného objektu, přítomnost externího magnetického pole nebo elektrického svařování do vzdálenosti 1 m.

Mezi hlavní výhody této metody patří:

- rychlost měření
- opakovatelnost měření
- není třeba úprava povrchu měřeného materiálu
- inspekce je možná za provozu
- včasná diagnostika únavového poškození
- vibrace nemají vliv na měření

Celkově lze kvalitu inspekce významně zvýšit doplněním a porovnáním výsledků s jinými metodami.



Numerical Tests on Acoustic Emission Localizing Techniques for Anodized Aluminium Watering Can

Václav KŮS and Michal ZÁVESKÝ

¹Department of Mathematics, FNSPE, Czech Technical University in Prague, Trojanova 13,
Prague 120 00, EU - Czech Republic;
Phone: +420224358547, E-mail: v.kus@centrum.cz, zaveskymichal@seznam.cz

Abstract

This paper deals with the Acoustic Emission principle, which is a Nondestructive Testing method for structural monitoring and many other applications. We deal with the precise geodetic localization of the defects on surfaces of solid bodies mathematically described as a conjunction of several simpler parametric shapes with underlying mutual intersection areas. We use the Newton-Raphson procedure and we propose a few algorithmic improvements such as the holes and the so called condensed localizations. For initializing of the iterative numeric computation we employ A-star mesh based algorithm. The whole algorithm is employed to achieve quick and exact localization of the virtual Acoustic Emission Source on anodized aluminium watering can.

Keywords: Acoustic emission, geodetic curves, Newton-Raphson method, source localization

1. Introduction

Acoustic emission (AE) diagnostics belongs to nondestructive defectoscopy methods and the AE localization principle is based on geodesic curves on combined surfaces. Using a numerical iterative solution of geodetic equations we obtain a procedure determining geodesics on elementary surfaces, whose compositions give us the real surfaces in engineering industry for a number of intersected elementary surfaces. The main goal is the precise numerical procedure, which detects positions of acoustic emission sources (cracks) in various materials. We take into account the measured time differences of arrivals of AE signal to AE sensors placed on the material surface. In the case of three sensors we have at disposal three mutually linearly dependent time differences measured throughout the experiment Δt_{12} , Δt_{23} , Δt_{13} , see [1]. Assuming that we know the velocity c of elastic waves propagating in a given material, we deduce the three corresponding differential distances between the source and AE sensors Δl_{12} , Δl_{23} , Δl_{13} from which the AE source localization can be determined. The principle of AE sources localization indicates that the key challenge is to find the shortest distance between two surface points: the “imaginary” AE source position and the sensor position. Consequently, the computed distances (lengths) can be compared with the real values measured.

2. Geodetic Curve Algorithm

We solve the system of geodetic equations, given in [1], numerically by the method of finite differences, especially by the iterative Newton-Raphson procedure, see in [2]. Simultaneously we compute the so called Christoffel symbols for a given regular surface. Using the Newton-Raphson (NR) method, we find a sequence of $(N + 1)$ tuples which converges to a solution of the geodesic equations, see [3] in details. This numerical solution requires an initial path which was considered here to be found by A-star mesh algorithm or directly through the straight line in parametric space U . The geodetic algorithm was implemented in *Matlab* version 7.11.0 (R2010b).

Input values are:

- (I1) the boundary points in the space of parameters $p, q \in U \subset \mathbb{R}^2$,
- (I2) large positive N ,
- (I3) number of iterations allowed or any other stopping condition.

Output values are:

- (O1) the initial path and the resulting numerical geodesics,
- (O2) length of geodesics between boundary points on the surface,
- (O3) total running time of the program (including visualizations),
- (O4) total number of iterations in the case of combined surfaces.

It is necessary to realize that the NR procedure works on a space of parameters U , depends on an initial path chosen and also on the parametrization of surface used.

3. Anodized Aluminium Watering Can

Solving the equations, we have the tool for obtaining the distance (length) differences, which are essential for localization of AE source on the surface. We place three sensors on the surface of the aluminium watering can and find the shortest length from an “imaginary” AE source to each sensor. Repeating the computation for a sufficiently condensed survey grid of “imaginary” sources, we determine the closest length differences Δl_{12} , Δl_{23} , Δl_{13} which approximates the real AE source to be found. We test the whole procedure for the Anodized Aluminium Watering Can and the sensors were placed at the ellipsoidal torus bail (Sensor 1), at the cone shaped neck (Sensor 2) and at the flat bottom (Sensor 3), the positions can be seen in Figure 1. We compare the solution of numerical procedure for the case of FM (Fundamental method) and SA (Sequential algorithm). The Figure 1a corresponds to the method of FM, when all the grid points of all the four intersections were considered, and Figure 1b refer to the SA procedure, when only the subsequently condensed intersected points were used for geodesic curve computations. In Table 1 we present overall numbers of iterations, computing times in seconds, and the achieved lengths from the AE source to the sensors 1, 2, 3. This proves that our numerical modification in frame of SA algorithm

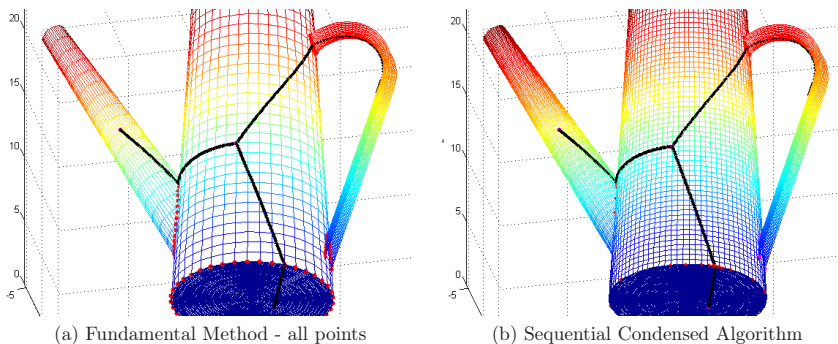


Figure 1: Geodesics found by FM and SA algorithm

	Num. of iter.	Com. time (s)	l_1	l_2	l_3
FM	7580	5.9506	20.2417	13.0920	16.7200
SA	2283	2.2587	20.2402	13.0811	16.7177

Table 1: The length of geodesics from the AE source to each sensors 1, 2, 3

improves the accuracy of geodesic curve lengths l_1 , l_2 , l_3 while decreasing the number of iterations and corresponding computational time quite substantially.

The next test is an example of localization of the three “imaginary” AE sources, placed accordingly at the watering can surface, see Figure 2a in black, yellow, and blue color for each source position. The iterative procedure is the same for the whole net of “imaginary” sources. By this test we prove that the numerical algorithm is stable and independent on the possible positions of AE sources. All the results can be seen in Figure 2a and Table 2. From

	l_1	l_2	l_3	$l_1 - l_2$	$l_2 - l_3$	$l_1 - l_3$
Source1 (B)	22.1502	9.9424	17.2615	12.2078	-7.3191	4.8887
Source2 (Y)	16.3998	18.0798	9.5603	-1.6800	8.5195	6.8395
Source3 (B)	18.0460	14.7760	17.6350	3.2700	-2.8590	0.4110
AE source	–	–	–	11.6878	-6.9997	4.6881

Table 2: Numerical procedure test for Source 1 (black), Source 2 (yellow), Source 3 (blue)

Table 2 it is clear that AE source is close to “imaginary” Source No.1 (black). Moreover, the total time of computation was $T = 7.0895$ seconds for all these three “imaginary” sources which is relatively satisfactory result. The procedure was also applied to the real AE source and the two dimensional condensed localization algorithm converges very quickly as can be seen in preliminary Figure 2b.

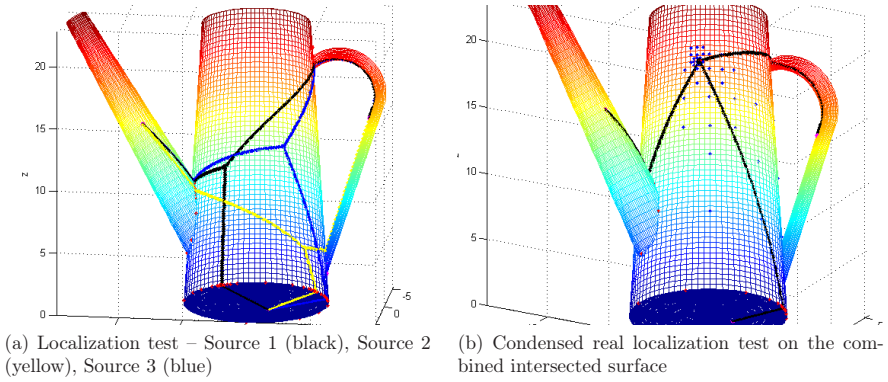


Figure 2: Numerical tests of the proposed condensed localization algorithm

4. Algorithmic Complications - the Holes

Let us mention one possible complication of the numerical algorithm applied to a combined surfaces, i.e. if the geodesic curve passes through the “hole” in the surface. Either the acoustic waves from AE source cannot spread out in this empty region, or the acoustic waves (as well as the geodesic curve) can pass across another adjacent surface and thus it takes a shorter path. This problem can be converted to previous one under the same computational manners, but the two identical sets of points of intersections must be employed, see Figure 3.

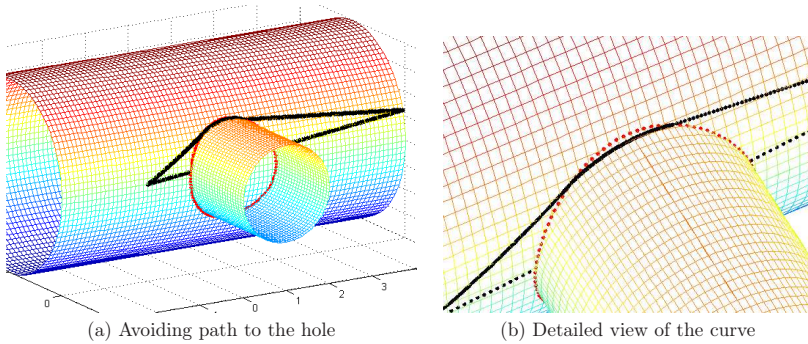


Figure 3: Geodesics passing across the second surface avoiding the "hole"

5. Initial Surface Path Using A-star Algorithm

The A-star algorithm finds the shortest path between two points using the mesh. This is a generalization of Dijkstra's algorithm referred by [4]. The algorithm is divided into 4 parts:

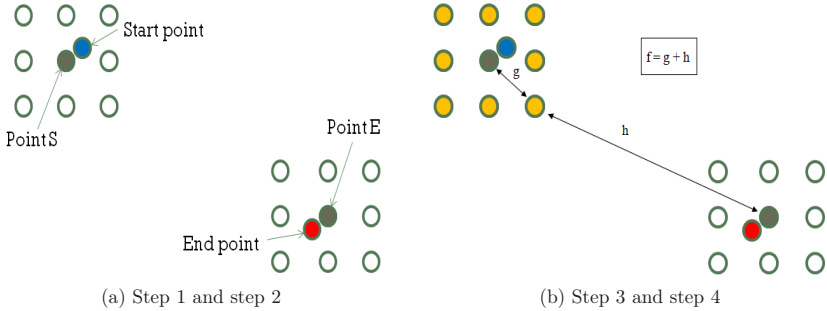


Figure 4: A-star algorithm: E and S points selected and distance f settings

- 1.**step** First, we calculate the Euclidean distance between the endpoint and the first point of the mesh. If the distance is not zero, we repeat this step for all mesh points succeedingly. Then we choose the smallest distance found and the closest mesh point to this position, i.e. the point E, see Figure 4a.
- 2.**step** The second part is identical to the first one but for the starting point. The point closest to the starting point is called point S, see Figure 4a.
- 3.**step** The third part is to take 8 closest points around the point S (in yellow in Figure 4b) and calculate the Euclidean distance f for each of these 8 points as is shown in Figure 4b. The distance f is the sum of the distances g and h .
- 4.**step** Then the point with the smallest distance f is chosen and the same sub-algorithm is applied. The loop stops when the current point is one of the 8 points around the point E.

Note that the points E and S are not included in the final curve. The points are then interpolated linearly to obtain the resulting curve.

First, we implemented the A-star algorithm to simple shapes: cylinder, cone, sphere, and torus. The results for $30 \times 30 = 900$ mesh points can be seen in Figure 5. A complex body shape emerges as a composition of several simple shapes. For the algorithm to be successful, it is essential that all the meshes interconnect perfectly. The main disadvantage of the method is that the same number of grid columns is required for each surface mesh. However, the advantage is a short computational time and simplicity of the procedure compared to the method of intersections. Application on the shape consisting of three cylinders, two torus, two cones and sphere is presented in Figures 6.

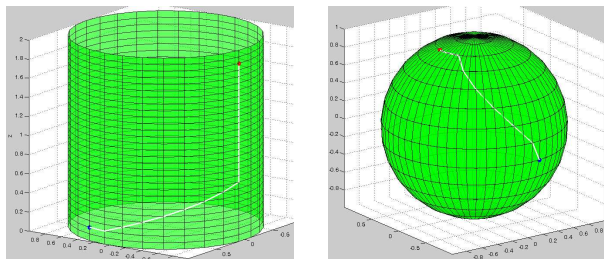


Figure 5: A-star algorithm examples - the curves for the simplest surfaces

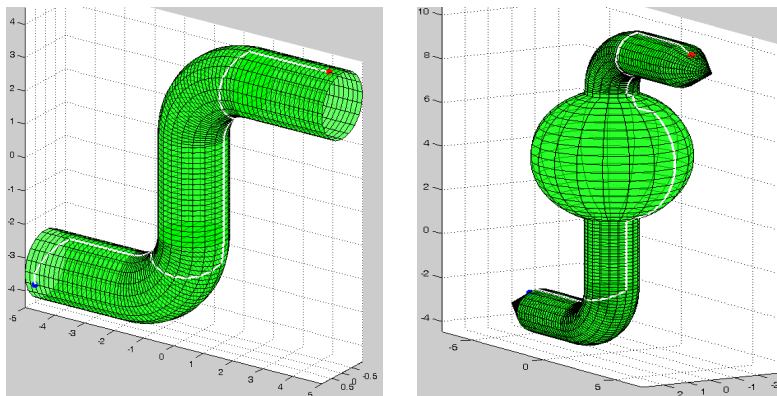


Figure 6: Complex shapes - 3 cylinders, 2 toruses, 2 cones, and 1 sphere

6. Tangent Plane Orthogonal Projections

The second approach how to find the approximative initial geodetic path is based on the idea that we can consider each surface to be locally a plane, therefore it is possible to calculate a geodesic curve point by point, using a starting direction and a starting point. To move from one point to the next one, the tangent plane at the first point is computed, then the direction of propagation of geodesic curve is projected onto this tangent plane and, finally, a point properly chosen on that tangent direction is projected back to the surface to obtain the next point of the geodesic curve for original surface. The objectives for applying this tangent plane are that the tangential component of the second derivative of the geodesic curve $\alpha(s)$ should be zero, i.e.

$$\frac{D_{\tan} \alpha'(s)}{ds} = \kappa_g = 0, \quad \text{and} \quad \alpha''(s) = \kappa \cdot n = \kappa_N \cdot N + \kappa_g,$$

where n is the unit vector normal to the curve C , N is the unit vector normal to the surface, κ_g is called the geodesic curvature of $\alpha(s)$. Repeating this projection algorithm for subsequent points on the surface we reach the geodesic curve. The projection is the most complicated step of the algorithm which can be understood from Figure 7.

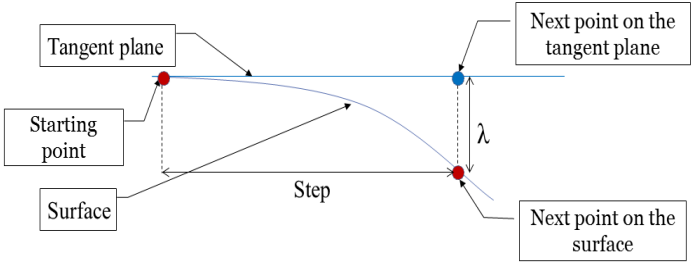


Figure 7: The projection by means of tangent plane - one dimensional case only

The algorithm works well at a simple surfaces like the sphere, torus, cylinder, plane, see e.g. Figure 8a. We carried out this tangent geodesic algorithm on the composed surface of Figure 8b consisting of 2 cylinders (pipes), 2 cones (coupling sleeve), 1 plane (the main vessel). The joint solution have to be found, however it is not so easy since the curvature of the surface changes abruptly at the intersections considered. Based on our experience,

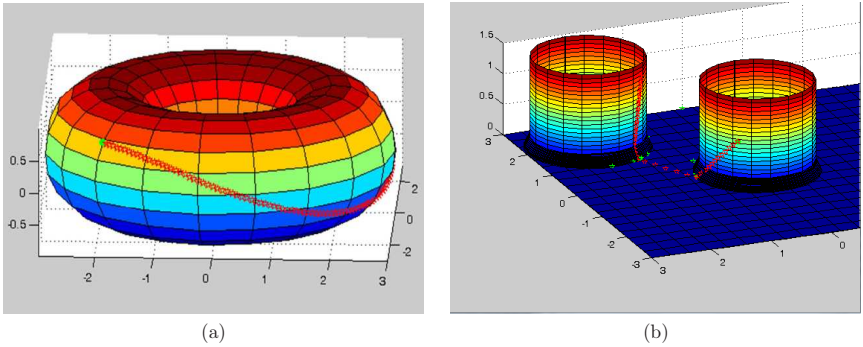


Figure 8: Examples of geodetics found by Tangent Plane Orthogonal Projections

the proposed tangent plane based geodesic method is able to deal with intersected surfaces, consequently, it is theoretically possible to compute geodesic curves on any complex surfaces. However, the program is still excessively time-consuming. For the case of Figure 8b, the program proceeded 30 seconds for fifty points, facing four different discontinuous changes of surfaces to be calculated and the algorithm itself is relatively slow due to its own operational demands.

7. Conclusions

Testing the proposed algorithms on real relatively complex surface of the watering can we have found that it is possible to detect acoustic emission crack effects with more then acceptable time-consuming procedure together with respect to high accuracy of geodesic curve lengths. We dealt with the algorithmic complications, and we solved them out, i.e. we managed to construct the geodesic curves for the case of present holes in the material and we found the quick mesh based A-star algorithm for initial curve computations.

Acknowledgements

This work was supported by the grant SGS10/209/OHK4/2T/14 and by the research program of the Ministry of Education of Czech Republic under the contract MSM6840770039. The authors appreciate the remarkable help of Aurélien Ceppe and Bastien Duchéne from ENIVL university in Blois (France) providing the software computations on A-star and Tangent Projection algorithms.

References

- [1] M. P. do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Prentice-Hall, New Jersey, 1976.
- [2] J. Beak, A. Deopurkar and K. Redfield, *Finding geodesics on surfaces*, Research report, Stanford University, 2007.
- [3] M. Záveský, V. Kůs, *Geodetic curves on combined surfaces for acoustic emission crack detection*, SMPS2011 Proceedings, Stochastic and Physical Monitoring Systems, June 27 - July 2, Krizanky, Czech Republic, 2011.
- [4] Edsger W. Dijkstra, *A short introduction to the art of programming*, 1971.



WORK OF IRANIAN ULTRASONIC SCANNER FOR FAULT DIAGNOSTIC OF CNG CYLINDERS AT PRODUCTION LINES

Asad BABAKHANI, Fereidoun A. MIANJI, Ariya PARISH, Mahdi MOZAFFARIAN, Abdollah DADKHAH

Design and manufacturing of Ultrasonic scanner for fault diagnostic of CNG cylinders is explained on this paper. Ultrasonic scanners have been made installed on 5 different CNG production lines in the territory. A fast and reliable test of cylinders is done with capability of logging results as per customer demands. The paper explains both machine specification and challenges faced during manufacturing and starting up. A questioner has been designed to ask of different operators for handling and performance of machine. It is proved that the ultrasonic machine could identify defects may cause in different stages of CNG production line especially in heat treatment furnace. Beside of innovation of machine manufacturing, the knowledge of ultrasonic interpreting has been transferred to operators and they have earned enough capability to distinguish between flaw and noise signals.

Keywords: Ultrasonic scanner, Heat treatment, ISO 11439 standard, CNG production line



USING NDE APPLICATIONS FOR ASSESSMENT OF PAVEMENT CONDITIONS: TOOLS FOR PUBLIC SERVICES

Carole KAOUANE*, David CHEINISSE

*CETE Normandie-Centre, Laboratoire Régional de Rouen, Rouen, France

Contact e-mail: carole.kaouane@developpement-durable.gouv.fr

Road users needs are commonly safety and comfort. Presence of structural defects as rutting, potholes and cracks could be an obstacle to these needs. The road in-charge authorities have to assess the network condition. A well established diagnostic would help planning maintenance and rehabilitation and therefore road users would be less bothered. High-efficiency NDE methods provide information on the pavement structural condition at reasonable costs. Their use also has a low influence on the traffic. At the regional laboratory of Rouen, France, we use visual defects detection methods and Ground Penetrating Radar in order to provide an overview of the road condition.

Visual detection methods (IQRN and Visiodec) consist in filming the road, measuring geometrical factors and adhesion. Pictures are analyzed. Defects are classified by range depending on the size and the type. Hence the analyzed pavement is graded on different scales. Depending on the grade, the road administrators have an overview of the situation along the pavement. Surface defects are often due to deeper structural deformations. Ground Penetrating Radar allows to image interface variations in the pavement. Studying these variations permit a better interpretation of the surface defects. This paper overviews our methodologies through cases and give few tools for index standardization.

Key words: Visual detection, GPR, Road, Index, combined methods.



MYTHS AND POSSIBILITIES OF ACOUSTIC EMISSION METHOD

Valentin PETROV, Aleksandr PETROV

OOO "ORK", Saint-Petersburg, Russia, <http://orkspb.ru>

Contact e-mail: valentin.petrov@orkspb.ru, avpetrov@orkspb.ru

The main difference of acoustic emission (AE) method from other NDT methods is in the detection of the most dangerous defects – "sounding" defects, i.e. developing defects during AE testing. In order to "listen" defects the object is influenced by the loading higher than the working value during 10 minutes. The material is considered as the set of elements with different strength values and such influence should exceed its tensile strength values, initiating AE of new elements not "sounding" at working value of loading (Kaiser effect).

This opinion is based on the notion about force fracture and is mistaken. The fracture is carried out by the fluctuations of heat energy. AE phenomenon is the emission of excess free energy of the loaded material during damages generation, which occurs at every constant loading with the course of time (the experimental data are given).

Defects don't have enough time to "sound" even at the heightened loading during traditional testing. Registration of AE parameters in operational mode is the most adequate method of the object testing. We have developed and use new method of such testing. It allows carrying out long-term estimation of the industrial object remaining life by measuring the rate of stable damages accumulation in the object material. The limit state is the critical concentration of damages accumulation (concentration criterion, P-parameter) at which statistical clasterization of damages with growing macro-cracks formation takes place. The laboratory data for steel and composite samples will be given in the lecture, which verify the method for macro-cracks formation detection and estimation of the remaining life on the basis of AE registration.

Keywords: acoustic emission, AE, NDT, fracture, remaining life.



STUDY OF WIND TURBINE BLADES UNDER STATIC LOADING USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

M. SHEHADEH, M. Abdel-GELIEL and A. ADEL

*Faculty of Engineering, Arab Academy for Science and Technology,
Alexandria, Egypt
e-mail:eng_amr_adel_86@yahoo.com*

Wind is the fastest growing and the most widely utilized emerging renewable energy technology. Many techniques used for monitoring and detecting defects in wind turbines blades such as Ultrasonic, Strain gages, Thermal cameras and Acoustic Emission. Acoustic emission method is only known method used for continuous monitoring. The present paper is investigated the AE propagation behaviour in carbon fibre blades only under static loads. This study is increasing the knowledge of mechanical stress on wind turbines to improve the over all health monitoring technique during turbine operation. Therefore, two experiments have been applied in lab. First experiment is the pencil break test of ASTM standard (E976–99) which used to simulate the AE wave's propagation in wind blades. The wind blade (model FY-58B) is made from carbon fibre. The AE impedance and velocity are estimated for the carbon fibre. Second experiment is bending test which is used to study the behaviour of AE under static loads. The results are shown good correlation between the AE and carbon fibre blades. Also, AE is a proper method as quantitative evaluation for fibre carbon blades operation condition.



HODNOCENÍ PRŮBĚHU KOROZNÍHO POŠKOZENÍ METODAMI AKUSTICKÉ EMISE A NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE

CORROSION DAMAGE EVALUATION BY ACOUSTIC EMISSION MONITORING AND NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY TESTING

Jan KOBER^a, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ^b

^a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

^b Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.

Contact e-mail: kober@it.cas.cz

Abstrakt:

Rozvoj lokálního korozního poškození konstrukcí může vést k závažným poruchám a případně i k neopravitelnému poškození celých konstrukčních částí. Snížení spolehlivosti konstrukce lze předejít včasnou detekcí probíhajícího korozního procesu a přesným odhadem rozsahu aktuálního poškození. Zabezpečení spolehlivého provozu konstrukce je zásadní tam, kde porucha může vést k ohrožení zdraví a velkým ekonomickým ztrátám, tj. především v energetickém, chemickém a leteckém průmyslu. Tato práce se zabývá využitím metod akustické emise a nelineární ultrazvukové spektroskopie při detekci a monitorování korozního poškození. V laboratorních podmínkách byly provedeny korozní zkoušky. Akustická emise byla sledována in situ v průběhu korozního procesu. Mezi korozními zkouškami bylo provedeno měření metodou nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS). Bylo zjištěno, že intenzita akustické emise souvisí s aktuální dynamikou korozního procesu a že rozsah korozního poškození dobře koresponduje s nelineárními parametry zjištěnými metodou NWMS. Obě metody zároveň umožňují detekci únavového poškození, takže tvoří univerzální systém pro nedestruktivní inspekci konstrukcí.

Klíčová slova: akustická emise (AE), nelineární ultrazvuková spektroskopie (NEWS), korozie

Abstract:

The development of local corrosion damage can lead to serious malfunctions and even to irreparable damage to whole structural parts. It is possible to prevent the decrease of reliability by timely detection of ongoing corrosion process and by accurate evaluation of current corrosion damage. A reliable operation of a structure has to be secured, if a failure can cause health hazards and significant economic losses, i.e. in power, chemical and aerospace industry. This work is dealing with the application of acoustic emission method and a nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) method for detection and monitoring of corrosion damage growth. A series of corrosion tests was performed in laboratory conditions. The acoustic emission was recorded in situ during corrosion process. The measurement by nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS) method was performed in between corrosion tests. It was observed that the current dynamics of a corrosion process was determined by AE and that the amount of corrosion damage was corresponding to the nonlinear parameters obtained by NWMS. Both methods have already been used for fatigue damage evaluation therefore they form a universal system for non-destructive structural inspection.

Keywords: Acoustic emission (AE), Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS), corrosion

1. Úvod

V současné době jsou intenzivně studovány metody vhodné pro tzv. *Structural Health Monitoring* (SHM) systémy, tj. systémy, které umožňují spolehlivé hodnocení aktuálního stavu konstrukce a dokáží predikovat další vývoj poškození. SHM systémy proto nalézají uplatnění především v aplikacích, kde je prioritou maximální spolehlivost provozu a kde případná porucha může vést k závažným následkům. V současnosti se takové systémy používají např. pro zařízení v jaderné energetice (v energetice obecně), v chemickém průmyslu či v leteckých konstrukcích. Diagnostické metody vhodné pro SHM systémy, by měly vykazovat vysokou citlivost a spolehlivé hodnocení rozsahu poškození. V tomto příspěvku jsou diskutovány možnosti použití metody akustické emise (AE) a nelineární ultrazvukové spektroskopie (NEWS) pro sledování a hodnocení průběhu korozního poškození. V pracích [1-6] jsou uváděny aplikace nelineárních ultrazvukových metod jak při detekci trhlin, tak i rozptýleného poškození v objemu materiálu, nicméně zmínky o možnostech hodnocení korozního poškození metodami NEWS jsou v dostupné literatuře dosud jen sporadické. Naproti tomu využití metody akustické emise pro sledování korozních procesů bylo již mnohokrát důkladně studováno, např. v [7-10]. Bylo prokázáno, že AE umožňuje detekovat již počáteční stádia korozních procesů a že aktuální rychlost korozní reakce dobře koreluje s emisní aktivitou.

2. Experimentální metodika sledování korozních procesů

2.1. Zkušební vzorky a postup korozních zkoušek

Jako zkušební tělesa pro korozní zkoušky byly použity L-profilu z letecké Al-slitiny o délce 100 mm a šířce bočních stran 15 mm. Vzorky byly vyrobeny ze slitiny ekvivalentní Al-slitině typu 2024. Ve výchozím stavu nebyl povrch vzorků nijak ošetřen. Na povrchu vzorků byla patrná pouze stejnoměrná vrstva slabých oxidačních produktů.

Korozním zkouškám byly podrobeny dva vzorky, z nichž každý byl vystaven odlišnému koroznímu prostředí. Vzorky byly umístěny do oddělených nádob s korozním médiem tak, aby se nedotýkaly stěn nádoby. Nejprve byly použity roztoky mořské soli o koncentraci 0,5 mol s přídavkem 0,1 mol HCl resp. HNO₃. Po necelých 140 hodinách expozice byly slabé roztoky vyměněny za koncentrovanější (1 mol mořské soli a 0,3 mol HCl resp. HNO₃). Agresivnějšímu prostředí byly vzorky vystaveny dalších přibližně 500 hodin.

2.2. Měření akustické emise

V průběhu korozních zkoušek byla monitorována AE. Na horní část vzorků, izolovanou od korozního prostředí, byly připevněny snímače AE kyanakrylátovým lepidlem. Ke snímání AE byly použity snímače Dakel IDK-09 s oddělenými předzesilovači 30 dB, připojené k analyzátoru AE Dakel XEDO. Byly zaznamenávány počty emisních překmitů přes dvě prahové úrovně (ozn. *count1*, *count2*). Nižší prahová úroveň byla volena blízko hranice šumu a vyšší cca v polovině zbyvajících rozsahu. Zároveň byla ukládána hodnota RMS signálu AE.

2.3. Měření NEWS metodou

2.3.1. Metoda nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS)

K hodnocení rozsahu korozního poškození byla použita dvoufrekvenční NEWS metoda, tzv. nelineární vlnově modulační spektroskopie (NWMS). Analýza nelinearity materiálu (resp. defektu) vychází z modelu klasické nelinearity, který je založen na vztahu mezi deformací ε a napětím σ ve tvaru

$$\sigma = \int K(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

$$K(\varepsilon) = K_0[1 + \beta\varepsilon + \delta\varepsilon^2], \quad (2)$$

kde K_0 je lineární modul pružnosti a β a δ jsou parametry kvadratické, resp. kubické nelinearity. V případě, že je materiál s uvedenou nelineární charakteristikou buzen signály o frekvencích f_0 a f_1 , vyskytují se v odezvě harmonické frekvence (tj. $2f_0$, $3f_0$ apod.) a intermodulační produkty prvního ($f_1 \pm f_0$) a druhého řádu ($f_1 \pm 2f_0$). Velikost harmonických a intermodulačních složek spektra je závislá na amplitudách budících frekvencí A_0 , resp. A_1 . Ve [4] bylo ukázáno, že pro amplitudu intermodulačního produktu prvního řádu A_{\pm} platí

$$A_{\pm} = C_{\beta} A_0 A_1, \quad (3)$$

kde C_{β} je konstanta úměrná parametru kvadratické nelinearity ze vztahu (2). Podobně pro amplitudu intermodulace druhého řádu $A_{2\pm}$ platí

$$A_{2\pm} = C_{\beta\delta} A_0^2 A_1, \quad (4)$$

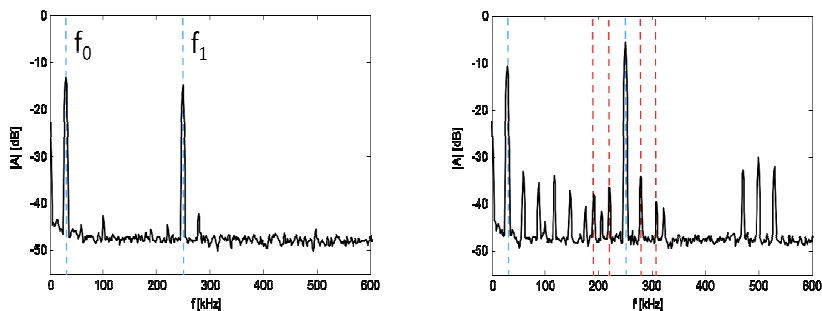
kde $C_{\beta\delta}$ je konstanta úměrná oběma nelineárním parametrům z (2). Obdobné vztahy lze psát i pro další harmonické složky.

2.3.2. Experimentální postup měření NWMS

Před samotným měřením metodou NWMS byly vzorky vyjmuty z korozního média a důkladně očištěny v roztoku isopropylalkoholu v ultrazvukové čističce. Osušené vzorky byly pak testovány. Snímač AE, připevněný na vzorcích, sloužil jako přijímač signálu a další piezoelektrický měnič stejného typu byl použit jako vysílač vyšší frekvence f_1 . K buzení harmonického signálu o nižší frekvenci f_0 byla použita nízkofrekvenční (30 kHz) ultrazvuková sonda s kuželovým nástavcem. Vysílací sondy byly umístěny na zkorodované části vzorků. Akustická vazba pro vysokofrekvenční signál byla zajištěna přes folii ze silikonového kaučuku a pro nízkofrekvenční signál ultrazvukovým gelem Sonotech Ultragel II. Nižší frekvence f_0 byla volena blízko rezonanční frekvence použité sondy na 29,3 kHz a zůstala neměnná po celou dobu experimentu. Sonda byla buzena pomocí generátoru multifunkčního přístroje TiePie HS3 přes výkonový zesilovač LV102. Amplituda budícího signálu byla zvyšována ve 24 krocích od 0,5 Vpp do 15 Vpp. Vysokofrekvenční signál byl vysílán z generátoru funkcí Rigol DG2041A s konstantní amplitudou signálu 20 Vpp. Frekvence f_1 byla volena v rozmezí 247 – 251 kHz tak, aby byl zajištěn optimální výstupní signál. Bylo provedeno pět měření při různých frekvencích f_1 měnících se po 0,5 kHz okolo optimální frekvence. Signál odezvy byl zesílen o 20 dB pomocí předzesilovače

PAC a zaznamenávání osciloskopem TiePie HS3. Celé měření bylo automatické, řízené počítačem pomocí programu vytvořeného v programovém prostředí MATLAB. Zaznamenané signály měly délku 100 ksvl při vzorkování 10 MHz v rozlišení 14 bit.

Ze souboru zaznamenaných signálů byly vyhodnoceny nelineární parametry C_β a $C_{\beta\delta}$ podle vztahů (3) a (4). Ze spekter výstupních signálů byly vyhodnoceny amplitudy odpovídající budícím frekvencím a intermodulačním produktům (viz obr. 1). Z odečtených hodnot byly vyneseny odpovídající závislosti na rostoucí amplitudě A_0 a směrnice závislostí C_β a $C_{\beta\delta}$ byly zjištěny metodou nejmenších čtverců. Na obr. 1 je porovnání spekter signálů naměřených v počáteční a v konečné fázi korozních zkoušek. Nárůst nelineárních složek spektra s rostoucím poškozením je zde zcela evidentní.



Obr. 1: Porovnání spekter signálů naměřených v počáteční (vlevo) a v konečné (vpravo) fázi korozních zkoušek. Vyznačeny jsou budící frekvence a intermodulační produkty.

(Comparison of signal spectra evaluated in the initial (left) and the terminal (right) phase of corrosion tests. Driving and intermodulation frequencies are marked with dashed lines)

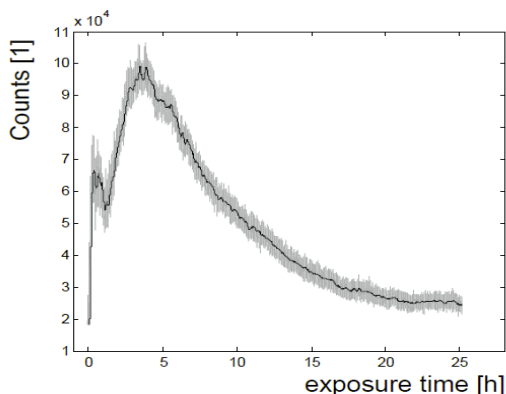
3. Výsledky zkoušek a diskuse

3.1. Výsledky měření AE v průběhu korozních zkoušek

Akustická emise byla zaznamenávána in situ v průběhu korozních zkoušek. Typický průběh emisní aktivity je vidět na obr. 2, kde je vynesena časový průběh překmitů přes nižší prahovou úroveň *count*. Zdroji akustické emise jsou při korozních procesech tvorba korozních produktů, jejich praskání a odpadávání z povrchu a v konečných fázích potom rozvoj exfoliačních trhlin. Kvalitativně stejné záznamy byly pořízeny v různých fázích korozních zkoušek i v obou korozních prostředích. Vzhledem k tomu, že nejsou k dispozici žádná další měření koroze, která by umožnila porovnání s emisní aktivitou, můžeme pouze hypoteticky předpokládat možné fyzikálně-chemické příčiny. První vrchol emisní aktivity zpravidla trval přibližně dvě hodiny a byl následován druhým, širokým vrcholem, který s časem exponenciálně klesal. Výška druhého vrcholu se měnila v průběhu testu, ale jeho průběh zůstával stejný.

Lze se domnívat, že první vrchol odpovídá rychlé pasivaci povrchu vzorků po přerušení korozního procesu před měřeními NWMS, kdy byla očištěním odstraněna část korozní vrstvy.

Dalším vysvětlením může být odstranění korozních produktů vzniklých na vzduchu při přerušené korozní zkoušce. Druhý vrchol pravděpodobně odpovídá postupu korozního procesu lokalizovanou korozí, tj. vytváření korozních důlků a v pozdějších fázích rozvoji exfoliačních puchýřů a trhlin. Pokles pak odpovídá pasivaci povrchu vytvořenými korozními produkty a zároveň částečnému vyčerpání agresivity korozního média.

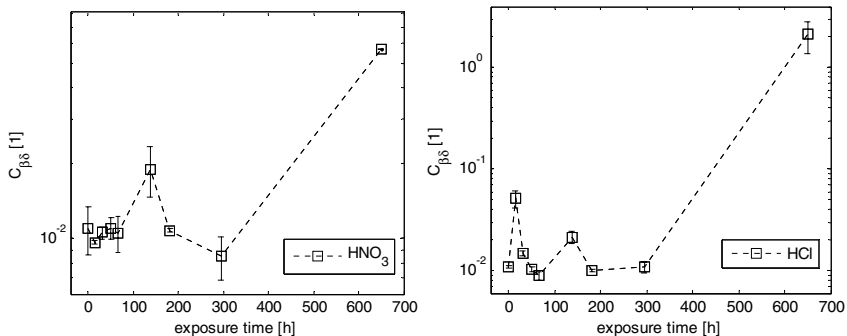


Obr. 2: Typický průběh emisní aktivity zaznamenané během korozního procesu. Zaznamenané četnosti emisních přechmitů jsou znázorněny šedou tečkovanou čarou, silná černá čára je jejich klouzavý průměr.

(Typical AE activity recorded during the corrosion process. Actual AE count rates are in grey dotted line, and their moving averages in solid black)

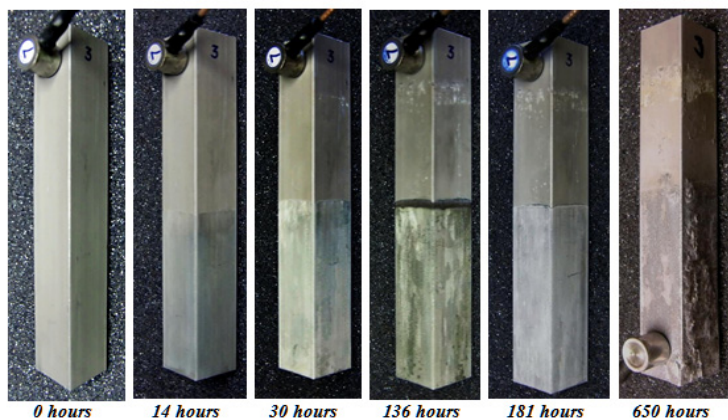
3.2. Výsledky měření metodou NWMS

Měření metodou NWMS byla v průběhu korozních zkoušek několikrát opakována. Nelineární parametry C_{β} a $C_{\beta\delta}$ byly vyhodnoceny v různých fázích korozního poškození. Ukázalo se, že parametr $C_{\beta\delta}$ lze použít jako velmi citlivý ukazatel rozsahu korozního poškození. Na obr. 3 jsou vyneseny průměrné hodnoty parametru $C_{\beta\delta}$ v závislosti na době expozice vzorku v korozním mediu. Průběh závislosti v různých korozních prostředích je podobný. Nejprve dochází k mírnému snížení nelinearity vzorků a prvního maxima dosahuje nelinearity shodně po 136 hodinách expozice. Po této fázi experimentu bylo použito koncentrovanější korozní médium. Vlivem nového média došlo opět ke snížení nelinearity vzorků, které bylo následováno velkým nárůstem. Tento efekt dobře odpovídá vizuálnímu hodnocení vzorků (viz obr. 4). Snížení nelinearity v počátečních fázích korozního procesu je pravděpodobně způsobeno odstraněním původních korozních produktů. Tím dochází k částečnému vyčištění povrchu vzorků. Nárůst nelinearity potom pravděpodobně způsobuje vrstva korozních produktů slabě vázaná k základnímu materiálu. V konečné fázi korozní zkoušky docházelo k exfoliační korozí, tj. tvorbě puchýřků a trhlin v materiálu, což se projevilo řádovým nárůstem zjištěné nelinearity.



Obr. 3: Vývoj nelineárního parametru $C_{\beta 8}$ během korozního procesu. Vyneseny průměrné hodnoty $C_{\beta 8}$ s chybovými intervaly v závislosti na době expozice koroznímu médiu. Koncentrovanější korozní medium bylo použito po 136 hodinách expozice.

(Development of nonlinear parameter $C_{\beta 8}$ during corrosion process. Mean values of parameter $C_{\beta 8}$ are plotted against exposure time in semilog scale with error bars. Concentrated corrosion media was used after 136 hours of exposure.)



Obr. 4: Fotografie korozního poškození vzorku v různých fázích korozní zkoušky. Uvedený vzorek byl exponován v roztoku s HNO_3 .

(Photographs of the specimen at different exposure times. The specimen has been corroded in the solution with nitric acid)

4. Závěry

Byly provedeny korozní zkoušky vzorků z letecké slitiny Al. Rozsah korozního poškození, realizovaného pomocí urychlených korozních zkoušek pokrýval celý průběh pozorovatelný

v reálných podmínkách na letecké konstrukci. V počáteční fázi docházelo k rovnoměrné korozi na povrchu vzorku s lokálním rozvojem korozních důlků. V konečné fázi bylo již korozní poškození značné, takové, že v provozních podmínkách by mohlo dojít k havárii součásti. Došlo až k rozvoji exfoliační koroze, tvorbě trhlin a puchýřů v materiálu a tím k silné degradaci mechanických vlastností původního materiálu.

Korozní proces byl monitorován in situ pomocí akustické emise. Bylo zjištěno, že aktivita akustické emise je spolehlivým ukazatelem okamžité rychlosti korozních procesů. K určení mechanismu korozního poškození, detekovaného na základě měření AE by bylo třeba sestavit na základě doplňujících fyzikálně-chemických analýz odpovídající korozní model. Výhodou AE je v případě použití více snímačů AE m.j. možnost dosti přesné lokalizace korodujících částí konstrukce, což je důležité zejména na vizuálně nepřístupných místech. V současné době jsou za tímto účelem do některých letounů instalovány speciální vláknové detektory vlhkosti (např. pod koberce v kabinách pro cestující), ty však přímo nevyovídají o korozním napadení, ale jen o jeho možnosti na základě hypotetického modelu. Měření nelineární ultrazvukovou metodou NWMS bylo provedeno několikrát v průběhu korozní zkoušky. Ukázalo se, že zjištěný nelineární parametr dobře odpovídá rozsahu korozního poškození zjištěnému vizuální kontrolou. Nelineární parametr vykazuje velkou dynamiku v závislosti na rozsahu korozního poškození. Detekuje minimální změny korozní vrstvy i ve fázi, kdy makroskopické vlastnosti materiálu ještě nejsou příliš ovlivněny. Naproti tomu nebezpečný stav je indikován řádovým nárůstem nelineárního parametru.

Obě metody prokázaly svou efektivitu při detekci a hodnocení korozního poškození kovových leteckých slitin. Vlastnosti obou metod se vhodně doplňují a vzhledem k tomu, že využívají podobné experimentální zařízení, tvoří výhodnou součást budoucího SHM systému. Jejich aplikace není omezena na slitinu Al, která zde byla studována. Protože princip obou metod je založen na šíření elastických vln prostředím, lze očekávat obdobné vlastnosti pro celou řadu kovových materiálů. Nasazení uvedených metod je proto možné také v dalších průmyslových odvětvích, jako např. v chemickém průmyslu či energetice apod.

Poděkování

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR-TI1/274 a studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS10/302/OHK4/3T/14.

This work was supported by the Czech Ministry of Trade and Industry under project no. FR-TI1/274 and by the Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS10/302/OHK4/3T/14.

Literatura

- 1 P.P. Delsanto. 'Universality of nonclassical nonlinearity: applications to non-destructive evaluations and ultrasonics', Springer Verlag, 2007.
- 2 R.A. Guyer and P.A. Johnson. 'Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials', Physics Today, 52:30–36, 1999.

- 3 P.B. Nagy. 'Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization', *Ultrasonics*, 36(1-5):375–381, 1998. ISSN 0041-624X.
- 4 K. Van Den Abeele. 'Multi-mode nonlinear resonance ultrasound spectroscopy for defect imaging: An analytical approach for the one dimensional case', *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122:73, 2007.
- 5 K. Van Den Abeele, P. Johnson, and A. Sutin. 'Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS)', *Research in nondestructive evaluation*, 12(1):17–30, 2000.
- 6 I. Yu. Solodov, N. Krohn, G. Busse. 'CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids', *Ultrasonics* 40, 2002.
- 7 F. Bellenger, H. Mazille, H. Idrissi. 'Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion', *NDT&E International* 35, 2002.
- 8 M. Boinet et al. 'Understanding aluminum behavior in aqueous alkaline solution using coupled techniques. Part II: Acoustic emission study', *Electrochimica Acta* 55, 2010
- 9 M. Fregonese et al. 'Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: monitoring by acoustic emission', *Corrosion Science* 43, 2001
- 10 J. Kovac et al. 'Correlations of electrochemical noise, acoustic emission and complementary monitoring techniques during intergranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel', *Corrosion Science* 52, 2010



SLEDOVÁNÍ ROZVOJE ÚNAVOVÝCH TRHLIN V NÝTOVANÝCH LETECKÝCH KONSTRUKCÍCH POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE

MONITORING OF FATIGUE CRACK GROWTH IN RIVETED AIRCRAFT STRUCTURES BY ACOUSTIC EMISSION

Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Laboratory

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

Abstrakt

Lomové porušení integrity materiálu je primárním nebezpečím z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti provozu většiny extrémně zatěžovaných konstrukcí jako jsou např. letadla, důležité stavby či tlakové nádoby apod. Současné náročné požadavky na jejich spolehlivost a bezpečnost nejsou realizovatelné bez efektivních nástrojů nedestruktivního testování (NDT) resp. systémů monitorování okamžitého fyzikálního stavu konstrukce (SHM - Structural Health Monitoring). Akustická emise představuje jednu z významných NDT a SHM metod pro detekci a identifikaci rostoucích materiálových defektů. Původ různých typů detekovaných emisních signálů lze vysvětlit rozdílnými mechanismy poruch nebo provozními šумы. Monitorování konstrukcí pomocí akustické emise vyžaduje nové, robustní a rychlé metody pro lokalizaci a klasifikaci emisních zdrojů. Nově navržená lokalizační metoda na bázi umělých neuronových sítí, využívající tzv. časové profily příchodů signálu v poli snímačů AE, byla aplikována na sledování rozvoje trhlin během dlouhodobého únavového zatěžování vzorků nýtované pásnice křídla letounu. V příspěvku jsou diskutovány možnosti této metody pro vzdálené "on-line" sledování růstu nebezpečných trhlin v kritických částech leteckých konstrukcí.

Klíčová slova: akustická emise, lokalizace zdrojů, umělé neuronové sítě, časové profily.

Abstract

Fracture is the primary threat to the integrity, safety, and performance of nearly all highly stressed structures, e.g. of aircrafts, building units or pressure vessels, etc. Contemporary exacting demands on reliability and safety of structures are not realizable without effective means of non-destructive testing (NDT) and continuous state monitoring. In principle, the acoustic emission (AE) represents one of NDT and structure health monitoring (SHM) methods for the detection and identification of growing material defects. Different types of signals detected by the AE method are supposed to correspond to different types of defects or operational noises. Monitoring of structures by acoustic emission needs new robust and fast methods for emission source location and classification. Recently proposed AE source location method using so-called signal arrival time profiles and artificial neural networks (ANN) was applied for monitoring of growing defects during long-term fatigue testing of riveted aircraft wing flange. The potentialities of the method regarding the on-line monitoring of dangerous crack growth in selected critical parts of aircraft structures are discussed.

Key words: Acoustic emission, source location, neural networks, arrival time profiles.

1. Úvod

Lomová porušení extrémně zatěžovaných konstrukcí, jako jsou např. letadla, stavební díla nebo tlakové nádoby, mohou mít značné negativní dopady včetně vážných zranění osob nebo ztrát na životech, znečištění životního prostředí, či ekonomických ztrát. Únavové procesy jsou jednou z primárních příčin selhání celých konstrukcí či jejich součástí. Predikce únavového poškození konstrukcí a růstu materiálových defektů je technickým problémem již od začátku 20. století. Na základě lomové mechaniky byly jako podklady pro návrhy kovových konstrukcí vyvinuty různé modely růstu únavových trhlin. V posledních desetiletích byla vypracována také řada metod pro odhady zbytkové životnosti konstrukcí s trhlinami, namáhaných konstantním či amplitudově proměnlivým zatěžováním. Tyto přístupy jsou ale obvykle aplikovány "off-line", tj. během technických prohlídek, při kterých nemusí být kritická závada odhalena. Zejména pokud je skrytá v těžko přístupných resp. nedemontovatelných částech konstrukce. Technické kontroly při odstávkách rovněž nejsou schopné detekovat okamžitá náhodná přetížení materiálu za provozu.

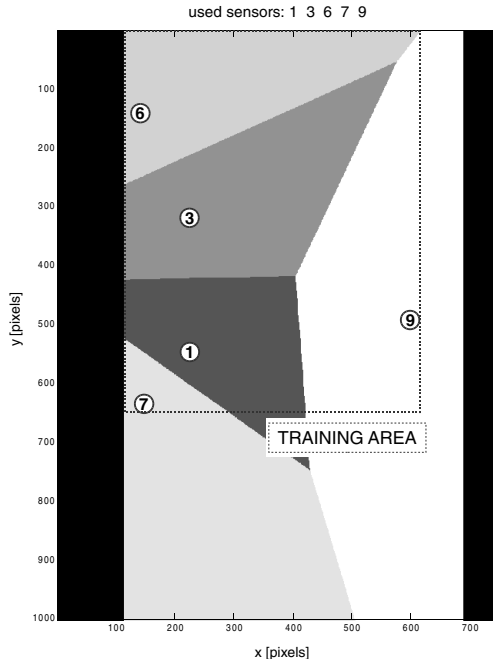
Akustická emise ve svém principu představuje jednu z mála NDT metod pro okamžitou "on-line" detekci a identifikaci rostoucích materiálových defektů [1]. Původ různých typů detekovaných emisních signálů lze vysvětlit rozdílnými mechanizmy poruch nebo provozními šумы. Metoda akustické emise je dosud většinou aplikována především v případech nedestruktivního testování relativně jednoduchých konstrukcí, jelikož standardní algoritmy zpracování emisních signálů (např. pro lokalizaci či rozpoznávání emisních zdrojů) nejsou vhodné pro složitější konstrukce a anisotropní materiály. Z těchto důvodů jsou pro lokalizaci, tak i klasifikaci emisních zdrojů zapotřebí nové přístupy. Umělé neuronové sítě (ANN) jsou jako součásti inteligentních systémů vhodným nástrojem pro řešení těchto problémů a nalézají tak široké uplatnění v praxi.

Pro charakterizaci mechanismu poškození materiálových konstrukcí na základě analýzy signálů akustické emise je v první řadě nezbytné co nejpřesněji určit polohu emisního zdroje. Nejčastěji aplikovaný triangulační algoritmus vychází při analytickém výpočtu souřadnic zdroje AE z časových diferencí příchodů signálu k jednotlivým snímačům a rychlosti šíření elastických vln [2]. Analytické vzorce jsou však známy jen pro jednodušší případy, např. tenké isotropní desky apod. Algoritmus rovněž předpokládá geometrickou spojitost materiálu. Možnosti jeho praktického uplatnění jsou tak v mnoha případech velmi omezené, zejména při testování složitějších součástí.

Problém lze řešit matematickými modely šíření napěťových vln. Pro potřeby lokalizace zdrojů AE jsou tyto modely ale příliš komplexní a výpočetně náročné. Budeme-li předpokládat, že detekované vlny se šíří po geometricky nejkratších cestách uvnitř či na povrchu materiálu, je možné vycházet z nejpřímější trasy mezi snímačem AE a místem emisního zdroje a parametrizovat chronologii příchodů signálů k jednotlivým snímačům. Nově zavedený přístup k lokalizaci zdrojů AE pomocí časových profilů [3] využívá interpolačních schopností umělých neuronových sítí ve vícerozměrných parametrických prostorech. Výhodným předzpracováním naměřených časů příchodů signálů k jednotlivým snímačům zaručuje navíc univerzálnost konkrétní naučené neuronové sítě, tj. nezávislost na změně materiálu a měřítka. Časové profily zohledňující chronologii příchodů signálu k jednotlivým senzorům mohou být přitom počítány rovněž na základě nejkratších vzdáleností od zdroje ke snímačům. Tyto vzdálenosti ale nemusejí být odvozeny pomocí různých algoritmů hledajících nejkratší vzdálenosti v geometrických tělesech. V případě jednoduchých tvarů materiálu postačí eukleidovská vzdálenost zdroj-snímač.

2. Profily časů příchodů signálů

Parametrizace chronologie příchodů signálů ke snímačům pomocí časových profilů je inspirována předběžnou expertní analýzou polohy emisního zdroje, při níž je sledovaná konstrukce rozdělena na zóny podle prvního příchodu signálu k jednotlivým snímačům. Na obr.1 jsou různými odstíny šedi vybarveny oblasti namáhané součástí, odpovídající polohám emisních zdrojů, jejichž signály detekuje příslušný senzor jako první. Jinými slovy, v oblasti označené jako N leží body, které jsou nejbližší ke snímači S_N .



Obr.1 Ilustrativní rozdělení materiálu na zóny podle prvního příchodu signálu k jednotlivým snímačům.

Fig.1 Illustrative dividing of material into zones by signal first arrival to each sensors.

Pro přesnější postžení chronologie detekce signálů byly v [3] zavedeny tzv. časové profily. Předpokládejme konfiguraci N snímačů AE umístěných na rovinném tělese. Označme T_i dobu šíření elastické vlny od zdroje ke snímači S_i . Časový profil (arrival time profile - ATP) je vektor s následovně definovanými složkami p_i :

$$p_i = \frac{NT_i - \sum_{j=1}^N T_j}{\sum_{k=1}^N \left| T_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \right|} \quad (1)$$

Je zřejmé, že pomocí běžných analyzátorů AE je možné získat pouze časy příchodů t_j signálu k jednotlivým snímačům. Nicméně, označíme-li t_s čas inicializace zdroje AE, lze upravit původní vzorec (1) pomocí vztahu $T_i = t_i - t_s$:

$$p_i = \frac{N(t_i - t_s) - \sum_{j=1}^N (t_j - t_s)}{\sum_{k=1}^N \left| t_k - t_s - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_j - t_s) \right|} = \frac{Nt_i - \sum_{j=1}^N t_j}{\sum_{k=1}^N \left| t_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_j \right|} \quad (2)$$

Označme dále d_i vzdálenost mezi zdrojem AE a snímačem S_i . Dosazením vztahu $T_i = d_i/v$ do (1) lze dále odvodit:

$$p_i = \frac{N \frac{d_i}{v} - \sum_{j=1}^N \frac{d_j}{v}}{\sum_{k=1}^N \left| \frac{d_k}{v} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{d_j}{v} \right|} = \frac{Nd_i - \sum_{j=1}^N d_j}{\sum_{k=1}^N \left| d_k - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j \right|} \quad (3)$$

Je tedy zřejmé, že časové profily lze počítat z časů příchodů t_j nebo vzdáleností d_j podle příslušných modifikací definičního vzorce (1). Ze vztahu (3) navíc plyne nezávislost na změně rychlosti v elastické vlny. Obdobně se vykrátí jakýkoliv násobek vzdáleností d_j , tedy změna měřítka materiálu. Ve smyslu této „univerzality“ mohou být neuronové sítě učeny numericky generovanými daty, odvozenými ze vzdáleností naměřených na proporcionálním modelu uvažované konstrukce nebo její fotografii, s využitím algoritmu hledání nejkratších cest. Ve fázi vybavování, kdy jsou na vstupy sítě předkládána neznámá data, je možné zpracovávat časové profily počítané již ze skutečných časů příchodů.

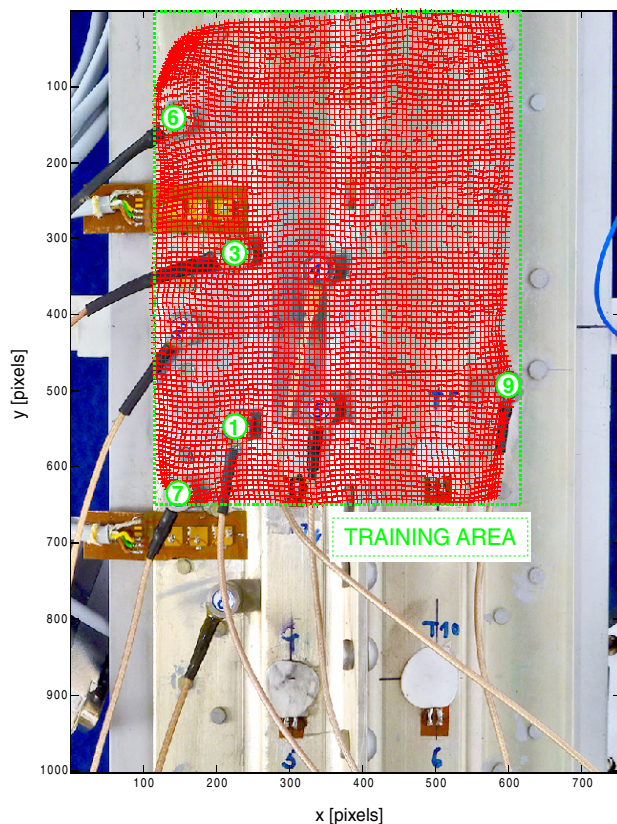
Výše uvedené vlastnosti časových profilů značně rozšiřují aplikační možnosti neuronových sítí. V první řadě řeší problémy při získávání dostatečného počtu tréninkových a testovacích dat, což může být v praxi velmi náročné a v mnoha případech i nemožné. Zejména z důvodu vysokých hladin šumu nebo velkých měřících chyb mohou být experimentálně získaná učící data nejednoznačná a tudíž nepoužitelná. V takových případech nelze zaručit dostatečně jemné pokrytí vstupního prostoru ANN vhodnými tréninkovými daty. Problém nepřenositelnosti konkrétní naučené sítě na jinou úlohu je časovými profily rovněž vyřešen, díky jejich nezávislosti na změně rychlosti elastické vlny nebo měřítka konstrukce.

3. Experiment

Výhody nové metody lokalizace zdrojů AE byly ověřovány v praxi během dlouhodobého únavového zatěžování vzorku nýtované pásnice křídla letounu. Úkolem bylo lokalizovat emisní zdroje a včas předpovědět růst nebezpečných trhlin. Akustická emise byla během cyklického namáhání monitorována a zaznamenávána analyzátozem AE DAKEL XEDO. Schéma na obr.2 znázorňuje rozmístění pěti vybraných senzorů, vymežujících učící lokalizační oblast, ve které má lokalizace na základě zpoždění příchodů elastických vln k jednotlivým senzorům fyzikální smysl. Konfigurace senzorů je zvolena tak, aby „pokrývaly“ pás kolem uměle

iniciované trhliny C1 (viz obr.4) a zároveň aby bylo možné sledovat její růst směrem ke středu pásnice, což spolu s dostatečnou přesností v ose x zajišťuje snímač č.9. V průběhu zatěžování se ale objevila nepředpokládaná trhлина v levé horní části pásnice, tedy zcela mimo lokalizovatelnou oblast danou konfigurací snímačů. Proto byla v rámci dodatečné analýzy emisní aktivity rozšířena tréninková oblast co nejvíce tímto směrem, i přes výrazné zhoršení průběhu učení neuronových sítí (viz obr.2), plynoucí z velké citlivosti výsledků lokalizace na změny chronologie příchodů signálů.

used sensors: 1 3 6 7 9

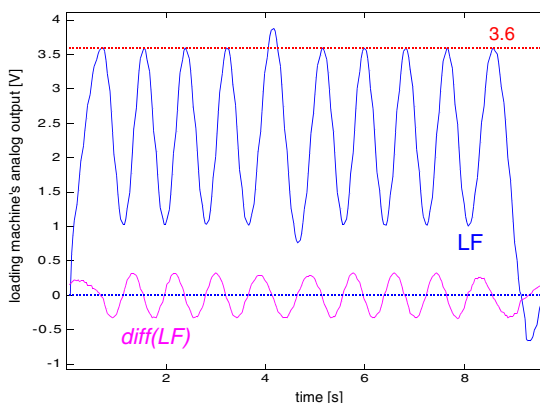


Obr.2 Lokalizace virtuálních tréninkových zdrojů (průměry výsledků 13-ti ANN)
Fig.2 Localization of virtual training sources (means of results of 13 neural networks)

Zvolené virtuální tréninkové zdroje ekvidistantně pokrývají zónu mezi snímači. Eukleidovské vzdálenosti těchto virtuálních zdrojů ke všem snímačům, uvažované ve 2D průmětu a odečtené z fotografie součásti, byly zpracovány podle vzorce (3). Následovalo učení neuronové sítě aproximovat původní souřadnice virtuálního zdroje. Přesnost výsledků natrénované neuronové sítě lze posoudit ze zpětné projekce

učících bodů předložených na její vstupy a zobrazených přímo do původního obrázku (viz obr.2). Významnější nepřesnosti jsou patrné pouze na hranicích tréninkové oblasti, kdy velmi blízké časové profily odpovídají rozdílným lokalizacím a neuronová síť nemá kapacitu lokálně aproximovat velmi strmou závislost.

Naučené neuronové sítě byly pak testovány na reálných experimentálních datech. Začátky signálů AE byly automaticky určovány pomocí expertního algoritmu, navrženého ve [4]. Ačkoliv je tato metoda relativně spolehlivá, její přesnost je mnohem menší než aproximační chyba neuronových sítí, zvláště pro delší vzdálenosti emisního zdroje od snímače. Profily časů příchodů, sloužící jako vstupy neuronové sítě, byly počítány pomocí vzorce (2) na základě časů začátků signálu odhadnutých výše zmiňovanou expertní metodou. Výstupy sítě představují konečný odhad souřadnic emisních zdrojů, zobrazených jako křížky v obr.2. Tyto, i všechny dále uvedené výsledky, jsou průměry výstupů třinácti neuronových sítí stejné konfigurace, naučených pouze z různě optimalizovaných startovních vah. Je tak potlačena „učící“ chyba sítí, která ovšem zdaleka nedosahuje významnosti chyby při určení začátků signálů.



Obr.3 Průběh zatěžovací síly (LF) a její derivace během jednoho typického cyklu.

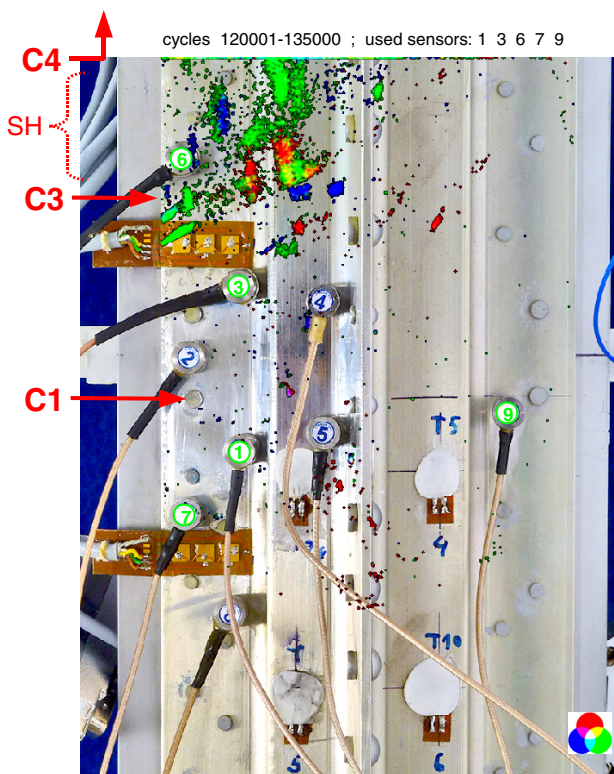
Fig.3 Loading force (LF) envelope and its derivative during one typical cycle.

4. Diskuze výsledků

Hlavním cílem monitorování AE byla detekce růstu umělé trhliny (označené jako C1 v obr.4) iniciované na okraji otvoru pro nýt v levé centrální části pásnice. Ukázky výsledné lokalizace (z posledních přibližně 15 tisíc zatěžovacích cyklů) jsou patrné na obr.4. Závažnost zdrojů AE byla posuzována na základě okamžité fáze zatěžující síly. Zprůměrovaný výstup neuronových sítí (t.j. souřadnice v obrázku) je vždy interpretován jako jeden "pixelů v RGB barevném prostoru, jehož komponenty odpovídají fází zatěžující síly (LF - viz obr.3). Zelenou barvou jsou zobrazeny události detekované při nárůstu zatížení (tj. ve fází kladné derivace síly), modrá barva odpovídá jeho poklesu (tj. záporné derivaci síly). Události detekované při maximálním zatížení, kdy na analogovém výstupu zatěžovací síly byly hodnoty větší než 3.6V (viz obr.3), mají na obrázcích barvu červenou. Jas každé barvy je úměrný četnosti lokalizací do příslušného pixelu, přičemž za současného výskytu

událostí z různých fází zatížení je uplatněno aditivní směšování barev (nikoli překrývání). Pro názornost je princip součtového skládání barev vždy uveden v pravém dolním rohu obrázku. Pro zvýraznění takto zbarvených pixelů bylo použito "gaussovské rozostření" spolu se zvýšením kontrastu a saturace barvy.

Na obr.4 je patrná poměrně komplikovaně interpretovatelná emisní aktivita. Předně lze říci, že uměle vyrobená trhlinka C1 se zde neprojevuje, resp. pouze v minimální míře. Převládají zdroje, které se nepodařilo uspokojivě vysvětlit. Zvláště kumulace emisních zdrojů v levé horní části pásnice (ozn. SH - viz obr.4), pravděpodobně pocházející od upevňovacích kleštin zatěžovacího stroje. Vysvětlit lze naopak zdroj odpovídající místu, kde byla následně objevena trhlinka C3. V neposlední řadě je patrná častá emise pocházející z levé horní části pásnice, vysvětlitelná růstem trhlinky C4, která byla důvodem mimořádné opravy vzorku. I když její lokalizaci nelze při dané konfiguraci snímačů s jistotou extrapolovat, je jiný zdroj nepravděpodobný, protože jiná závada nebyla v této části pásnice nalezena.



Obr.4 Výsledky lokalizace reálných emisních zdrojů během cyklů 120001-135000.
Fig.4 Localization of real emission sources during cycle 120001-135000.

4. Závěr

V průběhu únavových zkoušek vzorku pásnice křídla letounu byla monitorována akustická emise, která ve všech případech vždy s dostatečným předstihem varovala před blížícím se porušením (rozvoj trhlin C3 a C4) a to i v situacích, kdy ani podrobná vizuální prohlídka namáhaného dílu neodhalila žádnou vadu. Z důvodu dosud nedokončeného vývoje software pro "on-line" zpracování signálů AE ale nebylo možné vyhodnotit přesnější lokalizaci defektů přímo v reálném čase. Zatěžování bylo přerušeno na základě expertní analýzy aktuální emisní aktivity z osciloskopických záznamů emisních signálů a nárůstu emisních překmitů.

Poděkování

Práce vznikla za podpory MPO ČR v projektu č. FR-TI1/274.

Literatura

- [1] Miller, K Ronnie, P McIntire, 'Nondestructive testing handbook; v.5.', American Society for Nondestructive Testing, INC., USA, ISBN 0-931403-02-2, 1987.
- [2] M Blahacek, 'Acoustic Emission Source Location Using Artificial Neural Networks', PhD. Thesis, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague 2000 (in Czech).
- [3] M Chlada, Z Prevorovsky, M Blahacek, 'Neural Network AE Source Location Apart from Structure Size and Material', Journal of Acoustic Emission, vol. 28, 99-108, 2010.
- [4] M Chlada, Z Prevorovsky, 'Expert AE signal arrival detection', Int. J. Microstructure and Materials Properties, ISSN (Print): 1741-8410, Vol. 6, Nos. 3/4, 2011, pp.191-205.



RUČNÍ, MECHANIZOVANÉ A MANIPULÁTOROVÉ KONTROLY ULTRAZVUKEM METODOU PHASED ARRAY A TOFD – PRAKTICKÉ PŘÍKLADY MANUAL, MECHANIZED AND MANIPULATOR INSPECTION BY MEANS OF ULTRASONIC PHASED ARRAY AND TOFD METHODS – PRACTICAL EXAMPLES

Miloslav PROCHÁZKA, Roman BENEŠ

TEDIKO, s.r.o.

Contact e-mail: info@tediko.cz

Abstrakt

Tento článek je zaměřen na praktickou stránku měření ultrazvukem v elektrárnách, chemických výrobnách a rafinériích metodami Phased Array a TOFD včetně pomoci mechanizovaných prostředků. Praktické příklady praktické stránky uskutečněných měření – kontroly tlakových nádob a potrubí, kontroly svarových spojů, kontrola na přítomnost a rozsah poškození nádob blistry a jinými vadami.

Klíčová slova: zkoušení ultrazvukem, manipulátor, phased array, TOFD

Abstract

This article describes the practical examples of ultrasonic measuring in power and chemical plants and refineries by means of Phased Array and TOFD methods using manipulators included. The examples of performed inspections from practice - real measuring of pressurised vessels and piping, welds inspection, HIC blister damage and other flaw identification.

Key words : ultrasonic inspection, manipulator, phased array, TOFD

1. Úvod

Tento příspěvek navazuje na příspěvek o mechanizaci při kontrole ultrazvukem prezentovaný na konferenci v roce 2010. Zaměřením ukazuje některé konkrétní aplikace ultrazvukové metody zkoušení. Zabývá se pouze některými našimi zkušenostmi, které z uskutečněných měření vyplynuly, nikoliv na jedné straně teorií či naopak na druhé straně velmi drahými špičkovými aplikacemi.

2. Informace získávané při měření

Informace získávané z jakéhokoliv měření mohou být různého druhu a mít různou hodnotu. Asi tou nejjednodušší informací je informace, zda kontrolovaná věc (zařízení, součást, výrobek, ...) vyhovují požadavku nějaké normy či předpisu. Pracovník provádějící kontrolu se zajímá, tu s větší, tu s menší snahou, pouze o to, zda byla či nebyla naplněna nějaká kritéria. Na základě výsledků se pak daný „zkoušenec“ uvolní k dalšímu použití, nebo se opraví či vyřadí. Zkoušející má „čistou hlavu“ a radostně pokračuje v další činnosti.

Úroveň poskytovaná informace je ale velmi nízká. Při měření tloušťek stěn je potom výsledkem nějaké číslo. Často ve skutečnosti vytržené z kontextu, protože vyjadřuje hodnotu pouze a jenom toho jediného měřeného bodu na základě jehož se provádí odhad stavu celku.

V případě, že je ale potřebné zařízení dále provozovat, přestože „obsahuje“ vady, je nutné získat komplexnější informace. To lze řešit mapováním určitých míst měření tloušťek v sítích případně prováděním měření B-Skenů, kontrolou různými ultrazvukovými sondami v různých polohách, zkreslováním výsledků atd. Nemluvíme zde o ostatních metodách, které by jistě v komplexním pojetí měly co říci.

Použití manipulatorového skenování ultrazvukovými sondami, tak jak se provádělo v minulosti či použití Phased Array (PA) umožňuje získat oproti běžným ultrazvukovým měřením podstatně komplexnější informaci. Měření je doopravdy objemové, tzn. dochází k prozvučení a záznamu objemu materiálu, jehož rozměry jsou dány účinnou délkou sondy (závisí především na počtu elementů), tloušťkou materiálu a dráhou posunu sondy.

To umožňuje získat novou hodnotu informace, kterou lze i určitým způsobem zviditelnit. Samozřejmě může nastat menší odpor daný zažitými konvencemi, například na straně výpočtářů, ale to bude dáno především tím, že se musí naučit s těmito informacemi zacházet. Nedostává do ruky nákres a tabulku s hodnotami, ale dostává i obrázek – pohled na zkoušené zařízení.

Problémem je, že nový pohled také znamená, že nelze aplikovat původní přístupy ke kritériím hodnocení. Hodnocení nelze provádět jen tak na základě náhradní velikosti. Možná zazní námitka, že to přece některé kombinace přístrojů, softwaru a sond umí. To ano, ale potom se vlastně bez ohledu na použití moderní technologie používá stále stejný přístup. Omlouvám se za následující přirovnání, ale je to jako klasický psací stroj tisknoucí přes pásku písmenka na papír, ale ovládaný z klávesnice na počítači. Čili pro základní aplikace nahrazující klasické ultrazvukové ruční měření je to výrazný pokrok, ale např. pro stanovování životnosti na základě ocenění konkrétních vad je to málo.

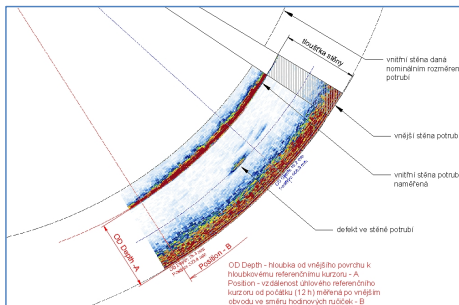
Navíc je zde ještě jedna důležitá věc – jednotlivé ultrazvukové metody nejdou jen tak vzájemně zaměňovat z hlediska získávaných informací – každá přináší trochu jiný pohled, každá je na něco lepší a na něco horší.

Kontrolovat plošně pomocí Phased Array lze takto potrubí, nádrže, zásobníky, nádoby atd. Samozřejmě, že takováto měření jsou vzhledem k použité technologii poněkud dražší, ovšem přinášejí větší informaci za kratší čas.

V případě kontroly svarových spojů jak metodou PA tak TOFD lze říci, že se zvyšuje opět vypovídací schopnost měření, při současném použití lze obě metody zároveň konfrontovat mezi sebou a tím ověřovat zjištěné skutečnosti. Měření je ale také relativně rychlé, existuje záznam a hodnocení lze provádět v kanceláři a nikoliv někde v terénu za nepříznivých podmínek.

3. Základní podmínky

V příspěvcích na minulých konferencích bylo mimo jiné ukázáno i měření Phased Array po obvodu trubky, u které docházelo na vnitřním povrchu k eroznímu poškození. Toto měření bylo ještě prováděno manuálně se všemi svými nechtosmi. Přesto bylo velmi přesvědčivé. Podobně tak měření prováděné na tlustostěnných tlakových nádobách. Při těchto měřeních byla a je sonda používána v režimu přímé sondy, ovšem sondy, která místo jednoho měniče má desítky měničů - až 128. Jen pro velmi rychlé zopakování je uveden následující obrázek.



Jakákoliv podobná měření ovšem mají společných několik věcí. Je nutné používat zařízení, které umožňuje kompletní záznam dat, použít enkodéry a dále možnost počítačového zpracování. Vůbec tedy nestačí jakékoliv zařízení deklarované jako Phased Array. To je základní a zcela kardinální omyl. Je to stejné jako s dopravními prostředky – např. kola mají jako základní pohybový prostředek koloběžky, jízdní kola atd. až po nákladní automobily, vlaky...

Přesto by se asi nikdo neodvážil požadovat dovezení několika tun písku pomocí jízdního kola. Považoval by to za hloupost. Je ale pozoruhodné, že v případě nedestruktivního zkoušení tomu tak není a často jsou vyžadovány či porovnávány mezi sebou totální nesmysly.

Pro měření PA i TOFD je tedy nutné vytvořit určité předpoklady. Relevantní měření **nelze** uskutečnit bez enkodéru, tzn. že i měřicí zařízení a software musí tuto volbu umožňovat. Pokud má být měření doopravdy spolehlivé, je nutné zaručit dobrou manipulaci se sondou na zkušebním povrchu a bezproblémovou **nepřetržitou** vazbu. Udržet vazbu při pohybu sondou ve vynucené poloze ještě třeba za nižších teplot a na zakřiveném povrchu je velmi obtížné. Jestliže normální kabely od jednoduchých sond za nižších teplot tuhnou (a to nemluvíme o teplotách blízcích se nule a nižších), tak ztuhlé poměrně masivní kabely sond PA představují výrazný ztěžující moment pro jemnou manipulaci. Protože je v případě větších ploch nutné jednotlivé skeny skládat do větších ploch, je ruční vedení při měření téměř až nemožné. Používáme tedy imerzní vazbu vodou pomocí speciální předsádky. Imerzní vazba je důležitá ještě z jednoho důvodu – sondy jsou drahé a riziko „ošoupání“ a tedy zničení je velké.

V jednoduchých případech lze použít jednoduchý manipulátor vybavený enkodérem. Pokud je ale naším zájmem pořizovat záznam, který budeme moci analyzovat až po měření a to záznam ploch, linií atd., potom nevystačíme jen s ručním vedením ultrazvukové sondy bez jakýchkoliv pomocných prostředků umožňujících plynulé a nepřetržité vedení sondy. Samozřejmě tedy nemluvíme o záznamu jednotlivých statických obrázků, jak umí většina dnes prodávaných přístrojů.

Pro měření používáme různé druhy manipulátorů a to jak s ručním tak s motorizovaným pohybem. Pro návrh a tvorbu složitějších zařízení vlastní konstrukce používáme konstrukční software umožňující 3D modelování. Většina podobného softwaru umožňuje jak zhotovení přesné dokumentace tak i modelování činnosti. Výhodou je velmi rychlá simulace a výrazná redukce způsobu konstrukce metodou „pokus-omyl“.

Na základě našich zkušeností z minulých let, které jsou částečně vysvětleny i výše v textu, byly některé původní manipulátory přestruovány, případně byly do života uvedeny nové konstrukce, které nám umožňují provádění kontrol ploch 0,5 x 0,5 m (a to včetně ploch zaoblených), provádění kontrol svarových spojů na nádobách a nádržích, provádění kontrol na trubkách a tyčích od průměru cca 25 mm do cca 600 mm. Některé jsou určeny pro kontroly metodou Phased Array, jiné pro kontrolu metodou TOFD.

Pro slušnost se sluší dodat, že ne všechna zařízení jsou vlastní výroby.

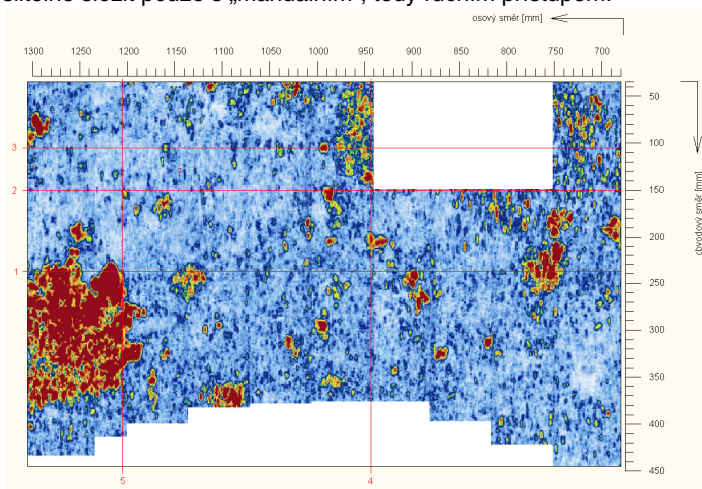
4. Kontrola ploch

V jednom z minulých příspěvků byla naznačena kontrola tlustostěnných nádob. V tomto případě se jednalo o získávání podkladů pro výpočty. V jiném případě, který je na následujícím obrázku, je ukázána kontrola nádrže korozně poškozené vodíkovou korozí (HIC) pomocí motorizovaného X-Y skeneru.

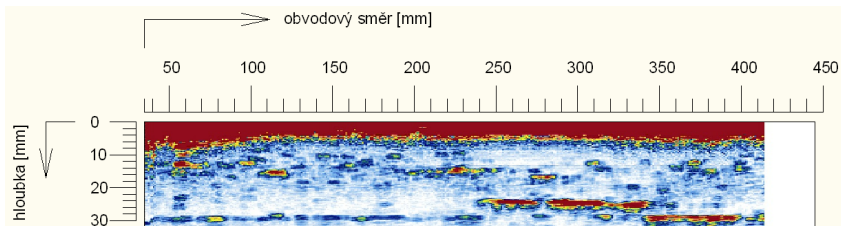


Kontrola byla provedena za účelem zmapování poškození stěny. Prováděla se dvakrát s časovým rozestupem, tzn. bylo možné porovnávat dva výsledky navzájem. Kromě ultrazvukové kontroly se prováděla i kontrola vizuální a sledování za provozu pomocí akustické emise.

Po vyřazení nádoby z provozu budou dále šetřeny odebrané vzorky. Výsledkem ultrazvukové kontroly je níže uvedený obraz plochy (na obrázku je vidět souřadný systém), ve které jsou přímo nádherně vidět místa s vadami, v tomto případě poškozený materiál stěny nádoby s vytvářejícími se blistry. Takovýto obraz je zcela nemyslitelné složit pouze s „manuálním“, tedy ručním přístupem.



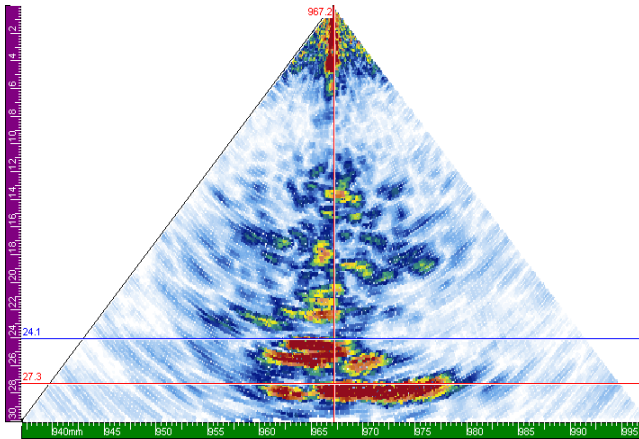
Na následujícím obrázku je uveden jeden z řezů – v tomto případě svislý řez číslo 5 stěnou nádoby. Na řezu jsou velmi dobře vidět místa odrazů ultrazvukové svazky včetně velkých ploch vpravo dole blíže k vnitřnímu povrchu nádoby.



Takovýchto ploch bylo změřeno několik a bylo také provedeno několik desítek řezů jak zobrazujících řez stěnou tak zobrazujících různé vrstvy stěny. Pro ilustraci je níže uveden obrázek velmi dobře ukazující o jaké vady se jedná. Proces vzniku vad tohoto typu je založen na difuzi atomárního vodíku, který se zachycuje v tzv. pastech např. na povrchu rozválcovaných vměstků. Atomární vodík potom vytváří plynný vodík H₂, který nahromaděný kolem vměstků vytváří puchýře, blistry. Atomární vodík také zvyšuje náchylnost oceli k lokalizaci plastické deformace do smykových pásů a to vede v důsledku tahu v zatíženém materiálu ke smykovému protrhávání můstku mezi blistry a to pod úhlem 45°. Vzniká vodíkem indukované praskání (HIC) a v oblasti svarů i příčné porušení mezi můstky (SOHIC).



Vzhledem k tomu, že výše uvedené záznamy jsou pořizovány sondou phased array, která je v režimu přímé sondy, tzn. poskytuje pouze přímý odraz ve směru kolmém na povrch, je nutné ještě ověření, jak vypadá obraz poškození stěny při sektorovém zobrazení. Na následujícím obrázku je právě ukázka sektorového skenu místa poškozeného HIC.



5. Kontrola svarových spojů

Kontrola svarových spojů metodami TOFD a PA není vůbec tak jednoduchá, jak se nás často snaží přesvědčit výrobci. Zároveň ale, pokud je ovšem používána správná technika správným způsobem, není zase tak složitá. Je i relativně rychlá a má slušnou vypovídací schopnost. Jen s normami to není zatím to pravé ořechové. Ale ve skutečnosti většina norem sama o sobě, bez ohledu na „národnost“ není to pravé ořechové ...

I pomocí Phased Array lze kontrolovat svary stejným způsobem jako běžnou UT sondou. Některé PA sondy umí (správněji některé přístroje a SW) hodnotit stejným způsobem jako běžné sondy (AVG, DAC, ...). Ovšem ruční kontrola takovouto sondou je stále jen obvyklou kontrolou, jen s podstatně dražší sondou, pro ruční dohledání a ocenění vady dobré, avšak tímto způsobem není vůbec využit plný potenciál, který v sobě metoda skýtá. Tuto kontrolu lze provádět i tzv. „levnými“ přístroji, těmi však nelze provést nic následujícího.

Kontrola metodou TOFD se provádí se záznamem, protože bez záznamu lze, mírně řečeno, jen velmi těžko vyhodnotit naměřená data. A záznam musí být propojen s údajem z enkodéru, protože nalezené „vady“ se měří, v milimetrech (vkrádá se mi ale taková malá skrytá neodbytná myšlenka - není ale milimetr příliš malá míra ve světle současných trendů „hlavně ať je to dobrý“?).

Pokud se týká PA, je to podobné jako u TOFD, bez záznamu se bude poloha vady a některé z jejích rozměrů hledat hodně špatně.

Vzhledem k výše uvedenému používáme celou řadu manipulačních prostředků, které umožňují kontroly od průměru mírně přes dvacet milimetrů až po „rovinu“. Na dalších obrázcích jsou ilustrační příklady této techniky. Pro menší rozměry používáme dodaný manipulátor Cobra, který umožňuje kontrolu například svarových spojů pomocí dvojice speciálních sond Phased Array vysílajících ultrazvukový svazek proti sobě na osu svarového spoje. Pro větší rozměry již používáme zařízení vlastní konstrukce Lizzard, které umožňuje opět použití dvojice PA sond. Tím je zcela bezproblémově pokryt rozsah zkoušení od cca 25 mm do 600 (800) mm. Pro větší rozměry (průměry) již není nutné (ale je možné) používat tyto manipulační prostředky a lze používat ručního vedení. Ve všech případech je ale samozřejmě nutné použít enkodér polohy.



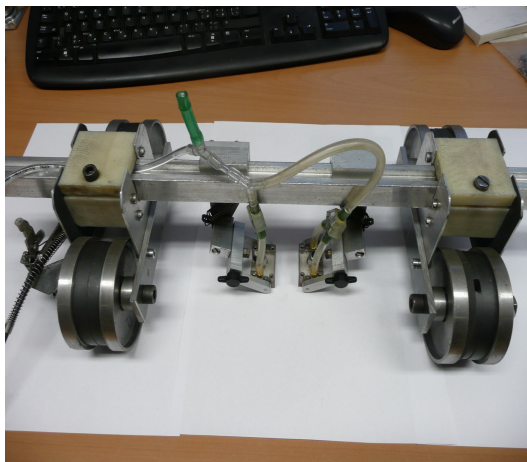
Optimálním se ovšem jeví, pokud lze zároveň provádět měření TOFD i PA. Proč ho provádět nebo proč by to mělo být výhodou ?

Velice významnou výhodou je možnost potvrzení nálezů dvěma různými způsoby. V úvahu připadají samozřejmě minimálně dvě základní možnosti. Provést např. měření PA i TOFD zcela samostatně a využít při porovnávání souřadný systém daný enkodérem je první možností.

Daleko elegantnější je ale použít vše naráz v jednom okamžiku – tedy měřit oběma metodami současně a synchronizovat polohy tak, aby při hodnocení bylo „vidět“ shodné místo jak metodou TOFD tak metodou PA.

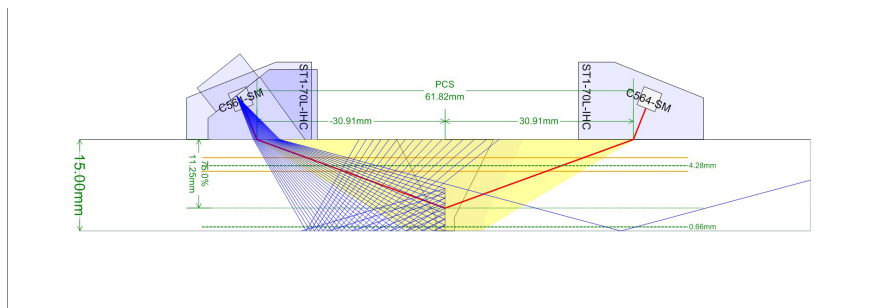
Tento způsob současného použití dvou „principů“ je ale poměrně náročný a to jak na konstrukci zařízení, tak na nastavení a nejvíce ze všeho na přenos dat.

Objem přenášených dat je totiž velmi vysoký. Proto je, přestože jednotlivé samotné kontroly jsou relativně rychlé (především TOFD), zkoušení tímto způsobem pomalejší než zkoušení každou z metod samostatně.

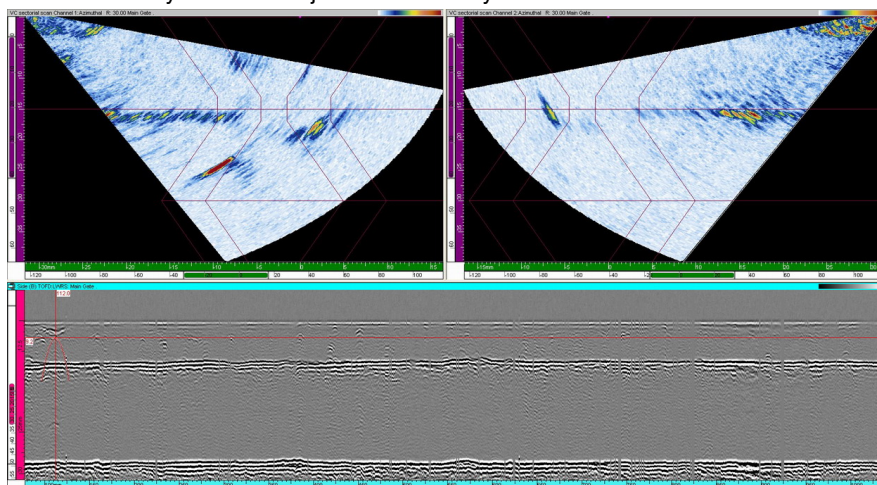


Výhodnější se proto může často jevit použití samotného TOFD, ověření pomocí Phased Array a zároveň ocenění velikosti vad.

Na následujícím obrázku je ukázána simulace souběžného použití zkoušení TOFD a PA. Pro přehlednost je vynechána druhá sonda Phased Array. Odraz svazku PA sondy simuluje odraz od trhliny vycházející z protilehlého povrchu.



Na posledním obrázku tohoto příspěvku je ukázka výše popisovaného způsobu měření na konkrétním svarovém spoji. Červená svislá čára v levé části záznamu TOFD ukazuje místo, které bylo zároveň zjištěno levou PA sondou pod vnějším povrchem. Druhá PA sonda nemá ve stejném místě žádný nález.



6. Závěr

Smyslem tohoto příspěvku bylo ukázat na některé aspekty zkoušení ultrazvukem jiným způsobem než ručně. Každý způsob zkoušení, každá úloha chce „svoje“. Ukázaná měření vyžadují odlišný přístup než ruční zkoušení ultrazvukem. Bez použití mechanizace by zkoušení nebylo téměř možné. Zkušenosti ze zkoušení jsou po překonání počátečních problémů (které jsou ostatně vždy při zahájení jakéhokoliv vývoje) jednoznačně pozitivní. Zkrátil se čas kontroly i hodnocení, zlepšila se kvalita výsledků, snížila namáhavost pro obsluhu a také bylo možné kontrolovat místa, která dříve nebyla jednoduše kontrolovatelná.



PRŮMYSLOVÁ DIGITÁLNÍ RENTGENOVÁ RADIOGRAFIE DIGITAL RADIOGRAPHY FOR INDUSTRY

Michal Kubínyi, Zdeněk Porkert*

*TESTIMA, spol. s r.o.

Contact e-mail: info@testima.cz

Abstrakt

Předmětem tohoto příspěvku je prezentace přehledu systémů pro digitální radiografii. Pro praktické nasazení těchto systémů se příspěvek zabývá především srovnání výhod a nevýhod jednotlivých systémů. Teoretický rozbor je podpořen měřením testovaných dílů na různých systémech digitální radiografie. Výsledkem této části příspěvku tedy bude i rozdělení systémů dle jejich použití. V rámci diskuze nad použitím různých systémů je prezentován i současný stav harmonizace norem v oblasti kontroly svarů při použití digitální radiografie. Nedílnou součástí využívání digitálních systémů je i jejich kalibrace. Příspěvek prezentuje metody kalibrace schválené a používané pro digitální radiografii.

Klíčová slova: digitální radiografie, zpracování obrazů, normalizace, kalibrace

Abstract

This article presents a comprehensive evaluation and comparison of state of the art in digital radiography. The article presents advantages and disadvantages of the current systems in order to provide theoretical background for their usage in industry. The theoretical evaluation is supported by insitu measurement presented in this article. The result which comes out of this is separation of systems into groups according to their usage. The article presents also current state of harmonization in digital radiography. This is supported by discussion over new standards in weld testing. The usage of digital radiography systems is not possible without calibration. This article presents also current standards in calibration and pixel correction for digital radiography.

Key words: digital radiography, image processing, standardization, calibration

1. Úvod

Digitální radiografie představuje formu zobrazení radiogramu bez použití tradičních filmů. Mezi hlavní výhody této metody patří vyšší efektivita zpracování snímku bez použití chemických vývojek inherentní převod s uskladnění v počítači. Pro zachycení snímku existují principiálně dvě metody to systémy paměťových fólií a systémy s plochými detektory. Systémy s paměťovými fóliemi byly poprvé patentovány a zkonstruovány Georgem Luckey v roce 1975. Jejich širší nasazení bylo až v 80 letech minulého století a to především pro lékařské aplikace. Následně až na přelomu tisíciletí byly uvedeny kompaktní systémy, které ve spojení s rozvojem rychlosti a kapacity běžných počítačů dovolují současné široké nasazení.

Druhým významným systémem pro digitální radiografii jsou systémy s plochými detektory. Oproti výše zmiňovaným paměťovým fóliím byly ploché detektory nasazeny přibližně o 10 let později. Jejich následné nasazení má podobnou souvislost s rozvojem počítačové techniky jak tomu bylo u paměťových fólií.

Je nutné v tuto chvíli uvést platnou definici systémů pro digitální radiografii dle ASTM E-2597:

Jedná se o elektronická zařízení, které převádějí ionizující, rentgenové záření na celistvý počet paralelních analogových signálů, které jsou následně digitalizovány uschovány v počítači pro další vyhodnocení. Digitální snímek odpovídá profilu dopadající záření. K transformaci záření může dojít i nepřímo přes převod do viditelného spektra a následnou digitalizaci obrazu. Vlastní rychlost převodu může být od jednotek snímků za minutu až po přenos v reálném čase.

2. Parametry hodnocení digitálních snímků

Standardní radiografie pracující s filmy využívá pro hodnocení kvality snímků kontrastu, typu použitého filmu a neostrosti. V oblasti digitálního zpracování signálů a obrazů existují další standardy, které lépe popisují získaný snímek. Tyto parametry mají zaručit minimální požadavky na kvalitu obrazu při použití digitální radiografie a navíc dovolují kvalitativní porovnání dostupných systémů pro digitální radiografii.

2.1 Místní rozlišení

Místní rozlišení, v originále *Basic Spatial Resolution*, odpovídá efektivní velikosti pixelu a značí nejmenší geometrický detail v obraze, který je rozpoznatelný. Počítá se dle platné normy EN ISO 17636 jako jedna polovina celkové neostrosti obrazu. Dále norma uvádí normalizované SNR, kde je měřen SNR dělený koeficientem 88,6. V případě kontroly svarů se uvádí, že normalizované SNR se má měřit v tepelně ovlivněné zóně svaru, kde konstantní rozložení stupňů šedi, které dovoluje přesné měření SNR. Ověření místního rozlišení se provádí pomocí liniového profilu na drátové měrce. Rozdíl mezi hranou a zářezem musí být alespoň 20% rozsahu, aby bylo dosaženo ekvivalentního místního rozlišení. Pro zvýšení místního rozlišení systému je tedy nutné zvolit menší rozteč pixelů v detektoru, menší ohnisko a větší geometrické zvětšení.

2.2 Neostrost obrazu

Dle výše zmíněné normy je neostrost obrazu kvalitativní míra ztráty rozlišení na hranách ve snímku způsobené geometrickými vlastnostmi zkoumaného objektu, vlastním digitálním systémem. Tato ztráta rozlišení popsána jako neostrost není del definice způsobena ani šumem ani rozptýleným zářením. Popisujeme tedy šířku pásma změny hustoty či jasu způsobenou z náhlých změn intenzity záření dopadajícího na detektor. Do neostrosti lze tedy zahrnout geometrickou neostrost, neostrost způsobenou pohybem, neostrost detektoru, neostrost paralaxy při pozorování. Vlastní kombinace jednotlivých jevů není přesně definována a výsledná neostrost není pouhým součtem jednotlivých neostrostí. Celkové neostrosti většinou dominuje jedna nejvýznamnější složka.

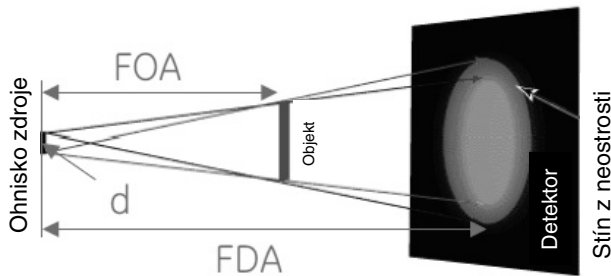
Zjednodušeně lze odhadnout hodnotu neostrosti pomocí vztahu

$$u_{im} = \frac{1}{\sqrt[3]{(u_G)^3 + (1,6 \cdot SR_b)^3}}, \quad (2.1)$$

kde SR_b je místní rozlišení a u_G je geometrická neostrost obrazu.

2.3 Geometrická neostrost

Geometrickou neostrost pro systémy plochých detektorů a paměťových folií můžeme dle ASTM E2597 popsat jako tomu je na Obr.1 a dle vztahu 2.2.



Obr.1 Popis geometrické neostrosti

$$u_g = d \cdot \left(\frac{FDA}{FOA} - 1 \right), \quad (2.2)$$

kde d značí velikost ohnisko zdroje. FDA značí vzdálenost zdroj detektor a FOA značí vzdálenost zkoumaného objektu od zdroje.

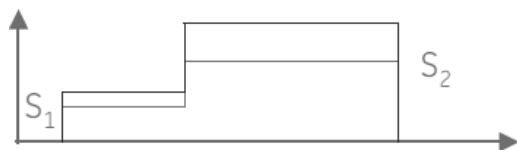
Často se uvádí pro zjednodušení zápisu poměr vzdálenosti detektor-zdroj ku objekt-zdroj jako geometrické zvětšení. Norma ASTM také uvádí, že správné zvětšení je takové, pro které platí, že

$$SR_b > \frac{d}{2} \quad (2.3)$$

2.4 Odstup signál šum v obraze

Jedna z možností jak kvantitativně odhadnout poměr užitečného signálu k šumu je využít koeficient SNR (Signal to Noise Ratio), tedy poměr signál k šumu. Obecná definice uvádí SNR jako poměr střední hodnoty signálu ke směrodatné odchylce šumu ve zvolené oblasti obrazu.

Při zpracování obrazů se běžně spíše pracuje s pojmem kontrast. Kontrast definujeme jako rozdíl v úrovních v obraze, které dovolují, aby zkoumaný objekt byl rozeznatelný od pozadí. Tato skutečnost je naznačena na Obr. 2.

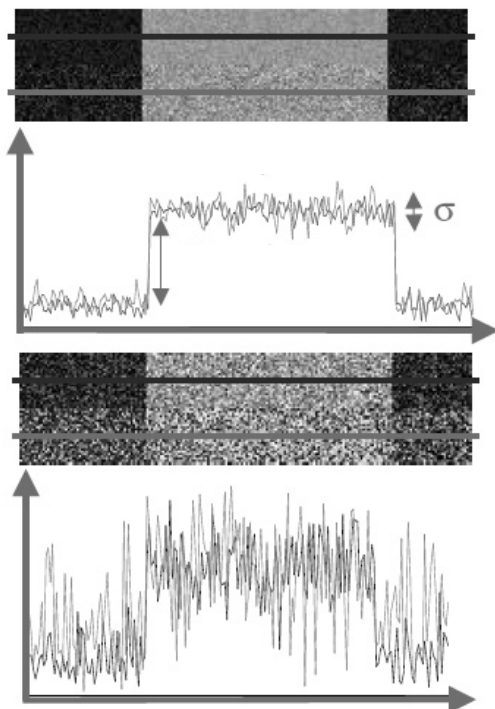


Obr.2 Popisúrovňí měření kontrastu

Definicí jak počítat hodnotu kontrastu existuje v různých aplikacích několik. Můžeme uvést vztah 2.4 běžný v digitální radiografii

$$C = 2 \cdot \left(\frac{S_2 - S_1}{S_1 + S_2} \right) \quad (2.4)$$

Následně tedy při zpracování obrazů můžeme uvést parametr postihující vztah mezi kontrastem v obraze a šumem. Tento vztah popisuje CNR (Contrast to Noise Ratio), je to tedy odstup kontrastu od šumu. Nejlépe je definovat CNR dle aktuální ASTM E2597 podle Obr. 3 ve vztahu.



Obr.3 Popisodhadu CNR v obraze

$$CNR = \frac{S_{IQ14THole} - S_{IQI}}{\sigma} \quad (2.5)$$

kde je nutné použít liniový profil jak je tomu na Obr. 3. Hodnoty signálů S odpovídají středním hodnotám na kalibračním standardu a mimo referenční vadu. Dle ASTM je to kruhová měrka, ale jiné normy pracují i s drátkovými měrkami. Zvýšení kontrastu můžeme dosáhnout jak citlivějším detektorem tak potlačením šumu.

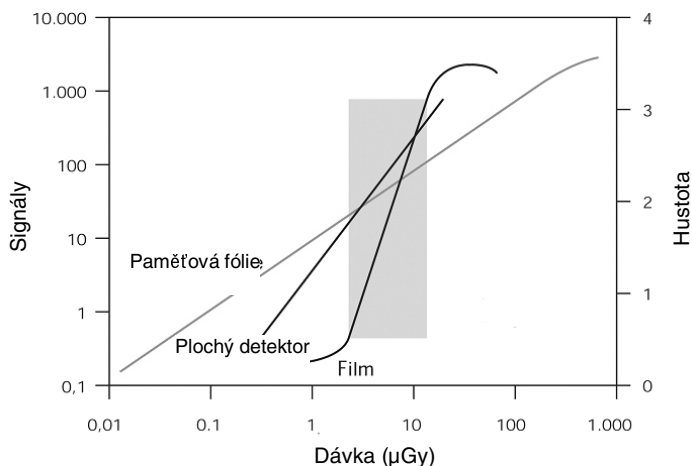
3. Teoretické srovnání systémů

V předchozích odstavcích byly definovány parametry nutné pro práci s digitálními radiografickými systémy a snímků z nich. Pro orientaci uvádí Tabulka 1 běžné hodnoty systémů používaných v digitální radiografii.

Tabulka 1 Běžné parametry záznamových systémů pro rentgenování

Vlastnosti	Filmy	Systémy paměťových fólií	Ploché detektory
Místní rozlišení	10 – 50 μm	40 – 150 μm	50 – 400 μm
SNR	50 - 250	100 – 250	250 – 2000
Kontrast	256:1	>4000:1	>4000:1

Je nutné zmínit, že výsledek SNR u plochých detektorů je do značné míry způsoben i možností použití průměrování více snímků během měření. Metody zpracování signálů budou probírány v následujícím odstavci. Další významný parametr pro porovnání systému je linearita a ta je zobrazena na Obr. 4.



Obr.4 Srovnání linearity různých systémů pro záznam rentgenového záření (zdroj:měření na systémech GE Measurement&ControlSolutions)

Obr. 4 jasně ukazuje, že paměťové fólie poskytují v současné době optimální výsledky v širokém spektru energií.

3.1 Klasifikace systémů na paměťové fólie

Existují dva hlavní parametry dle, kterých se dělí systémy paměťových folií, a to místní rozlišení a odstup signál šum. Historicky se vyráběly systémy – skenery s místním rozlišením do 100 μm . Tomuto rozlišení odpovídá průměr paprsku vyčítajícího z paměťové fólie 30 μm . Systémy, které mají rozlišení vyšší, než je 100 μm , jsou označovány zkratkou HD (HighDefinition), tedy vysoké rozlišení. Skenery, které mají rozlišení vyšší, než 50 μm jsou označovány jako HD+. Druhým významným parametrem pro vlastní vyhodnocení snímků je hodnota odstupu signálu od šumu SNR, jak to bylo popsáno v odstavci 2.4. Tento parametr závisí nejen na elektronice skeneru ale ve velké míře vlastními paměťovými fóliemi. Dle odstupu signálu od šumu jsou tyto systémy rozděleny v normě EN 584-1 a v Tabulce 2.

Tabulka 2 Klasifikace CR (ComputedRadiography) -systémů napaměťové fólie dle EN 584-1

Klasifikace systému	Minimální SNR _n
IP 1/Y	130
IP 2/Y	117
IP 3/Y	78
IP 4/Y	65
IP 5/Y	52
IP 6/Y	43

3.2 Klasifikace systémů na bázi plochých detektorů

Problematika systému na bázi plochých detektorů pracuje s odlišným postupem práce. S místní rozlišením a odstupem signálu od šumu případně kontrastu od šumu se pracuje podobným způsobem jako u paměťových folií. Norma EN 13068-3 navíc definuje parametry neostrosti podle, kterých lze tyto systémy srovnávat. Minimální parametry, kterých musí dosáhnout ploché detektory při expozici 100 kV a použití 6 mm stínící ocelové desky jsou v Tabulce 3.

Tabulka 3 Klasifikace digitálních radiografických systémů využívajících ploché detektory dle EN 13068-3

Parametry	Typ systému		
	SC 1	SC 2	SC 3
Neostrost detektoru (mm)	0,4	0,5	0,6
Zkreslení (%)	5	10	20
Homogenita (%)	10	20	30

Dalším významným parametrem u plochých detektorů jsou vadné pixely. Jelikož je existence vadných bodů považována za vlastnost plochého detektoru a ne za vadu, tak je prováděna kalibrace detektoru za účelem potlačení vadných bodů.

První podmínkou dle ASTM 2597 je, aby expoziční dávka při kalibraci byla 2x větší (mA, min.) než při finální kontrole. Pokud se změní expoziční podmínky kontroly, tak se musí kalibrovat panel znovu. Špatné body jsou rozděleny do 7 skupin a podle dané skupiny se s nimi i zachází a to vše dle normy ASTM 2597. Pixely-body se dělí na mrtvé body, nad míru reagující, reagující pod míru, zašumělé body, nestandardně reagující body, body reagující zpožděné a body kde všech 8 sousedních bodů je špatných. Pokud je sousedních dobrých bodů 4 a méně, pak se skupina takových bodů nazývá se taková skupina shluk vadných bodů. Dle normy je nutné používat jen detektory bez CKP (cluster kernel pixels / shluků vadných bodů) v oblasti zájmu. Vadné body a především shluky vadných bodů musí být dokumentovány, aby byly k dispozici jako dokumentace ke kontrole. Z důvodu existence vadných bodů a i šumu je nutné definovat přípustné vady pro detekci vad, které jsou stejné nebo větší než 3x3 body u jednotlivých bodů či rozměru 2x5 bodů u linek. V každém případě se ekvivalentně započítává geometrické zvětšení. Zároveň minimální hodnota zvětšení pro místní rozlišení a průměr ohniska musí být dle vztahu 2.5.

$$M_{\min} = \frac{4.25 \cdot SR_b}{d} \quad (2.5)$$

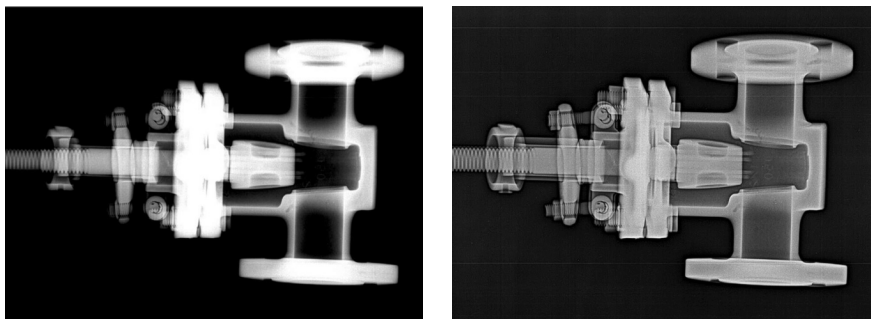
Po identifikaci vadných bodů během kalibrace je vytvořena mapa vadných bodů. Na základě této mapy jsou body korigovány pomocí prokládání a nastavení dílčích zesílení pro jednotlivé body, aby vadnými body nebyla snížena pravděpodobnost detekce vad ve zkoumaném materiálu. Vlastní postup korekce vad musí obsahovat každý software dodávaný s plochým detektorem.

4. Digitální zpracování signálů a obrazů

Možnost dodatečného zpracování snímků za účelem zvýšení kontrastu ve snímku je jednou z hlavních deviz digitálních radiografických systémů. První krok ve zpracování snímku tvoří jejich uložení v otevřeném formátu, který dovoluje rekonstruovat veškerou historii změn snímku a zároveň nemůže maskovat možnou vadu v materiálu. Pro tento účel se používá bezztrátový formát ukládání dat DICONDE odvozený od lékařského standartu DICOM.

Metody zpracování obrazů můžeme rozdělit například podle počtu snímků, se kterými pracují. Ploché detektory mají tu výhodu, že dovolují sekvenční snímání více snímků z jednoho místa. Následně lze použít tyto snímky k potlačení rušivých signálů, které mají nulovou střední hodnotu. Tato metoda potlačování šumu se nazývá průměrování. Nesprávně se často uvádí pojem „integrace“. Integraci můžeme definovat jako proces slučování či narůstání. Bez použití normování, které je součástí průměrování by došlo při použití více snímků k saturaci záznamu.

Druhou skupinu metod zpracování obrazů tvoří algoritmy pracující s jedním snímkem. Nejběžnější metodu úpravy tvoří ekvalizace histogramu. Pomocí ekvalizace se programově přenastaví jednotlivé jasové úrovně v obrazu tak aby došlo ke zvýšení kontrastu u zkoumané části obrazu. Protipól této relativně jednoduché metody tvoří oblast digitálních filtrů. Díky matematické funkci dojde k rozložení snímku na dílčí koeficienty, které respektují jednotlivé složky v obraze. Filtrací dojde k potlačení neužitečných složek a po zpětné rekonstrukci získáme snímek, kterým má větší kontrast v zkoumaných částech prozařovaného objektu. Výsledek takovéto filtrace je prezentován na Obr. 5.



*Obr.5 Srovnání nefiltrovaného obrazu vlevo a filtrovaného vpravo
(zdroj: měření na systémech GE Measurement&ControlSolutions)*

5. Závěr

V rámci tohoto článku byly diskutovány možnosti digitální radiografie a to ve světle Evropských norem EN 584, EN 13 068, EN 17 636 a americké normy ASTM 2597. Kvalifikace personálu je dle EN 473.

Při sumarizaci detailů ohledně vlastních systémů označíme ploché detektory rentgenového záření jako vhodnou náhradu převaděčů obrazu a to především pro hromadnou kontrolu a její automatizaci. Je možné touto technologií výrazně snížit hodnotu šumu díky průměrování obrazu z více snímků. Další výhodou je, že snímky jsou k dispozici bezprostředně po expozici. Je možné celý systém ovládat na dálku. Mezi hlavní nevýhody patří pevná stavba detektoru, omezené rozměry detektorů. Omezením plochým detektorů je omezení na maximální napětí pro expozici.

Systémy paměťových fólií označované jako CR jsou ideální náhradou klasických filmů kde v porovnání s plochými detektory dovolují jednoduchou manipulaci v těžko přístupných místech. Paměťové fólie dovolují v porovnání s plochými detektory využít i vysokých napětí pro expozici radiogramu, u kterých ploché detektory selhávají. U paměťových fólií nedochází k degradaci paměťového zařízení opakovanými expozicemi. Ve výsledku tedy při zavedení digitální radiografie pomocí paměťových fólií nedochází ke změně pracovního postupu a je možné využít všech výhod včetně digitálního zpracování obrazu. Kvalita obrazu u digitálních systémů závisí především na místním rozlišení, kontrastu, šumu a dynamice ve kterých v současné době lépe vycházejí paměťové fólie.

Poděkování

Autoři by chtěli poděkovat za poskytnutou techniku a materiály firmě TESTIMA, zástupce GE Measurement&ControlSolutions a Dürr NDT, výrobců systému pro digitální radiografii.



DEFEKTOSKOPIE BETONOVÝCH DÍLCŮ POMOCÍ NELINEÁRNÍ VLNOVĚ MODULAČNÍ SPEKTROSKOPIE S VYUŽITÍM 3D SKENERU

DETECTION OF DEFECTS IN CONCRETE SAMPLES BY NONLINEAR WAVE MODULATION SPECTROSCOPY WITH 3D SCANNER

Jan HETTLER, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.

hettljan@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

Nelineární vlnově modulační ultrazvuková spektroskopie (NWMS) je jednou z dynamicky se rozvíjejících metod spadajících do oblasti nelineární spektroskopie elastických vln. Oproti konvenčním ultrazvukovým metodám přináší vyšší citlivost a umožňuje zkoušet i materiálově a tvarově složitější tělesa. Tento příspěvek se zabývá návrhem a realizací experimentu využívajícího metodu NWMS pro hodnocení poškození a lokalizaci defektních oblastí v betonových dílcích pomocí ultrazvukového 3D skeneru. Pozornost je věnována především generování intermodulačních frekvencí jako indikátoru nelinearity a poškození v závislosti na poloze a amplitudě buzení tělesa.

Klíčová slova: NDT, nelineární ultrazvuková spektroskopie, ultrazvukové skenování, beton

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR v rámci grantu číslo GAČR 104/10/1430

Abstract

Nonlinear Wave Modulation ultrasonic Spectroscopy (NWMS) is one of the new perspective methods in ultrasonic testing. It belongs to the group of the methods called Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS). These methods offer the better sensitivity, robustness and allow us to inspect more complex materials of different complicated shapes. Presented work deals with the design and realization of the experiment using NWMS for the damage evaluation and damage zone localization in larger concrete samples. The 3D ultrasonic scanner is used as a motion platform for this experiment. A special attention is paid to the generation of the intermodulation frequency components as a sign of a nonlinearity and damage depending on the position and amplitude of the ultrasound excitation.

Key words: NDT, nonlinear ultrasonic spectroscopy, ultrasonic scanning, concrete

Acknowledgement: This work was supported by the Grant Agency of the Czech Republic under grant no. GACR 104/10/1430



VZDÁLENÉ MONITOROVÁNÍ AE - PROSTŘEDEK VČASNÉHO VAROVÁNÍ PŘED KOLAPSEM KONSTRUKCE

REMOTE AE MONITORING - A TOOL FOR EARLY WARNING OF STRUCTURE COLLAPSE

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Milan CHLADA, Josef KROFTA

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i.

zp@it.cas.cz

Abstrakt

Monitorování akustické emise (AE) jako součást SHM systému namáhané konstrukce umožňuje detekci výskytu rozvíjejících se defektů a jejich dostatečně přesnou lokalizaci přímo v reálném čase. Včasně varování na základě analýzy emisní aktivity a hodnocení jejich zdrojů může často zabránit havárii sledované konstrukce ať již v důsledku náhlého lomu či plastického kolapsu některé důležité součásti. V příspěvku jsou diskutovány dva modelové případy dokládající význam a praktické možnosti včasného varování před blížícím se kolapsem na základě AE. V prvním případě byla cyklicky namáhaná, 9 snímači AE osazená část nosné pásnice křídla letounu, s umělou zárodečnou trhlinou pod jedním nýtem. Snímače byly připojeny k analyzátoru AE DAKEL-XEDO. Při monitorování AE ze vzdálenosti 200 km od místa zkoušky, realizovaném prostřednictvím internetového propojení s řídicím počítačem analyzátoru, byla algoritmem neuronových sítí na vzdáleném počítači lokalizována další kritická vada, odlišná od původní trhliny. Tato skrytá trhlina byla na základě varování opticky odhalena až více než týden (cca 180000 cyklů) poté, co byl její růst signalizován AE. Únavová zkouška byla v důsledku této neočekávané závady přerušena a testovaný díl musel být opraven. Vzdálené monitorování a lokalizace zdroje AE při vzniku a růstu nové trhliny se uskutečnilo pomocí internetové služby "LogMeIn", která umožňuje snadný a bezpečný vzdálený přístup k počítači prostřednictvím webového prohlížeče odkudkoli. Bezpečnost přenášených údajů zajišťuje 256-bitové SSL šifrování, podpora RSA SecurID a duální ověření uživatele. Reakce analyzátoru AE na vzdálené řízení je při přenosové rychlosti 100 Mbit/s prakticky okamžitá a ukázalo se, že při propojení více analyzátorů AE lokální sítí, lze prostřednictvím vzdálené obsluhy vyhodnocovat kritičnost emisních zdrojů při několika současně probíhajících testech různých konstrukčních dílů najednou. Podobné zkušenosti byly získány i ve druhém případě, při zatěžovací zkoušce modelového střešního nosníku, osazeného 6 snímači AE. Při konstantní rychlosti nárůstu zatěžné síly (simulace padajícího sněhu na střešní konstrukci budovy) upozornil prudký nárůst emisní aktivity na blížící se nebezpečí plastického kolapsu a zastavil zkoušku s dostatečně velkým předstihem před další etapou zatěžování, končící náhlou celkovou ztrátou stability modelové střešní konstrukce. Výsledky obou diskutovaných zkoušek ilustrují význam kontinuálního monitorování AE jako součást SHM systémů.

Klíčová slova: SHM, NDT, akustická emise, vzdálené monitorování prostřednictvím internetu, lokalizace defektů.

Poděkování: Práce vznikla za podpory grantů MPO ČR č. FR-TI1/274 a FR-TI1/198

Abstract

Acoustic emission (AE) as a part of a Structural Health Monitoring (SHM) system of stressed structure enables detection of developing defects and their relatively precise localization in real time. Early warning based on AE activity analysis and AE sources evaluation can often prevent breakdown of monitored structure, caused as by sudden fracture as plastic collapse of some important structure part. This paper deals with two model tests, supporting significance and practical potential of early warning based on remote AE monitoring. The first case was cyclic loading of an aircraft wing flange equipped with 9 AE sensors connected to DAL-XEDO AE analyzer. The tested flange was artificially pre-cracked at one rivet hole. AE was remotely monitored at a place 200 km far from the test. During the fatigue test, an additional crack different from the original one has been localized by AE with the use of an artificial neural network algorithm. This second crack was optically disclosed after AE warning a week later (after approx. 180000 cycles). The fatigue test was then stopped and tested part was repaired. The remote AE monitoring was realized with the aid of an Internet service "LogMeIn", which allows easy and secure remote access to the AE analyzer control computer through the web browser from anywhere. Data transfer security is provided with 256-bit SSL encryption, supported by RSA SecurID and dual user authentication. AE analyzer reaction on remote control at 100Mbit transfer rate is practically instantaneous. It has been shown, that LAN interconnection of several AE analyzers allows for critical AE sources evaluation during more simultaneously running tests of various structural parts. Similar experiences were acquired also in the second case, during the tests of model roof beam equipped by 6 AE sensors, and loaded by constantly growing force, which simulated the snow dropping on a building roof. The sharp AE activity growth signalized forthcoming plastic collapse and stopped the beam loading test early enough before the next loading period resulted in sudden gross stability collapse of the whole structure. Results of both tests supported importance of continuous AE monitoring in SHM systems.

Keywords: SHM, NDT, acoustic emission, remote monitoring through Internet, defect localization.

Acknowledgements: This work is supported by the Czech Ministry for Industry and Trade under projects No. FR-TI1/274 and FR-TI1/198.



APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE PŘI KONTINUÁLNÍM MONITOROVÁNÍ STAVU A ROZVOJE DEFEKTŮ NA KULOVÝCH ZÁSObNÍCÍCH ČPAVKU V LOVOCHEMII A.S. LOVOSICE

František Žemlička, Emil Vařák - Preditest s.r.o. Praha
Antonín Galle, Jiří Křehnáč - Lovochemie a.s., Lovosice

Metoda akustické emise se v posledních letech stala v mnoha firmách z oblasti energetického a chemického průmyslu standardní NDT metodou pro zjišťování stavu tlakových zařízení a konstrukcí po dlouhodobém provozu. Její nasazení při klasických takových zkouškách, při přechodových režimech nebo monitorování při provozních parametrech spolu s aplikací klasických NDT metod přispívá ke komplexnějšímu zhodnocení stavu zařízení a zvyšuje bezpečnost provozu těchto zařízení

Tento referát popisuje praktické zkušenosti a výsledky z dlouhodobého provozního monitorování akustické emise na dvou kulových zásobnících čpavku v Lovochemii a.s. Lovosice. K rozhodnutí nasadit monitorovací systém akustické emise na kulové zásobníky vedly provozovatele opakované problémy s výskytem korozních trhlin ve svarových spojích, zjištěné při pravidelných NDT kontrolách při odstávkách pomocí MT a UT metody. Svoji roli zde sehrál i tlak dozorových orgánů, které podmiňovaly vydání souhlasného stanoviska s dalším provozem kulových zásobníků přijetím řady opatření pro zajištění bezpečného provozu. Jedním z těchto opatření bylo i nasazení kontinuálního monitorování akustické emise na kritická místa na obou kulových zásobnících. Na základě průběžných výsledků AE a sledování rozvoje emisní aktivity v lokalizovaných emisních zdrojích, doplněné o cílené NDT kontroly (MMM a UT) těchto emisních zdrojů, které potvrdily výskyt nepřipustných defektů, byly oba kulové zásobníky postupně, ještě před plánovanou odstávkou, řízeným způsobem odstaveny z provozu.

Název	NDE for Safety / Defektoskopie 2011
	41. mezinárodní konference – sborník příspěvků
Editor	Pavel Mazal, Luboš Pazdera
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT
Tisk	BETIS s.r.o. Praha
Vyšlo	listopad 2011
Vydání	první
Náklad	200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-4358-7



Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Non-destructive Testing



**zve všechny defektoskopické odborníky i zájemce
na nejvýznamnější událost roku 2012 z oblasti
nedestruktivního zkoušení v České republice**

DEFEKTOSKOPIE 2012

NDE FOR SAFETY 2011

42. mezinárodní konferenci a výstavu NDT techniky
42nd International Conference and NDT Technique Exposition

30. 10.–1. 11. 2012
October 30 – November 1, 2012
Kongres Hotel JEZERKA, Seč



Konference bude tradičně zaměřena zejména na problematiku nedestruktivního zkoušení materiálů a konstrukcí v různých oborech technické činnosti. Tato akce bude významnou příležitostí k setkání všech, kteří se zajímají o výzkum, vývoj, praktické aplikace i vzdělávání a normalizaci v tomto oboru. Výrobčům a dodavatelům zařízení i poskytovatelům služeb zde bude dána příležitost pro prezentaci tradičních i nejnovějších produktů široké odborné veřejnosti.



11th ECNDT
PRAGUE 2014
October 6 - 10, 2014
www.ecndt2014.com
11th European Conference on NDT