

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2017

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

47. mezinárodní konference a výstava NDT techniky
47th International Conference and Exhibition



7.–9. listopad 2017
November 7–9, 2017

Congres Centre Chomutov, Czech Republic

sponzoři / sponsors

OLYMPUS®

Your Vision, Our Future



ENERGOSERVIS



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



DEFEKTOSKOPIE 2017

NDE for Safety 2017

47th International Conference and NDT Exhibition
47. mezinárodní konference a výstava NDT techniky

PROCEEDINGS

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

November 7 - 9, 2017
7. až 9. listopad 2017

Chomutov, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera, Pavel Mazal and Marta Kořenská

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

Scientific Committee / Reviewers:

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

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal and Marta Kořenská

Copyright © 2017
Czech Society for Nondestructive Testing
All rights reserved

Published by:

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

and

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

printed version - ISBN 978-80-214-5554-2

OBSAH / CONTENTS

Zbyněk BUNDA, Josef VOLÁK, Václav MENTL NEDESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ SOUČÁSTÍ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ POMOCÍ METODY METALLOGRAFICKÝCH REPLIK NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF POWER PLANT PARTS USING METHOD OF METALLOGRAPHIC REPLICAS	1
Daniel CEJNAR, Jiří SVOBODA, Aleš POLZER TESTOVÁNÍ POLYMERŮ OPTICKOU AKTIVNÍ TERMOGRAFIÍ POLYMER TESTING BY OPTIC ACTIVE THERMOGRAPHY	9
Jan CRHA, Dalibor SOLNAŘ ANALÝZA ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE	21
Jan CRHA, Jan ADÁMEK AKTUÁLNÍ PRŮMYSLOVÉ APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE	29
Richard DVORÁK NEDESTRUKTIVNÍ POSOUZENÍ TEPLOTNĚ DEGRADOVANÉHO PROSTÉHO BETONU S RŮZNÝM OBSAHEM HRUBÉHO KAMENIVA POMOCÍ METODY IMPACT-ECHO NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF THERMALLY DEGRADED PLAIN CONCRETE WITH DIFFERENT CONTENT OF COARSE AGGREGATE BY IMPACT-ECHO METHOD	39
Grigory DYMKIN, Alexey SHELUKHIN ACCEPTANCE ULTRASONIC TESTING OF RAILS. REGULATORY REQUIREMENTS AND PRACTICES	49
Lukáš FAIT ZKOUŠENÍ SVARU OBALOVÉHO SOUBORU ŠKODA 1000/19 ULTRAZVUKEM ULTRASONIC TESTING OF THE CASK BODY SKODA 1000/19	55
Jaroslav FIALA, Michal KOLEGA, Štěpán JÍRA, Pavel MAZAL, František VLAŠIC, Vendula KRATOCHVÍLOVÁ SLEDOVÁNÍ STRUKTURNÍCH ZMĚN, VYVOLÁVANÝCH CYKlickÝM ZATĚŽOVÁNÍM OCELI 15CH2NMFA, POMOCÍ RENTGENOVÉ DIFRAKCE A MĚŘENÍ KOERCITIVNÍ SÍLY MONITORING STRUCTURAL CHANGES PRODUCED BY CYCLIC STRAIN OF STEEL 15CH2NMFA, WITH USE OF X-RAY DIFFRACTION AND COERCIVE FORCE MEASUREMENT	63

Jaroslav FIALA	71
RENTGENOGRAFICKÁ MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ X-RAY DIFFRACTION MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES	
Daniel FREJVALD	83
MĚŘENÍ A VLIV VELIKOSTI OHNISKA RENTGENOVÝCH ZAŘÍZENÍ NA PROCES DIGITÁLNÍ RADIOGRAFIE MEASUREMENT AND EFFECT OF X-RAY FOCAL SIZE ON THE PROCESS OF DIGITAL RADIOGRAPHY	
Michaela HODULÁKOVÁ, Luboš PAZDERA, Libor TOPOLÁŘ, Oto ROTH, Peter OROLIN, Karel MIKULÁŠEK	91
PILOTNÍ STUDIE CHOVÁNÍ CYKLICKY ZATĚŽOVANÉHO BETONOVÉHO NOSNÍKU METODOU AKUSTICKÉ EMISE THE PILOT STUDY OF THE BEHAVIOUR OF THE CYCLIC LOADED CONCRETE BEAM BY ACOUSTIC EMISSION METHOD	
Michal JANKŮ, Josef STRYK	97
METODIKA PRO TERMOGRAFICKÉ MĚŘENÍ OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY METHODOLOGY FOR THERMOGRAPHIC MEASUREMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS	
M. KIEL, R. STEINHAUSEN, A. BODI, K. ROSTKOWSKI	109
SINGLE-SIDED CONTACT-FREE ULTRASONIC TESTING – A NEW AIR- COUPLED INSPECTION TECHNOLOGY FOR WELD AND BOND TESTING	
Stefan KIERSPEL, Helge RAST	117
HIGH RESOLUTION PHASED ARRAY IMAGING USING THE TOTAL FOCUSING METHOD	
Bohuslav KOLÁŘ	127
DIGITÁLNÍ PRŮMYSLOVÁ RADIOGRAFIE – UVEDENÍ TECHNIKY DO PROCESU KONTROL DIGITAL INDUSTRIAL RADIOGRAPHY - APPLICATION OF THE TECHNIQUE TO THE TESTING PROCESS	
Bernard KOPEC	135
ISAAK NEWTON A JEHO NEPŘÍMÝ VLIV PRO OBJASNĚNÍ FYZIKÁLNÍCH ZÁKLADŮ NDT ISAAC NEWTON AND HIS INDIRECT INFLUENCE TO CLARIFY THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF NDT	

Bernard KOPEC	141
INFORMACE O KONFERENCI CERTIFIKACE 2017, VÍDEŇ, 6.-7. 6. 2017 CONFERENCE INFORMATION CERTIFICATION 2017, VIENNA, 6.-7. 6. 2017	
Vendula KRATOCHVÍLOVÁ, František VLAŠIC, Pavel MAZAL	143
IDENTIFIKACE ROZVOJE ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ VE SLITINÁCH CU VYROBENÝCH METODOU SLM IDENTIFICATION OF FATIGUE DAMAGE DEVELOPEMENT IN CU ALLOYS PRODUCED BY SLM TECHNOLOGY	
Houssam MAHMOUD, Frantisek VLASIC, Pavel MAZAL, Libor NOHAL, Vendula KRATOCHVILOVA	151
ANALÝZA POŠKOZENÍ PNEUMATICKÝCH VÁLCŮ METODOU AKUSTICKÉ EMISE ANALYSIS OF PNEUMATIC CYLINDER DAMAGE BY ACOUSTIC EMISSION METHOD	
Michal MOLČAN	163
KONSTRUKČNÍ NÁVRH ULTRAZVUKOVÉ PŘEDSÁDKY S MĚNITELNOU GEOMETRIÍ ENGINEERING DESIGN OF ULTRASONIC WEDGE WITH ADJUSTABLE INCIDENCE ANGLE	
Lukáš MUZIKA, Michal ŠVANTNER	171
TERMOGRAFICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ THERMOGRAPHIC NONDESTRUCTIVE TESTING OF SOLAR CELLS	
Josef NEUGEBAUER	181
DEMAGNETIZACE STROJNÍCH SOUČÁSTI – PROBLÉM DODAVATELŮ, I ODBĚRATELŮ DEMAGNETIZATION OF MACHINE PARTS - PROBLEM OF SUPPLIERS AND CUSTOMERS	
Josef NEUGEBAUER	189
ZKUŠEBNÍ KOMISAŘ PERSONÁLU NDT VERSUS NORMA ČSN EN ISO 9712 EXAMINER PERSONNEL NDT VERSUS STANDARD ISO 9712	
Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Michaela HODULAKOVA	195
METODA AKUSTICKÉ EMISE APLIKOVANÁ NA AKTIVITU DŘEVOKAZNÉHO HMYZU ACOUSTIC EMISSION METHOD APPLIED TO THE ACTIVITY OF WOOD BORING INSECTS	

Aleš PETRŮ, Bohuslav KOLÁŘ, Tomáš ZAVADIL	201
DODRŽENÍ MINIMÁLNÍ POŽADOVANÉ RADIOGRAFICKÁ JAKOST PŘI ZKOUŠENÍ SVARŮ TRUBEK MALÝCH PRŮMĚRŮ DLE NORMY ČSN EN ISO 17636-1	
MINIMAL REQUIRED RADIOGRAPHIC QUALITY WHILE PERFORMING TESTING OF WELDS ON SMALL DIAMETER PIPES ACC. TO ČSN EN ISO 17636-1	
Alexandr POPOV	209
VYHODNOCENÍ VELIKOSTI VAD PŘI ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM PODLE AMPLITUDY SIGNÁLU S POUŽITÍM KŘIVEK DAC A AVG/DGS DIAGRAMŮ	
EVALUATION OF THE DEFECT SIZE IN THE ULTRASONIC INSPECTION ACCORDING TO THE AMPLITUDE OF SIGNAL WAVEFORM USING DAC CURVES AND AVG/DGS DIAGRAMS	
Dana PROCHÁZKOVÁ, Václav SVOBODA	223
ROLE DEFEKTOSKOPICKÝCH METOD PŘI IDENTIFIKACI RIZIK V PRŮMYSLU	
ROLE OF METHODS INVESTIGATING THE DEFECTS AT RISKS IDENTIFICATION AT INDUSTRY	
Zdeněk SKÁLA, Jan VÍT, Jindřich FORMAN, Lukáš STAINER	233
PROJEKT CANUT A AUTOMATIZACE NDT	
CANUT PROJECT AND AUTOMATION OF NDT	
Břetislav SKRBEK	241
AKUSTICKÁ A MAGNETICKÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE VYBRANÝCH NEŽELEZNÝCH SLITIN	
ACOUSTIC AND MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY CHOICE NONFERROUS ALLOYS	
Jaroslav ŠNAJBERK	251
POSOUZENÍ PARAMETRŮ A PODMÍNEK MAJÍCÍCH VLIV NA PROCES ODMAGNETOVÁNÍ	
REVIEW OF PARAMETERS AND CONDITIONS HAVING INFLUENCE ON DEMAGNETIZING PROCESS	
Jiří SVOBODA	277
INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE V NDT	
INFRARED THERMOGRAPHY IN NDT	

Václav SVOBODA, Eva SVOBODOVÁ 289
APLIKACE MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU PŘI ÚNAVOVÉM
POŠKOZENÍ ATYPICKÝCH VZORKŮ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ
APPLICATION OF METAL MAGNETIC MEMORY METHOD (MMM) DURING
FATIGUE DAMAGE OF ATYPICAL METAL SPECIMENS

Václav SVOBODA, Ľubomír GAJDOŠ, František ŽEMLIČKA 293
DETEKCE DEFECTŮ - VMÁČKLIN V POTRUBÍ PLYNOVODŮ
V KOMBINACI S DALŠÍMI TYPY POŠKOZENÍ
DETECTION OF DENTS IN PIPELINES IN COMBINATION WITH
ANOTHER DEFECTS

**Jaroslav ZAČAL, Michal ŠUSTR, Petr DOSTÁL, Michal ČERNÝ,
Martin BRABEC** 297
ANALÝZA PORUŠOVÁNÍ KARBONOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ
DAMAGE ANALYSIS OF CARBON COMPOSITE MATERIALS

Zinaida ZAKHARENKO, Valentina ZAKHARENKO 309
USE OF ELASTIC WAVES IN DEVELOPMENT AND DIAGNOSTICS
COATINGS AND CONNECTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

Tomáš ZAVADIL 317
ASME ANDE-1 – ZCELA NOVÝ PŘÍSTUP KE KVALIFIKACI PERSONÁLU
ASME ANDE-1 – COMPLETELY NEW APPROACH TO PERSONNEL
QUALIFICATION

PŘÍSPĚVKY DODANÉ PO TERMÍNU / PAPERS AFTER DEADLINE

Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ 331
OPTIMALIZACE VÝBĚRU SENZORŮ PRO LOKALIZACI ZDROJŮ
AKUSTICKÉ EMISE
OPTIMIZATION OF SENSOR SELECTION FOR ACOUSTIC EMISSION
SOURCE LOCATION

Zdeněk PŘEVOROVSKY, Josef KROFTA, Jan KOBER, Milan CHLADA 343
LOKALIZACE ZDROJŮ SPOJITE AKUSTICKE EMISE POMOCI ČASOVE
REVERZACE SIGNALŮ
LOCALIZATION OF CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION SOURCES
USING TIME REVERSAL PROCEDURE

ABSTRAKTY / ABSTRACT

- Marie BOHÁČOVÁ** 328
ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VÍŘIVÝMI PROUDY
EDDY CURRENT TESTING OF COMPOSITE MATERIALS
- Martin FAJKUS** 330
LINEÁRNÍ URYCHLOVAČ JAKO ZDROJ ZÁŘENÍ
PŘI PROZAŘOVÁNÍ SVARŮ A ODLITKŮ
- German MARKARJANC** 341
OPTIMALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ NA
ZÁKLADĚ SIMULACE PROUDĚNÍ
OPTIMIZATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING DEVICES BASED ON
FLOW SIMULATION
- German MARKARJANC** 342
SYSTÉM ŘÍZENÍ, IDENTIFIKACE A PROTOKOLOVÁNÍ ZKOUŠENÝCH
DÍLŮ NA PENETRAČNÍCH LINKÁCH
CONTROL SYSTEM, IDENTIFICATION AND REPORTING OF TESTED
PARTS ON PENETRATION LINES
- Václav SVOBODA, Ľubomír GAJDOŠ, František ŽEMLIČKA** 356
HODNOCENÍ ZÁVAŽNOSTI DEFECTŮ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ
A#LAKOVÝCH NÁDOB
- Yuriy YAREMENKO** 357
HAZARD PICTOGRAMMS INTERPRETATION IN PENETRANT AND
MAGNETIC PARTICLES INSPECTION. HOW TO DECREASE CHEMICAL
IMPACT OF DETECTION MEDIA?

INDEX AUTORŮ / AUTHORS INDEX

Adámek J.	29	Nohál L.	151
Bodi A.	109	Orolin P.	91
Boháčová M.	328	Pazdera L.	91, 195
Brabec M.	297	Petrů A.	201
Bunda Z.	1	Polzer A.	9
Cejnar D.	9	Popov A.	209
Crha J.	21, 29	Procházková D.	223
Černý M.	297	Převorovsky Z.	331, 343
Dostál P.	297	Rast H.	117
Dvořák R.	39	Rostkowski K.	109
Dymkin G.	49	Roth O.	91
Fait L.	55	Shelukhin A.	49
Fajkus M.	330	Skála Z.	233
Fiala J.	63, 71	Skrbek B.	241
Forman J.	233	Solnař D.	21
Frejvald D.	83	Stainer L.	233
Gajdoš L.	293, 356	Steinhausen R.	109
Hoduláková M.	91, 195	Stryk J.	97
Chlada M.	331, 343	Svoboda J.	9, 277
Janků M.	97	Svoboda V.	223, 289, 293, 356
Jíra Š.	63	Svobodová E.	289
Kiel M.	109	Šnajberk J.	251
Kierspel S.	117	Šustr M.	297
Kober J.	343	Švantner M.	171
Kolář B.	127, 201	Topolář L.	91, 195
Kolega M.	63	Vít J.	233
Kopec B.	135, 141	Vlašic F.	63, 143, 151
Kratochvílová V.	63, 143, 151	Volak J.	1
Krofta J.	343	Yaremenko Y.	357
Mahmoud H.	151	Začal J.	297
Markarjanc G.	341, 342	Zakharenko V.	309
Mazal P.	63, 143, 151	Zakharenko Z.	309
Mikulášek K.	91	Zavadil T.	201, 317
Molčan M.	163	Žemlička F.	293, 356
Muzika L.	171		
Neugebauer J.	181, 189		

OLYMPUS®

Your Vision, Our Future



EPOCH® 6LT Přenosný ultrazvukový defektoskop

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

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

Jednoduchost použití: Ovládání menu přístroje otočným voličem palcem jedné ruky

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

Odolnost: Dle normy IP65/67 – drop test

EPOCH je registrovaná známka společnosti Olympus.

Scientific Solutions Division

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

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6 | Tel.: +420 221 985 211 |
info-industrial@olympus.cz | www.olympus.cz

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

PŘÍSPĚVKY / PAPERS

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

Poznámky / Notes



NEDESTRUKTIVNÍ HODNOCENÍ SOUČÁSTÍ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ POMOCÍ METODY METALOGRAFICKÝCH REPLIK

NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF POWER PLANT PARTS USING METHOD OF METALLOGRAPHIC REPLICAS

Zbyněk BUNDA*, Josef VOLÁK*, Václav MENTL*

*Regionální technologický institut, FST, ZČU, Univerzitní 8, Plzeň 306 14
Contact e-mail: bunda@rti.zcu.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá nedestruktivní metalografií, sahající do oblastí 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. Nachází se zde velké množství aplikací, kde je možné využít hodnocení materiálu využitím metod nedestruktivní metalografie. Součásti energetických zařízení jsou vystaveny extrémním podmínkám, díky kterým materiál degraduje. Ke zjištění míry degradace se hojně využívá metoda replik. Na základě výsledků je možné toto poškození identifikovat a následně učinit nápravná opatření, která zabrání možným haváriím energetických zařízení. Tento článek popisuje princip hodnocení součástí pomocí metalografických replik a ukazuje jejich možné využití v reálných aplikacích.

Klíčová slova: nedestruktivní metalografie, repliky, kontrola mikrostruktury

Abstract

The article deals with non-destructive metallography. This method is useful for its speed and simplicity. Its range of applications is very wide. This contribution discusses mainly the utilization of this promising method in the field of power plant components e.g. boiler tubes, steam piping, pressure vessels, turbine rotors and also stator casings. There is a large number of applications where it is possible to use the evaluation of the material by using non-destructive metallography. Power plant parts are exposed to extreme conditions, thanks to which the material degrades. The replica method is useful for the determination of the degradation degree of the material. On the basis of the results of this method the damage extent of material can be identified and corrective measures can then be taken, which prevents possible accidents of power plant parts. This article describes the principle of components evaluation by using metallographic replicas and shows their possible use in real applications.

Key words: nondestructive metallography, replicas, microstructure inspection

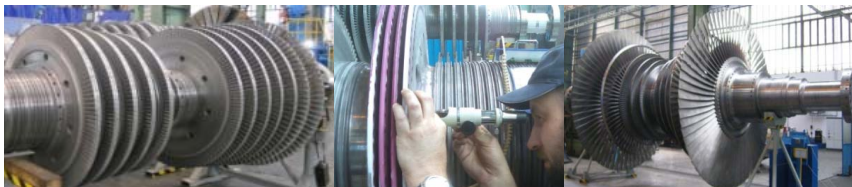
1. Úvod

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 bohužel v převážné většině odvíjí od množství finančních prostředků provozovatele zařízení.

2. Metoda replik

Tato metoda se nachází na rozhraní nedestruktivních až semidestruktivních zkoušek. Toto tvrzení se opírá o fakt, že je potřeba před hodnocením povrch součástí vhodným způsobem připravit, a to 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 u výrobků, jako jsou tělesa turbín, parovodní potrubí nebo parovodní ventily nehraje ve své podstatě žádnou roli. Touto metodou se hodnotí struktura a nehomogenity, které se nacházejí v hodnoceném materiálu. Po sejmutí repliky, se tento negativ následně analyzuje v laboratoři na metalografickém mikroskopu.

3. Příklady kontrolovaných dílů



Obr. 1 Rotor

Obr. 2 Kontrola mikrostruktury

Obr. 3 NT rotor

Fig.1 Rotor

Fig.2 Microstructure inspection

Fig. 3 Low pressure rotor

Kontrolu mikrostruktury je možné provést jak na discích rotorů a lopatkách parních turbín, viz obr. 1 až obr. 3, tak i na vnějších skříních (horní i spodní díl), viz obr 4 až obr. 6. Dále také na regulačních a rychlozávěrných ventilech, které jsou zobrazeny

na obr. 6 až 9. Při kontrole 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

Fig. 9 Steam valves

Běžně se provádí také kontrola svařovaných rotorů, potrubí i ventilů. Předmětem kontroly je základní materiál, svařový kov, přechodová oblast a tepelně ovlivněná zóna svařového spoje, viz obr 10 – 12).



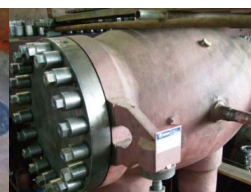
Obr. 10 Kontrola svaru ventilu

Fig. 10 Inspection of welds



Obr. 11 Detail svaru, ventilu

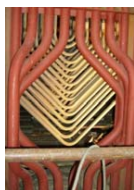
Fig. 11 Weld of the steam valve



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, což je ukázáno na obr. 15.



Obr. 13 Kotlové trubky, průřez

Fig. 13 Boiler pipes, inspection chamber



Obr. 14 Vnitřní kotlové trubky

Fig. 14 Inner boiler pipes



Obr. 15 Kontrola stěnového přehříváku s jštěním

Fig. 15 Inspection of the pipe with bely

Další příklady použití metody na konkrétních dílech jsou uvedeny na obr. 16 – 18. Na obr. 19 – 21 jsou uvedeny příklady 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 (aceton, líh) a osušením horkým vzduchem. Zkoumání struktury povrchu je možné po vhodné přípravě zahrnující broušení, leštění a 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. [1, 3]

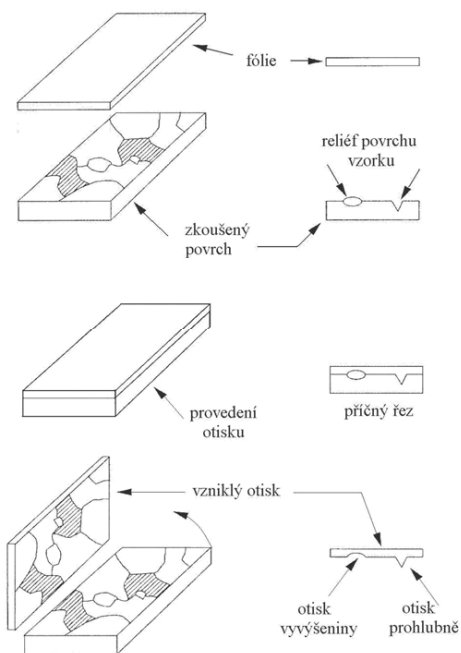
Při přípravě povrchu není nutný větší úběr materiálu o více než 0,2 mm. V mnoha případech je tento úběr výrazně menší. Během opracování je nutné se vyhnout nadměrnému zahřívání povrchu. Z tohoto důvodu nesmí být použita příliš velká přítlačná síla. Při jednotlivých po sobě jdoucích stupních opracování povrchu je třeba

kolmo měnit směr opracování součástí. Po každém kroku musí být z povrchu odstraněny zbytky po broušení.

5. Kontrola mikrostruktury

Kvůli maximální eliminaci možné oxidace či kontaminace kontrolovaného místa je nutné odebrat repliku (otisk) co možná nejrychleji. Otisk struktury se odebrá v souladu s návodem výrobce replik, který je součástí balení zkušebního setu. Tím vzniká otisk strukturního reliéfu do aktivní vrstvy záznamového média. Schématické znázornění principu zhotovení otisku je na obr. 19.

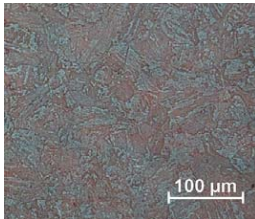
Takto provedený otisk je přenesen na metalografický světelný mikroskop (např. na transportním laboratorním sklíčku), kde lze repliku předběžně vyhodnotit přímo v provozních podmínkách. Podrobnější metalografická analýza včetně fotodokumentace se provádí na laboratorním invertovaném metalografickém mikroskopu, případně na elektronovém mikroskopu v laboratorních podmínkách.



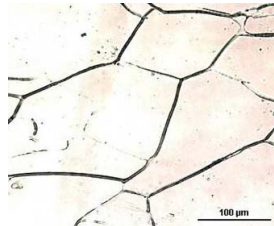
Obr. 19 Otisk strukturního reliéfu do aktivní vrstvy záznamového média [2]

Fig. 19 The imprint of structural relief to the active layer of the replica [2]

Pro zajištění korektních výsledků je vhodné, aby případnému opakovanému odebírání otisku ze stejného kontrolního místa předcházela znova celá procedura přípravy metalografického výbrusu. Mikrostrukturu hodnotíme buď přímo na místě za použití přenosného mikroskopu, nebo odebereme otisk mikrostruktury metodou replik a zkoumáme jej v laboratoři (např. obr. 19 až 21). Nejrychlejší metodou je v současné době vyfotografování mikrostruktury přenosným mikroskopem a následná analýza.



Obr. 20 Kotlová trubka
Fig. 20 Boiler tube



Obr. 21 Obruč generátoru
Fig. 21 Generator ring



Obr. 22 Přehřívák
Fig. 22 Over heater

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].

Struktura materiálu se hodnotí nejčastěji optickým metalografickým mikroskopem. Replika se pozoruje pod mikroskopem na laboratorním skle, nebo mezi dvěma laboratorními skly. Operátor stanovuje charakter a typ mikrostruktury kontrolovaného místa se zaměřením na:

- typ, tvar a velikost strukturálních útvarů a zrn
- obsah a rozložení přítomných fází
- typ, velikost a morfologie nekovových složek (grafit, vměstky apod.)
- charakter a tvar případných nečistot.

Dále provádí dokumentaci fotografováním. V případě hodnocení struktury za účelem zjištění degradace materiálu energetických zařízení vlivem poškození dlouhodobým provozem za vysokých teplot (tečení materiálu) se ke klasifikaci stavu užívá pětistupňová škála.

Pro hodnocení postupných strukturních změn, probíhajících v materiálu vlivem dlouhodobého působení vysokých teplot, lze pro uhlíkové a nízkolegované oceli užít šestibodovou klasifikační stupnici uvedenou v publikaci [2].

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 jednoduchost má tato perspektivní metoda do budoucnosti velký potenciál.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu LO1502 Rozvoj Regionálního technologického institutu podpořeného programem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy na podporu výzkumu, experimentálního vývoje a inovací Národní program udržitelnosti I („NPU I“).

The present contribution has been prepared under project LO1502 'Development of the Regional Technological Institute' under the auspices of the National Sustainability Programme I of the Ministry of Education of the Czech Republic aimed to support research, experimental development and innovation.

Literatura:

- [1] DIN 54150 Abdruckverfahren für die Oberflächenprüfung (Replica-Technik)
- [2] BUNDA, Z.: Vztah mikrostruktury a zbytkové životnosti dílů energetických zařízení, Disertační práce, ZČU v Plzni, Plzeň 2013.
- [3] ISO 3057:1998(E) Non-destructive testing – Metallographic replica techniques of surface examination.



TESTOVÁNÍ POLYMERŮ OPTICKOU AKTIVNÍ TERMOGRAFIÍ

POLYMER TESTING BY OPTIC ACTIVE THERMOGRAPHY

Daniel CEJNAR, Jiří SVOBODA, Aleš POLZER*

"TMV SS" spol. s r.o., *VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Contact e-mail: daniel.cejnar@tmvss.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá detekcí uměle vytvořených defektů v kompozitech s využitím aktivní optické termografie.

Testované defekty jsou dvojího druhu a to vnitřní, který byl vytvořen při výrobě vyříznutím oblasti ve vrstvě kompozitu, a povrchovým, který byl vytvořen vyfrézováním otvorů o daných průměrech a hloubkách do hotového kompozitu.

Pro testování bylo využito různých nastavení optické excitační jednotky (amplituda a tvar signálu, doba ozáření atd.) a termografické kamery (integrační čas, rozlišení detektoru, pozice kamery atd.).

Výstupem příspěvku je zhodnocení jednotlivých nastavení měřicí soustavy, porovnání termografických snímků s měřeným materiálem a zhodnocení využitelnosti metody v praxi.

Klíčová slova: *optická aktivní termografie, teplo, kompozity, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)*

Abstract

This paper is focused on detection artificially made defects in composite by active optic thermography.

Defects of two types were manufactured. First one was added during the creation of composite, small holes were cut in middle layer. Second defect were made after the process of creating composite. In more rough side of composite were drilled holes with specified diameter and depth.

For testing it was used several options of excitation unit, for example amplitude of signal, line of the signal or time of irradiation, and several options for camera for example integration time, detector resolution, position of the camera.

The outcome of this paper is evaluation of different approaches in data evaluation by active optic thermography, comparison of thermo graphic pictures and real material, and evaluation of its usefulness in real applications.

Key words: *active thermography technique – optical excitation, heat, composite, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)*

1. Úvod

Tento dokument navazuje na článek Infračervená Termografie v NDT sepsanou Ing. Jiřím Svobodou v tomto čísle, kde je popsán princip metody a teorie související s danou problematikou. V této technické zprávě je popsáno měření kompozitních materiálů, ve kterých byly uměle a plánovaně vytvořeny defekty. Tyto defekty se následně budou lokalizovat soustavou pro aktivní termografii.

2. Soustava pro aktivní termografii

Soustava pro LT (Lock-in Thermography) aktivní termografie se skládá ze čtyř základních komponent. Prvním je zdroj tepelné energie, která je dodávána testovacímu vzorku. Pro naše měření byly použity dvě halogenové lampy (EDP 04.02.0001 Halogen Lamp) o příkonu 2,5 kW každá. Lampy jsou dále vybaveny odrazivými kužely, které slouží k usměrnění záření a filtry BOROFLOAT 33 pro odfiltrování UV složky světla.

Druhou částí soustavy je OTvis modul. OTvis modul slouží k napájení IR kamery a jejího propojení s vyhodnocovacím počítačem a lampami pro možnosti triggrování, synchronizace a nastavování procesních parametrů.

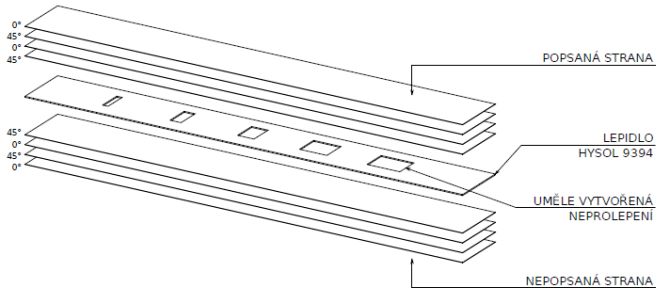
Třetí komponenta je infračervená kamera FLIR X6580 SC s chlazeným detektorem InSb pracující ve vlnových délkách 1,5–5,1 μm . Kamera má rozlišení detektoru 640 x 512 pixelů s roztečí pixelu 15 μm a s teplotní citlivostí nepřesahující 25 mK. Na kameře byl použit 50mm objektiv, který omezil rozsah detekovaných vlnových délek na 3–5 μm . Pro přenos dat byl využit CAMLINK.

Poslední částí pro fungující OTvis soustavu je počítač s nainstalovaným SW DisplayImg 6 professional. Minimální požadavky na počítač jsou operační systém Windows Vista a vyšší, RAM 4GB DDR3, CPU Core I5(3rd Gen.) a grafická karta Intel HD 4000.

3. Vzorky CFRP a GFRP

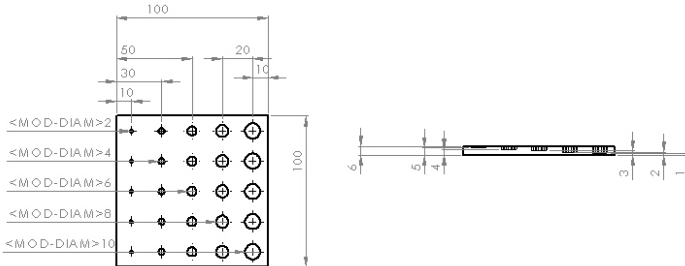
Aktivní termografie využívající jako excitační zdroj halogenové lampy je udávána jako nejvhodnější metoda pro detekování vad v kompozitech. Z tohoto důvodu byly vytvořeny tři vzorky z různých kompozitů, do kterých byly uměle vytvořeny defekty pro detekování aktivní termografií.

První vzorek [1], zapůjčený Ing. Kostrounem (ČVUT Praha Fakulta strojní) obsahuje mezery, které mají reprezentovat praskliny, změny vnitřní struktury, či jiné defekty (viz Obrázek 1).



Obrázek 1: Zapůjčený vzorek

Do dalších dvou vzorků jsou vyvrtány otvory o průměrech 2, 4, 6, 8 a 10 mm. Tyto otvory jsou vždy vyrobeny do hloubek 1, 2, 3, 4 a 5 mm v obou experimentálních vzorcích z materiálů CFRP a GFRP o rozměrech 100x100x5 mm (viz Obrázek 2).



Obrázek 2: Návrh zkoušených vzorků

3.1.1. Zkoušené vzorky

Zapůjčený vzorek od Ing. Kostrouna byl vytvořen pro práci Ing. Hergessela [2] a reprezentuje plochý lepený spoj dvou dvousměrných čtyřvrstvých laminátových desek vyrobených autoklávkovou technologií. Ve vrstvě lepidla Hysol 9394 jsou pak vytvořeny mezery, představující neslepené části vzorku. Vizuální kontrolou nelze na povrchu nalézt žádné defekty.

Druhý vzorek je kompozitní destička CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) tvořena 10 vrstvami uhlíkových vláken (600g/m^2 , vazba kepr). Vrstvy jsou vůči sobě pootočený o 90° . Jeho následná úprava je popsána v kapitole 3.1.2.

Třetí vzorkem je kompozitní destička GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) tvořená 25 vrstvami skelných vláken (280g/m^2 , vazba kepr). Vrstvy jsou vůči sobě pootočený o 90° . Jeho následná úprava je popsána v kapitole 3.1.2.

Druhý i třetí vzorek byl vyroben na kaleném skle. Po vyskládání byly vzorky vakuované na podtlak 1 Bar. Následně byly pomocí vakuové infúze prosyceny epoxidovou pryskyřicí (IN2 Infusion Epoxy Resin).

3.1.2. Tvorba defektů kompozitů CFRP, GFRP

Experimentální vzorky upravil Ing. Aleš Polzer, Ph.D. na ústavu strojírenské technologie, FSI, VUT v Brně. Obrábění materiálů CFRP a GFRP byla realizována na pětiosém vertikálním CNC frézovacím centru MCV 1210 s řídicím systémem Sinumerik 840D pl., které je vybaveno vřetenem s maximálními pracovními otáčkami $18\,000\text{ min}^{-1}$.

Pro výrobu otvorů byly použity dvoubřité frézy z rychlořezné oceli s průměry 2, 4, 6, 8 a 10 mm s břitem přes střed. Výrobní operace sestávala z postupného vertikálního zavrtávání fréz (strategie vrtání s výplachem) do předepsané hloubky, z časové prodlevy 0,2 s na dně otvoru a z návratu frézovacího nástroje na referenční rovinu nad obrobkem.

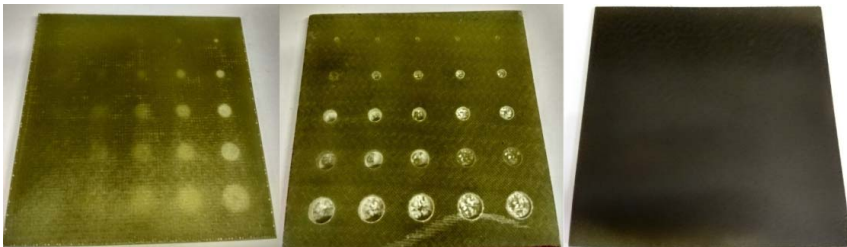
Řezná rychlost byla $v_c = 85\text{ m/min}$ a posuv na zub $f_z = 0,015\text{ mm}$. Obrábění probíhalo bez použití procesní kapaliny.

Polotovary byly vždy upnut pomocí čtyř upínek na broušenou ocelovou podložku umístěnou na pracovní stůl frézovacího centra. Úplné podložení obráběných vzorků, působení axiální síly proti pevné podložce a použití nízké hodnoty posuvu byly zvoleny, aby nedošlo k delaminaci obrobků. Minimálního silového působení mezi nástrojem a obrobkem bylo docíleno i použitím zcela nových (bez opotřebení) řezných nástrojů s pozitivní geometrií břitů.

Finální podoba vzorků je na obrázcích (Obrázek 3 a Obrázek 4). Oba kompozity byly v průběhu měření nastříkány rovnoměrnou vrstvou Thermaspray 800 na stranu bez vyfrézovaných otvorů. Důvodem nastříkání u GFRP materiálu byla jeho částečná průsvitnost a tím dobrá viditelnost defektů lidským okem. Pro nastříkání CFRP materiálu byl důvod velká odrazivost lamp na povrchu vzorku a tím získání falešných oblastí s defekty. Informace o nastříkání vrstvou Thermaspraye je zapsána v titulu jednotlivých obrázků



Obrázek 3: Obrázky, materiál CFRP, vpravo vrstva nastříkaná sprejem Thermaspray 800



Obrázek 4: Obrázky vzorku, materiál GFRP, vpravo horní vrstva nastříkaná sprejem Thermaspray 800

4. Měření

Při měření byly měněny parametry: poloha halogenových lamp, výkon/amplituda halogenových lamp, frekvence ozařování, tvar signálu. Veškerá měření probíhala ve společnosti "TMV SS" s.r.o. v místnosti klimatizované na 18 °C, proudění vzduchu v oblasti měřicí soustavy bylo omezeno usměrněním proudění z klimatizace tak, aby neovlivňovalo měření. Snížená teplota prostředí má zvýšit výslednou diferenci teplot mezi maximální teplotou při dodání energie z halogenových lamp a minimální, klidovou teplotou, kdy halogenové lampy energii nevyzařují. Veškeré zdroje IR záření v místnostech byly vypnuty.

4.1. Poloha lamp a kamery

Byla provedena dvě různá nastavení halogenových lamp. V ideálním případě by energie měla být dodávána kolmo na celou plochu vzorku a zároveň by odražená energie vyzařující ze vzorku měla dopadat kolmo do objektivu kamery. Nastavení polohy a vzdálenosti halogenových lamp od vzorku ovlivňuje množství dopadajícího zářivého výkonu na vzorek.

Pro první případ byly halogenové lampy nastaveny tak, že lampy zářily šikmo na vzorek ze vzdálenosti čela lampy ke středu vzorku 80 cm. Kamera byla nastavena v pozici, kdy kolmo snímala plochu vzorku ze vzdálenosti 80 cm.

Ve druhém případě byly halogenové lampy nastaveny tak, že osa záření svírá s osou x vzorku úhel 80° a s osou Y úhel 85° a halogenové lampy jsou vzdáleny od středu vzorku 40 cm. Kamera snímá vzorek ze vzdálenosti 70 cm.

4.2 Amplituda halogenových lamp

Příkon 2,5 kW lamp lze modulovat pomocí software DisplayImg 6 professional od 0 % do 100 % amplitudy lamp. Pro měření byly zvoleny příkony 50 %, 75 % a 100 % maximálního příkonu lamp, které jsou v dostatečném rozmezí a zároveň zajišťují dostatečnou tepelnou energii, která je vysílána do vzorku.

4.3 Frekvence a počet ozařování

Software DisplayImg 6 professional nabízí nastavení frekvence a počtu period, které budou probíhat. Pro měření byly zvoleny frekvence v rozmezí 0,010–0,002 Hz s krokem 0,002 Hz. Tím byla zajištěna dostatečná doba pro předání tepla vzorku. Počet opakování byl zvolen na 2 a 3 periody. Vyšší počet opakování by měl eliminovat šum a zlepšit rozlišitelnost snímků.

4.4 Tvar signálu

Přednastavené tvary signálu jsou sinus, trojúhelník, obdélník a dále je možnost nastavit vlastní tvar signálu. Pro tuto práci byly zvoleny sinusový a trojúhelníkový signál.

4.5 Snímací frekvence kamery

Kamera FLIR X6580SC má chlazený fotonový detektor, díky tomu je schopna dosáhnout při plném rozlišení snímkovací frekvence až 355 Hz a při snížení rozlišení až 14 550 Hz. Pro měření byly zvoleny frekvence 100 a 200 Hz.

4.6 Zapůjčený kompozitní vzorek

Na vzorku zapůjčeném od Ing. Kostrouna byla testována použitelnost metody v běžném provozu. V diplomové práci [1] byl tento vzorek detekován pulzní termografií a lockin termografií s lampou o výkonu 1 kW. Byly použity frekvence 0,15; 0,05 a 0,01 Hz. Pro tuto práci byly zvoleny frekvence ozařování 0,05; 0,01 a 0,008 Hz při amplitudě lamp 75 %.

5. Výsledky

Vytvořené experimentální vzorky mají 25 různých otvorů, pokud nebude vyznačeno jinak, horní série děr na termogramech mají hloubku 5 mm (vrstva zbylého materiálu je cca 1 mm) a průměry děr jsou zleva doprava (2, 4, 6, 8 a 10 mm). Druhá řada má

hloubku 4 mm (vrstva zbylého materiálu je cca 2 mm) a průměry otvorů jsou zleva doprava (2, 4, 6, 8 a 10 mm) atd.

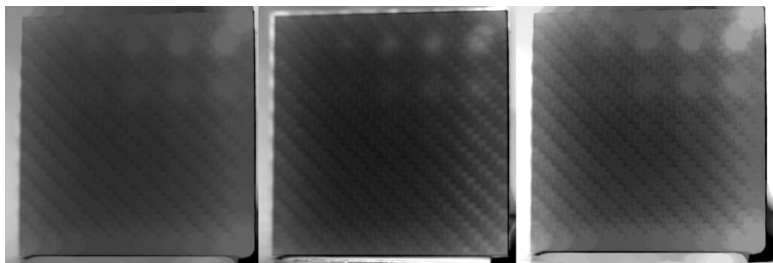
5.1. CFRP a GFRP experimentální vzorky

V následujících podkapitolách jsou popsány výsledky experimentálních vzorků CFRP a GFRP s 25 otvory.

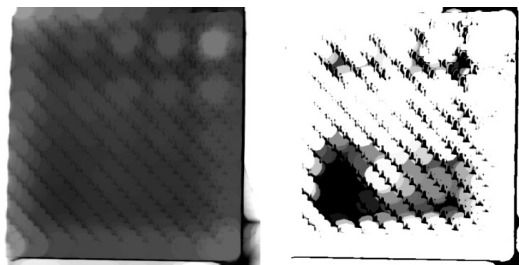
5.1.1. Poloha lamp a kamery

Pro materiál CFRP při 100 % amplitudě lamp, tří period (3T) a sinusovém pulzu, frekvenci $f = 0,004$ Hz a nastavení polohy soustavy pro první případ (viz 4.1) jsou zřetelně viditelné nezávislým pozorovatelem 4 otvory v první řadě, 4 otvory v druhé řadě a částečně 2 otvory ve třetí řadě. V průběhu určování byl měněn kontrast a jas viz termogramy (Obrázek 5), kdy docházelo k lepší viditelnosti různých otvorů, proto nelze vytvořit jeden snímek, kde by byly viditelné všechny otvory. Při určení bylo částečně využito Adaptive Threshold filtru.

Pro druhou polohu lamp a kamery byla veškerá ostatní nastavení zachována (amplituda, f , T, sinus). Stejně jako v předchozím případě byl v průběhu vyšetřování měněn jas a kontrast, použit Adaptive Threshold filtr. Nezávislý pozorovatel nyní určil v první řadě 4 otvory, ve druhé 4 otvory, ve třetí 3 otvory a ve čtvrté taktéž 3 otvory (viz Obrázek 6).

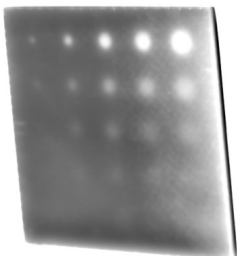


Obrázek 5: CFRP, amp 100 %, 3T, sinus, $f = 004$ Hz, poloha lamp 1



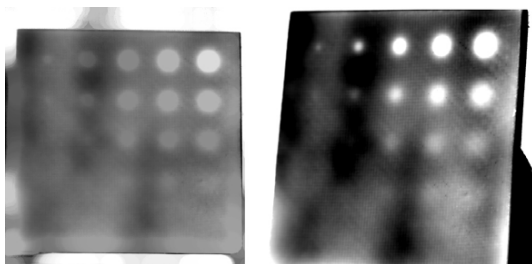
Obrázek 6: CFRP, amp 100 %, 3T, sinus, $f = 004$ Hz, poloha lamp 2

Defekty GFRP materiálu byly nejlépe viditelné/vizuálně detekovatelné i za podmínek 50 % amplitudy lamp, 3T, sinusového pulzu, frekvenci 0,004 Hz – viz termogram (Obrázek 7). Pozorovatel určil v první řadě 5 otvorů, v druhé řadě 5 otvorů, ve třetí řadě 4 otvory, ve čtvrté řadě 4 otvory, v páté řadě 1 otvor. Protože jsou ale defekty viditelné i lidským okem, veškerá měření byla dělána po nástřiku sprejem Thermasprayem 800.



Obrázek 7: GFRP, amp 50 %, 2T, sinus, $f = 0,004$ Hz, poloha lamp 2

Při měření s nástřikem došlo k poklesu kvality získaných obrazů. Toto snížení zapříčinilo nehomogenní rozptýlení spreje po ploše. Nastavené parametry byly opět 50 % amplitudy lamp, 3T, sinusového pulzu, frekvenci 0,002 Hz. Největší kvality bylo dosaženo při nastavení lamp do větší vzdálenosti, tedy pro případ 1 (viz 4.1). Tím poklesla maximální intenzita dopadajícího záření na zkoušený vzorek a tím došlo i ke snížení dodaného tepla. Kvůli svým tepelným vlastnostem je GFRP materiál vhodnější ozařovat tak, aby intenzita záření byla nižší, tím se zlepšují rozlišovací schopnosti soustavy Otvis a nedochází k materiálovým změnám kompozitu, z důvodu jeho dobré teplotní absorpce. Pozorovatel určil v první řadě 5 otvorů, v druhé řadě 5 otvorů, ve třetí řadě 4 otvory, ve čtvrté řadě 3 otvory.



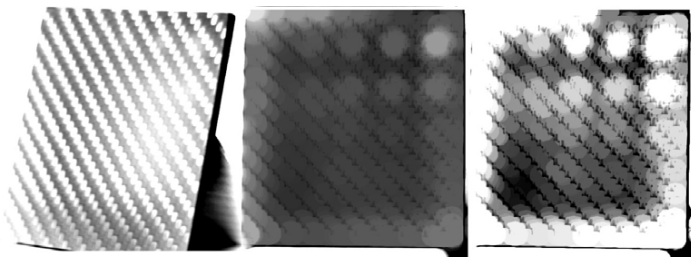
Obrázek 8: GFRP, amp 50 %, 2T, sinus, $f = 0,002$ Hz, vlevo poloha soustavy 1, vpravo poloha soustavy 2, nastříkaný Thermasprayem

Závěrem této podkapitoly je možné zkonstatovat, že u zvoleného CFRP vzorku je pro lepší kvalitu vyhodnocování dodávat větší energie. Maximální intenzity při tomto

měření bylo dosaženo nastavením lamp co nejbližší k materiálu. Naopak vzorek GFRP nepotřebuje takové množství energie, a proto je možné ozařovat z větší vzdálenosti a pod různými úhly.

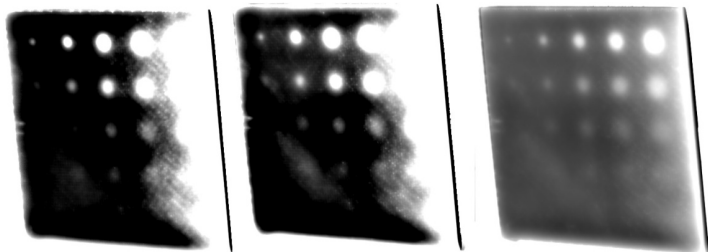
5.1.2. Amplituda halogenových lamp

U CFRP materiálu je potřeba dodat větší množství tepelné energie pro detekci teplotních změn v materiálu. Na termogramech (Obrázek 9) lze vidět, že amplituda lamp 50 % je zcela nedostatečná pro projevy teplotních změn. Nezávislý pozorovatel vyhodnotil nejlepší výsledky při použití 100 % amplitudy lamp, kdy bezpečně určil v první řadě 4 otvory, v druhé řadě 4 otvory, ve třetí řadě 3 otvory a ve čtvrté řadě 1 otvor.



Obrázek 9: CFRP, $f = 0,004$ Hz, 3T, amplituda zleva 50 %, 75 %, 100 %

U vzorku GFRP (který nebyl nastříkán Thermasprayem 800), vzhledem k jeho dobrým tepelným vlastnostem, postačovala amplituda lamp 50 %, viz termogramy (Obrázek 10), pro bezpečné určení uměle vytvořených defektů/otvorů. Při použití amplitudy 50 % bylo možné rozpoznat v první řadě 5 otvorů, v druhé řadě 5 otvorů, ve třetí řadě 4 otvory, ve čtvrté řadě 4 otvory, v páté řadě 1 otvor. V páté řadě se otvory o průměrech 10 a 8 mm vlivem odrazů sloučili do jediné vady, která neměla kruhový profil, a proto není započtena jako viditelný defekt. Zvýšení amplitudy na 75 % nepřineslo žádné zlepšení ve viditelnosti defektů. Amplituda lamp 100 % zapříčinila teplotní změny v materiálu, kdy se povrchová vrstva zbarvila do hněda.

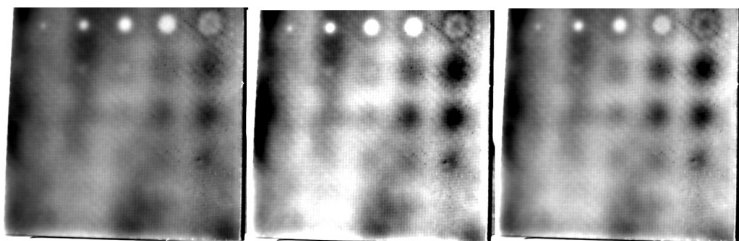


Obrázek 10: GFRP, $f = 0,004$ Hz, 3T, amplituda zleva 50 %, 75 %, 100 %

Toto měření potvrdilo rozdílné teplotní chování zvolených CFRP a GFRP materiálů. Materiálu CFRP je potřeba dodat vyšší energie, pro lepší rozlišitelnost. Oproti materiálu GFRP postačuje nižší amplituda pro kvalitní zobrazení defektů.

5.1.3. Frekvence a počet period ozařování

Jak již bylo znázorněno v předchozích kapitolách materiálu CFRP je důležité dodat dostatečnou energii, velikost dodané energie roste se snižující se frekvencí, tedy prodloužením doby osvětlení. Naproti tomu vzorku z materiálu GFRP stačilo dodat 50 % amplitudy lamp při stejných frekvencích jako u CFRP pro rozlišení většiny defektů. Nižší frekvence dále zajišťuje homogenní prohřátí celého materiálu. Zvýšení periody ozařování zlepší detekci hůře rozlišitelných defektů – viz termogramy (Obrázek 11), zároveň se ale násobí délka ozařování.



Obrázek 11: GFRP: $f = 0,004$ Hz, amp 50 %, perioda zleva 1T ,2T, 3T

5.1.4. Tvar signálu

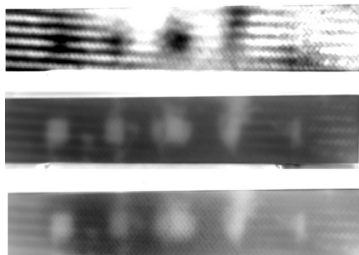
Změna tvaru signálu z přednastaveného tvaru sinus na trojúhelníkový nepřinesla žádné viditelné změny pro určení uměle vytvořených defektů.

5.1.5. Snímkovací frekvence kamery

Frekvence snímání 100 a 200 Hz nemá žádný vliv na kvalitu výsledných snímků. Vliv na kvalitu snímků by nastal při výrazném snižování této frekvence, kdy by kamera nezaznamenávala rychlé tepelné změny na materiálu a mohlo by dojít k podvzorkování.

5.2. Zapůjčený kompozitní materiál

Nejlepší rozlišitelnosti defektů bylo dosaženo při použití frekvence 0,01 Hz, viz termogramy (Obrázek 12). Při použití frekvence 0,05 Hz nedošlo k dostatečnému prohřátí vzorku, to způsobilo nezvýraznění některých defektů. S využitím vyšších amplitud lamp by mohlo dojít k zlepšení rozlišitelnosti.



Obrázek 12: Zapůjčený vzorek z práce [1], amp 75 %, 3T, frekvence shora 0,05 Hz; 0,01 Hz; 0,008 Hz

Z naměřených dat je zřejmé, že se nepodařilo spojit vrstvy bez vytvoření dalších neúmyslných defektů. Tyto nehomogenity materiálu mohly vzniknout při vlepování plastové folie do vyřezaných otvorů.

6. Závěr

Cílem této práce bylo utvořit představu o možných nastaveních soustavy pro optickou aktivní termografii a jejich vliv na kvalitu výsledného obrazu/termogramu. Při určitém nastavení byla provedena měření pouze pro 2 – 3 případy (např. amplituda lamp 50, 75 a 100 %). Mezi měřenými parametry byly: poloha lamp, amplituda lamp, frekvence a počet period osvětlení, tvar pulzu.

Pro tuto zprávu byly vytvořeny 3 vzorky. První byl zapůjčen inženýrem Kostrounem z ČVUT, informace o materiálu jsou uvedeny v kapitole 3. Úprava zbylých dvou vzorků je popsána v kapitole 3.1.2.

Výsledky jsou zaznamenány v kapitole 5. Pro materiál CFRP bylo stanoveno, že pro lepší detekci defektů uložených hlouběji je zapotřebí dodání větší energie než u materiálu GFRP. Při nejlepších nastavení bylo možné na experimentálních vzorcích u materiálu CFRP určit 14 otvorů z 25. Pro materiál GFRP se podařilo určit 19 z 25 bez nástřiku Thermasprayem. Tentýž materiál s GFRP s nástřikem Thermaspray 800 bylo určeno 17 z 25 otvorů.

Při měření zapůjčeného kompozitu byly aktivní termografií objeveny další defekty, které vznikly při vyrábění vzorku. Metodou byla nalezena všechna poškození s poměrně dobrou rozlišitelností tvaru defektů.

7. Použitá literatura

[1] Jan Pilař, *Diplomová práce – Nedestruktivní kontrola kompozitových konstrukcí pomocí aktivní infračervené termografie*

[2] Jiří Hergessel, *Diplomová práce- Nedestruktivní zkoušky primární konstrukce letounu pomocí bond testeru*

[3] Edevis - *OTvis and DisplayImg 6 Manual*



ANALÝZA ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE

Jan CRHA*
Dalibor SOLNAŘ**

* důchodce, spolupracovník PTS Solnař, jcrha@tiscali.cz

** PTS Solnař, dalibor.solnar@ptsndt.com

Contact e-mail: jcrha@tiscali.cz, dalibor.solnar@ptsndt.com

Abstrakt

Vyhodnocování signálu akustické emise (dále AE) má zásadní význam pro vypracování kritérií pro zjišťování závažnosti detekovaných zdrojů. Předpokládá se, že různé typy porušování celistvosti materiálů a různé typy deformačních procesů, které např. tyto procesy doprovázejí, se budou vyznačovat charakteristickým signálem AE. To umožní jednoznačně odlišit rušivé zdroje od zdrojů majících přímý vztah k degradaci materiálů. Řešení této problematiky si vyžaduje znalost podstaty vzniku signálu AE. Prvořadým úkolem je znalost mechanismů zdrojů, na jejichž základě je signál AE uvolňován, dále je nutné se zabývat změnou signálu během jeho šíření testovaným tělesem. Rovněž je třeba kontrolovat zkreslení způsobené experimentální technikou použitou při zpracování. Jedná se o problém velmi komplexní a poměrně složitý. V příspěvku jsou zhodnoceny zkušenosti z řady provozních měření a laboratorních experimentů. Tyto zkušenosti potvrzují, že každá úloha si vyžaduje specifický přístup. V závěru jsou navrženy možnosti dalšího postupu.

Klíčová slova: *frekvenční analýza, rezonanční snímač, širokopásmový snímač, příčná vlna, podélná vlna*

Abstract

The signal analysis of detected AE sources has essential importance for creating the evaluation criterias theirs relevancy. It is supposed that different types of structural integrity damaging and different types of deformation, which accompanies these processes, will have characteristic AE signal. In this manner can be possible distinguish disturbing sources from sources having direct relationship to material degradation. For solving this problematic is necessary to have knowledges about nature of AE signal. The primary task is knowledge how is the signal form AE sources released, second is also necessary to deal with the change of the signal during its propagation by the body. Simultaneously distortion, caused by the experimental technique used in processing, should be tested. This is a very complex and complicated problem. In paper are evaluated experiences from a number of field and laboratory measurements. These experiences confirm that each task requires a specific approach. In the end, options for futher research are proposed.

Key words: *frequency analysis, resonant sensor, wideband (broadband) sensor, shear wave, longitudinal wave*

Úvod

Akustická emise (dále AE) prošla od svých počátků, který se datuje zhruba do konce čtyřicátých let a je spojen se jmény Kaisera (1) a Masona (2), rozsáhlým a dlouhým vývojem. Tato metoda se rozšířila do řady oborů a podstatně jejímu rozvoji napomohli pokrok v oblasti mikroelektroniky, počítačová techniky (IT technologie) a měřicí techniky. Pro správné vyhodnocení výsledků měření AE je nutné znát mechanismy vzniku signálu AE a tím pak charakteristické vlastnosti možných zdrojů AE. Na základě těchto znalostí pak lze oddělit signál ze sledovaných zdrojů od rušivého signálu. Na zkresení původního tvaru uvolněné elastické se podílí celá řada vlivů počínaje charakteristikou snímače, přes zkresení během šíření elastické vlny, kdy působí disperze, změna módu vlny a frekvenčně závislý útlum.

Rozbor problému

V zásadě si signál AE podle (3) dělí do dvou skupin na spojitou emisi a nespojitou emisi. Převážná většina prací a na ně navazujících aplikací se soustředila na zpracování signálu o charakteru nespojité emise tzv. signál typu "burst" neboli praskavé emise. Praskavé emise typu "burst" je v literatuře věnována značná pozornost a detekce plastické deformace pomocí AE je, z důvodu poměrně špatná detekovatelnosti, v pozadí zájmu. Přitom pro predikci šíření trhliny by bylo ideální indikovat vznik plastické zóny na jejím čele a dále také studovat mikroplasticitu u vysokopevných ocelí za účelem zvýšení odolnosti těchto ocelí vůči křehkému porušení. Pomocí mechanismu plastické deformace lze definovat obecná pravidla vzniku napěťových vln. Podobné mechanismy platí i při makroskopickém šíření trhlin, při korozním praskání a při praskání návarů, rozdíl je jen v kvantitativních poměrech při těchto fyzikálních procesech.

Vznikem AE během plastické deformace se zabývá Gillis (4), Analyzuje základní aspekty, které ovlivňují AE během plastické deformace. Je zajímavé, že nejen plastická deformace je zdrojem emise, ale že též emise byla pozorována při zkoušení materiálů nekystalických, kde nelze s pohyby dislokací počítat. Dislokační mechanismy nejsou jedinými zdroji emitovaných vln. Dále významnou roli má experimentální vybavení, které je rozdílné na různých pracovištích a je limitujícím faktorem u řady prací. Proto jsou zjišťovány řádově vysoké rozdíly v rychlosti uvolňovaných pulzů uváděné různými autory. Vezmeme-li v úvahu materiál s výraznými plastickými vlastnostmi, pak lze považovat emisi jako produkt dislokačních pohybů. Pohyby dislokací rozdělujeme zhruba do dvou kategorií, a to na homogenní a nehomogenní. Homogenní pohyb dislokací je často využíván pro sledování mechanismů uvolňování elastických vln. Druhý typ pohybu dislokací se uskutečňuje při pohybu vad a vzniku nových poruch, Výsledkem pohybu Lüdersových pásů je homogenní deformace. Je to i přesto, že pohyb jednotlivých pásů se uskutečňuje stupňovitě po skocích. Naopak dislokační pohyby, které se uskutečňují na čele trhliny a při jejím růstu, a které se sestávají z tvorby plastické zóny a jejího porušování, jsou ryze nehomogenními deformacemi v úzce lokalizovaných oblastech. Poznatky získané při nehomogenních deformacích mají největší význam pro predikci porušování materiálů a tím pro diagnostické účely. Elastické vlny se uvolňují při přeskokování dislokace z jedné pozice do druhé, tím je generován rychlý přírůstek deformace v krystalu. Dochází k uvolnění vibrační (elastické) vlny, která je tak

produkována všemi dislokacemi pohybujícími se stejnou fází. Bylo odvozeno, že energie uvolněných elastických vln bude závislá na rychlosti plastické deformace, Přírůstek energie v čase vztažený na jednotku objemu je podle (4) definován:

$$\frac{dw}{dV} = \sum_{i=1}^n (\sigma \cdot b_i) v_i v_i \rho_i \dots\dots(1)$$

- σ napětí od jednotlivé dislokace
- b_i Burgersův vektor od jednotlivé dislokace
- v_i vektor rychlosti
- v_i normálový vektor rychlosti
- ρ_i místní dislokační hustota

Rovnice (1) definuje energii na jednotku objemu, která je generována jednotlivými dislokacemi. Předpokládá se, že část této energie se přemění v teplo a zbylá část je možným zdrojem AE. Podle vztahu (1) je energie proporcionální k místním napětím v oblasti dislokačního pohybu a k dislokačnímu toku. Ten je ve výrazu (1) dán vztahem $v_i \rho_i$.

Experimentální výsledky prokázaly, že detekovatelnost AE závisí, kromě experimentálního zařízení, na způsobu dislokačního pohybu. Uvažujeme-li např. tahovou zkoušku, která je deformována skoro do meze kluzu aproximativně konstantní rychlostí, deformace pak při absolutně stejném pohybu dislokací budou emitované vlny produkovány stejnoměrně a prakticky nebude pozorována AE ve formě ostrých vzplanutí (typu burst). Naopak bude-li docházet k nespojitostem v rychlosti deformace (diskontinuitám) z různých důvodů, objeví se AE signál, jehož frekvence a amplituda bude záviset od charakteru změn rychlosti dislokací. Výsledky experimentů Fishera a Lallyho (5) shrnují testování v podmínkách jednoosového namáhání na zkouškách z monokrystalů mědi, mosazi, hořčíku atd., při různých rychlostech deformace. Bylo zjištěno, že rychlost uvolňování AE pro každý materiál byla proporcionální k rychlosti deformace,

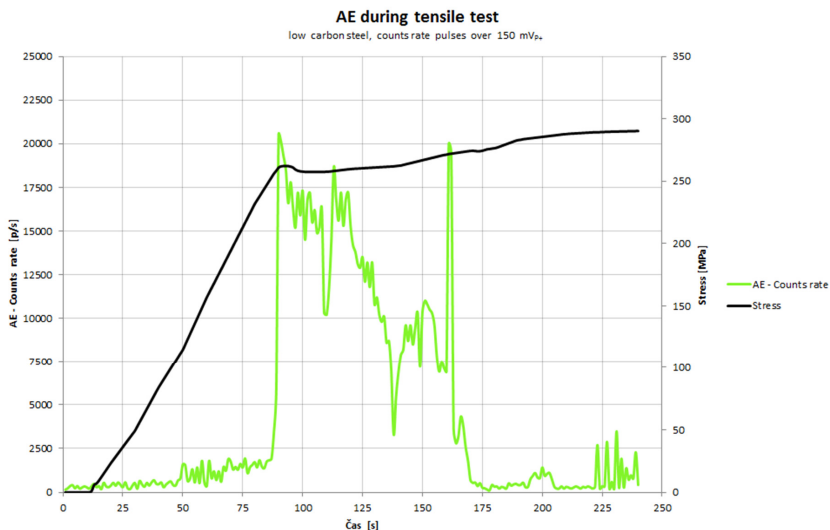
Přejdeme-li od monokrystalů k polykrystalickým materiálům, zjistíme, že poznatky získané na monokrystalech lze aplikovat na jednotlivá zrna polykrystalických materiálů. V každém zrně polykrystalického materiálu bude deformace probíhat stejným způsobem jako u monokrystalu. Pro kvantitativní hodnocení je zapotřebí znát počet zrn obsažených v průřezu vzorku. Z jistým přiblížením lze pak odvodit, že při konstantní rychlosti deformace ϵ : a konstantním objemu zkoušky rychlost uvolňování signálu AE vzrůstá se zmenšujícím se rozměrem zrna, současně však energie každého hitu (elastické vlny) klesá, poněvadž menší objem zrna je zapojen do procesu plastické deformace. Samozřejmě přesné ověření těchto relací nebylo ještě exaktně provedeno. Dunegan a Green (6) zjistili, že jemnozrný uran emituje signál AE o nízkých energetických úrovních, srovnáme-li např. signál AE u uranu v litém stavu. Při sledování plastické deformace metodou AE se velmi výrazně projevila hranice mezi detekovatelnými a obtížně detekovatelnými procesy. U všech testovaných materiálů byla při vzrůstající deformaci pozorována, při citlivosti snímání ($A_{AE} > 35dB_{AE}$), pozorována tendence směřující k poklesu emise elastických vln (hits/sec). Vzrůst rychlosti uvolňování signálu AE (elastických vln) byl však znovu zaznamenán před porušením. Pokles četnosti hitů při vzrůstající deformaci je vysvětlován jako vzrůst tendence směřující ke zvýšení homogenity deformace. Jakmile hustota dislokací již dosáhne vysoké hodnoty, která je spojena s nasycením zkoušky skluzovými pásy, pak další deformace je uskutečňována difuzním pohybem velkého

množství poruch (dislokací) a tím není vyzařován signál AE detekovatelný klasickým způsobem ($A_{AE} < 35\text{dB}_{AE}$). Jiná situace nastane těsně před porušením materiálu, kdy dochází k lokalizaci extrémně nehomogenní deformace, za kterou bezprostředně následuje porušení materiálu. Deformační mechanismus tohoto typu je naopak zdrojem silné aktivity AE.

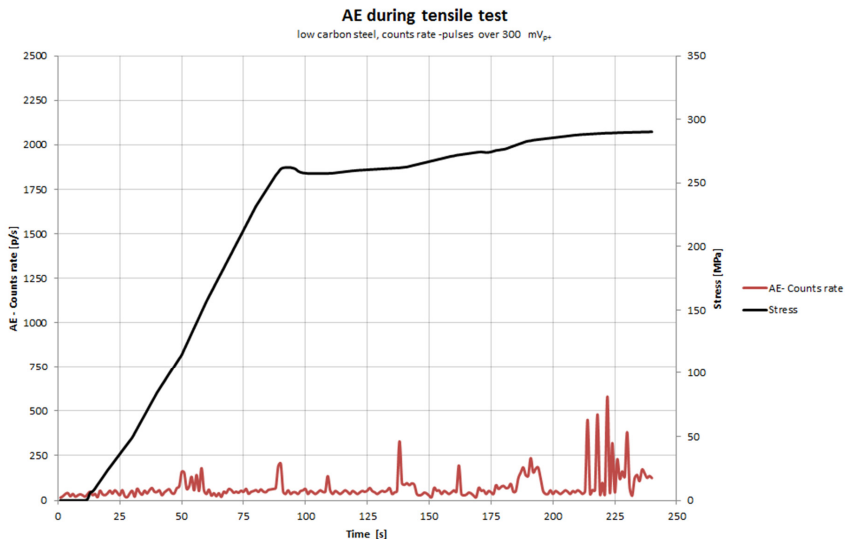
Mezi dobře indikovatelné zdroje AE patří iniciace a šíření trhlin. I v tomto případě jsou zaznamenávány velké rozdíly u jednotlivých testovaných těles, které jsou způsobeny přítomností zbytkových pnutí, kvalitou povrchových vrstev, rozložením sekundárních fází, způsobem namáhání (je určující pro typ subkritického růstu) a strukturou materiálu. Signál AE je v případě vysokopevných ocelí zaznamenáván jako vzplanutí (burst) o vysokých amplitudách, naopak u ocelí o nízkých mezí kluzu (šíření trhliny tvárným mechanismem) nebyla prakticky při běžných citlivostech snímání AE detekována (7"). Při šíření trhliny u ocelí s nízkou mezí kluzu je AE spojována s praskáním křehkých inkluzí a jejich dekohezí od matrice, praskáním karbidů a nakonec procesy plastické deformace, které lze poměrně obtížně definovat. Žádný z předpokládaných zdrojů nebyl potvrzen jako majoritní při generování emise v průběhu tvárného šíření trhliny.

Experimentální ověřování

Na obr. 1 je uveden průběh tahové zkoušky z materiálu ČSN 13030 o nízké mezí kluzu (cca 270 MPa (8)). Zkoušku o ϕ 8mm byla akusticky oddělena od trhačického stroje teflonovými izolačními bloky. Extrémně vysoké citlivosti snímání bylo dosaženo vyladěným akcelerometrem, který pracoval na svém rezonančním kmitočtu 65 kHz.

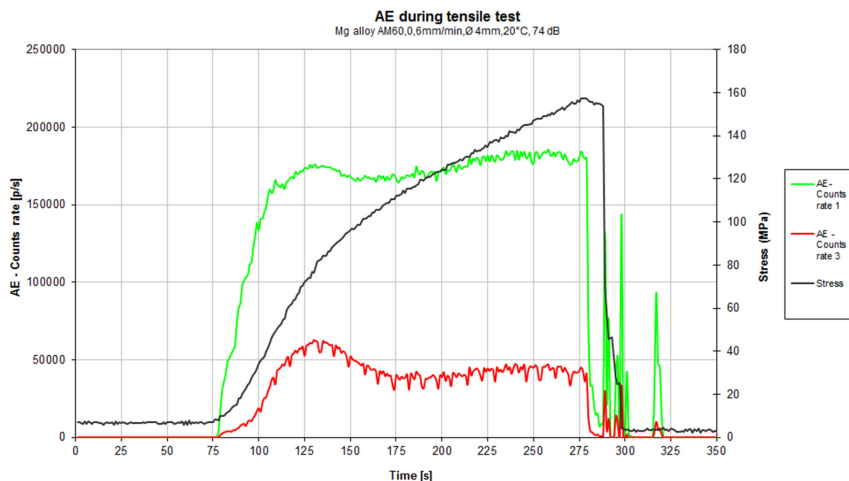


Obr. 1



Obr. 2

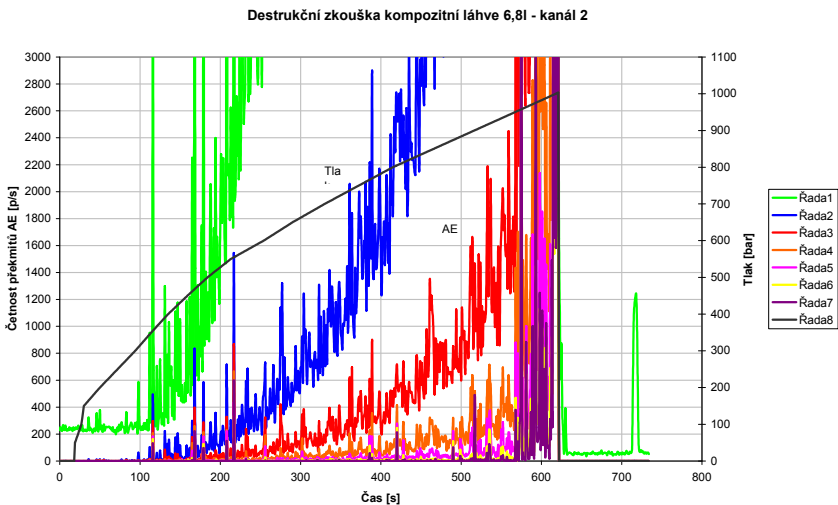
Na obr. 2 je uvedena identická zkouška jako v předchozím případě na obr. 1. Rozdíl je jen ve zpracování signálu AE. Jsou registrovány jen signály o vyšších amplitudách než je 35dB_{AE}. Ve své podstatě pracujeme v tomto případě jen s praskavou emisí, čemuž odpovídají také hodnoty četností (AE - rate) na ose y. Jedná se o typický průběh, jak je zaznamenáván komerčními systémy AE.



Obr. 3

Průběh na obrázku 3 dokazuje, že i s běžným experimentálním vybavením je možné plastickou deformaci detekovat. Dva průběhy na záznamu reprezentují amplitudové spektrum signálu během tahové zkoušky horčíkové slitiny Mg AM60. Záznam s vyššími četnostmi je pro amplitudy větší než 30dB_{AE} , záznam s nižšími četnostmi je pro amplitudy amplitudovém okně 42 - 48 dB_{AE} .

Při tlakových zkouškách je důležité včas zachytit iniciaci a šíření vad. U ocelových tlakových nádob by neoptimálnějším řešením bylo zachytit tvorbu plastické zóny na čele vady před jejím šířením. Plastická deformace generuje signál o nízkých energetických úrovních a o spojitém spektru zasahujícím do pásma vysokých frekvencí. Vysokofrekvenční signál je velmi účinně při svém šíření utlumen. V ASME CODE CASE N-471 (9) je uvedeno řešení pomocí piezoelektrického snímače, kterým se on-line monitoruje kritické místo na kotli. Oblast monitorovaná tímto snímačem je velmi malá z důvodu silného útlumu vř signálu. Predikce porušení ocelových nádob při tlakové zkoušce s omezeným počtem snímačů je proto dosti komplikovaná. Zcela jiná situace je u kompozitních tlakových nádob, jak lze demonstrovat na obr. 4.



Obr. 4

Závěr

Zásadním problémem aplikací AE u konstrukčních ocelí je identifikace zdrojů a následná klasifikace jejich závažnosti. Špatně vyhodnocené zdroje jsou hlavní příčinou problematických závěrů a z toho vyplývajících zklamání z nekválních výsledků. Jedná se přitom o velmi širokou oblast zahrnující potrubní systémy, stavební konstrukce, dopravní prostředky, atd. (10). Ze stručně uvedených příkladů v předchozím textu je zřejmé, že normovaný způsob vyhodnocování tlakových zkoušek podle (11), který se zabývá jen

zpracováním signálu charakteru prudkých vzplanutí tzv. typu "burst", je jen dílčím specifickým přístupem. Zpracování se provádí klasickou lokalizací zdrojů AE. Teprve v počátcích je provádění tzv. modální analýzy MAE(12), kdy se z rozpadu elastické vlny stanovuje vzdálenost zdroje od snímače. Na rozpad původní vlny v závislosti na vzdálenosti od zdroje má vliv disperze a geometrie testovaného tělesa. Z tvaru detekované vlny a z podílu podélné a příčné vlny lze pozici zdroje identifikovat.

Normovaným způsobem se u tlakových zkoušek zpracovává signál o vysokých energetických úrovních a tím zůstává velké množství informací, které by bylo možné ze signálu AE získat nevyužito. Signál o nízkých energetických úrovních generovaný v průběhu plastické deformace je velmi perspektivním předmětem zájmu z důvodu predikce šíření vad v konstrukčních ocelích. Detekce plastické deformace např. u nízkouhlíkových ocelí je s běžným experimentálním vybavením používaným u tlakových zkoušek prakticky nemožná. Vyřešení tohoto problému si vyžaduje použití snímačů pracujících na vlastních ostrých rezonančních kmitočtech, dokonalou znalost vlivu geometrie na generování signálu AE (způsobu namáhání), znalost vlivu povrchových vrstev (13), analýzu zkreslení signálu během jeho šíření a nové postupy pro zpracování dat (např. neuronové sítě, statistické zpracování atd.). Pro další postup v analýze signálu AE lze využít zkušenosti z oblasti ultrazvuku, kde je např. problematika šíření elastických vln detailně zpracována (14).

Reference

- 1/ J. Kaiser: Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, Archiv für das Eisenhüttenwesen 1-2 (1953), p. 43-45
- 2/ W. P. Mason: Physical Acoustic, Vol. 1, Part. A, Academic Press, New York (1965)
- 3/ ČSN EN 1330-9, Nedestruktivní zkoušení -Terminologie -Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí
- 4/ P. P. Gillis: Dislocation Motions and Acoustic Emissions ASTM STP 505 (1972), p. 20
- 5/ R. M. Fischer, J. S. Lally: Canadian Journal of Physics CJPFA, Vol. 45, No. 2, Part 3, Feb.1967, pp 1147-1159
- 6/ J. R. Frederick, D. K. Felbeck : Dislocation Motion as a Source of Acoustic Emission, ATM STP 505 (1972), p. 129
- 7/ H. N. G. Wadley, C. B. Scruby, J. H. Speake: Acoustic emission for physical examination of metals, International Metals Reviews (1980), No 2, p. 57
- 8/ R. Kocich, M. Cagala, J. Crha, P. Kozelský: Character of acoustic emission signal generated during plastic deformation, sborník 30.Conference EWGAE, poster 170, Granada 2012
- 9/ Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-471, Approval Date: April 30,1990
- 10/ I. G. Scott: Basic Acoustic Emission, Nondestructiva Testing Monographs and Tracts, edited by Warren J. Gonnagle, Elmhurst, Illinois 1991, p. 113

- 11/ ČSN EN 14584, Nedestruktivní zkoušení -Akustická emise - Zkoušení kovových tlakových zařízení během přijímací zkoušky-Planární lokalizace zdrojů akustické emise
- 12/ ČSN EN ISO 16148, Láhve na přepravu plynů - Znovuplnitelné ocelové bezešvé láhve na plyny- Periodická kontrola metodou akustické emise
- 13/ J. C. Duke, R. A. Kline: The Influence of The Surface Layer on Acoustic Emission, Scripta Metallurgica, Vol. 9, (1975), pp. 855-858
- 14/ J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 4. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York (1980)



AKTUÁLNÍ PRŮMYSLOVÉ APLIKACE AKUSTICKÉ EMISE

Jan CRHA*
Jan ADÁMEK**

* důchodce, spolupracovník PTS Solnař, jcrha@tiscali.cz

** důchodce, dříve Výzkumné ústavy Vítkovice, adamekj9@gmail.com

Contact e-mail: jcrha@tiscali.cz, adamekj9@gmail.com

Abstrakt

Aplikace akustické emise (dále AE) v průmyslu jsou soustředěny do tří základních směrů na:

- 1/ testy kvality během výroby a povýrobní testy, včetně periodických kontrol v předepsaných časových intervalech*
- 2/ spojitou kontrolu výrobních technologií*
- 3/ trvalé monitorování provozu exponovaných konstrukčních částí*

Tlaková zkouška je předepsána jako výstupní kontrola kvality u všech tlakových nádob a zařízení. Prováděcí postupy odpovídají normě ČSN EN 14584. V příspěvku je diskutována problematika predikce porušení tlakové nádoby a platnost hodnotících kritérií pro ocelové a kompozitní tlakové nádoby.

Spojité kontrola výrobních technologií je využívána u výkovek, odlitků, v průběhu svařovacích procesů, při obrábění atd. Jejím cílem je určit, která část výrobní technologie má zásadní vliv na konečnou kvalitu výrobku. V textu jsou uvedeny výsledky z množství provedených experimentů a jsou formulovány závěry pro další postup.

Zjistit včas skutečný technický stav konstrukce a zabránit tak haváriím a ztrátám je úkolem trvalého monitorování exponovaných konstrukčních částí. Patří mezi ně např. kotle fosilních elektráren, zásobníky nebezpečných látek a primární okruh jaderných elektráren. Pokud jsou tyto konstrukce navrženy podle LBB kritéria stačí zachytit počátek úniku, který generuje spojitý signál ve frekvenčním pásmu signálu AE. Přesnost určení místa zdroje a intenzity úniku je v práci diskutována.

Experimentální výsledky potvrzují, že je zapotřebí zabývat se u všech aplikací rozložením napětového pole (geometrický problém), typem snímače, útlumem a zkreslením signálu během šíření od zdroje. Je to poměrně komplikovaný problém, jehož řešení si vyžaduje velké množství experimentální a teoretické práce.

Klíčová slova: *hodnotící kritéria, kritická teplota, kritický čas, zbytková napětí, LBB kritérium*

Abstract

Acoustic emission (further AE) applications in industry are focused into three mainstreams on:

- 1/ quality tests during production and post production tests, including periodical tests in prescribed time interval*
- 2/ continuous control of production technologies*
- 3/ on-line (permanent) monitoring of the operation of the exposed construction components*

The pressure test (mainly hydrotest) is prescribed as final quality control all pressure vessels and equipment. Implementation procedures conform to the standard ČSN EN 14584. The paper discusses the problem of prediction of pressure vessel failure and the validity of evaluation criteria for metal and composite pressure vessels.

Continuous control of production technologies is used for forgings, castings, welding processes, machining, etc. Its purpose is to determine which part of the production technology has a major impact on the final quality of the product. In the text, the results from the number of experiments performed and the conclusions for further development are formulated.

To find out in real time the actual technical state of the structure and to prevent accidents and losses is the task of on-line (permanent) monitoring of the exposed construction components. These include, for example, fossil-fuel boilers, hazardous substances storage facilities and the primary circuit of nuclear power plants. If these constructions are designed according to the LBB criterion, it is enough to capture the origin of the leakage, which generates a continuous signal in the frequency band of the AE signal. Accuracy of location of source and leakage intensity is discussed in the paper.

Experimental results confirm that it is necessary to deal with all applications by distributing a stress field (geometric problem), sensor type, attenuation, and distortion of signal during propagation from the source. It is a rather complicated problem which requires a great deal of experimental and theoretical work.

Key words : *evaluation criteria, critical temperature, critical time, residual stresses, LBB criterion*

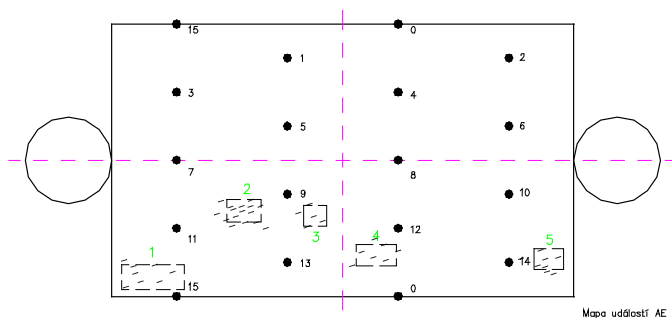
Úvod

Předností metody akustické emise je její poměrně jednoduchá použitelnost pro řešení praktických problémů ve výrobě a pro zajišťování bezpečného provozu exponovaných konstrukčních částí. Poněvadž je také výbornou pomůckou při řešení výzkumných úkolů, lze ji využít pro přímou kontrolu vyvinutých postupů do praxe. Její aplikace na konkrétních objektech kontrolují chování materiálu za provozních podmínek, které by bylo velmi těžké simulovat v laboratorních podmínkách. Mezi další přednosti této metody patří integrální charakter monitorování. Není zapotřebí projíždět zkušebními sondami po určených krocích celý testovaný objekt, ale stačí s poměrně malým počtem sond kontrolovat rozměrné geometrie. Je zde však řada omezení, s kterými je třeba počítat. Především se generovaná vlna signálu AE rozpadá na typ vlnění závislý na sledované geometrii a na struktuře materiálu. Dále je velmi nepříjemná závislost útlumu signálu na frekvenci, což omezuje vzdálenost mezi snímači a tím je významně omezena citlivost metody AE a lokalizaci zdrojů signálu. V dalším textu budou uvedeny příklady aplikací a způsoby jejich vyhodnocování. Vždy je třeba mít na zřeteli, že zdrojem signálu jsou veškeré procesy způsobené vzrůstem napětí v testovaném objektu a že přednostně jsou detekovány fyzikálně metalurgické procesy probíhající v povrchových vrstvách. Správná interpretace výsledků si proto vyžaduje velké množství trpělivě prováděné práce při ověřování zdrojů AE.

Testy kvality výrobků

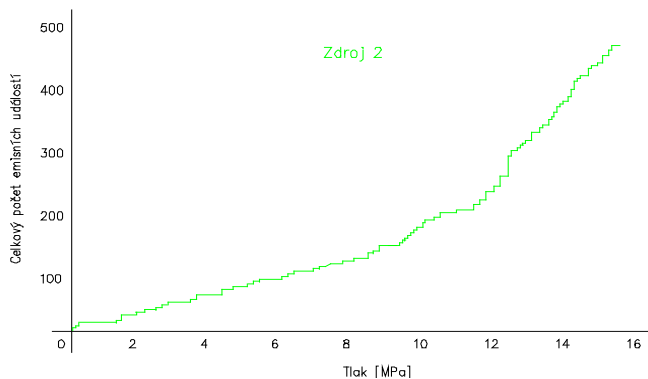
Mezi testy kvality a současně také ke kontrole technického stavu tlakových zařízení patří tlaková zkouška. Obecná pravidla jsou dána normou (1), která se zabývá tlakovými zkouškami kovových zařízení. Pro kompozitní materiály je k dispozici varianta této normy respektující specifické chování kompozitních materiálů. Je zapotřebí na tomto místě zdůraznit, že u tlakových zkoušek zařízení vyrobených z kompozitních materiálů je predikce a ověřitelnost hodnotících kritérií

mnohem příznivější než např. u kovových tlakových nádob, viz. Hamstad (2). Klasický přístup je založen u kovových materiálů na vyhledávání zdrojů signálu AE, jejich závažnost je ověřována jinými defektoskopickými metodami. Na obr. 1 je zjednodušeně uvedeno rozmístění snímačů na kotlovém bubnu a na obr. 2 je, podle charakteru zdroje, zdroj klasifikován jako kriticky aktivní zdroj.



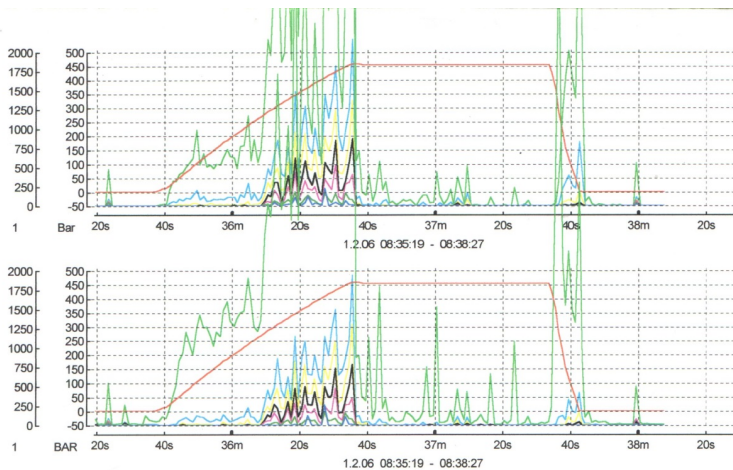
Obr. 1

Zdroj 2 na obr.2 je vyhodnocen jako kriticky aktivní zdroj z důvodu progresivního růstu četnosti AE aktivity jako funkce tlaku.



Obr. 2

U kompozitních materiálů lze podle kritéria Felicity daleko průkazněji usuzovat na zhoršení kvality výrobku (2). Na dalším obr. 3 je uveden výsledek tlakové zkoušky kompozitní láhve 6,5 l u které prakticky vymizel Kaiserův ireverzibilní jev. Důvodem bylo špatné zakotvení uhlíkových vláken.



Obr. 3

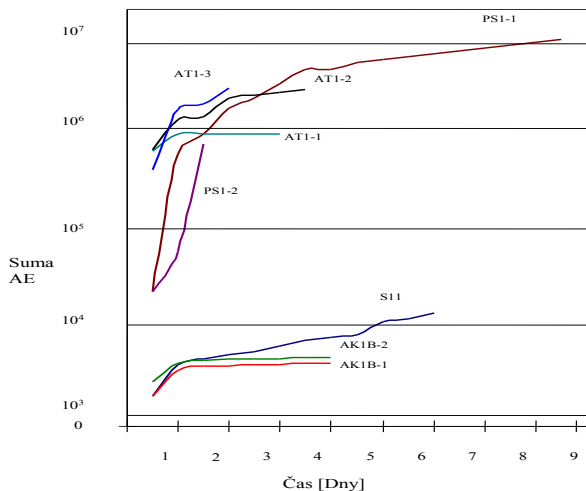
Metodou AE lze také použít u ohybových zkoušek, zátěžových zkoušek konstrukcí, zkoušek lan atd.

Spojité (on-line) kontrola výrobních technologií

Velkým problémem při výrobě je zjistit, která část výrobního postupu sehrála rozhodující roli na jeho konečnou kvalitu. Většinou se spekuluje "post mortem" až na konci výrobního řetězce, kde je zapotřebí provést úpravu výrobního postupu a tím vyřešit problém nevyhovující kvality. Při praskání otěruvzdorných návarových vrstev na vysokopečnicích zvonech byla použita AE. Cílem sledování bylo zjistit, kdy dochází k iniciaci vad a k jejich dalšímu šíření. Současně byla měřena teplota svařence a podle závislosti rychlosti ochlazování pak mohly být předepsány požadavky na řízené ochlazování svařence v expandovaném perlitu. Po řadě měření, jejichž výsledky jsou souhrnně uvedeny na obr. 4, bylo možné definovat následující parametry nutné k úpravě technologického postupu:

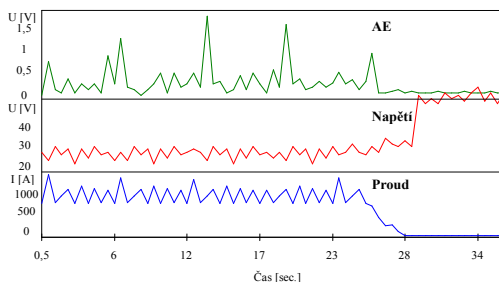
- 1/ kritický čas - pro vložení svařence do pece na odstranění zbytkových napětí (někdy se uvádí zbytková pnutí)
- 2/ kritickou teplotu - na kterou nesmí poklesnout teplota svařence před vložení do žíhací pece
- 3/ navařovací materiál (elektrodu) - která je nevhodnější pro dané podmínky

Na souhrnném obr. 4 chybí průběh teploty. Ten byl rozdílný pro jednotlivé případy a obrázek by se stal nepřehledným.



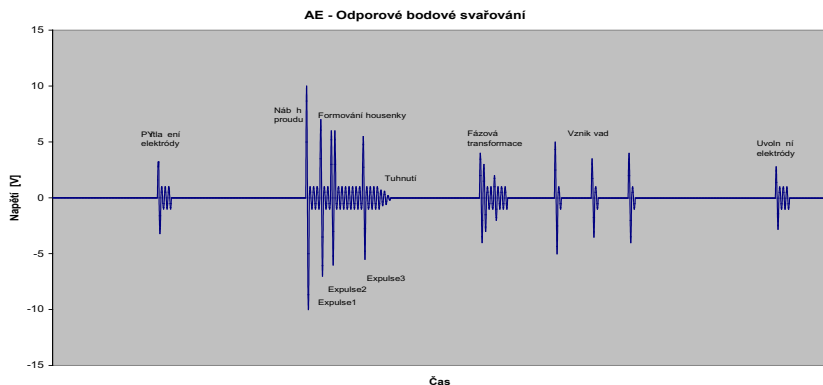
Obr.4

Kromě sledování velkých těles po svařování je možné i přímo kontrolovat vlastní svařovací proces. Výsledky jsou uvedeny na obr. 5.



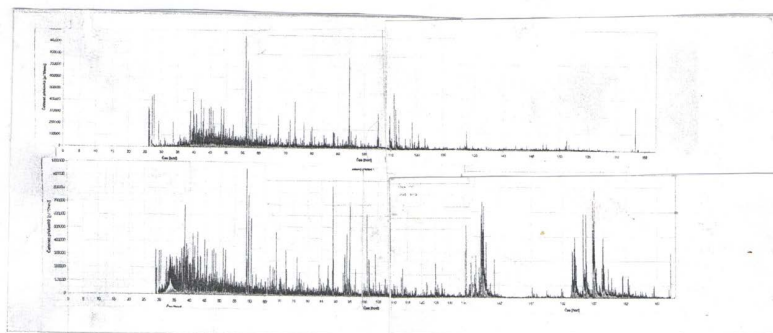
Obr.5

Z průběhu na obr. 5, kde je zaznamenán průběh svařovacího proudu, napětí a RMS signálu AE lze vyhodnotit anomálie doprovázející tuhnutí roztaveného kovu a především vznik napětí indukovaných v průběhu tuhnutí svařovací vrstvy. Další možnosti, které poskytuje AE při svařování, jsou demonstrovány na příkladu odporového bodového svařování. Průběh jednoho cyklu tohoto procesu, tak jak je prezentován v (3), je na obr. 6.



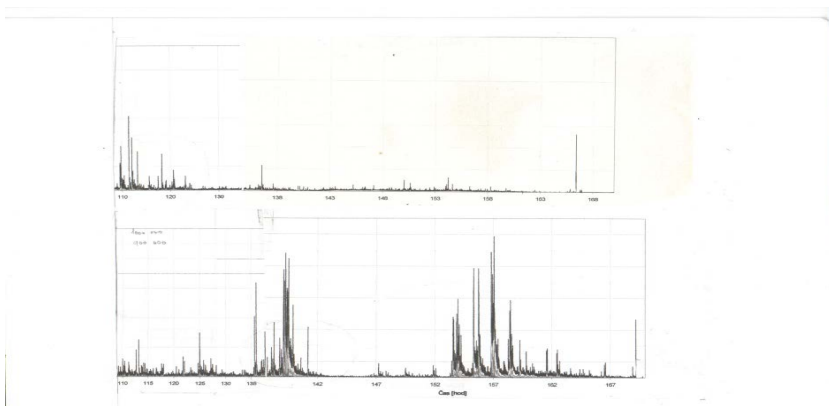
Obr. 6

Zcela ideální je nasazení AE na sledování velkých odlitků a výkovků. Na obr. 7 je celkový profil AE během tuhnutí dvou rozměrných válců (10t) po odlití po dobu 7 dnů.



Obr. 7

Oba válce byly o stejné geometrii. U válce na horním záznamu nebyly indikovány vady. Spodní záznam je průběhem AE u válce, který měl vady a pro špatnou kvalitu byl vyřazen. Je zřejmé, že k rozvoji defektů dochází zhruba po 5 dnech po odlití a dále po intervalu jednoho dne dochází znovu k rozvoji defektnosti mechanismem "zbrzděných lomů". Etapovitý průběh rozvoje defektnosti v rozmezí 6 a 6 dnů a 12 hodin je řízen patrně difúzí interstitických prvků, tj. uhlíkem, případně vodíkem, nebo dusíkem. Již v počáteční fázi, po zatuhnutí vlnovodu do nálitku, dochází k výrazně odlišnému průběhu AE oproti válci, jehož průběh AE je na horním záznamu. Zřejmě i samotný průběh krystalizace byl zdrojem iniciace trhlin a zbytkových napětí. Postupné křehnutí a uvolňování vnitřních napětí je na následujícím obr. 8. Šířením vad se postupně snižuje úroveň vnitřních napětí v odlitku.

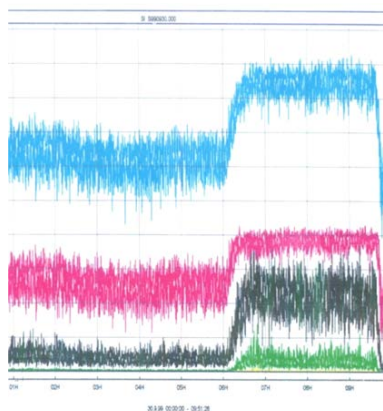


Obr. 8

Uvedeným postupem byla kontrolována řada výrobků jmenovitě klikové hřídele, svařování rámu válcovací stolice, olejářské trubky atd.

Trvalá kontrola exponovaných konstrukčních částí

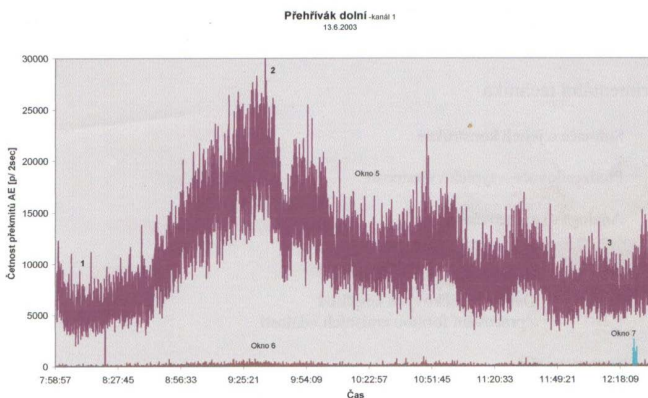
Úniky médií z tlakových zařízení jsou vědním předmětem pro použití AE. Jedním z běžných příkladů je nasazení AE na úniky z membránových stěn fluidních kotlů. Je detekován a zaznamenáván signál AE ve frekvenčním rozsahu zhruba 50 kHz až 400 kHz. Při monitorování rozsáhlejších oblastí se přechází a nižší frekvence a u vodárenských systémů dokonce na frekvence řádu stovek Hz. Na obr. 9 je uvedena odezva systému na simulovaný únik z membránové stěny u velkého fluidního kotle 500 MW. Podobná aplikace byla prezentována v (4).



Obr. 9

Na rozdíl od (4) systém používaný v našich podmínkách vyhodnocuje aktivitu AE tříděním signálu do amplitudových oken. Provádí se tím amplitudová analýza, která umožňuje citlivější indikaci

počátku vzniku AE, oproti běžně používaným zahraničním systémům. Kromě úniků lze systémy AE zachytit i změny technologie spalování ve fluidních kotlích, jak je uvedeno např. obr. 10. Četnost signálu se mění v závislosti na doplňování popela v chladiči fluidní vrstvy.



Obr. 10

Mezi další příklady použití patří monitorování úniků z primárních okruhů jaderných elektráren. Základní podmínkou je, aby primární potrubní systém splňoval LBB kritérium a tím byla zaručena odolnost oproti náhlému porušení integrity tzv. gilotinovým efektem.

Závěr

Stručně popsané aplikace AE v předchozím textu potvrzují přínos této metody pro řešení širokého spektra problémů od kontroly kvality, výrobní technologie, bezpečnosti a bezporuchového provozu exponovaných konstrukcí. Každá aplikace vyžaduje velký objem experimentální a teoretické práce, omezujícím faktorem je nedostatek finančních prostředků a také poměrně malý tlak na zvyšování kvality a bezpečnosti provozu. Teoretické závěry by měly být dotaženy do praktických aplikací, což je asi největším problémem. Pro další rozvoj metody AE bude nutné vyřešit:

- 1/ vliv způsobu namáhání na detekovaný signál AE - je to známý problém ve zkušebnictví, kde zkušební stroj často ovlivňuje měřené materiálové parametry (5)
- 2/ působení povrchových vrstev na vyzařovaný signál AE
- 3/ konstrukci vhodných snímačů a odpovídající způsob zpracování signálů AE z výstupu těchto snímačů. Je to stálý problém přenosu širokého frekvenčního spektra mezi snímačem a testovaným tělesem a dále provádění následné frekvenční analýzy těchto signálů

V podstatě jsme na prahu řešení široké problematiky AE. Vyžádá si to značný objem experimentální a teoretické práce a tím také nemalé finanční prostředky.

Reference

- 1/ ČSN EN 14584, Nedestruktivní zkoušení -Akustická emise - Zkoušení kovových tlakových zařízení během přejímací zkoušky-Planární lokalizace zdrojů akustické emise
- 2/ M. A. Hamstad: A discussion of the basic understanding of the Felicity Effect on fibre composites, J. Acous. Emiss. 5, (1986), p. 95
- 3/ Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring during Resistance Spot-Welding, ASTM E 751-80
- 4/ D. H. KIM, S. B. Lee: Development of Precise Source Location and Leak Monitoring Technique 3D Point Location Method for Power Plant Boiler Structure, 31st Conference EWGAE, Dresden, Germany (2014), p. 49
- 5/ K.S.Grewal, V.Weiss: The Effect of Testing System Stiffness on Fracture Behavior of Sheet Specimen, Abstract from Ph.D.Dissertation, Syracuse University, 1967



NEDESTRUKTIVNÍ POSOUZENÍ TEPLOTNĚ DEGRADOVANÉHO PROSTÉHO BETONU S RŮZNÝM OBSAHEM HRUBÉHO KAMENIVA POMOCÍ METODY IMPACT-ECHO NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF THERMALLY DEGRADED PLAIN CONCRETE WITH DIFFERENT CONTENT OF COARSE AGGREGATE BY IMPACT-ECHO METHOD

Richard DVOŘÁK*

*Vysoké učení technické v Brně, Ústav fyziky

dvorak.r1@fce.vutbr.cz

Abstrakt

V oblasti diagnostiky stavebních konstrukcí zasažených požárem se v posledních letech zvažuje použití nedestruktivní akustické metody Impact-Echo (dále IE) (Hager, Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method, 2015), (Ghorbanpoor & Benish, 2003). Tato zkušební metoda spočívá v rozkmitání zkušebního tělesa mechanickým úderem a následné snímání jeho rezonanční frekvence (Malhotra & Carino, 2004). V oblasti teplotně degradovaných stavebních hmot, konkrétně cementových malt, projevila tato metoda značnou korelaci s destruktivními a jinými srovnávacími zkouškami (Štefková, Tupý, Sotiriadis, Šamárková, & Chobola) a prokázala schopnost posoudit míru degradace zvýšenou teplotou. Tato publikace se věnuje posouzení sad betonových zkušebních těles tří různých receptur pomocí nedestruktivní metody IE a její srovnání s destruktivními zkouškami. Samotné měření v praxi je ovlivněno více faktory, jako je stáří konstrukce, kvalita provedení, obsaženou vlhkost a míra degradace způsobena jinými činiteli než zvýšenou teplotou. V rámci experimentu je uvedeno měření nasákavosti a změna rezonanční frekvence při různém obsahu vlhkosti.

Klíčová slova: Beton, degradace, vysoká teplota, nedestruktivní zkušebnictví, Impact-echo, nasákavost, vlhkost

Abstract

In the past few years a non-destructive acoustic method of Impact-Echo (IE method) is being tested as a diagnostic tool in the field of civil engineering structures damaged by fire (Hager, Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method, 2015), (Ghorbanpoor & Benish, 2003). This test method consists of exciting the test specimen by mechanical impact and then recording its resonance frequency (Malhotra & Carino, 2004). In the field of thermally degraded building materials, such as cement mortars, this method showed a significant correlation with destructive and other comparative tests (Štefková, Tupý, Sotiriadis, Šamárková, & Chobola) and demonstrated the ability to assess the degree

of degradation by elevated temperature. This paper focuses on the assessment of sets of concrete test specimens of three different mixtures using a non-destructive IE method and its comparison with destructive testing. Measurements in practice are influenced by factors such as age, construction design, moisture content and degradation due to factors other than elevated temperatures. Within the experiment a water absorption measurement of high temperature degraded concrete samples and change of the resonant frequency due to different moisture content is presented.

Key words: Concrete, degradation, high temperature, non-destructive testing, Impact-Echo, absorption, moisture

1. Úvod

Pro účely diagnostiky betonových a železobetonových konstrukcí zasažených požárem je v technické praxi poptávka po levné, rychlé a nedestruktivní metodě, která by byla schopná odhalit míru degradace povrchových a podpovrchových vrstev. Míra poškození konstrukce se odvíjí od charakteru zdroje zvýšené teploty. Svou roli zde hraje zdroj zvýšené teploty, maximální dosažená teplota, doba působení zvýšené teploty a rychlost chlazení dané konstrukce při protipožárním zásahu. Při diagnostice takto zasažené konstrukce je tedy klíčové zjistit, jaké teploty panovaly v období požáru (Graves, 2006). Tato informace se dá zjistit laboratorními metodami na základě chemických změn jednotlivých složek v průběhu výpalu. Zejména se jedná o změny ve struktuře pojiva a plniva (Hager, Behaviour of cement concrete at high temperature, 2013). Tyto metody jsou však nákladné časově i finančně, navíc je potřeba odebrat z konstrukce vzorky, nejčastěji pomocí jádrových vývrtů. V této oblasti nabízí nedestruktivní akustická metoda Impact-Echo možnou alternativu jako srovnávací metoda buď přímo pro stanovení míry degradace nebo pro vyhledávání lokálního minima fyzikálně mechanických vlastností degradované konstrukce. V rámci tohoto příspěvku jsou tak posuzovány zkušební tělesa prostého betonu různého složení, degradovaného zvýšenou teplotou¹.

2. Zkušební tělesa

V rámci studie byly navrženy tři receptury s použitím cementu CEM I 42,5 R, jemného kameniva Žabčice 0/4 mm a rozdílné kompozice hrubého kameniva z lomu Olbramovice (viz Tabulka 1). Návrh těchto receptur vychází z požadavku na porovnání reakce různé kvalitního betonu na zvýšenou teplotu a jeho následnou diagnostiku. Byly zhotoveny zkušební tělesa trámčů 100 x 100 x 400 mm, která byla uložena po dobu 28 dní ve vodním prostředí. Poté byly ponechány týden na vzduchu a předsušeny.

¹ Studie je zaměřena na degrační procesy prostého betonu, z toho důvodu neuvádí v této fázi výzkumu zkoušky zkušebních těles s použitím ocelové výztuže.

Tabulka 1: Složení použitých receptur.

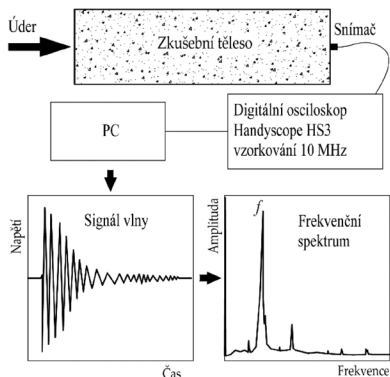
Table 1: Composition of used mixtures.

Složka:	Hmotnost na 1 m ³ dle jednotlivých receptur [kg]		
	A	B	C
CEM I 42,5 R	345	345	345
Jemné kamenivo Žabčice 0/4 mm	848	813	813
Hrubé kamenivo Olbramovice 4/8 mm	-	-	1010
Hrubé kamenivo Olbramovice 8/16 mm	980	521	-
Hrubé kamenivo Olbramovice 11/22 mm	-	391	-
Pří sada Sika Viscocrete 2030	2,8	2,5	3,1
Voda	160	176	176

Tímto krokem se předchází jevu odprýskávání (Zhao, Zheng, Peng, & van Breugel, 2014), které může v případě prudkého nárůstu teploty nastat v krycí vrstvě betonové konstrukce. Sušení bylo nastaveno na 110 °C po dobu 72 hodin v laboratorní sušárně. Zkušební tělesa byly poté vypáleny v keramické peci Rhode KE130B. Zkušební tělesa každé receptury byly rozděleny do 7 sad dle výpalu – referenční nepálená sada a sady pálené na 200, 400, 600, 800, 1000 a 1200 °C. Teplotní nárůst byl nastaven na 300 °C/min a teplotní výdrž na 1 hodinu. Chlazení probíhalo samovolně v peci až na pokojovou teplotu.

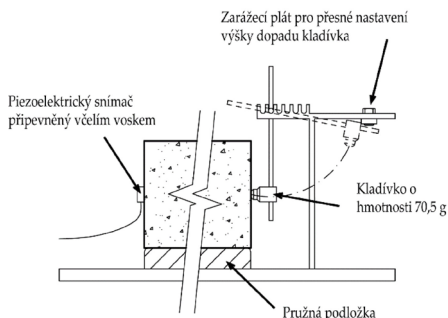
3. Experiment

Metoda IE je založená na vnášení mechanických impulzů v podobě úderu sférického kladívka do povrchu zkušební tělesa a následné snímání vibrací pomocí piezoelektrického snímače (Carino, 2001). Takto zaznamenaný signál tvořený změnou amplitudy [mV] na čase [ms] poté transformujeme pomocí rychlé Fourierovy transformace na frekvenční spektrum (Bracewell, 1999), které jsme schopni analyzovat. Postup této metody je popsán jak v americké technické normě ASTM C1383 15 (ASTM C1383-15, 2015), tak v české technické normě ČSN 73 1372 Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení (Úřad pro technickou normalizaci, 2012). Pro potřeby tohoto zkoušení se volí zkušební tělesa prismatického tvaru, kdy délka je aspoň dvojnásobkem kratšího rozměru. Můžeme takto zkoušet válce i trámce. V první sestavě je snímač umístěn uprostřed plochy kratší strany a buď vyvozuje úderu na protější straně zkušební tělesa. Při analýze změřeného frekvenčního spektra se tak zaměřujeme na první dominantní frekvenci f_1 . Zkušební sestava je uvedena na Obr. 1 a Obr. 2.



Obr. 1: Schéma zkušební postupy.

Figure 1: Scheme of test set.



Obr. 2: Vnášení mechanického vlnění a snímání vibrací.

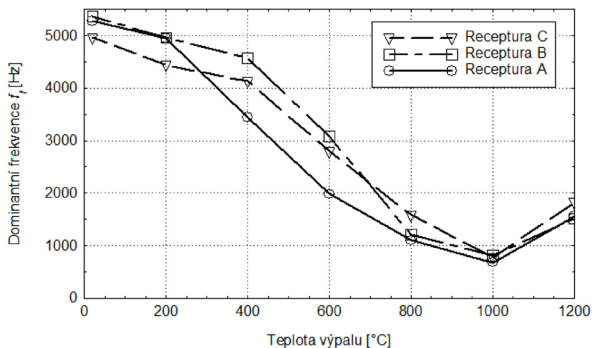
Figure 2: Apparatuses for wave excitation and recording.

Pro excitaci mechanického vlnění bylo využito kladívko se sférickou hlavou o hmotnosti 70,5 g a jako snímač byl využit piezoelektrický senzor MIDI 446s12. V rámci této publikace jsou prezentovány výsledky z měření podélného vlnění. Při tomto hledáme rezonanční frekvenci zkušebního tělesa. Změna fyzikálně chemických a převážně fyzikálně mechanických vlastností se projevují právě posunem první dominantní rezonanční frekvence směrem k nižším frekvencím. Na měřenou frekvenci mají vliv i okrajové podmínky měření jako je teplota vzduchu a obsažená vlhkost. Všechna měření metodou IE probíhala v laboratorních podmínkách s udržovanou teplotou 21 ± 2 °C. Změna struktury zkušebních těles v průběhu výpalu (Graves, 2006) ovlivňuje systém otevřených pórů a kapilár, což se projevuje změnou v nasákavosti takto degradovaného betonu. Tento proces tak ovlivňuje rychlost průchodu mechanického vlnění v betonu (Ohdaira & Masuzawa). Z tohoto důvodu bylo provedeno měření nasákavosti u všech tří receptur dle ČSN 73 1316 (Úřad pro technickou normalizace, 1990). Na referenčních zkušebních tělesech receptury B byl též sledován vliv různého obsahu vlhkosti na změnu rezonanční frekvence. Krom měření metodou IE byly provedeny destruktivní zkoušky v tahu a tlaku (ČSN EN 12 390-5, 2009), (ČSN EN 12 390-3, 2009).

4. Výsledky měření

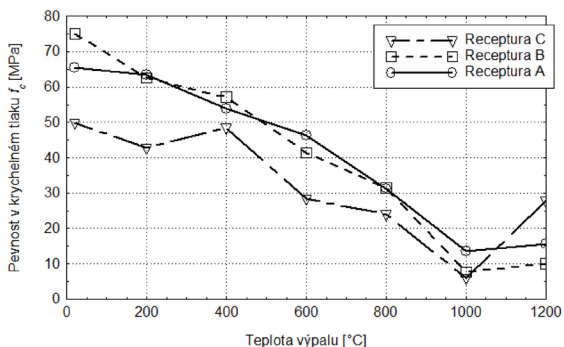
Zkušební tělesa byla vypálena na dané teploty a byla následně testována vybranými zkušebními postupy. U všech receptur se ukázala jako kritická teplota 1000 °C, která byla lokální minimem jak pro výsledky získané metodou IE, tak pro destruktivní zkoušky. Teplotně nenamáhaná zkušební tělesa dosahovaly rezonanční frekvence 5,29 kHz pro recepturu A, 5,37 kHz pro recepturu B a 4,96 kHz pro recepturu C. Z pohledu měření

rezonanční frekvence pak receptura A vykazovala jako první výraznější pokles rezonanční frekvence už mezi teplotou 200 a 400 °C. Receptura B a C pak první výrazný pokles vykazovala při teplotě 400 až 600 °C.



Graf 1: Srovnání průměrné první dominantní frekvence podélného kmitání pro tři receptury degradované vysokou teplotou.

Chart 1: Comparison of average resonance frequency of thermally degraded test specimens.



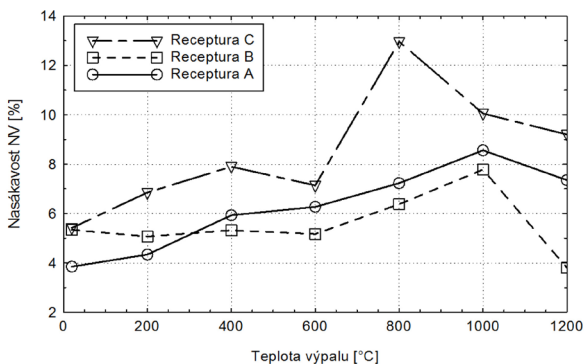
Graf 2: Srovnání průměrné pevnosti v tlaku vypálených zkušebních těles.

Chart 2: Comparison of average values of compressive strength of thermally degraded test specimens.

Všechny receptury pak vykazují nejnižší naměřenou frekvenci při teplotě 1000 °C a to 0,68 kHz pro recepturu A, 0,81 kHz pro recepturu B a 0,78 kHz pro recepturu C. Nad tuto teplotu došlo k mírnému zvýšení rezonanční frekvence o 0,8 – 1,0 kHz. Podobné chování vykazují i destruktivní zkoušky, viz Graf 2². Toto chování je dáno fyzikálně chemickými změnami jak v cementové matici, tak použitím hrubém kamenivu. V průběhu teplotního zatěžování zrna kameniva expandují a zvětšují svůj průměr, cementová matrice se

² V rámci výzkumu byly provedeny i zkoušky pevnosti v tahu ohybem, které ale vzhledem k rozsahu publikace nejsou prezentovány.

naopak dehydratuje, smršťuje se a vznikají nové mikrotrhliny a kapiláry. Fyzikálně a chemicky vázaná voda odchází ve formě páry, cementové hydratační produkty jsou dehydratovány (rozklad C-S-H gelu a portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hager, Behaviour of cement concrete at high temperature)). Tyto procesy způsobují zvýšení porozity a snižování objemové hmotnosti betonu což se projevuje jak na rychlosti průchodu mechanického vlnění zkoušenou hmotou, tak na nasákavost betonu (Ohdaira & Masuzawa). Doposud hydraulické vazby jsou tak postupně vystřídány vazbami keramickými a beton začíná částečně slinovat (Bodnárová, Zach, Hroudová, & Válek, 2013). Vliv změny porozity na nasákavost zkušebních těles jednotlivých receptur je uveden na Graf 3.



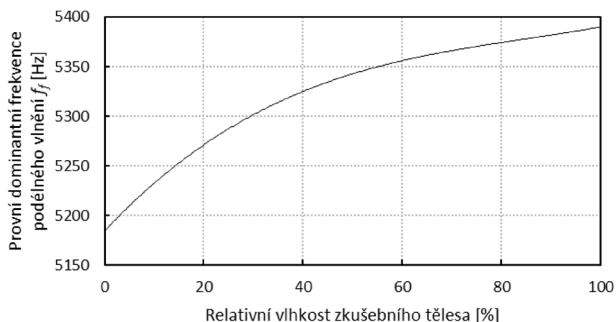
Graf 3: Nasákavost teplotně degradovaných zkušebních těles.

Chart 3: Water absorption of thermally degraded test specimens.

Hodnoty nasákavosti pro referenční sadu se pohybují od 4 do 6 % a nejvyšší nasákavost 11,9 % pak má sada receptury C vypálena na 800 °C. Receptura C dosahuje nejnižších hodnot jak při destruktivním, tak nedestruktivním zkoušení. Avšak díky použití hrubé frakce 4/8 mm vykazuje pravděpodobně rychlejší vznik keramických vazeb, a tedy i výraznější zvýšení hodnot nad 1000 °C. Vznik prasklin na rozhraní cementové matrice a hrubého kameniva fungují jako kapiláry, které se tak účastní zvýšení nasákavosti. V případě receptury C však došlo ke značnému snížení nasákavosti až pod počáteční 4 %. Toto chování můžeme pravděpodobně přisoudit částečnému přechodu křemičitých složek do taveniny, která vzniklé kapiláry z části vyplnila.

Na měření rezonanční frekvence má vliv obsah vlhkosti (Ohdaira & Masuzawa), což se projevilo při měření změny rezonanční frekvence na referenčních tělesech zobrazené na Graf 4. Jedná se o skupinu zkušebních referenčních těles receptury B, které byly po dobu 2 týdnů ponořeny ve vodní lázni. Poté se po dobu dvou měsíců průběžně měřila rezonanční frekvence. Zkušební tělesa se nakonec vysušila a zjistila se tak rezonanční frekvence tělesa s obsahem relativní vlhkosti od 0 do 100 %. Veškerá měření probíhala

za pokojové teploty 20 ± 2 °C. Z grafu jde vidět rozdíl 0,22 kHz mezi nasáklým a suchým stavem.



Graf 4: Změna průměrné rezonanční frekvence referenčních těles při různém obsahu vlhkosti.

Chart 4: Change of average resonance frequency of reference test specimen with different content of moisture.

5. Závěr

Byly vyrobeny, vypáleny a testovány zkušební tělesa prostého betonu třech různých receptur. Receptury byly navrženy s rozdílnou frakcí hrubého kameniva Olbramovice frakce 4/8 mm, 8/16 mm a 11/22 mm. Na zkušebních tělesech bylo provedeno měření pomocí akustické nedestruktivní metody Impact-Echo se záměrem ověřit použitelnost této metody pro účel kvalitativního posouzení vlivu teplotní degradace na prostém betonu. Byla naměřena změna v dominantních frekvencích pro jednotlivé sady, kdy při vyšší vlhkosti koreluje s výsledky destruktivních zkoušek pevností v tlaku. Tyto výsledky dokazují, že metoda IE je použitelná pro zkoušení betonových zkušebních těles poškozených vysokými teplotami a stanovení míry degradace. Zkušební tělesa degradovaná na vyšší teplotu s větším obsahem menší frakce hrubého kameniva 4/8 mm projevila vyšší nárůst nasákavosti. Sledování změny rezonanční frekvence referenčních těles s rozdílnou relativní vlhkostí vykazovala rozdíl 0,22 kHz mezi suchým a plně nasyceným zkušebním vzorkem. Pro účel přesného stanovení vztahu mezi rezonanční frekvencí a dosaženou teplotou při výpalu, se v dalších experimentech nabízí sledování změny rezonanční frekvence při různé vlhkosti pro teplotně degradovaná zkušební tělesa.

6. Poděkování

Tato publikace byla vypracována pod projektem No. LO1408 „AdMaS Up – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“, podporované Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy, pod projektem GAČR No. 16-02261S a Juniorským projektem FAST-J-17-4585 podporovaným Stavební fakultou Vysokého učení technického v Brně.

7. Bibliografie

(nedatováno).

- ASTM C1383-15. (2015). Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. 1. West Conshohocken: ASTM International.
- Bodnářová, L., Zach, J., Hroudová, J., & Válek, J. (2013). Methods for Determination of the Quality of Concretes with Respect to their High Temperature Behaviour. *Procedia Engineering*, vol. 65, 260-265. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.040
- Bracewell, R. (1999). *The Fourier Transform & Its Applications* (3. vyd.). USA: McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Carino, N. (2001). THE IMPACT-ECHO METHOD: AN OVERVIEW. *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, 18, 1-19.
- ČSN EN 12 390-3. (2009). Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN EN 12 390-5. (2009). Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut.
- Ghorbanpoor, A., & Benish, N. (2003). Non-destructive testing of wisconsin highway bridge: Wisconsin highway research program—final report. Wisconsin Department of Transportation.
- Graves, H. (2006). A Review of the Effects of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures. *Volume 1: Plant Operations, Maintenance and Life Cycle; Component Reliability and Materials Issues; Codes, Standards, Licensing and Regulatory Issues; Fuel Cycle and High Level Waste Management*, 615-624. doi:10.1115/ICONE14-89631
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 61(issue 1), -. doi:10.2478/bpasts-2013-0013
- Hager, I. (2015). Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 2015, 9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007
- Hager, I. (nedatováno). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, -. doi:10.2478/bpasts-2013-0013
- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2nd ed.. vyd.). Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Ohdaira, E., & Masuzawa, N. (nedatováno). Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE. *Ultrasonics*, 546-552. doi:10.1016/S0041-624X(99)00158-4
- Štefková, D., Tupý, M., Sotiriadis, K., Šamárková, K., & Chobola, Z. (nedatováno). High-Temperature Degradation of Mortar Containing Rubber Aggregates and EVA Binder Evaluated by Impact-Echo Method. *Applied Mechanics and Materials*, 272-275. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.627.272

- Úřad pro technickou normalizace, m. a. (1990). Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlínivosti betonu. Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, m. a. (2012). Nedestrukтивní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- Zhao, J., Zheng, J.-j., Peng, G.-f., & van Breugel, K. (2014). A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure. *Cement and Concrete Research*, vol. 65, 64-75. doi:10.1016/j.cemconres.2014.07.010



ACCEPTANCE ULTRASONIC TESTING OF RAILS. REGULATORY REQUIREMENTS AND PRACTICES

Grigory DYMKIN*, Alexey SHELUKHIN**

*Research Institute of Bridges and NDT; Petersburg State Transport University,

** Research Institute of Bridges and NDT

Contact e-mail: gdymkin@gmail.com; shelukhin_a@mail.ru

Abstract

Non-destructive testing is mandatory and very important step in the manufacture of railway rails. The so-called NDT Lines include: automated equipment for measuring the geometrical characteristics (linearity and the cross-sectional shape) of rails; eddy current testing to detect surface defects and ultrasonic inspection to detect internal flaws. The presentation provides a comparative analysis of the requirements of Russian and other States regulations for acceptance nondestructive testing of rails in production. On the basis of experimental research and numerical simulation of the acoustic field ultrasonic testing sensitivity distributions at the cross section of the rail have been estimated. The results show the difference between the required and implemented testing areas. It is very important that the zone of least sensitivity coincides with the zone of maximum operating stress. Recommendations for changes to the requirements for ultrasonic testing of rails in production is justified given the characteristics and location of rail defects that were found in both the manufacture and in operation

Key words: rails, acceptance ultrasonic testing, regulation requirements

1. Introduction

Non-destructive testing is an obligatory and extremely important stage in the rails production technology. The so-called non-destructive testing lines as part of the technological process include equipment for measuring the geometric characteristics of the rail, as well as eddy current quality control of the surface and ultrasonic testing for internal defects. Requirements for ultrasonic control of rails are established in national or international regulatory documents: in Russia – GOST R 51685-2013 [1], in the European Union – EN 13674-1: 2011 [2], in the USA – norms of American Society for Testing and Materials (ASTM-A1-2010) [3] and American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (APEMA, ch. 4: 2014) [4]. These documents regulate sensitivity and testing zone (see Table). It is also established that

the controlled cross-sectional area of the rail is conditionally determined by projections of the nominal sizes of transducers.

The main purpose of this research is to analyze practical implementation of the requirements for testing zones of the rail cross section established by regulatory documentation. Comparison is performed just for the head and web testing channels, over which more than 99% of the flaws are detected.

Table – Requirements for ultrasonic acceptance testing of rails in accordance with regulatory documents of Russia, the European Union and the USA

Testing zone and diagram	Type and dimensions of the reference reflector for setting sensitivity levels according to the standards		
	[1], [2]	[3]	[4]
The head from the top	SDH 2 mm, h = 20 mm	FBH 2.38 mm	FBH 4.23 mm
The head from the side face (two sides)	FBH 2 mm, h = 60 mm		
The web from the top	SDH 2 mm, h= 20 mm, 150 mm	FBH 3.18 mm	FBH 2.38 mm
The web from one side	FBH 2 mm, h - on the vertical axis		
The foot from below	SDH 2 mm, h= 30 mm	Longitudinal notch depth 1.59 mm length 6.35 mm	Longitudinal notch depth 1.59 mm length 12.7 mm
SDH – side drilling hole; FBH – flat-bottom hole; h –depth			

2. Modeling of the transducers field

To solve this task, numerical modeling of the piezoelectric transducers field used in one of the installations for acceptance ultrasonic testing of rails [5] was performed. When modeling, parameters of the acoustic path (the frequency of ultrasonic oscillations, the size of the piezoceramic plate, the acoustic delay parameters, dimensions, type and location of the reference reflectors) were chosen the same as in the exploited installation. The modeling was performed as per the following algorithm:

- calculation of the signal amplitude from the reference reflector, on which the reject level was set;
- increase of gain by 4 dB above the reject level (in accordance with requirements of regulatory documents);

- determining the width of the zone in which the amplitude of the echo signal from the reference reflector exceeds the reject level by calculating amplitudes of the echoes from the reference reflector placed in different points along the acoustic axis of the transducer and when shifting it vertically relative to the acoustic axis;
- graphical representation of the fields of transducers in the cross section of the rail.

It should be noted that when modeling the transducer field, the size of the dead zone determined by the experimental method was also taken into account. Figure 1 shows results of modeling for two types of rail, manufactured according to Russian and European standards: P65 and 60E1. It can be seen that actually, that with required sensitivity is monitored only part of the zone, which is considered "controlled" in accordance with regulatory documents (for the head – 73%, for the web – 25%).

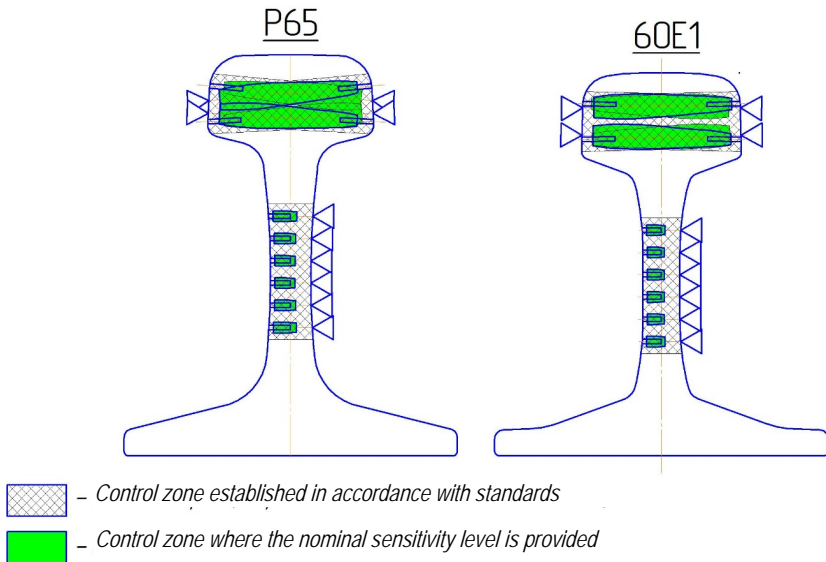


Figure 1

3. Location of defects detected during acceptance ultrasonic testing and analysis of the scanning scheme

Also within the framework of this work, statistical analysis of the results of acceptance ultrasonic testing of rails at one of the Russian metallurgical plants was performed. Figure 2 (a) shows zones in which metallographic studies show the highest probability of occurrence of metallurgical defects, and Figure 2 (b) – zones in which more than 99% of the defects detected during acceptance ultrasonic testing are concentrated. This distribution was obtained by analyzing coordinates of the detected defects, as well as the results of opening a number of samples of rails with defects. As can be seen,

the actual location of the defects detected during acceptance NDT corresponds to what is expected.

When analyzing the scanning scheme, the rail head is most interesting. The results of operational rails monitoring in Russia show that about 30% of defective rails (7–9 thousand rails per year) are removed from the track due to presence of transverse contact fatigue cracks in the rail head. When opening such defects, it is often possible to see the defect origin point which is located at a depth of less than 15 mm from the working fillet of the rail head and is an oxide inclusion. It is in this zone in accordance with GOST R 51685 and EN 13674 destructive control of contamination with non-metallic inclusions is performed.

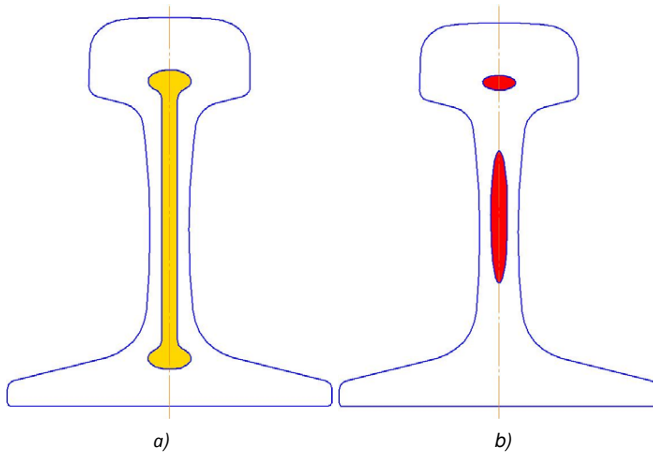


Figure 2

Figure 3 shows examples of transverse contact-fatigue cracks in the rail head, and in Figure 4 – location of the actual head control zones on the side and zones where occurrence of a transverse contact fatigue crack is most likely.



Figure 3

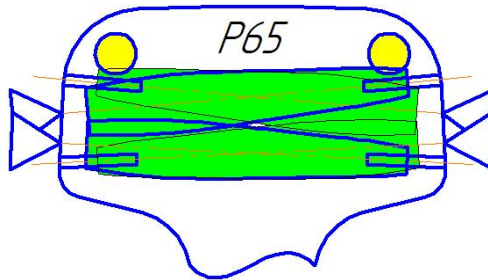


Figure 4

It can be seen from Fig. 4 that zones in which probability of occurrence of contact fatigue defects is the highest are practically not monitored.

4. Conclusions

1. Numerical modeling of the transducer field with subsequent graphic plotting of the control zone showed that the actually monitored zone is significantly different (downwards) from the control zone determined in accordance with regulatory documents.
2. It was established that the zones of the rail head where probability of occurrence of contact fatigue defects is the largest, are practically uncontrolled during acceptance ultrasonic control.
3. To determine the possibility of detecting oxide inclusions in the areas of the rail head where occurrence of contact fatigue cracks is most likely during operation, it is necessary to conduct experimental studies of detectability of such defects. In case of positive results, the scanning scheme and sensitivity in this zone may be adjusted.

References

1. GOST R 51685-2013. Railway rails. General specifications.
2. DIN EN 13674-1-2011. Railway application – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.
3. ASTM-A1-2010. Standard Specification for Carbon Steel Tee Rails.
4. AREMA chapter 4 RAIL: 2014.
5. Acceptance nondestructive ultrasonic echo-pulse testing of rails using UKR-64E /G. Dymkin, D. Kosobokov, A. Shelukhin, I. Etingen // Путь и путевое хозяйство, 2017, №6, p. 11-13



ZKOUŠENÍ SVARU OBALOVÉHO SOUBORU ŠKODA 1000/19 ULTRAZVUKEM

ULTRASONIC TESTING OF THE CASK BODY SKODA 1000/19

Lukáš FAIT

ŠKODA JS a.s.

Contact e-mail: lukas.fait@skoda-js.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá zkoušením svaru obalového souboru pro použité palivo z jaderné elektrárny typu VVER 1000 (JE Temelín) ultrazvukem odrazovou technikou a difrakční technikou TOFD. Popisuje problematiku použití jednotlivých technik pro zkoušení svarů velkých tloušťek. Dále porovnává zkoušení tohoto svaru ultrazvukem s radiografickou metodou a shrnuje poznatky z praxe.

Klíčová slova: obalový soubor, svar, ultrazvuk, TOFD

Abstract

This article deals with ultrasonic testing of the weld of cask body for used fuel from nuclear power plant type VVER 1000 (NPP Temelin) by the pulse-echo technique and time of flight diffraction technique. This article describes problematic of using of particular techniques for big thickness welds testing. Furthermore, it compares ultrasonic and radiographic testing of this weld and summarizes experience.

Key words: cask body, weld, ultrasonic, TOFD

1. POPIS OS ŠKODA 1000

Obalový soubor pro přepravu a skladování ŠKODA 1000/19 (Obrázek 1) je koncipován pro přepravu a dlouhodobé skladování vyhořelých palivových souborů z tlakovodních reaktorů typu VVER 1000. Obalový soubor ŠKODA 1000/19 se skládá ze silnostěnného válcového tělesa s uzavíracím systémem o dvou víkách a z nosného koše umístěného ve vnitřní šachtě tělesa obalového souboru, který slouží pro uložení palivových souborů.

Obě víka - primární i sekundární - tvořící uzavírací systém obalového souboru jsou zhotovena z korozivzdorné kované oceli a upevňují se k tělesu OS zhotovenému z kované uhlíkové oceli svorníky a uzavřenými maticemi resp. šrouby s válcovou hlavou.



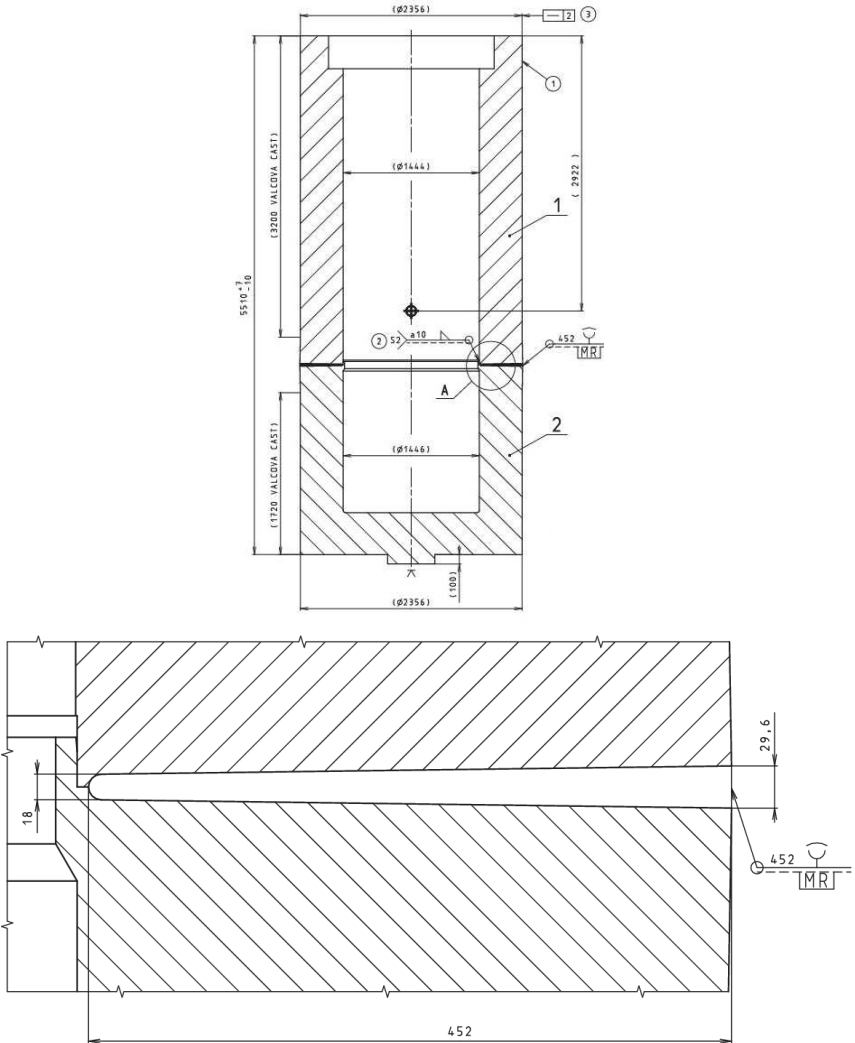
Obrázek 1: Obalový soubor pro přepravu a skladování ŠKODA 1000/19

1.1. Materiál tělesa

Těleso OS ŠKODA 1000 je vyrobeno z nízkolegované uhlíkové oceli ASTM A 350M Grade LF2, Class 1. Tato ocel je určena na výkvyky přírub, armatur a ventilů namáhaných tlakem pro práci za nízkých teplot, u nichž je vyžadována zkouška vrubové houževnatosti. Chemické složení je optimalizováno pro dosažení vhodných vlastností materiálu během tváření za tepla, vlastností vhodných pro svařování a vhodných mechanických vlastností výkvyků.

1.2. Provedení svaru

Těleso obalového souboru je svařeno ze dvou částí. Svar mezi dnem a pláštěm tělesa je proveden metodou 121 podle EN ISO 4063 - Svařování drátem pod tavidlem do úzkého úkosu v poloze vodorovné shora s předehřevem a následným žháním na odstranění vnitřních prnutí po svařování. Nákres úzkomezerového svaru viz obrázek 2.



Obrázek 2: Nákres úzkomezerového svaru OS ŠKODA 1000/19

2. ZVOLENÉ NDT METODY

Kontrola svaru tělesa OS ŠKODA 1000/19 předpokládá použití objemových metod NDT. Dle zadávací dokumentace zákazníka (ČEZ) je požadována kontrola svarových spojů OS prozařováním. Výrobce (ŠJS) navrhl jako alternativní metodu NDT použít zkoušení ultrazvukem.

2.1. Vznik možných necelistvostí

Při použití automatového svařování úzkomezerového svaru tělesa OS ŠKODA 1000 se dají očekávat následující typy necelistvostí, které je nutné odhalit:

- trhliny (příčné, podélné)
- studené spoje (na úkosu, mezi housenkami)
- struskové vměstky a póry

2.2. Zkouška prozařováním

Prozáření svaru tělesa OS ŠKODA 1000 je vzhledem k projektové tloušťce stěny kolem 450 mm velmi obtížné. Jediným vhodným zařízením na prozařování svarů těchto tloušťek je lineární urychlovač pracující s částicemi vysokých energií.

2.2.1 Princip zkoušení prozařováním

Zkoušení prozařováním je citlivé na necelistvosti v materiálu, které mají hlavní rozměr ve směru tloušťky materiálu. Při průchodu paprsků záření přes necelistvost nedochází ke stejnému zeslabení záření jako v okolním homogenním materiálu a proto je možné obraz necelistvosti zachytit na rentgenový film.

2.3. Zkouška ultrazvukem

Pro kompletní vyzkoušení svaru tělesa OS ŠKODA 1000/19 je nutné použít kombinaci několika ultrazvukových technik. Výhodou použití kombinace těchto technik je možnost určit rozměr a polohu necelistvostí ve směru hloubky, což zkouška prozařováním neumožňuje.

2.3.1 Odrazová technika

Konvenční ultrazvuková technika prováděná ručním způsobem. Předpokládané použití přímých a úhlových sond pro zjištění necelistvostí orientovaných v různých směrech.

2.3.2 Difrakční technika TOFD

Hlavní předností této techniky je vysoká citlivost na planární necelistvosti, především na trhliny kolmé ke zkušebnímu povrchu. Tím velmi dobře doplňuje techniku impulzní odrazovou, která naopak takto orientované necelistvosti detekuje problematicky, respektive s velmi malou náhradní velikostí. Difrakční technika (TOFD) fakticky nahrazuje zkoušení technikou „tandemovou.“ Velkou předností této techniky je digitální záznam, ze kterého je možné kdykoli určit nebo případně ověřit polohu a velikost nalezených indikací.

3. ZKOUŠENÉ KOMPONENTY

Svaření tělesa OS ŠKODA 1000/19, předcházely pracovní a kvalifikační zkoušky svařování. Na svařených blocích bylo možno ověřovat citlivost a vhodnost použití jednotlivých NDT metod.

3.1. Kontrolní svarový spoj VP 666

Před vlastním svařením tělesa OS ŠKODA 1000/19 byl svařen kontrolní svarový spoj VP 666, který přesně odpovídal budoucímu svarovému spoji tělesa OS.

Tento kontrolní svarový spoj byl zkoušen následujícími metodami a technikami NDT:

- Zkouška prozařováním
- Zkouška ultrazvukem – odrazová technika
- Zkouška ultrazvukem – technika TOFD

3.1.1 Zkouška prozařováním

Před svařením kontrolního svarového spoje VP 666 byla provedena zkouška citlivosti prozáření lineárním urychlovačem. Do jedné části bloku budoucího kontrolního svarového spoje VP 666 byly vyrobeny otvory různých průměrů a hloubek.

Touto zkouškou bylo ověřeno, že prozářením lze detekovat i nejmenší vývrt o průměru 3 mm a hloubce 3 mm přes celou tloušťku zkoušeného materiálu.

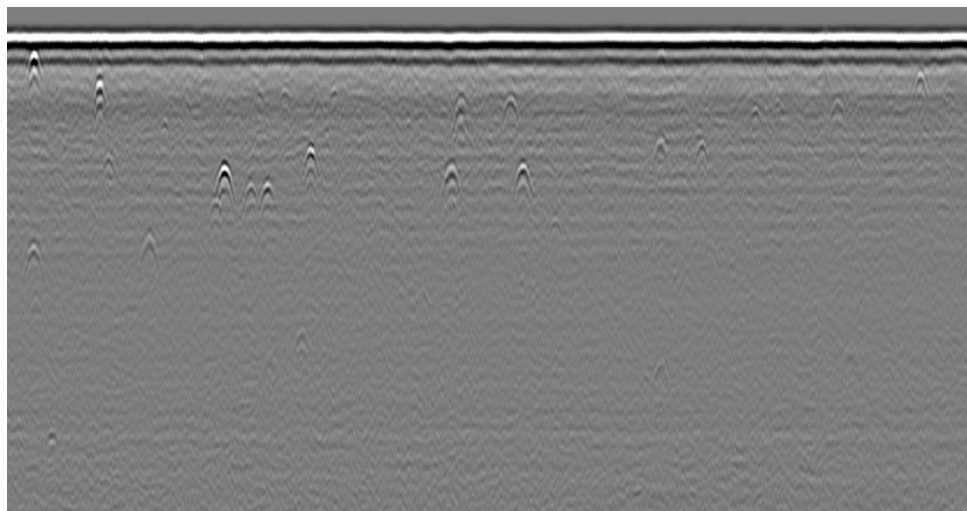
Po svaření VP 666 bylo provedeno prozáření svarového spoje s vyhovujícím výsledkem. Na snímcích byly registrovány celkem 3 indikace, které byly vyhodnoceny jako přípustné. Tyto indikace jsou na snímcích velice špatně rozeznatelné.

3.1.2 Zkouška ultrazvukem – odrazová technika

Kontrolní svarový spoj VP 666 byl zkoušen ultrazvukem za použití sond s frekvencí 2 MHz a úhly 0°, 45° a 60°. Výsledek této zkoušky byl vyhovující. Nebyly registrovány žádné indikace. Během zkoušení bylo detekováno několik ojedinělých přípustných bodových indikací o náhradní velikosti $D_n = 2 \div 4$ mm.

3.1.3 Zkouška ultrazvukem – technika TOFD

Pro zkoušku ultrazvukem technikou TOFD, byl svar rozdělen po hloubce na 7 zón. Byly použity úhly předsádek 30°, 45° a 60° a sondy s různými průměry měničů a jmenovitými frekvencemi pro dosažení optimální citlivosti v každé zóně. Zkouškou technikou TOFD nebyla nalezena žádná nevyhovující indikace. Bylo nalezeno množství ojedinělých bodových indikací, případně indikací způsobených strukturou materiálu. Vybrané záznamy jsou na Obrázku 3.



Obrázek 3: Záznam TOFD – bodové indikace

4. VYHODNOCENÍ

4.1. Porovnání metod NDT

Z výše uvedeného plyne, že radiografická i ultrazvuková metoda mají své výhody i nevýhody. Při použití radiografické metody je nutné počítat s doplněním této metody zkoušením ultrazvukovou metodou pro detekci vad rovnoběžných s povrchem případně vad s malým rozměrem ve směru tloušťky. Ultrazvukovou metodu lze při nasazení kombinace odrazové techniky a techniky TOFD použít samostatně.

4.1.1 Radiografická metoda

Výhody:

- Dobrá detekce objemových necelistvostí a necelistvostí s hlavním rozměrem ve směru prozařování
- Relativně jednodušší vyhodnocení a interpretace výsledků

Nevýhody:

- Špatná detekce necelistvostí kolmých ke směru prozařování
- Nemožnost určení rozměru a polohy necelistvostí po hloubce
- Vzhledem k prozařované tloušťce může docházet ke zkreslení velikosti indikací vlivem projekce
- Malá flexibilita zkoušky

4.1.2 Ultrazvuková metoda

Výhody:

- Za použití kombinace různých technik dobrá detekce všech typů necelistvostí
- Možnost určení rozměru a polohy necelistvostí po hloubce
- Flexibilita, rychlost a nízké nároky na prostor
- Digitální záznam zkoušky, vyhodnocení dat pomocí speciálního software

Nevýhody:

- Nutnost použití kombinace různých technik
- Vyhodnocení a interpretaci výsledků zkoušky musí provádět zkušení pracovníci s kvalifikací v metodě UT a technice TOFD

5. ZÁVĚR

Zkoušení radiografickou metodou má hlubokou tradici ve všech kódech a standardech užívaných pro zkoušení svarových spojů. Vývoj ultrazvukových technik v poslední době, užití digitalizace a softwarových aplikací umožnilo, aby se ultrazvukové zkoušení radiografickému zkoušení vyrovnalo a v některých případech jej i předčilo.

V případě zkoušení úzkomezerového svaru tělesa obalového souboru ŠKODA 1000/19 je tedy z hlediska NDT kontrol a detekce necelistvostí principálně možné použít obě dvě objemové NDT metody. Radiografickou metodu je nutné kombinovat s ultrazvukovou metodou (odrazová technika) pro zachycení necelistvostí nepříznivě orientovaných ke směru prozařování. Ultrazvukovou metodu pak lze použít při kombinaci různých technik zkoušení samostatně. Při zkoušení oběma metodami vzniká záznam, v případě RT je to rentgenový snímek, v případě UT je to digitální záznam, který je možné dále zpracovat a vyhodnotit pomocí příslušného software.

Během vývoje a zavádění svařování tělesa OS ŠKODA 1000/19 do výroby bylo provedeno několik zkoušek a porovnání jednotlivých objemových NDT metod a technik. Lze konstatovat, že obě metody dosahují citlivosti potřebné pro prokázání nepřijatelných vad definovaných v příslušných zkušebních předpisech.

V přímém srovnání se ale ukazuje, že kombinace ultrazvukových technik TOFD a konvenční odrazové techniky prokazuje lepší citlivost. Zkouškou ultrazvukem byly detekovány i velmi malé indikace, které prozářením detekovány nebyly. Výhodou zkoušky ultrazvukem je také její velká flexibilita, nároky na prostor a pracoviště jsou malé. Odpadají také omezení daná nutností dodržovat principy radiační ochrany, jak je tomu u zkoušky prozařováním.

Z výše uvedeného srovnání je použití kombinace ultrazvukových technik TOFD a konvenční odrazové techniky oproti radiografické metodě výhodnější jak, z hlediska času a náročnosti provedení zkoušky, tak i z hlediska získaných výsledků, a proto lze doporučit náhradu radiografické zkoušky zkouškou ultrazvukovou.



SLEDOVÁNÍ STRUKTURNÍCH ZMĚN, VYVOLÁVANÝCH CYKLICKÝM ZATĚŽOVÁNÍM OCELI 15CH2NMFA, POMOCÍ RENTGENOVÉ DIFRAKCE A MĚŘENÍ KOERCITIVNÍ SÍLY

MONITORING STRUCTURAL CHANGES PRODUCED BY CYCLIC STRAIN OF STEEL 15CH2NMFA, WITH USE OF X-RAY DIFFRACTION AND COERCIVE FORCE MEASUREMENT

Jaroslav FIALA*, Michal KOLEGA*, Štěpán JÍRA**,
Pavel MAZAL***, František VLAŠIC***, Vendula KRATOCHVÍLOVÁ***

*Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie - Výzkumné centrum

**Čermákova 46, Plzeň

***Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Abstrakt

Cyklické zatěžování ovlivňuje strukturu tělesa v celém jeho objemu. Tak, jako kmitavý tepelný pohyb kteréhokoli z jeho atomů je lokálním projevem (predikovatelnou výslednicí fononového pole) vlnění tělesa jako celku. Sledujeme proto změny globální struktury zatěžovaného tělesa, jež by mohly vypovědět něco o procesu, jímž dochází k jeho poškození. O zákonitostech, které tento proces řídí a umožnily by jeho směřování v budoucnosti předpovídat. Aniž bychom hledali mikrolokality, v níž se (posléze fatální) únavová trhлина tvoří ještě dávno před tím, než je ji možné rozpoznat metodami nedestruktivního testování (což už je většinou pozdě). V tomto příspěvku pak prezentujeme výsledky měření, jež jsme za tím účelem prováděli po dobu několika let na vzorcích oceli 15CH2NMFA pomocí rentgenové difrakce a magnetického pole. Výhodou rentgenové difrakce jest bezprostřední interpretace naměřených hodnot (směrové distribuce intenzity difraktovaného záření) v kategoriích atomové konfigurace, k jejímž změnám vlivem zatěžování dochází. Nevýhodou je, že rentgenové difraktometry jsou velké a vyžadují zdroj vysokého napětí a chladicí vody, takže se pro praktickou aplikaci v provozních a polních podmínkách příliš nehodí. Z tohoto hlediska jsou výhodnější měření magnetická. I když to, co se v tomto případě zjišťuje, není přímo struktura materiálu, resp. její změny v důsledku cyklického zatěžování, ale změny magnetických vlastností, které jsou změnami struktury způsobené. Což zase až tak moc nevádí.

Klíčová slova: cyklické zatěžování, ocel 15CH2NMFA, rentgenová difrakce, měření koercitivní

Abstract

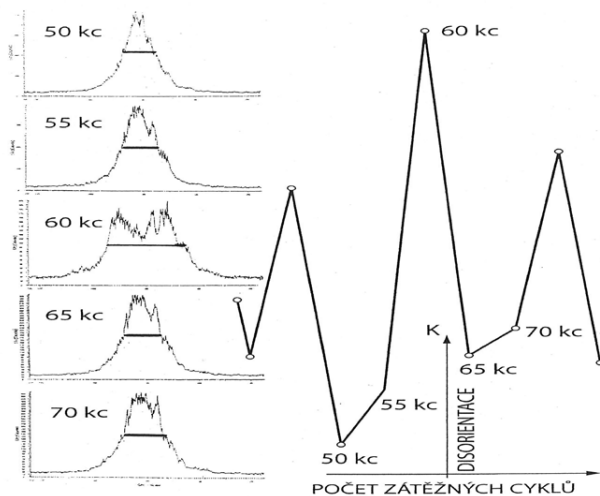
Cyclic strain affects structure of a body in its all volume. As much as thermal vibration of any of its atoms is a local manifestation (predictable resultant) of the undulation (of the phonon field) of the entire body. So we study the changes of the whole structure of the loaded body, that might tell something on the process by which it is damaged. On the laws, which control this process and might make it possible to forecast its future route. Without looking for the minute spot, where the (then fatal) fatigue crack forms long before it could be recognized by methods of nondestructive evaluation (which

is, as a rule, mostly late). In the present contribution we give an account on the results of examination of a number of samples of steel 15CH2NMFA, which we performed to this purpose in the course of several years using x-ray diffraction and coercive force measurements. Priority of the x-ray diffraction analysis consists in the fact that the results of measurement (directional distribution of the intensity of diffracted x-rays) can easily be expressed in terms of configuration of atoms, that changes due to loading. On the other hand, x-ray diffractometers are spacious and require high-voltage and cooling-water supply, which makes x-ray diffraction method no much suitable for application in working or field condition. For such a use, magnetic measurements are more convenient. Even when these are not structural changes which are determined by such measurements, but the changes of magnetic properties that are induced by the structural changes. Which is no much trouble, by the way.

Keywords: cyclic loading, steel 15CH2NMFA, x-ray diffraction, measurement of coercivity

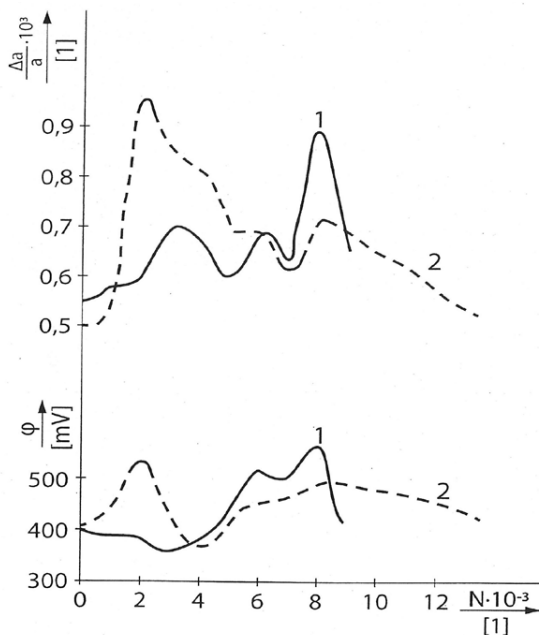
1. Úvod

Obr. 1 ukazuje, jak se během cyklického zatěžování duralu (Al + 4%Cu) střídavě rozšiřovala a zužovala směrová distribuce (disorientace) jeho mosaikových bloků [1, 2]. Také elektrodový potenciál ϕ oceli 20N2M se vlivem cyklického zatěžování rytmicky měnil, a to synchronně s radiálním rozšířením difrakční linie, jež je nepřímo úměrná velikosti mosaikových bloků (obr. 2) [3]. Protože struktura feromagnetika výrazně ovlivňuje jeho koercitivní sílu [4], rozhodli jsme se změřit během cyklického zatěžování oceli 15CH2NMFA rentgenový difraktogram a současně určit koercitivní sílu každého zkoumaného vzorku, abychom zjistili, zda by se při monitorování strukturálních změn, k nimž dochází během cyklického zatěžování, nedala využít těž magnetometrie.



Obr. 1. Azimutální profil difrakční linie (200) hliníku ve zkoumaném vzorku duralumin po 50, 55, 60, 65 a 70 tisících zatěžných cyklů (vlevo). Vpravo je uvedena závislost veličiny K, charakterisující směrovou distribuci (disorientaci) mosaikových bloků, na počtu zatěžných cyklů.

Fig. 1. Azimuthal profile of the diffraction line (200) of aluminum in an analyzed sample of duralumin after 50, 55, 60, 65 and 70 thousands of loading cycles (left). Dependence of the quantity K, characterizing the orientation distribution (disorientation) of mosaic blocks, on the number of loading cycles (right).

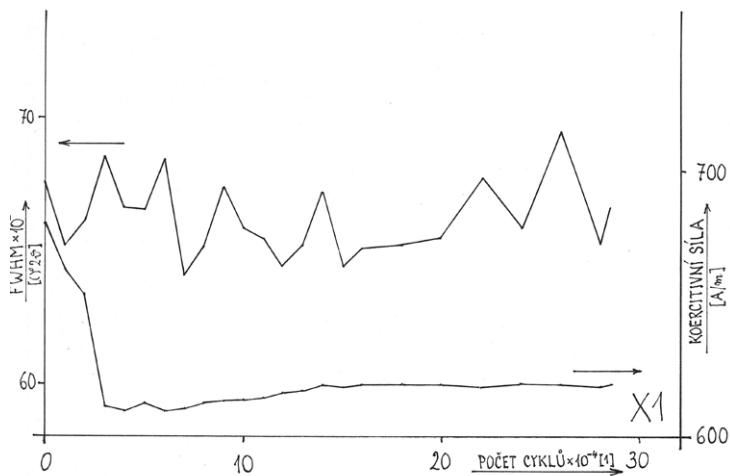


Obr. 2. Vliv cyklického mechanického zatěžování na strukturu oceli 20N2M (charakterisovanou hodnotou fluktuaace mřížkového parametru $\Delta a/a$) a na elektrodový potenciál φ ve vzduchu (1) a v korozně agresivním prostředí (2). Na horizontální souřadnicové ose se uvádí počet cyklů, na vertikální souřadnicové ose pak veličina $\Delta a/a$ (horní část grafu) a elektrodový potenciál φ na dolní části grafu. Hodnota $\Delta a/a$ je měrou radiálního rozlišení difrakční linie, která je nepřímo úměrná velikosti (difrakčně koherentních) mosaikových bloků: čím je $\Delta a/a$ větší, tím jsou mosaikové bloky menší.

Fig. 2. The effect of cyclic mechanical loading on the structure of steel 20N2M (characterized by the value of fluctuation of the lattice spacing $\Delta a/a$) and on electrode potential φ in air (1) and in a corrosive medium (2). $\Delta a/a$ (top) and electrode potential φ (bottom) versus number of loading cycles N . The value of $\Delta a/a$ is a measure of the radial broadening of the diffraction line, which is indirectly proportional to the size of the (diffraction coherent) mosaic blocks: the greater the value of $\Delta a/a$, the smaller are the mosaic blocks.

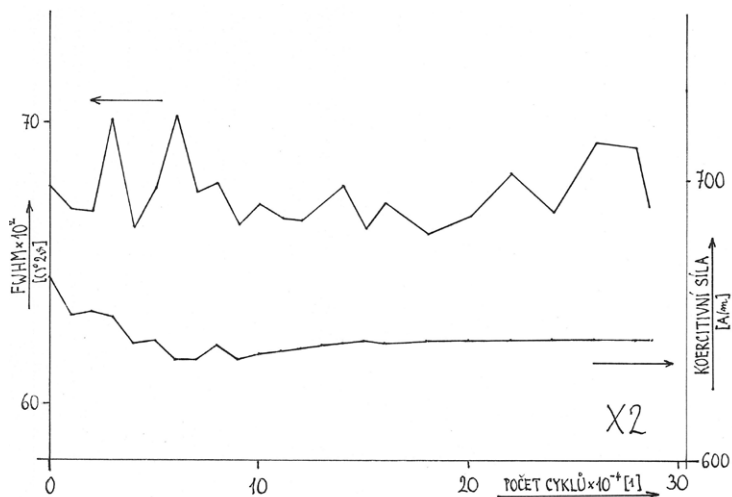
2. Měření

Zkoumali jsme šest vzorků oceli 15CH2NMFA (údajně téhož složení a tepelného zpracování), které byly (všechny stejně) cyklicky zatěžovány v ohybu až do lomu. Zatěžování bylo přerušováno po každých 10 000 cyklech až do 160 000 cyklů a pak po každých 20 000 cyklech až do lomu. Během každého přerušování byla změřena šířka rentgenové difrakční linie (211) feritu v polovině její výšky (FWHM) pomocí záření $\text{CoK}\alpha$ (v úhlových stupních odleskového úhlu 2θ) a koeritivní síla (v A/m). Měření trvalo 2½ roku. Výsledky měření jsou presentovány na obr. 3 – 8; vzorky označeny jako X1, X2, X3, X4, X6 a X7.



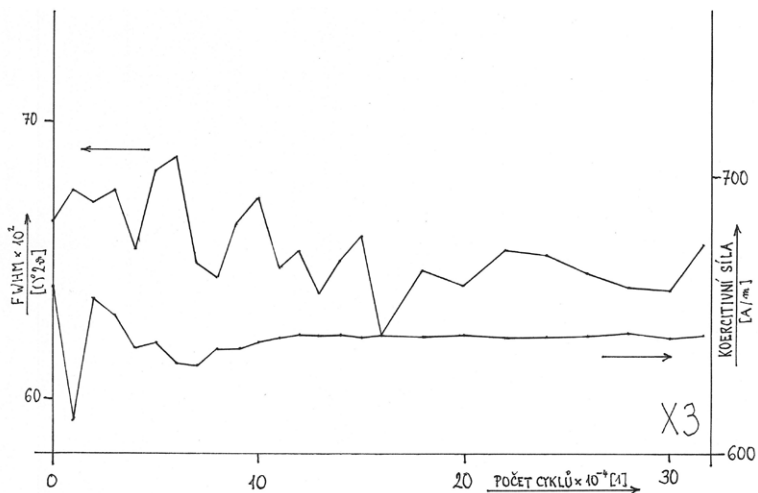
Obr. 3. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X1.

Fig. 3. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X1.



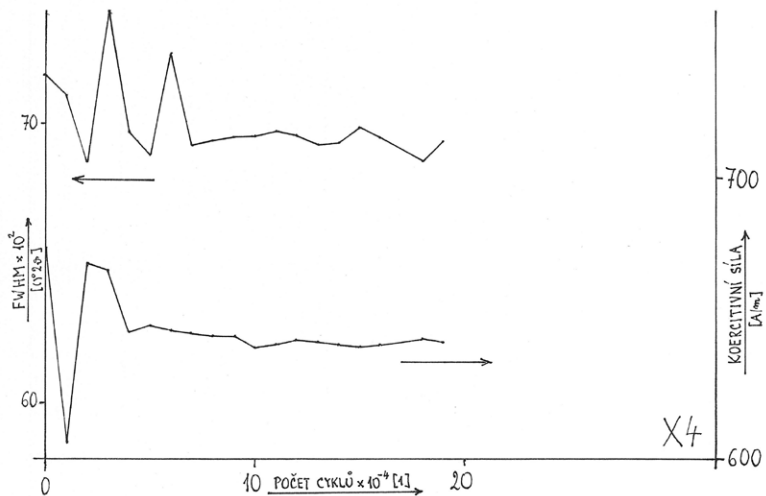
Obr. 4. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X2.

Fig. 4. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X2.



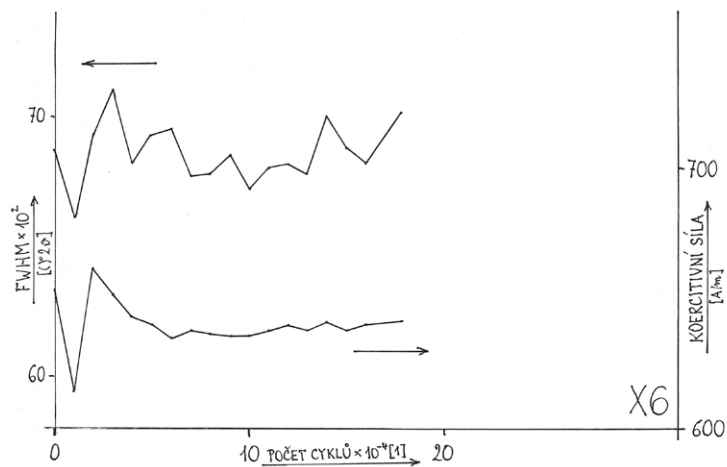
Obr. 5. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X3.

Fig. 5. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X3.



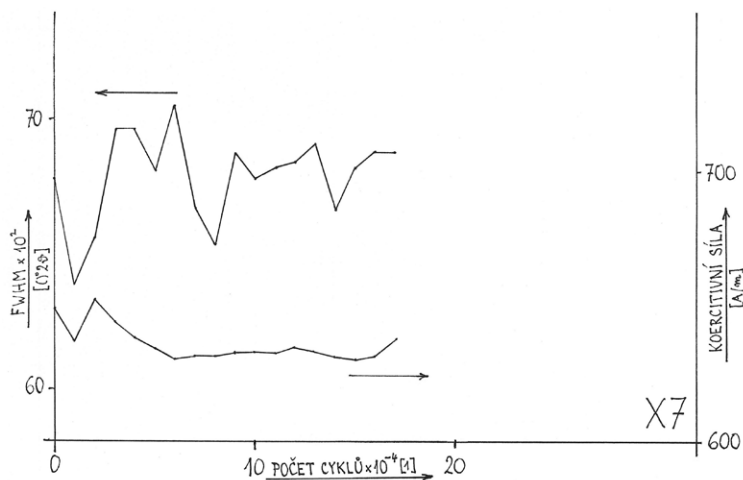
Obr. 6. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X4.

Fig. 6. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X4.



Obr. 7. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X6.

Fig. 7. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X6.



Obr. 8. Šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky a koercitivní síla v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek X7.

Fig. 8. Full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite and coercive force as a function of the number of loading cycles for the sample X7.

3. Diskuse

Z prezentovaných výsledků měření je především patrné, že počet cyklů do lomu se u jednotlivých vzorků velice liší: od 171 kilocyklů do 318 kilocyklů. Znamená to, že zkoumaný soubor vzorků není homogenní a že tedy jen to, co se opakuje u všech vzorků, bude signifikantní. Konkrétně, že šířka difrakčního maxima se při cyklickém zatěžování mění rytmicky, zatímco koercitivní síla je, až na počáteční exkurs, konstantní.

Vysvětlujeme si to tak, že během první krátké fáze cyklování dojde vlivem živějšího pohybu dislokací k anihilaci („vyrušení“) určitě jejich části a dosažení dynamické rovnováhy mezi těmi dislokacemi, které zůstaly. Ty jsou pak rozděleny do dvou populací: dislokací soustředěných v rozhraní mosaikových bloků – tam je vysoká hustota dislokací – a dislokací, kterých je málo a jsou uvnitř mosaikových bloků (v „bezdislokačních“ regionech). Dalším cyklováním dochází potom v důsledku hromadění parakrystalických distorsí uvnitř zvětšujících se bloků, rozpadu mosaikové struktury a jejího opětového hrubnutí (díky takto zvýšené rozhraňové energii) k „pendlování“ dislokací mezi oběma populacemi. Tento transfer je však už nadále vyrovnaný (vybilancovaný): celkový počet dislokací v materiálu se již nemění. A proto se koercitivní síla, která je úměrná odmocnině (celkové!, objemové) hustoty dislokací, už také dále nemění. Šířka difrakčních maxim je však (nepřímo) úměrná velikosti mosaikových bloků. Ta díky vzpomenutému mechanismu neustále osciluje, a proto se také šířka difrakčních maxim mění rytmicky – až posléze při této „hře na jámu a kyvadlo“ vznikne někde náhodou – zcela obdobně jako k tomu dochází při tuhnutí odlitku – nadkritická necelistvost a následně únavový lom. Pokud se pak týče (elektro)chemického potenciálu $\mu = \mu(r)$, ten je úměrný dispersi $1/r$ (vyjádřeno Herringovým vzorcem [5])

$$\mu(r) = \mu(\infty) + konst \cdot \frac{\alpha}{r}$$

kde r je velikost chemicky koherentní oblasti a α je mezipovrchové napětí) a proto se v průběhu cyklování rytmicky mění obdobně jako šířka difrakčních maxim (která je funkcí velikosti difrakčně koherentních oblastí).

4. Závěr

- a) Opět se potvrdilo, že leckdy existují obrovské rozdíly v počtu zátěžných cyklů do lomu mezi různými vzorky, které „by měly být stejné“.
- b) Získaly (a diskutovaly) se poznatky o tom, jak se mění rentgenografická (elektrochemická) a magnetická odezva materiálu během (vlivem) cyklického zatěžování a proč tomu tak je.
- c) Pro úplnost by se mělo měření koercitivní síly ještě zopakovat v pozmeněném uspořádání, aby se zjistilo, nakolik mohou být jeho výsledky ovlivněny:
 - velikostí měřené oblasti vzorku (buzené magnetickým polem);
 - (celkovou) dobou trvání (kampaň) měření (až do lomu).

The authors would like to thank the Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering for the funding of the projects No. FSI-S-17-4428 “Development of technology for the production of fast magnetoreological valves” and the project is also supported by NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and, in the follow-up sustainability stage, supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by financial means from the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“

Literatura

- [1] J. Fiala, P. Mazal, M. Kolega, F. Vlašic, P. Liškutín: Mechanismus únavových procesů. In Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2013, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2013, 17 – 22.
- [2] H. Frank, J. Fiala, I. Kraus: Elektronová struktura a reaktivita povrchů a rozhraní, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2013.
- [3] E. M. Gutman: Mehanochimija metallov i zaščita ot korosii, Metallurgija, Moskva 1981.
- [4] Š. Jíra, J.Fiala: Hysteresní smyčka feromagnetik. In Proceedings of NDE for Safety / Defektoskopie 2016, L. Pazdera, P. Mazal (eds), Brno University of Technology, Brno 2016, 37 – 51.
- [5] J. Fiala, I. Kraus: Povrchy a rozhraní, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2016.

RENTGENOGRAFICKÁ MĚŘENÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ X-RAY DIFFRACTION MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES

Jaroslav FIALA

Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie – Výzkumné centrum

Abstrakt

Zbytková (residuální, permanentní) napětí jsou vždy důsledkem nerovnoměrného rozložení plastické deformace. Vzájemným působením jednotlivých částí tělesa, v nichž došlo k odlišné deformaci (která se aktuálně mohla jevit jako plastická) je pak vyvoláno zbytkové napětí. V příspěvku jsou charakterizována makroskopická, mikroskopická a submikroskopická zbytková napětí. Popisuje se, jak tato napětí vznikají, jak relaxují a jakým způsobem ovlivňují mechanické vlastnosti těles, v nichž jsou přítomna. Mluví se též o tom, jak se zbytková napětí dají změřit. V případě napětí mikroskopických a submikroskopických je jedinou metodou, která to umožňuje, rentgenová difrakce. Každý druh zbytkového napětí se měří principiálně odlišným způsobem. Makroskopická napětí se dají určit z polohy příslušného difrakčního maxima, zatímco mikroskopická napětí se určují z jeho šířky. Velikost submikroskopického zbytkového napětí pak určujeme z toho, jakým způsobem se mění výška difrakčních piků v závislosti na jejich poloze. Z této závislosti se dají vypočítat statické výchylky atomů z jejich regulárních poloh a na základě toho pak Peierlsovo – Nabarrovo napětí. Tj. napětí, které musí dislokace překonávat při svém pohybu v rámci (uvnitř) jednoho bloku mosaikové substruktury. Ze šířky difrakčního maxima se dá pomocí Laueho vzorce vypočítat průměrná velikost mosaikového bloku, jehož hranice brzdí průchod dislokací a působí tedy jako efektivní vnitřní napětí proti jejich pohybu účinkem vnějších sil. Průchodu dislokací skrz polykrystalický agregát brání též variabilita mřížkových parametrů způsobená například substitučními atomy. Což představuje další složku vnitřního napětí, která brání pohybu dislokací a dá se vyjádřit z Braggovy – Vulfovy rovnice nebo z Braggova – Woodova vztahu.

Klíčová slova: zbytkové napětí, deformace, teorie dislokací, rentgenová difrakce

Abstract

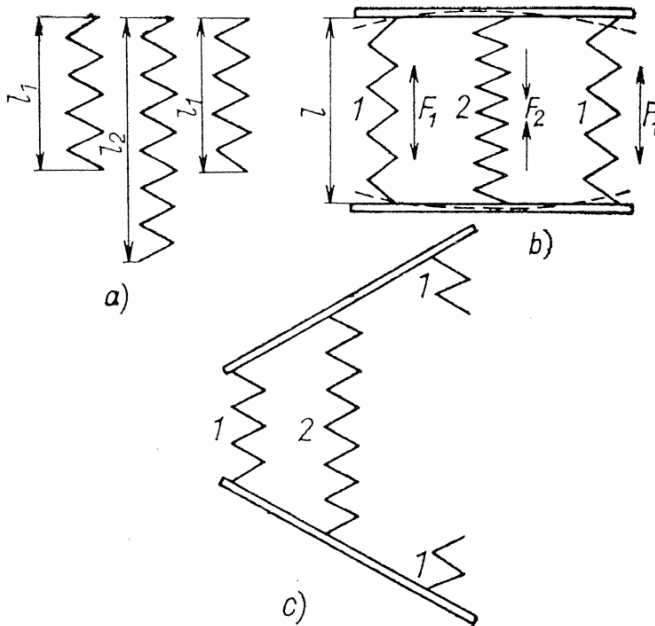
Residual stresses manifest inhomogeneity of the distribution of plastic strain. As it is interaction of individual parts of the body, that were differently deformed, by which residual stresses are induced. In the present contribution macroscopic, microscopic and submicroscopic residual stresses are characterized. It is explained how the residual stresses can arise, why and how they relax and in which way they influence mechanical properties of bodies where they appear. Experimental techniques for measurement of residual stresses are discussed, too. Microscopic and submicroscopic stresses can be determined only by means of x-ray diffraction. Quite different methods are applied for each kind of stresses. Macrostress can be determined from the position of the respective diffraction maximum, while microstress is estimated from its width. And the value of the submicroscopic stress is calculated from the relationship between height and position of diffraction maxima. From this relationship it is possible to evaluate deviations of atoms from their regular positions and from these to estimate the Peierls-Nabarro stress. Which is the stress that dislocations have to overcome when

passing across (inside of) a cell of mosaic substructure. From the width of diffraction peaks one can calculate, using Laue formula, the mean size of the cell of mosaic substructure, the boundaries of which oppose to passage of dislocations too and act in this way as another component of internal stress against the movement of dislocations under applied external stress. The motion of dislocations through polycrystalline aggregate is opposed also by variability of lattice parameters, caused e.g. by foreign atoms. Which is still another source of internal stresses that can be expressed from Bragg-Vulf equation or from Bragg-Wood relation. .

Keywords: residual stress, deformation, theory of dislocations, x-ray diffraction

1. Úvod

Zbytková (residuální, remanentní) jsou taková napětí, která existují v tuhém tělese přes to, že na něj nepůsobí žádné vnější síly ani momenty a že jeho teplota je všude stejná. Vznikají tím, že jednotlivé části tělesa (strojního dílce) byly během jeho výroby (při tuhnutí, tváření, tepelném zpracování, svařování, obrábění atd.) a využití různým způsobem a různou měrou deformovány. A tedy jedna část tělesa působí na druhou, a protože drží pohromadě, vzniká mezi nimi napětí σ_Z , které se pak přičítá k vnějšímu napětí σ_E . Pokud je $(\sigma_Z + \sigma_E)$ větší než lomové napětí σ_L , může dojít k porušení celistvosti přes to, že $\sigma_E < \sigma_L$. Porušením celistvosti se zbytkové napětí snižuje a těleso se deformuje (obr. 1) [1, 2, 3].



Obr. 1. Princip mechanického napětí. Tři pružiny: volné (a); spojené (b); po přestřihnutí jedné z pružin (c).

Fig. 1. Essence of mechanical stress. Three springs: free (a); connected (b); after cutting one of the springs (c).

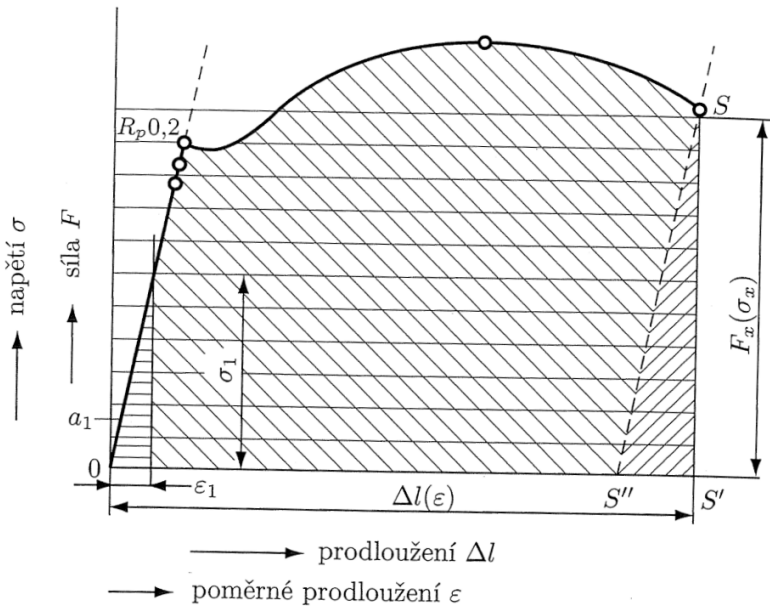
Což dokazuje, že v tělese před porušením celistvosti zbytkové napětí opravdu bylo. Jestliže však porušením celistvosti k deformaci nedojde, nemusí to znamenat, že v tělese žádné zbytkové napětí není nebo že je malé. Je-li variace zbytkových napětí σ v tělese velká (pro lineární případ

$$\sigma = \sigma(x), x \in \langle a, b \rangle$$

je variace napětí

$$V_a^b(\sigma) = \sup \left\{ \sum_{k=1}^n |\sigma(x_k) - \sigma(x_{k-1})|; a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b; n \in N \right\},$$

bude bilance zbytkových napětí, kterými působí na jakkoli malou část tělesa jeho okolí, vyrovnaná a při poruše celistvosti tělesa k jeho deformaci nedojde přesto, že v něm (třeba i nemalá) zbytková napětí jsou. Že variace zbytkových napětí je velká však znamená, že v tělese je vysoká průměrná hustota dislokací, jejichž účinkem těleso ztuhne a zkřehne. Přítom dislokace, jakožto stavební prvky struktury materiálu, obdařené obrovskou energií 1 – 10 eV (spíše 10 eV než 1 eV) na atom, jsou schopné aktivovat (iniciovat a „sponzorovat“) její rozsáhlé přeměny A tím ještě dále ovlivňovat mechanické, ale i jiné, např. chemické vlastnosti materiálu. Plasticou deformací, kterou byly dislokace v tělese generovány (aniž to těleso prasklo), je do něj ostatně možno vnést mnohem větší (volnou) energii než elastickou deformací účinkem vnějších sil, která posléze způsobí porušení celistvosti tělesa (obr. 2).



Obr. 2. Plasticou deformací lze do tělesa vložit mnohem větší energii než elastickou deformací. Pracovní diagram zkoušky v tahu.

Fig. 2. Much more energy can be introduced into a body by plastic strain than by elastic strain. Stress-strain curve.

A proto zbytková napětí v tělese, jež úzce souvisejí s tím, jak bylo to těleso ve své „technologické a exploatační minulosti“ plasticky deformováno, mají velký vliv na to, jak bude odolávat mechanickému zatěžování v budoucnosti. Zbytková napětí jsou též intenzivně využívána ke zlepšení užitkových vlastností výrobků např. cementací, nitridací, glazováním, smaltováním, indukčním kalením, kulíčkováním nebo válečkováním, čímž se na povrchu výrobku vytváří zbytkové tlakové napětí, které příznivě ovlivňuje např. únavovou životnost [4].

K měření zbytkových napětí se používají metody mechanické, optické, magnetické ultrazvukové a difrakční. Různé metody mají své specifické přednosti, omezení a možnosti aplikace. Tak třeba mechanické metody jsou velice přesné a snad vůbec nejvíce používané, ale protože jsou založené na měření deformací doprovázejících porušení napěťové rovnováhy při odstranění části objektu zkoumaného vzorku, nevypovídají nic o těch vnitřních napětích, jež při porušení celistvosti žádnou deformaci nezpůsobují. V předkládaném příspěvku se budeme zabývat rentgenografickým měřením zbytkového napětí, které umožňuje postihnout i takováto pro mechanické metody „neviditelná“ vnitřní napětí. Další specifikou rentgenografického měření jest, že umožňuje určit (zbytkové) napětí zvlášť v každé fázi, jež se ve zkoumaném tělese vyskytuje (např. napětí ve feritu a napětí v austenitu nebo napětí v α -mosazi a napětí v β -mosazi a podobně)[5].

2. Makroskopická napětí

Jedná se o (zbytková) napětí, která způsobují při porušení celistvosti tělesa jeho deformaci. Jak se taková napětí určují rentgenograficky: (záporně nabitě) elektrony atomu se vůči jeho (kladně nabitěmu) jádru rozkmitají účinkem dopadajícího (elektromagnetického) rentgenového záření v jeho rytmu a atom se tak stane elementárním zdrojem sekundárního rentgenového záření. A protože atomy v krystalech jsou rozmístěny pravidelně (rentgenograficky můžeme mechanické napětí měřit jen v krystalických látkách), dochází interferencí (sekundárního) rentgenového záření od všech atomů krystalu k výraznému difrakčnímu efektu. Záření se koncentruje do určitých směrů, které záleží na vlnové délce rentgenového záření, orientaci dopadajícího svazku rentgenového záření vzhledem ke krystalu a na struktuře krystalu (velikosti a tvaru jeho elementární buňky). Jestliže dojde vlivem (zbytkového) napětí k deformaci, změní se krystalové struktury tělesa, změní se poloha difrakčních maxim, směry do kterých krystal primární záření difraktuje. A z této změny můžeme pak vypočítat, jak se změnil krystal a posléze to přepočítat na napětí, které tuto změnu způsobilo, pomocí Hookeova zákona [6].

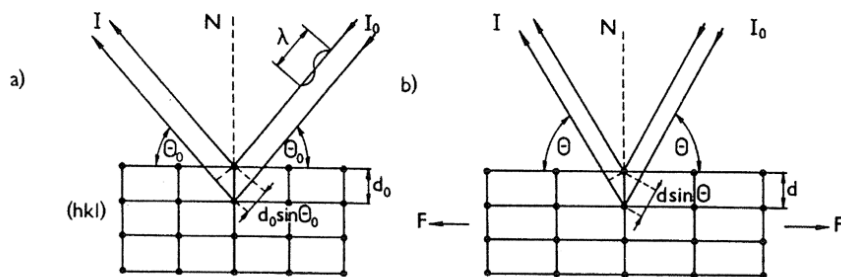
V situaci, která je znázorněna na obr. 3, se vlivem napětí změnila mezivzrostná vzdálenost d_0 uvažované rovinné osnovy (hkl) na d . Vztah mezi směrem (kterému odpovídá odleskový úhel) θ , v němž záření na té rovinné osnově difraktuje, mezivzrostnou vzdáleností té rovinné osnovy d a vlnovou délkou rentgenového záření λ vyjadřuje Braggova rovnice

$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

Diferencováním té rovnice pak dostáváme pro (relativní) deformaci

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = (\theta_0 - \theta) \cdot \cotg\theta$$

[7 – 10]. Vztažné hodnoty θ_0 resp. d_0 jsou určovány nezávislým měřením na (komerčně dostupných) referenčních standardech nebo získávány z literárních údajů o výsledcích měření „beznapěťových“ vzorků. Jedná se tedy o nedestruktivní testování. Je ovšem také možné určit vztažné hodnoty θ_0 resp. d_0 druhým měřením na zkoumaném tělese po porušení jeho celistvosti.



Obr. 3. Změna vzdáleností mřížkových rovin (hkl) a odpovídající změna polohy difrakčního maxima, vyvolané mechanickým napětím: nenapjatý stav (a); změny vyvolané silou F (b).

Fig. 3. Change in the interplanar spacings of lattice family (hkl) and corresponding change in the location placement of the diffraction maximum, caused by mechanical stress: unstressed state (a); change caused by force F (b).

3. Mikroskopická napětí

Jedná se o zbytková napětí, která po porušení celistvosti tělesa žádnou deformaci nevyvolají, protože jejich variace v tělese je veliká. Dislokační pole je rozčleněno na mnoho malých mosaikových bloků, krystalků (menších než $0,1 \mu\text{m}$ – odtud to označení „mikroskopická“), v nichž je hustota dislokací (plastická deformace ke které tam v minulosti došlo a která od té doby neodrelaxovala) různá. Mřížkové parametry těchto krystalků se proto poněkud liší a liší se tedy mírně i směry, do kterých uvažovaná rovinná osnova (hkl) těch mosaikových bloků primární svazek dopadajícího rentgenového záření difraktuje. Difrakční maxima (maxima distribuce intenzity rentgenového záření difraktovaného uvažovaným tělesem) jsou superposicí příslušného difrakčního maxima od všech mosaikových bloků. Proto jsou rozšířená, a to tím více, čím více se od sebe liší deformace jednotlivých mosaikových bloků a tedy čím větší je zbytkové napětí, těmito rozdíly vyvolané. Diferencováním Braggovy rovnice

$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

dostáváme pro vztah mezi rozšířením difrakčního maxima $|\Delta\theta|$ a (relativní) fluktuací $\frac{\Delta d}{d}$ mezirovinné vzdálenosti uvažované rovinné osnovy v jednotlivých krystalcích

$$|\Delta\theta| = \frac{\Delta d}{d} \cdot \text{tg}\theta$$

a pomocí Hookeova zákona pak odhad (fluktuace) odpovídajícího zbytkového napětí

$$\sigma = E \cdot |\Delta\theta| \cdot \text{ctg}\theta$$

kde E je Youngův modul pružnosti [11].

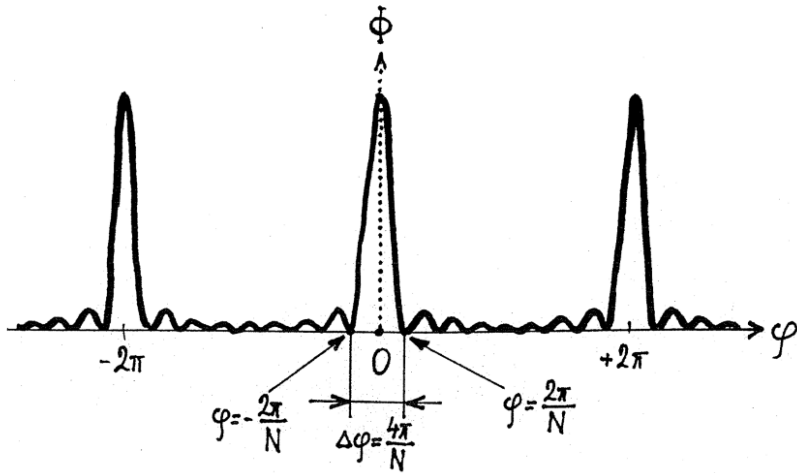
Čím menší jsou mosaikové bloky, tím větší je celková plocha jejich rozhraní v tělese. A rozhraní fungují jako pasti dislokací; brání jejich pohybu, působí tedy jako (efektivní) zbytkové napětí. Tato forma zbytkového napětí je tudíž nepřímo úměrná velikosti L krystalitů (mosaikových bloků) polykrystalického agregátu, který těleso tvoří (mluvíme o fragmentačním zbytkovém napětí). Snadno lze ukázat, že velikost krystalitů je nepřímo úměrná šířce difrakčního maxima $\Delta\theta$. Intenzita záření difraktovaného (pro jednoduchost ale bez újmy obecnosti) jednorozměrným krystalem složeným z N stejných stavebních jednotek (buněk) o hraně d uspořádaných v přímce, je totiž v závislosti na fázovém rozdílu ϕ mezi vlněním

vycházejícím ze sousedních základních buněk krystalové struktury vyjádřena Laueho interferenční funkcí

$$\Phi = \Phi(\varphi) = \frac{\sin^2 \frac{N\varphi}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} \quad [12]$$

A z průběhu této funkce, znázorněného na obr.4, je patrné, že šířka difrakčního maxima je

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{N} = \frac{4\pi d}{L}$$



Obr. 4. Průběh Laueho interferenční funkce

$$\Phi = \frac{\sin^2 \frac{N\varphi}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

kteřá znázorňuje tvar difrakčních maxim od krystalku, tvořeného řádkem N základních buněk. Šířka difrakčních maxim je nepřímo úměrná velikosti krystalku.

Fig. 4. Plot of Laue interference function

$$\Phi = \frac{\sin^2 \frac{N\varphi}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

showing the shape of diffraction maxima from a crystallite which consists of a string of N elementary cells. The width of diffraction maxima is inversely proportional to the size of the crystallite.

Z Braggovy rovnice však plyne, že

$$\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \sin \theta \quad ,$$

a tudíž

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \cos \theta \cdot \Delta\theta \quad ,$$

takže

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{L} \cdot \sec \theta \quad .$$

Celkově tedy má šířka difrakčního maxima $\Delta\theta$ dvě složky: flukuační $\left(\frac{\sigma}{E} \cdot \operatorname{tg} \theta\right)$

a fragmentační $\left(\frac{\lambda}{L} \cdot \sec \theta\right)$, které můžeme určit řešením soustavy rovnic (vyjadřujících Williamsonův – Hallův vztah)

$$\Delta\theta_i = \frac{\lambda}{L} \cdot \sec \theta_i + \frac{\sigma}{E} \cdot \operatorname{tg} \theta_i \quad ,$$

když změříme šířky $\Delta\theta_i$ difrakčních maxim (odpovídajících odleskovým úhlům) θ_i pro $i = 1, 2, \dots, k \geq 2$.

4. Submikroskopická napětí

Vůbec největší variaci mají zbytková napětí vyvolávaná „deformacemi“ (odchylkami) od pravidelného uspořádání atomů, které se mění od jedné základní buňky krystalové struktury k druhé. Změny se tedy odehrávají uvnitř jednotlivých krystalků. Všechny krystalky (jejich mosaikové bloky) jsou navenek (pokud se týče jejich průměrované atomové konfigurace) stejné, ale uložení atomů v jednotlivých základních buňkách, které krystalky tvoří, se v rámci krystalku liší a v každém krystalku jsou jiné. Tak malé konfigurační rozdíly nebyly donedávna žádnou mikroskopickou technikou zjištělné a proto zbytková napětí, jež jsou jimi způsobena, dodnes nostalgicky nazýváme „submikroskopická“. Což nikterak neznamená, že jsou nevýznamná, neboť konfigurační rozdíly, jež je vyvolávají, jsou sice malé, ale právě proto velmi četné. Národné porovnání makroskopických, mikroskopických a submikroskopických zbytkových napětí představuje obr. 5. (Makroskopická napětí se často označují také jako napětí I. druhu resp. I. řádu; mikroskopická napětí jako napětí II. druhu resp. II. řádu a submikroskopická napětí jako napětí III. druhu resp. III. řádu.)

Na rozdíl od makroskopických napětí, jež se na rentgenogramech projevují změnou polohy difrakčních maxim a od mikroskopických napětí, která se projevují jejich rozšířením, způsobují submikroskopická napětí oslabení intenzity difrakčních maxim, jež roste s jejich odleskovým úhlem θ . Intenzita difraktovaného rentgenového záření je totiž dána čtvercem modulu jeho amplitudy

$$\sum_{j=1}^n f_j \cdot \exp \left[2\pi i \vec{s} \cdot (\vec{\rho}_j + \vec{\delta}_j) \right] \quad .$$

V tomto výrazu představuje f_j rozptylový faktor j -tého atomu, $\vec{\delta}_j$ jeho odchýlení od ideální polohy $\vec{\rho}_j$ a $\vec{s} = \frac{\vec{S} - \vec{S}_0}{\lambda}$ difrakční vektor, charakterizující experimentální uspořádání (vlnovou délku λ a jednotkové vektory \vec{S}_0 a \vec{S} ve směru dopadajícího a difraktovaného záření); n je počet atomů v základní buňce krystalové struktury. Tedy intenzita difraktovaného záření jest

$$\sum_{j=1}^n f_j \cdot \exp [2\pi\bar{s} \cdot (\bar{\rho}_j + \bar{\delta}_j)] \cdot \sum_{k=1}^n f_k \cdot \exp [-2\pi\bar{s} \cdot (\bar{\rho}_k + \bar{\delta}_k)] =$$

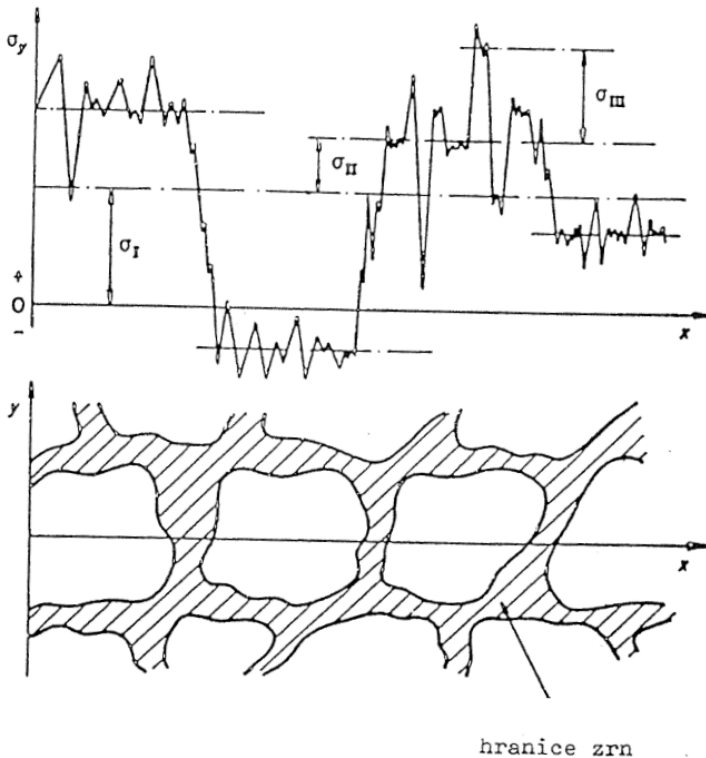
$$= |F_0(\bar{s})|^2 \cdot \langle \exp [2\pi\bar{s} \cdot (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_k)] \rangle = |F_0(\bar{s})|^2 \cdot D$$

kde

$$F_0(\bar{s}) = \sum_{j=1}^n f_j \cdot \exp (2\pi\bar{s} \cdot \bar{\rho}_j)$$

je amplituda záření difraktovaného ideální, neporušenou strukturou a D je součinitel vyjadřující vliv strukturních poruch na intenzitu difraktovaného záření. D představuje střední hodnotu $\langle \rangle$ výrazu

$$\exp [2\pi\bar{s} \cdot (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_k)] .$$



Obr. 5. Rozložení makroskopických (σ_I), mikroskopických (σ_{II}) a submikroskopických (σ_{III}) zbytkových napětí (σ_y) v polykrytalickém materiálu napříč několika zrna ve směru x .

Fig. 5. Distribution of macroscopic (σ_I), microscopic (σ_{II}) and submicroscopic (σ_{III}) residual stresses (σ_y) in a polycrystalline material across several grains in the direction x .

Hodnota součinitele D

$$\begin{aligned} D &= \langle \exp[2\bar{m}\bar{s} \cdot (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_k)] \rangle \doteq 1 + \langle 2\bar{m}\bar{s} \cdot (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_k) \rangle - 2\pi^2 \langle [\bar{s} \cdot (\bar{\delta}_j - \bar{\delta}_k)]^2 \rangle = \\ &= 1 - 2\pi^2 \langle (\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j)^2 + (\bar{s} \cdot \bar{\delta}_k)^2 - 2(\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j) \cdot (\bar{s} \cdot \bar{\delta}_k) \rangle = \\ &= 1 - 4\pi^2 \langle (\bar{s} \cdot \bar{\delta}_j)^2 \rangle \doteq \exp\left(-4\pi^2 \frac{u^2}{d^2}\right) \end{aligned}$$

kde u je střední kvadratická výchylka atomů z jejich ideální polohy kolmo k rovině osnově s mezivoušnou vzdáleností d (jinými slovy, je to výchylka atomů z jejich ideální polohy ve směru difrakčního vektoru \bar{s} , který má velikost $1/d$), neboť vychýlení atomů z jejich ideálních poloh je v různých základních buňkách krystalové struktury různé, takže $\langle \bar{s} \cdot \bar{\delta}_j \rangle = 0$. Submikroskopická zbytková napětí tedy způsobí zmenšení intenzity difraktovaného záření, které je tím větší, čím menší je mezivoušná vzdálenost rovinné osnovy d (čím větší je odleskový úhel θ , jenž svazek primárního záření svírá s rovinami té osnovy, přičemž $\lambda = 2d \cdot \sin\theta$) [13]. Střední výchylku atomů u z jejich regulární polohy, způsobenou submikroskopickým zbytkovým napětím, vypočteme řešením soustavy rovnic

$$\frac{I_i}{I_{0i}} = \exp(-4\pi^2 \frac{u^2}{d_i^2})$$

když změříme intenzity I_i difrakčních maxim zkoumaného materiálu, odpovídajících mezivoušným vzdálenostem d_i a porovnáme je s intenzitami I_{0i} týchž difrakčních maxim referenčního materiálu (bez submikroskopického zbytkového napětí), změřenými za stejných podmínek pro $i = 1, 2, \dots, k \geq 2$.

5. Napětí a mechanické vlastnosti

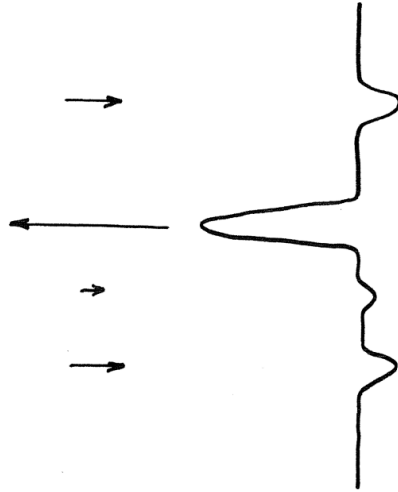
Zatímco vliv makroskopických zbytkových napětí na mechanické vlastnosti lze hodnotit bezprostředně, u mikroskopických a submikroskopických napětí to tak jednoduché není. To, co měříme, je deformace a její přepočet na napětí činíme pomocí vztahů, jež nejsou škálově invariantní. (V dikci odkazu [14] „Hodnoty zjišťované na zkušebních vzorcích malých rozměrů lze tedy použít k posuzování pevnosti rozměrnějších částí jen s přihlédnutím k vlivu velikosti.“) Mikroskopická napětí se mění místo od místa tak rychle, že oblast, ve které je můžeme v rozumném přiblížení pokládat za konstantní, je menší než $0,1 \mu\text{m}$. Tedy menší než jeden krystalit nejčastěji používaných materiálů. V tom případě už Youngův modul není skalární veličina, ale tensor čtvrtého řádu, který má 21 nezávislých souřadnic [15, 16]... Deformace (přetvoření), vyvolané submikroskopickým napětím, tedy vychýlením atomů z jejich regulární polohy v rámci jedné základní buňky krystalové struktury, bývají asi $0,1 \text{ \AA}$, tedy cca 10% vzdálenosti sousedních atomů (například v železe). Když to přepočítáme na Youngův modul pružnosti železa, dostaneme napětí 20 GPa, tj. stokrát více než je mez pružnosti nejměkčí oceli. Což odpovídá tomu, že plastické deformaci kladou odpor (za zbytková napětí jsou odpovědné) jen atomy v jádrech dislokací, tedy nanejvýše asi 1‰ až 1% všech atomů v tělese.

Difrakce rentgenového záření vlnové délky rovné velikosti atomu přináší informace o mechanismu, kterým vzniká napětí v důsledku nerovnoměrnosti rozložení deformace v atomárním měřítku. O tom, proč materiál v důsledku deformace nejen praská, ale také ztrácí tvárnost a odolnost vůči lomu. Všechno začíná deformací; v atomárním měřítku – vychýlením atomů z jejich rovnovážné polohy. A nerovnoměrností deformace, vznikem dislokací. Dislokace pak na sebe působí; přitahují se, odpuzují a ve svém pohybu a v souhře s vnějšími

silami (a s ohledem na „mimodislokační“ aspekty struktury materiálu) vzájemně – „dočasné“ nebo trvale – omezují: vznikají zbytková napětí.

Submikroskopické výchylky jednotlivých atomů z jejich rovnovážné polohy (které můžeme určit z oslabení intensity difrakčních maxim při rostoucím odleskovém úhlu) brzdí pohyb dislokací mosaikovým blokem jako Peierlsovo – Nabarrovo zbytkové napětí σ_i v Hallově – Petchově vztahu [17] pro mez kluzu

$$\sigma_y = \sigma_i + \frac{k_y}{\sqrt{L}}$$



Obr. 6. Fluktuační napětí v polykrytalickém materiálu způsobí pokles jeho tvárnosti a lomové houževnatosti, neboť vyvolá „rozvlhnutí dislokace“ (vpravo), což spotřebuje jistou energii. Šipky (vlevo) mají směr a velikost napětí v krystalcích, jimiž dislokační čára prochází.

Fig. 6. Fluctuation of stresses in a polycrystalline material reduces its ductility and fracture – toughness because it makes the dislocation lines wavy (right), which consumes some energy. Arrows (left) indicate the direction and size of stress in the crystallites through which the dislocation passes.

Zde je k_y retenční součinitel (napětí nezbytného pro odpoutání dislokace od rozhraní mosaikových bloků, jež působí jako dislokační past) a L měrou velikosti mosaikových bloků, kterou odhadujeme z fragmentační složky rozšíření difrakčního maxima. Tak se submikroskopická a mikroskopická vnitřní napětí, vyvolaná deformací tělesa, podílejí na jeho zpevnění, ztrátě tvárnosti. Fluktuální složka rozšíření difrakčního maxima pak svědčí o tom (je důkazem toho), že různé krystalky v tělese mají různé mřížkové parametry. To znamená, že je v nich různé zbytkové napětí – různé velikosti a různého směru. Toto napětí působí na dislokaci, která krystalky prochází a změní její tvar – v různých místech různě. Jestliže ta dislokace byla původně přímková, její energie byla vůbec nejmenší možná (neboť energie dislokace je úměrná její délce [18]). Aby pak mohla projít tou partií tělesa, v němž mají různé

krystaliky různá napětí, musí se její energie zvětšit, čehož se dosáhne tím, že se „zvlí“ (obr. 6). Na to je ovšem třeba vynaložit práci a ta je právě měrou zbytkového mikroskopického napětí v tom tělese působícího. Toto mikroskopické napětí, které se na rentgenogramech projeví jako fluktuální složka rozšíření difrakčních maxim, představuje další odpor vůči pohybu dislokací; další příčinu zpevnění materiálu. Zhoršená pohyblivost dislokací způsobí pak pokles kritické hodnoty hnací síly trhliny a lomové houževnatosti materiálu [19].

6. Závěr

- a) Zbytkové napětí je důležitý aspekt struktury, který má velký vliv na mechanické vlastnosti tělesa.
- b) Zbytkové napětí je důsledkem odchylnosti struktury od její ideální podoby, její defektnosti; patří tudíž právem do oblasti zájmu defektoskopie.
- c) Specifikou zbytkového napětí jest, že v rozličné podobě postihuje široký interval měřítkových úrovní jako napětí makroskopické, mikroskopické a submikroskopické.

Literatura

- [1] J. Příbyl: Pnutí v odlišcích, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1973.
- [2] I. Kraus: Úvod do strukturní rentgenografie, Academia, Praha 1983.
- [3] A. S. Tetelman, A. J. McEvily: Fracture of structural materials, John Wiley & Sons, New York 1967.
- [4] S. Suresh: Fracture of materials, Cambridge University Press, Cambridge 1991.
- [5] I. Kraus, N. Ganev: Difrakční analýza mechanických napětí, Vydavatelství Českého vysokého učení technického, Praha 1995.
- [6] I. Kraus, N. Ganev: Technické aplikace difrakční analýzy, Vydavatelství Českého vysokého učení technického, Praha 2004.
- [7] I. Kraus, V. V. Trofimov: Rentgenová tenzometrie, Academia, Praha 1988.
- [8] I. Kraus: Rentgenografie nehomogenních napětíových polí, Academia, Praha 1990.
- [9] I. Kraus: Rentgenová tenzometrie, str. 488 – 494 v knize B. Kopec a kolektiv: Nedestrukční zkoušení materiálů a konstrukcí, Nakladatelství CERM, s.r.o. pro Českou společnost pro nedestrukční testování, Brno 2008.
- [10] J. Fiala, I. Kraus: Povrchy a rozhraní, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2016.
- [11] L. Spiess, R. Schwarzer, H. Behnken, G. Teikert: Moderne Röntgenbeugung, B. G. Teubner, Wiesbaden 2005.
- [12] B. E. Warren: X-ray diffraction, Addison – Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts 1969.
- [13] R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge, eds.: Defect and microstructure analysis by diffraction, Oxford University Press for International Union of Crystallography, Oxford 1999.
- [14] J. Němec, J. Dvořák, C. Höschl: Pružnost a pevnost ve strojírenství, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1964.
- [15] J. F. Nye: Physical properties of crystals, their representation by tensors and matrices, Clarendon Press, Oxford 1964.
- [16] P. Pauffer: Physikalische Kristallographie, Akademie – Verlag, Berlin 1986.
- [17] G. E. Dieter: Mechanical metallurgy, McGraw – Hill Book Company, New York 1976.
- [18] J. P. Hirth, J. Lothe: Theory of dislocations, McGraw – Hill Book Company, New York 1968.
- [19] R. W. Hertzberg: Deformation and fracture mechanics of engineering materials, John Wiley & Sons, New York 1989.



MĚŘENÍ A VLIV VELIKOSTI OHNIKA RENTGENOVÝCH ZAŘÍZENÍ NA PROCES DIGITÁLNÍ RADIOGRAFIE

MEASUREMENT AND EFFECT OF X-RAY FOCAL SIZE ON THE PROCESS OF DIGITAL RADIOGRAPHY

Daniel Frejvald

Testima, spol. s.r.o.

Contact e-mail: frejvald@testima.cz

Abstrakt

V příspěvku je prezentováno jaký má vliv velikost ohniska rentgenky na proces radiografie jako takový. Jsou zde popsány procesy měření ohniska. Velikost opticky měřeného ohniska určuje geometrické zvětšení a z toho vyplývající neostrosti. Čím menší ohnisko je, tím menší je pak neostrost (zvýšení ostrosti v obrazu).

Klíčová slova:

rentgen, opticky měřené ohnisko, neostrost, emitující záření, geometrické zvětšení, plochý detektor, radiografie, radioskopie

Abstract

The article presents the effect of the X-ray focus on the radiography process as such. There are described focal measurement processes. The size of the optically measured focus determines the geometric magnification and the blurring resulting from. When the smaller focal is then is smaller blurring (increasing the sharpness in the image).

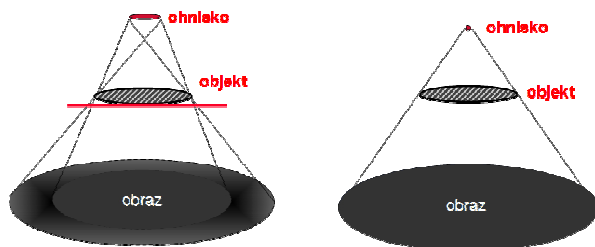
Keywords:

X-ray, optically measured focus, blurred, emitting radiation, geometric magnification, flat detector, radiography, radioscopy

1. Úvod

Jedním z nejdůležitějších parametrů rentgenového zařízení je velikost opticky účinného ohniska. Velikost ohniska nám určuje podmínky prozařování, zejména pak z hlediska rozsahu geometrické neostrosti. Ve většině případů se pro optimalizaci výpočtů geometrické neostrosti používá rozměr ohniska, který se uvádí v technické

dokumentaci k přístrojům, dodávaných jednotlivými výrobci. Snahou renomovaných a nadnárodních společností vyrábějících rentgenové zdroje a zařízení, je docílit konsensu co možná nejmenšího ohniska při největším výkonovém zatížení.

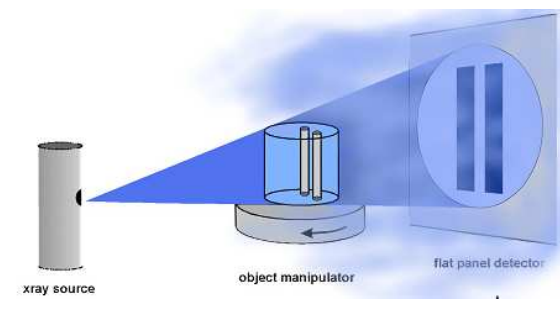


Obr. 1 a 2: Znázorňují důležitost správné volby ohniska
 Pictures 1 a 2: Describe the relevance of size of the focal spot

Nominální velikost ohniska

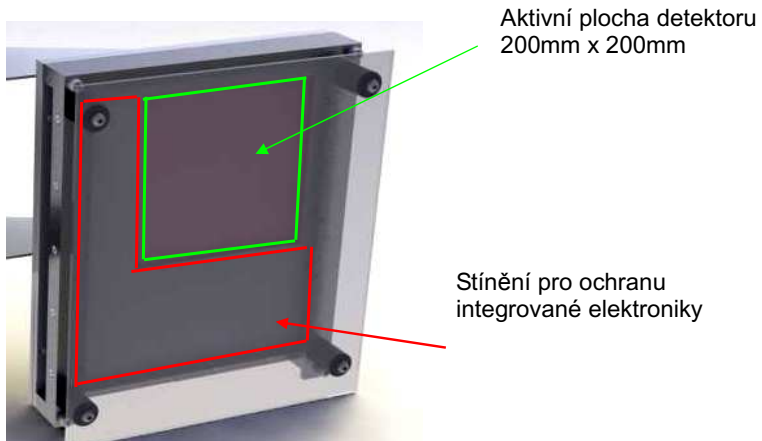
Ohnisková velikost je poměr mezi:

- Velikostí plochy a resistance tepelné absorbce která vzniká při dopadu akcelerujících elektronů (u záření se 99% procent emitujícího záření mění na teplo a „pouze“ 1% se mění na požadované RTG záření jako takové).
- Dále pak co nejmenší velikostí ohniska, které určuje geometrické zvětšení a z toho vyplývající neostrosti.
- V moderním pojetí je pak zvláště důležitá skutečná velikost optického ohniska kterou výrobci uvádí. Obr. 3 znázorňuje projekci na plochý detektor.



Obr. 3: Projekce na plochý detektor
 Picture 3: Flat panel projection

Ploché detektory (flat panels) postupně vytěsňují analogové převaděče obrazu



Obr. 4: Popis plochého detektoru
Picture 4: Flat panel description

Původně využívané normy **ČSN EN 1435**
Pro nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení svarových spojů

&

EN 14784
Pro nedestruktivní zkoušení pomocí počítačové radiografie

Nahrazuje norma 17636

17636-1

- Metody rentgenového a gama záření využívající filmy

17636-2

- Metody rentgenového a gama záření využívající digitální detektory

2. IEC 336

- Pro zdravotnická rentgenová zařízení byl navrhnutý původní předpis IEC. U zdravotnických rentgenů není rozhodující ohnisková velikost vzhledem k tomu, že se zde nepracuje s geometrickým zvětšením ani s neostřostí.

Optické ohnisko se v tomto případě za pomoci otvorové měřky naexponuje na RTG film (ve většině případů se jedná o dentální snímky). V současnosti se stále více využívá v rámci digitální radiografie namísto filmů paměťových fólií. Díky skeneru se naexponovaná paměťová fólie převede do digitální podoby (viz obr. 5, 6a, 6b a 6c)



Obr. 5: Přenosné RTG zařízení
Picture 5: Portable X-Ray



Obr. 6a: Paměťová fólie
Picture 6a: Image plate

Obr. 6b: Skener paměťových fólií
Picture 6b: Scanner of image plates

Obr. 6c: PC
Picture 6c: PC



Následně se změřenému ohnisku přiřadí „jmenovitá hodnota velikosti“. (Tabulka č.1).

Jmenovitá hodnota velikosti ohniska	Rozměry ohniska	
	šířka	Přípustná hodnota v mm
<i>f</i>		délka
0,1	0,10 ... 0,15	0,10 ... 0,15
0,15	0,15 ... 0,23	0,15 ... 0,23
0,2	0,20 ... 0,30	0,20 ... 0,30
0,3	0,30 ... 0,45	0,45 ... 0,65
0,4	0,40 ... 0,60	0,60 ... 0,85
0,5	0,50 ... 0,75	0,7 ... 1,1
0,6	0,6 ... 0,9	0,9 ... 1,3
0,7	0,7 ... 1,1	1,0 ... 1,5
0,8	0,8 ... 1,2	1,1 ... 1,6
0,9	0,9 ... 1,3	1,3 ... 1,8
1	1,0 ... 1,4	1,4 ... 2,0
1,1	1,1 ... 1,5	1,6 ... 2,2
1,2	1,2 ... 1,7	1,7 ... 2,4
1,3	1,3 ... 1,8	1,9 ... 2,6
1,4	1,4 ... 1,9	2,0 ... 2,8
1,5	1,5 ... 2,0	2,1 ... 3,0
1,6	1,6 ... 2,1	2,3 ... 3,1
1,7	1,7 ... 2,2	2,4 ... 3,2
1,8	1,8 ... 2,3	2,6 ... 3,3
1,9	1,9 ... 2,4	2,7 ... 3,5
2	2,0 ... 2,6	2,9 ... 3,7
2,2	2,2 ... 2,9	3,1 ... 4,0
2,4	2,4 ... 3,1	3,4 ... 4,4
2,6	2,6 ... 3,4	3,7 ... 4,8
2,8	2,8 ... 3,6	4,0 ... 5,2
3	3,0 ... 3,9	4,3 ... 5,6

Tabulka č.1: Přípustné hodnoty rozměrů ohniska
Table 1: Allowed focal size value

Hodnota však nemusí odpovídat skutečnému rozměru, je podstatně menší nežli reálný rozměr ohniska a je tzv. „bezrozměrná“ tzn. Že nemá hodnotu v mm.

3. EN 12543

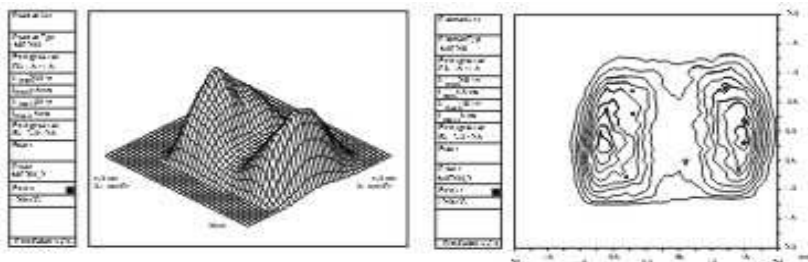
Norma EN 12543 byla vytvořena výrobcem CEN/TC 138, v platnost byla uvedena v srpnu roku 1999. Determinuje požadavky měření velikosti ohniska kde jsou popsány postupy v pěti různých bodech.

Oproti normě IEC 336 jsou zde uvedeny skutečné rozměry v mm (resp. μm).

V tomto případě pozornost zaměříme prvním dvěma postupům. Mají největší praktický význam pro RTG využití v průmyslu.

Pro všechny radiometrické metody je referenčním postupem norma EN 12543-1.

Principem je rozdělení intenzity měření záření ohniska „krok za krokem“. Záření je kolimováno do svazku $10 \times 10 \mu\text{m}$. Výsledek měření je následně zpracován elektronicky a vzniká zde reliéf rozdělení intenzity detekovaného záření (viz obr. 7 a 8).

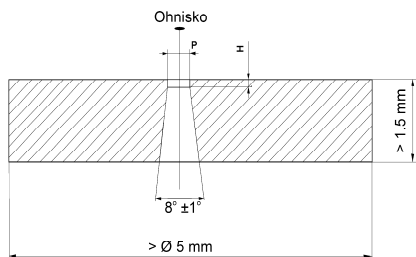


Obr. 7 a 8: Struktura intenzity záření a zobrazení dávek

Pictures 7 and 8: Radiation intensity structure and dose

Větší rozměr plochy určuje rozměr ohniska. Jedná se o takové místo, kde ještě intenzita dosahuje 10% maximální intenzity záření.

V EN 12543 je dále popsáno měření ohniska otvorovou měrkou.



Velikost ohniska d mm	Průměr P μm	Výška H μm
0,2 ÷ 1,0	30 ± 5	75 ± 10
> 1,0	100 ± 5	500 ± 10

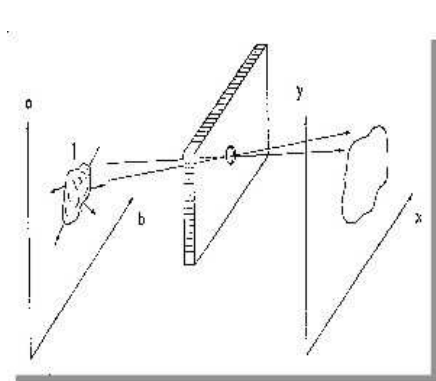
Obr. 9: Wolframová otvorová měrka

Picture 9: Tungsten hole standard

Tab. 2: Rozměry otvorové měrky

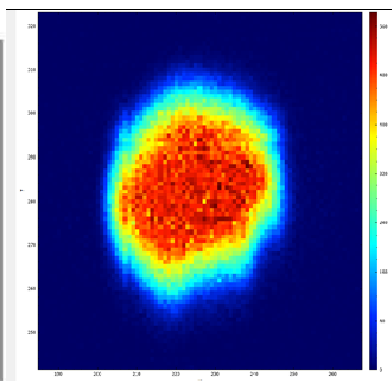
Table 2: Dimensions of hole standard

Jedná se o téměř identický postup expozice na film, jako v IEC 336



Obr. 10: Princip měření dle EN 12543

Picture 10: Measurement principle according to EN 12543



Obr. 11: Zobrazení ohniska

Picture 11: The focus

rozdílem je však postup stanovení rozměru a jeho vyhodnocení. Otvorová měrka kterou používáme pro určení velikosti ohniska musí být vyrobena z wolframu a mít stanovené rozměry. Jsou zde popsány i další parametry zkoušky, ale ty zde popisovat nebudeme. Důležitým aspektem je vyhodnocení velikosti ohniska a postup měření. Velikost ohniska je určena hodnotou zčernání (plochy). Délka ohniska „ f “ je ve směru osy rentgenového zařízení (lampy) a šířkou „ w “ v kolmém směru.

V případech, že není možno přesně určit osy zařízení, pro délku se použije směr toku elektronů.

Větší z obou rozměrů představuje velikost ohniska „d“. V případě certifikace se naměřené hodnoty nesmí lišit o více jak $\pm 10\%$ od postupu dle EN 12543-1 (metoda skenování).

4. Závěr

Přestože norma EN 12543 platí již několik let, stále se objevují nejasnosti z řad defektoskopické veřejnosti, týkající se způsobu garance velikosti ohniska. V technických dokumentech u různých výrobců objevují „pěkné rozměry“ dle IEC 336 s naměřenými hodnotami v milimetrech, které na rozdíl od hodnot dle EN 12543 jsou téměř o 50 % menší. V případě, že tyto hodnoty porovnáme, může se zdát jeden postup lepší, navzdory tomu, že mohou mít identická ohniska.

Závěrem bych rád zdůraznil hlavní rozdíly mezi IEC 336 a normou EN 12543:

- Rozměrem ohniska není uvedena hodnota v IEC 336, jedná se o bezrozměrné číslo, které je jeho nominální hodnotou.
- Dle normy EN 12543 determinuje skutečné rozměry ohniska a jedná se o delší rozměr, nebo o oba rozměry ohniska v případě panoramatického systému.

Při pokroku dnešních technologií by měla být preference jak u stacionárních, tak i u přenosných a mobilních RTG zařízení, malé ohnisko. Za předpokladu, že máme jakkoli strukturovaný objekt, dochází u většího ohniska k rozostření, které je nežádoucí. Proto je při koupi nového zařízení (stacionárního, mobilního, přenosného, nebo výměna lampy ve stávajícím zařízení) důležitá volba ohniska, která má u nového, případně repasovaného systému opravdu smysl.

V dnešní době se více využívá digitální radiografie, která je již na takové úrovni, i díky rozvoji paměťových fólií (substituce filmů), plochých detektorů (flat panelů), které jsou dynamickým vývojem tlačeny na nejvyšší možné rozlišení a kontrast od 14 bitových k 16 bitovým (více jak 65 tisíc odstínů šedi – přičemž lidské oko je schopno detekovat „pouhých“ 300 – 500 odstínů šedi). V mnohých provozech je takovéto rozlišení vnímáno za přílišné. Zejména proto se nezdá setkání s názorem, že vyhodnocování filmů je „prozatím“ dostačující a koncovým zákazníkům jeho zpracování vyhovuje. Nejen z pohledu pokroku 21. století, ale i z pohledu uživatelů automobilového, vodohospodářského i petrochemického průmyslu věřím, že se bude digitální radiografie a radioskopie využívat v mnohem větším měřítku, nežli doposud.



PILOTNÍ STUDIE CHOVÁNÍ CYKLICKY ZATĚŽOVANÉHO BETONOVÉHO NOSNÍKU METODOU AKUSTICKÉ EMISE THE PILOT STUDY OF THE BEHAVIOUR OF THE CYCLIC LOADED CONCRETE BEAM BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

Michaela HODULÁKOVÁ*, Luboš PAZDERA*, Libor TOPOLÁŘ*, Oto ROTH**,
Peter OROLIN**, Karel MIKULÁŠEK*

*Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta

** Technická univerzita v Košicích, Stavební fakulta

Contact e-mail: hodulakova.m@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Betonové konstrukce se v průběhu své životnosti střídavě nachází ve stavech zatížených a odlehčených. Označíme-li zatížení a následné odlehčení konstrukce způsobené vnějšími vlivy za cyklus, je poté možné běžně namáhanou konstrukci označit za mnohonásobně cyklicky zatěžovanou. Tyto cykly nejsou pravidelné a v průběhu životnosti konstrukce se neomezeně opakují v závislosti na jejím významu a využití. Příspěvek se zabývá jednou z možností detekce trhlin pomocí metody akustické emise. Trhliny vznikají v průběhu zvyšujícího se cyklického namáhání vyztuženého betonového nosníku. Metoda akustické emise zaznamenává vznikající elastické vlny generované aktivními trhlínami. Tato metoda umožňuje průběžně sledovat celou konstrukci nejen vybranou část.

Klíčová slova: metoda akustické emise, vyztužený betonový nosník, cyklické namáhání, počet překmitů, kumulativní počet překmitů

Abstract

During the life-time of concrete structures, we can say there are two possible conditions, the first one is loading and the other one is unloading. If we mark the change of states from loading to unloading caused by external influence as a cycle, then we can call a conventionally stressed structure as multiply cyclically loaded. Those cycles are not periodical and the number of repetitions depends on structure's meaning and usage. In this paper we are going to talk about method using acoustic emission for detection of forming cracks. These cracks in reinforced concrete beam are created by increasing power of loading during cyclic loading and unloading. The principle of detection method is recording elastic waves which are formed by active cracks. This method allows you to monitor the entire construction continuously and not just small specific part.

Key words: Acoustic emission method, reinforced concrete beam, cyclic loading's, number of counts, cumulative number of counts

1. Úvod

Akustická emise (AE) je fyzikální jev. Tento jev se projevuje v materiálech tak, že v nich dochází k uvolňování částí nahromaděné elastické energie v důsledku dynamických procesů, které mohou být vyvolané vnějšími nebo vnitřními silami [1].

AE patří mezi nedestruktivní metody sledující aktivní defekty, tedy nestabilní a nebezpečné, které probíhající uvnitř sledované struktury. Pasivní poruchy a tvar struktury nemá na vznik AE rozhodující vliv [2, 3, 4]. Je nutné zmínit, že podmínkou úspěšného nasazení metody AE je zejména důkladné pochopení fyzikálního pozadí principu generování AE probíhajícím dějem, uvědomění si omezení daných náhodným charakterem šíření a vzniku AE, ale také omezení daných konkrétním technickým řešením měřicí aparatury a snímači AE např. jejich správná kalibrace [5].

V důsledku zhoršení občanské infrastruktury na celém světě vznikla potřeba efektivního hodnocení poškození, přičemž AE se jeví jako dobře použitelná nedestruktivní metoda. Využívá se zejména pro monitorování betonových mostů, které bývají často cyklicky zatěžované. Technika sledování AE umožňuje soustavné a neinvazivní monitorování těles či konstrukcí, pomáhá včasné zjistit poškození a prodloužit tak životnost konstrukce. Výhodou měření je možnost vidět historii zatížení, které se při měření projevovalo v konstrukci [6, 7].

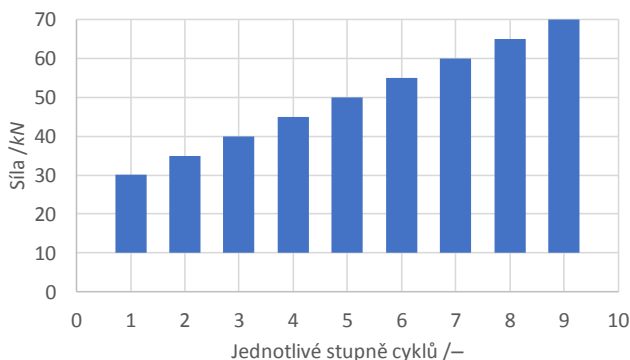
2. Popis experimentu

V rámci pilotního měření provedeného ve spolupráci s pracovníky Fakulty stavební, Technické univerzity v Košicích, jsme provedli zkoušku, při které byl cyklicky namáhán vyztužený betonový nosník viz Obr. 1. Na fotografiích je vidět i rozmístění snímačů AE vzhledem k umístění zatěžovací síly. Byly použity i dva snímače AE jako tzv. hlídací snímače. Jeden z nich byl umístěn na železném hranolu, přes který působila zatěžovací síla a druhý byl v těsné blízkosti tohoto železného hranolu.



Obr. 1 Vyztužený betonový nosník a rozmístění snímačů na vzorku

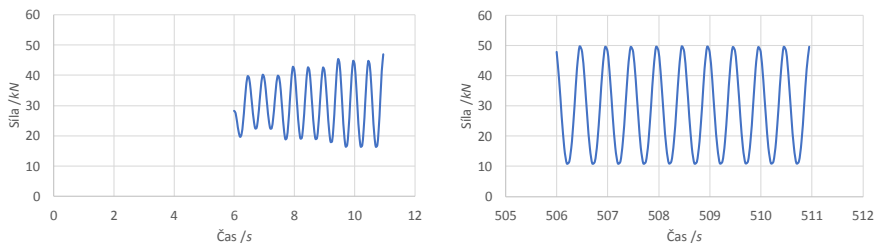
Fig. 1 Reinforced concrete beam and location of sensors on the sample



Obr. 2 Zobrazení způsobu zatěžování pro všechny stupně zatěžování

Fig. 2 Showing the way of the loading for all levels of loading

Na grafu na Obr. 2 je vidět velikosti působící síly v jednotlivých stupních zatěžování. V každém stupni zatěžování bylo přibližně 6020 cyklů v daném silovém rozpětí. Vzhledem k zatěžovací frekvenci o hodnotě 2 Hz a velikosti zatěžovací síly, je ukázán detail náběhu páté úrovně zatěžování (Obr. 3 – graf vlevo) a pak jeho průběh po 500 s (Obr. 3 – graf napravo).



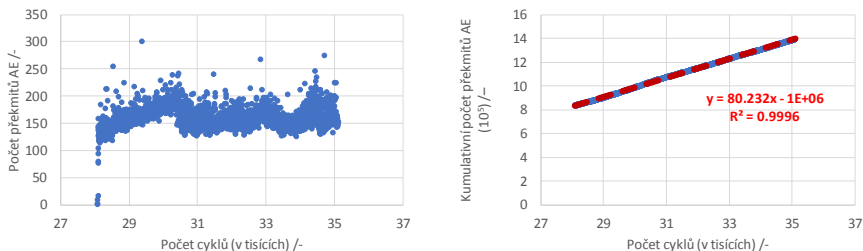
Obr. 3 Cyklické zatěžování v závislosti na čase pro pátý stupeň zatěžování

Fig. 3 Depending the cyclical loading on time for the fifth cycle

3. Výsledky

Z grafů na Obr. 4 je patrné (detail pro pátou úroveň zatěžování), že se vzrůstajícím počtem cyklů, roste i počet překmitů signálu AE. Jelikož počet překmitů AE udává množství vznikajících mikrotrhlin (trhlin) v materiálu, můžeme říct, že čím byla tělesa déle cyklicky zatěžována, tím v nich vznikalo stále více vad. Z tohoto důvodu jsme proložili křivky kumulativního počtu překmitů přímkami (Obr. 4 – graf napravo). Z následných směrnic (sklonu přímek) jsme vytvořili Tab. 1, ve které je vidět exponenciální (Rce 1) nárůst aktivity akustické emise:

$$\text{kumulativní počet překmitů} = 10,8 \cdot e^{0,4 \cdot \text{počet cyklů}}, \text{ při } R^2 = 0,95 \quad (1)$$



Obr. 4 Počet překmitů a kumulativní počet překmitů pro pátou úroveň zatěžování

Fig. 4 Number of overshoots and cumulative number of overshoots for the fifth cycle

Tab. 1 Hodnoty směrnic v jednotlivých stupních zatěžování

Tab. 1 The values of slopes in each levels of the loading

Jednotlivé stupně zatěžování /-	Směrnice kumulativního počtu překmitů /-
1	16,0
2	13,9
3	34,4
4	60,2
5	80,2
6	101,9
7	140,6
8	181,3
9	226,9

4. Závěr

Tento příspěvek popisuje pilotní měření na cyklicky namáhaném vyztuženém betonovém nosníku z hlediska aktivity AE. Bylo provedeno více než 54180 cyklů v devíti zatěžovacích úrovních. Bylo zjištěno, že nárůst aktivity AE je exponenciální, a tedy se dá předpokládat, že se struktura nosníku již blížíla destrukci, ač celková destrukce neproběhla. Z tohoto měření je patrné, že struktura nosníku již byla poničena nad únosnou mez, přičemž běžná vizuální kontrola nosníku žádné porušení nevykazovala. Je možné tedy říct, že z tohoto důvodu je metoda AE přínosná při dlouhodobém monitorování namáhaných struktur a konstrukcí, protože dokáže včas varovat před celkovým selháním.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu J-17-4554 podporovaného Vysokým učením technickým v Brně, Fakultou stavební a projektu LO1408 "ADMAS UP", podpořeného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci "Národního programu udržitelnosti I".

Literatura

- [1] Diagnostická metoda akustické emise a její perspektivy. Techmagazín.cz [online]. Praha: TECH MEDIA PUBLISHING, 2017 [cit. 2017-09-21]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/85>
- [2] MAZAL, P.; PAZDERA, L.; TOPOLÁŘ, L.; NOHÁL, L. Netradiční aplikace metody akustické emise. V Brně: Vysoké učení technické, 2012. ISBN 9788021446298.
- [3] DAKEL: Uživatelská příručka XEDO a programu DaeMon.
- [4] TOPOLÁŘ, Libor, Luboš PAZDERA a Jaroslav SMUTNÝ. Hodnocení chování betonu při tuhnutí a tvrdnutí netradičními metodami. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 9788021446427.
- [5] KEPRT, Jiří a Petr BENEŠ. Stanovení nejistot primární kalibrace snímačů akustické emise. In: KOŘENSKÁ, Marta a Pavel MAZAL. Defektoskopie 2007 - 37. mezinárodní konference a výstava: Sborník příspěvků proceeding. Praha: Česká společnost pro nedestruktivní testování, 2007, s. 105-110. ISBN 9788021435049.
- [6] Nair, Archana & Cai, C. (2010). Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. Engineering Structures. 32. 1704-1714. 10.1016/j.engstruct.2010.02.020.
- [7] Shiotani, T & Aggelis, D & Makishima, O. (2007). Global monitoring of concrete bridge using acoustic emission. J Acoust Emission. 25.



METODIKA PRO TERMOGRAFIKÉ MĚŘENÍ OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY METHODOLOGY FOR THERMOGRAPHIC MEASUREMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OBJECTS

Michal JANKŮ*, Josef STRYK*

* Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

michal.janku@cdv.cz

Abstrakt

V roce 2016 byla v Centru dopravního výzkumu, v.v.i. (CDV) vytvořena metodika pro termografické měření objektů dopravní infrastruktury. Metodika popisuje použití termografické metody při diagnostice mostů, pozemních komunikací a tunelů. V případě mostů se měření provádí standardní ruční termokamerou, u vyšších nebo špatně přístupných staveb ji lze osadit na dron. Při termografickém snímání pozemních komunikací a tunelů je výhodné připevnit termokameru na měřicí vozidlo. Termografie jako nedestructivní diagnostická metoda mimo jiné umožňuje odhalit skryté vady pod povrchem konstrukce. Odlišné teploty na povrchu konstrukce mohou být důsledkem poškození pod povrchem a zobrazují se jako teplotní anomálie na zaznamenaném termosnímku. Tuto technologii lze využít k určení oblastí, na které je potřeba zacílit podrobnou (lokální) diagnostiku. Hlavní výhodou této metody je její rychlost a jednoduchost, kdy lze měření provádět i bez přímého přístupu ke konstrukci a bez nutnosti vyloučení provozu. Naopak některé druhy měření je možné provádět pouze za určitého počasí a denní doby. Metodika definuje nejvhodnější podmínky pro měření. V neposlední řadě se metodika pokouší varovat před možnými chybami, kterých se lze dopustit špatným postupem při měření nebo nevhodnou obsluhou termokamery.

Klíčová slova: metodika, termografie, měřicí vozidlo, most, pozemní komunikace, tunel

Abstract

In 2016, CDV - Transport Research Centre created a methodology for thermographic measurement of transport infrastructure objects. The methodology describes the use of a thermographic method for diagnosing bridges, roads and tunnels. In the case of bridges, the measurements are performed by a standard handheld thermocamera, for higher or poorly accessible constructions it can be mounted on a dron. In the case of thermal imaging of roads and tunnels, it is advantageous to place the thermal camera on the measuring vehicle. Thermography as a non-destructive diagnostic method also makes it possible to detect hidden defects under the surface of the structure. Different temperatures on the surface of the structure may result from damage under the surface and appear as a thermal anomaly

on the thermal picture. This technology can be used to identify areas where the detailed local diagnostics should be carried out. The main advantage of this method is its high speed and simplicity, where measurements can be made without direct access to the structure and without the need to exclude traffic. Conversely, some types of measurements can only be performed under certain weather and weather conditions. The methodology characterizes the most suitable conditions for measurement. Last but not least, the methodology attempts to warn against possible mistakes that may be caused by the wrong method of measurement or inappropriate operation of the thermal camera.

Key words: methodology, thermography, measuring vehicle, bridge, road, tunnel

1. Úvod

Infračervená termografie je analytická technika založená na detekci záření objektů v IR spektru vlnových délek. Takto září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá IR kamera nebo termografická kamera, zkráceně termokamera. Výsledkem záznamu termokamery je obraz odpovídající intenzitě tepelného vyzařování snímaného objektu. Tento záznam se nazývá termogram. Intenzita tepelného záření objektů přímo souvisí s jejich teplotou.

Termografie se dělí na kvalitativní nebo kvantitativní a pasivní nebo aktivní. Cílem kvantitativní termografie je přesné stanovení hodnot teploty měřených objektů nebo jejich částí. V tomto případě je nezbytná znalost optických vlastností měřených objektů, často v závislosti na teplotě a je potřeba hodnotit vliv okolí na měřené hodnoty.

Kvalitativní termografie obecně nevyžaduje přesné měření teplot v absolutních hodnotách. Vyhodnocují se zejména teplotní rozdíly a kontrasty v IR vyzařování mezi různými místy jednoho měřeného objektu. Pro potřeby diagnostiky staveb dopravní infrastruktury se používá právě kvalitativní termografie.

Oba přístupy, kvalitativní i kvantitativní, mohou být aplikovány ve smyslu pasivní nebo aktivní termografie. Na měřený objekt může být uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem, které způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu. V takovém případě se jedná o aktivní termografii.

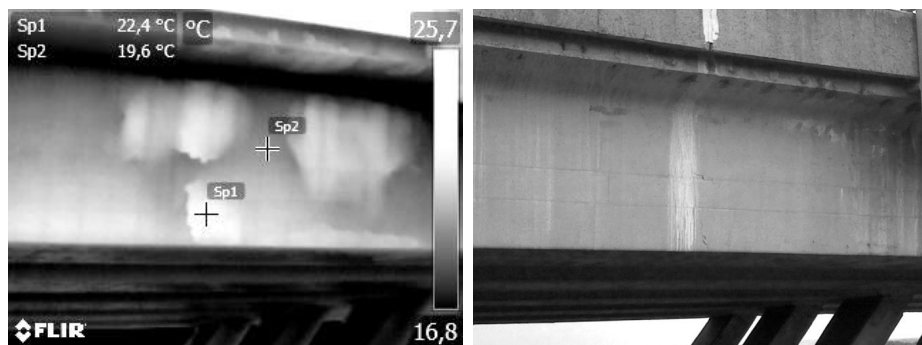
Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota objektu a měří se tedy její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o pasivní termografii. Vzhledem k velikostem staveb dopravní infrastruktury nepřichází aktivní termografie ve většině případů v úvahu, a proto se při měření těchto objektů uplatňuje právě pasivní termografie.

2. Poruchy, které lze zaznamenat termokamerou

IR termografii lze za vhodných podmínek výhodně použít při zjišťování plošných poruch tzv. delaminací na betonových konstrukcích. Tyto poruchy jsou často způsobeny korozi betonářské výztuže. Korozi výztuže obvykle předchází karbonatace betonové krycí vrstvy. V průběhu času do betonu se vzduchem proniká CO_2 a reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – portlanditem, obsaženým v betonu. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se rozkládá na CaCO_3 a vodu. Jak postupuje CO_2 do betonu, ubývá $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a tím se snižuje pH krycí vrstvy.

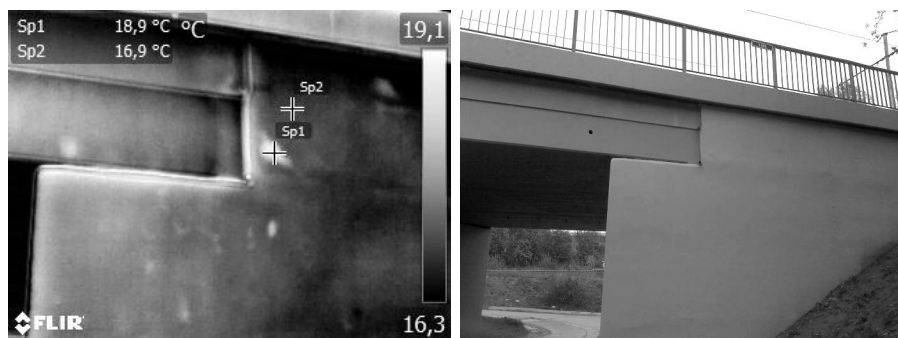
Když pH betonu klesne pod hodnotu 9, rozpadne se vrstvička hutných oxidů železa mezi ocelí a betonem. Dojde k tzv. depasivaci výztuže. Tímto okamžikem má k výztuži přístup voda a kyslík a startuje koroze výztuže.

Čím je menší hloubka uložení výztuže pod betonovým povrchem, tím dříve hrozí vznik koroze v případě, že je betonový povrch vystaven nepříznivým vlivům. Korozní produkty mají podstatně větší objem než původní kov. Jejich tvorba má za následek zvýšený tlak na betonovou krycí vrstvu. S přibýváním korozních produktů se tento tlak zvyšuje až do oddělení (delaminaci) betonové vrstvy od armatury a vzniku dutiny. Následně může dojít až k úplnému odtržení částí betonu. V případě, že se pod mostem nachází jiná komunikace, hrozí riziko poškození projíždějícího vozidla nebo v horším případě poranění osob při zasažení odtrženým kusem betonu. Na obrázku 1 vlevo je termogram betonového nosníku mostu, vpravo pak je fotografie téhož místa.



Obr. 1 Delaminace krycí betonové vrstvy na nosníku betonového mostu

Fig. 1 Delamination of the cover concrete layer on the concrete bridge beam

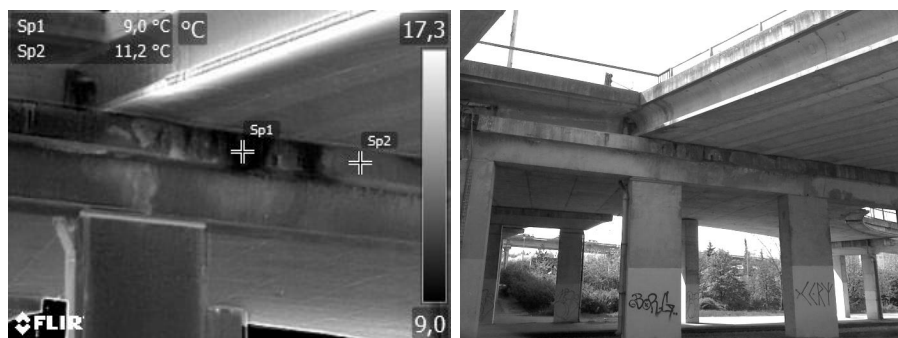


Obr. 2 Sanační nátěr na křídle opěry oddělený od podkladu; světlá – teplejší barva

Fig. 2 Remediation coating on the wing of the support, separated from the substrate; light - warmer color

Delaminace povrchové vrstvy nemusí být způsobena jen korozí výztuže. Na obr. 2 je termosnímek křídla opěry mostu, na kterém byl proveden sanační nátěr. Více zahřáté oblasti označují místa, ve kterých se tento nátěr odděluje od podkladu.

Další možností aplikace termografické metody je zjišťování přítomnosti vody v konstrukci. Při měření se vychází ze skutečnosti, že kapalina při vypařování odebírá teplo svému okolí. Pomocí termokamery tak lze odhalit oblasti s přítomností vlhkosti, která nemusí být pouhým okem na první pohled zřejmá. Na obr. 3 je patrný zátok na úložný práh podpěry pravděpodobně způsobený porušeným dilatačním závěrem mostu.



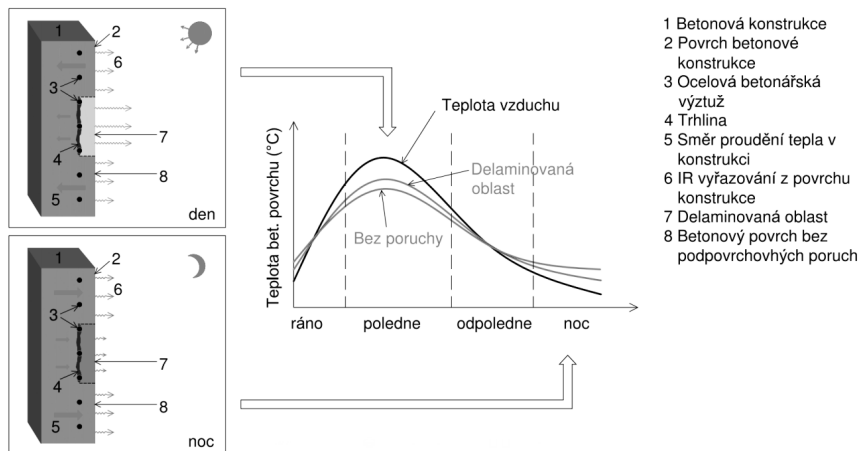
Obr. 3 Zátok na úložný práh; tmavá – chladnější barva

Fig. 3 Leak on the storage threshold; dark - cooler color

3. Princip zjišťování delaminací a dutin

Rychlost, jakou se teplo šíří v konstrukci, závisí na tepelné vodivosti. Ta je přímo úměrná teplotnímu rozdílu (ΔT) mezi místy přenosu tepla. Během dne dochází

obvykle ke kolísání mezi denní a noční teplotou. Na tyto změny reaguje i konstrukce. Vlivem dopadajícího slunečního záření a vzrůstající okolní teplotě se nejprve otepluje povrch objektu, od kterého se teplo šíří hlouběji do konstrukce. Pokud naopak dojde ke snížení okolní teploty (v noci), konstrukce se ochlazuje a teplo se šíří opačným směrem.



Obr. 4 Princip zjišťování skrytých poruch pomocí termografické metody

Fig. 4 The principle of detection of hidden faults using a thermographic method

V případě, že se pod povrchem konstrukce nachází nějaká porucha (delaminace) nebo dutina, působí vzduch zde obsažený jako „izolace“, která omezuje proudění tepla. Tato porucha způsobuje, že se povrch nad ní zahřívá více než obdobný povrch konstrukce bez závad. Důvodem je omezení odvodu tepla z povrchu do hloubky konstrukce (obr. 4). Při ohřívání konstrukce lze proto očekávat, že oblastí nad poruchou budou teplejší než okolní nepoškozený beton - vzniká tzv. pozitivní teplotní kontrast. Při ochlazování konstrukce nastává opak, kdy v těchto místech dochází k rychlejšímu odvodu tepla, a proto se budou tyto oblasti na pořizovaných termogramech jevit jako chladnější - negativní teplotní kontrast. Tohoto jevu lze využít například při termografické diagnostice mostů a vyhledávání delaminací.

4. Způsoby termografického snímání

Volba vhodného způsobu měření a typu přístroje musí vždy vycházet z účelu měření, požadované přesnosti a místních podmínek. Běžná ruční termokamera se hodí například pro termografické snímání většiny mostů. Tyto termokamery nemají na rozdíl od digitálních fotoaparátů optický zoom, proto je potřeba si vystačit se

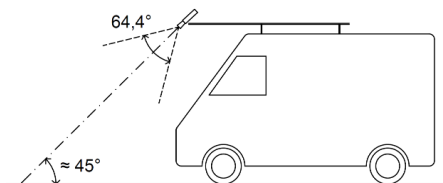
základním objektivem. Některé modely umožňují použití různých typů objektivů. Při měření na větší vzdálenosti tak lze použít teleobjektiv. Naopak pro měření na krátké vzdálenosti je výhodný širokouhý objektiv. V případě potřeby snímání špatně dostupných staveb, lze termokameru osadit na dálkově řízený dron.

Pro termografické snímání liniových staveb jako jsou vozovky nebo tunely, je výhodné upevnit termokameru na měřicí vozidlo. Při tomto měření se používá průmyslový typ termokamery, který zpravidla nemá vlastní displej, ale je propojen s počítačem, na jehož displeji jsou záběry zobrazovány. Na vozidle může být zároveň umístěna digitální kamera a jednotka GPS. Data ze všech těchto zařízení jsou synchronizována a ukládána do paměti přenosného počítače ve vozidle. Na obrázku 5 je měřicí vozidlo Centra dopravního výzkumu, které bylo využito pro termografické snímání vozovek.



Obr. 5. Měřicí vozidlo s kamerami

Fig. 5 Measuring vehicle with cameras



Obr. 6. Nákrres měřicího vozidla

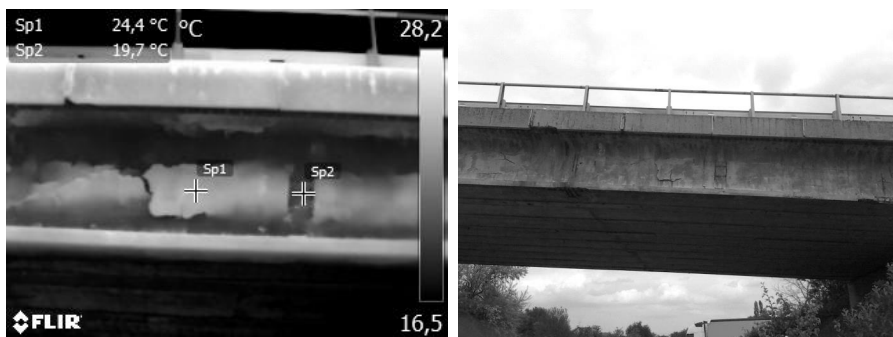
Fig. 6. Sketch of measuring vehicle

5. Měření na mostech

Poruchy pod povrchem betonových konstrukcí představují výzvu pro pracovníky provádějící jejich kontrolu či údržbu. Korozí podpovrchové výztuže může způsobit delaminaci a následné odprýskávání kusů betonu. V krajním případě mohou tyto odpadávající betonové kusy ohrozit provoz pod narušeným mostem. K udržení bezpečnosti provozu a omezení rizik spojených se stavebně technickým stavem mostů jsou prováděny pravidelné prohlídky. Tyto kontroly se obvykle skládají z vizuálního posouzení stavu mostu. Delaminace způsobené korozí betonářské výztuže nejsou vizuálně pozorovatelné, dokud poškození nepokročí do té míry, že nastane odprýskávání betonu. Pro detekci tohoto poškození v jeho rané fázi, kdy lze ještě provést cenově efektivní opravy, je potřeba progresivních diagnostických metod.

Infračervená termografie umožňuje detekovat skryté vady na základě vyhodnocení teplotních odchylek napříč betonovým povrchem. Když se teplota materiálu zvyšuje, jako například během dne, kdy slunce a okolní vzduch zahřívají betonový povrch, je oblast nad delaminací teplejší, než okolní nepoškozený beton. Během noci, kdy teplota vzduchu klesá, se naopak tyto oblasti ochlazují rychleji, a proto se na termogramech jeví jako chladnější.

Části konstrukce, na které dopadá sluneční záření, se pochopitelně zahřívají rychleji, než ty, které se nachází ve stínu. Doporučuje se provádět inspekce ve dnech, kdy je nepřerušovaný sluneční svit, oblačnost by měla být minimální. Letní dny jsou výhodnější než zimní z důvodu intenzivnějšího a delšího slunečního osvětlení. Inspekce by měly být prováděny alespoň 4 hodiny po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného tepelného kontrastu. V takovém případě lze s velkou pravděpodobností odhalit delaminace i v hloubce okolo 5 cm.

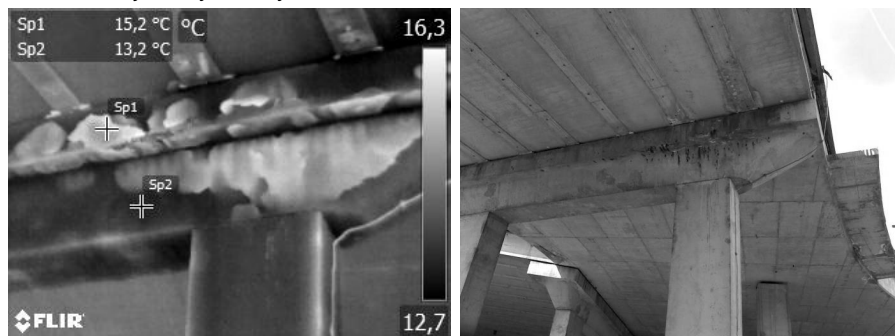


Obr. 7 Boční pohled na nosník typu I73 mostu; v bodě Sp1 je delaminovaná krycí vrstva, v bodě Sp2 již došlo k odtržení této vrstvy

Fig. 7 Side view of beam bridge type I73; at point Sp1 there is a delaminated cover layer, at point Sp2, this layer has been torn off

Měření lze provádět i na površích, které nejsou vystaveny slunečnímu záření. Doporučuje se provádět inspekce ve dnech, ve kterých se očekává změna okolní teploty vzduchu alespoň o 10°C. Tedy zpravidla ve dnech, kdy je dostatečný rozdíl mezi denní a noční teplotou. Obecně platí, že rychlejší nárůst okolní teploty má za následek výraznější teplotní kontrast. Ve chvíli, kdy se změní růst teploty na pokles, nastává také snižování tepelného kontrastu až do úplného vymizení. Geometrie mostu spolu s okolním terénem a vegetací mohou mít za následek, že se teplota vzduchu v blízkosti mostu bude měnit jen velmi pomalu, což znemožní vznik tepelného kontrastu na jeho povrchu, a tedy neumožní měření. Na obrázku 8 je podhled mostu mimoúrovňové křižovatky. Rozdíl mezi delaminací a neporušeným povrchem dosahuje v tomto případě

2°C. Obecně jsou hodnoty teplotních kontrastů na stíněných površích nižší než při měřeních objektů vystavených slunečnímu záření.



Obr. 8 Delaminovaný povrch příčle a úložného prahu

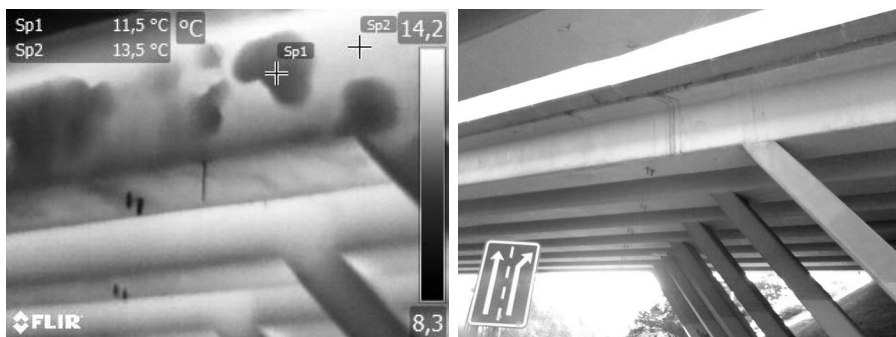
Fig. 8 Delaminated surface of the beam and storage threshold

Měření lze teoreticky provádět i v nočních hodinách, delaminaci však v tomto případě označuje negativní teplotní kontrast. S měřením je vhodné začít nejdříve jednu hodinu po západu slunce. Z hlediska provádění je ovšem praktičtější ranní měření. Pokud se teplota vzduchu uplynulou noc pohybovala alespoň o 10 stupňů níže než předchozí den, lze při dostatečném teplotním kontrastu provádět měření i v ranních hodinách. Toto měření je možno provádět do doby, než začne teplota vzduchu i konstrukce opět růst, tedy přibližně jednu hodinu po východu slunce. Klasickým příkladem je teplý den, po kterém následuje bezoblačná noc, kdy teploty většinou klesají na nižší teploty.

Při poklesu teploty platí, že se delaminované oblasti ochlazují rychleji, než neporušený povrch. Proto se budou tyto poruchy na termogramech jevit jako chladnější (obr. 9). Omezení týkající se geometrie mostu a jeho okolí jsou stejná jako při měření ve dne.

Nedoporučuje se provádět měření ve dnech, kdy se denní teploty příliš neliší od těch nočních a zároveň na zkoumaný povrch konstrukce nedopadá sluneční záření. Typickým příkladem je sychravé podzimní počasí. V těchto situacích téměř nevzniká teplotní kontrast a poruchy tedy nemusí být zjistitelné.

Dále není vhodné provádět měření v době, kdy přechází pozitivní teplotní kontrast v negativní a naopak (viz kap. 3 a obr. 4). V těchto okamžicích se teplota povrchu nad poruchou rovná teplotě okolního neporušeného betonu a proto nelze závady pomocí termokamery odhalit. Tato situace nastává zpravidla v ranních a podvečerních hodinách.



Obr. 9 Měření v ranních hodinách; delaminovaný povrch trámu nosné konstrukce mostu je chladnější než zbytek konstrukce – bod Sp1

Fig. 9 Measurement in the morning; the delaminated surface of the bridge beam is cooler than the rest of the structure – point Sp1

6. Měření vozovek

Při diagnostice vozovek byla otestována termokamera umožňující natáčet tzv. termografické video. Měření bylo prováděno z jedoucího vozidla a termokamera byla upevněna na jeho střeše. Širokouhý objektiv umožnil zachytit celý jízdní pruh.

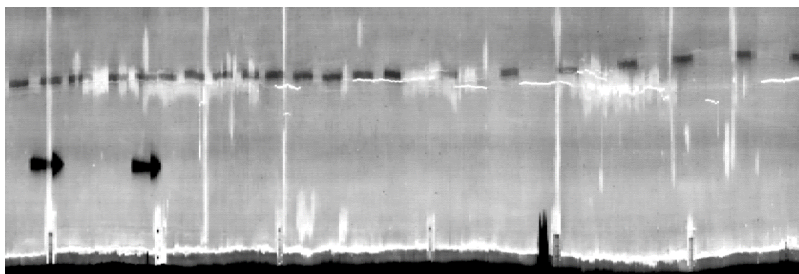
Měření je výhodné provádět za slunečného počasí, díky kterému lze na povrchu vozovky dosáhnout vyšších teplotních kontrastů. Naopak nevýhodou je rušení měření od stínů, které vrhá okolní zástavba nebo vegetace. Při měření a následné analýze lze mimo jiné lokalizovat výtlučky, vysprávkové a trhliny.

Rovněž vysprávkové výtlučky lze pomocí termokamery snadno lokalizovat. Vysprávkové bývají zpravidla z mírně odlišného materiálu a mají odlišný barevný odstín. Na obr. 10 jsou vysprávkové vyhotoveny z tmavšího materiálu, který se na slunci více zahřívá a proto je lze na termogramu dobře rozlišit díky vyšší teplotě.



Obr. 10 Lokalizace vysprávek pomocí termokamery

Fig. 10 Location of repairs using thermal camera



Obr. 11 Teplotní mapa měřené komunikace

Fig. 11 Thermal map of pavement

Jednotlivé snímky, ze kterých se skládá termografické video lze upravit a složit za sebe. Vznikne tím teplotní mapa měřené komunikace (obr. 11). Na termogramu je patrné vodorovné dopravní značení – černá barva nebo například asfaltová zálivka – nepravidelná bílá čára u středu vozovky.

Mimo měření na stávajících pozemních komunikacích lze využít termokameru i při výstavbě nových asfaltových vozovek. Jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících životnost asfaltobetonové vozovky je mezerovitost a objemová hmotnost asfaltové směsi. Teplotní segregace asfaltové směsi při pokládce vede k lokálním změnám mezerovitosti a tím i ke změnám objemové hmotnosti asfaltové směsi. Takto ovlivněná místa neumožňují dokonalé zhutnění asfaltové vrstvy a v průběhu provozu komunikace mohou být negativně ovlivněna dopravním zatížením a průsakem vody, který riziko budoucího poškození vozovky ještě zvyšuje.

Termokamera umožňuje sledování teploty nově pokládané asfaltové vrstvy během stavebních prací. Obsluha finišeru tak může v průběhu pokládky operativně přijmout nezbytné opatření pro zvýšení kvality budované vozovky. Na termosnímku (obr. 12) jsou za finišerem patrné oblasti s teplotou lišící se až o 30°C. Tyto rozdíly v teplotách vznikly v důsledku nerovnoměrného chladnutí asfaltové směsi na korbě nákladního vozidla. Pokud by došlo ještě k výraznějšímu vychladnutí směsi, může dojít ke zmíněným problémům se zpracováním a se zhutněním směsi.



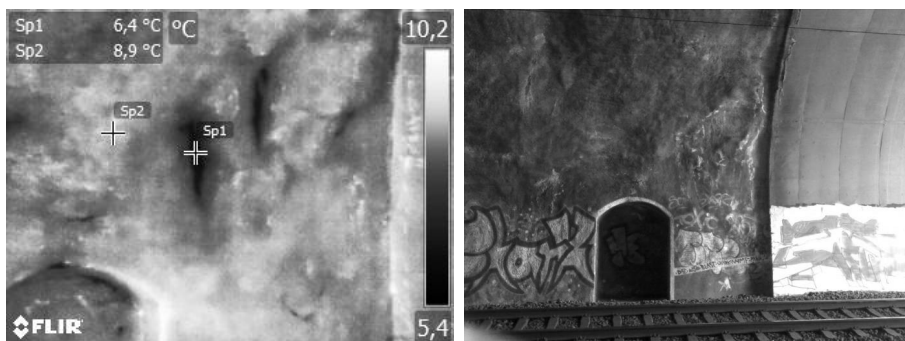
Obr. 12 Kontrola teplotní homogenity asfaltové směsi

Fig. 12 Checking the temperature homogeneity of the asphalt mixture

7. Měření v tunelech

Termokamera poskytuje slušné výsledky při měření na ostění tunelu ze stříkaného betonu. Nicméně, u nových tunelů se téměř žádné anomálie zaznamatelné pomocí termokamery nevyskytují. Jedním z důvodů může být fakt, že se tyto poruchy nenachází blízko povrchu a hlubší defekty nedokáže termokamera odhalit.

Princip zjišťování dutin je obdobný jako u mostů. Pro vytvoření teplotního kontrastu na povrchu ostění je nezbytný dostatečný rozdíl mezi noční a denní teplotou. Aby se tato změna venkovní teploty projevila i v tunelu, je potřeba dostatečného proudění vzduchu v něm. Naopak detekci průsaků vody a vlhkosti termokamerou lze provádět téměř bez omezení a nezávisle na okolní teplotě. Na obrázku 13 je díky tmavší, tedy chladnější barvě, patrný zátok v železničním tunelu.



Obr. 13 Termogram z měření v železničním tunelu

Fig. 13 Thermogram from measurements in the railway tunnel

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci programu Národní program udržitelnosti I, projektu Dopravní VaV centrum (LO1610) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

Literatura

JANKŮ, Michal a Josef STRYK. *Metody termografického snímání objektů dopravní infrastruktury*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., (ve schvalovacím procesu).

JANKŮ, Michal, Ilja BŘEZINA a Jiří GROŠEK. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. *Procedia Engineering*. 2017, (190), 62 - 69. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.308. ISSN 1877-7058.

CLARK, M. R, D. M MCCANN a M. C FORDE. *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00060-9. ISSN 0963-8695

WASHER, Glenn, Richard FENWICK, Seth NELSON a Rilya RUMBAYAN. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2013, (2360), 13-20. DOI: 10.3141/2360-02. ISSN 0361-1981.



SINGLE-SIDED CONTACT-FREE ULTRASONIC TESTING – A NEW AIR-COUPLED INSPECTION TECHNOLOGY FOR WELD AND BOND TESTING

M. KIEL[†], R. STEINHAUSEN, A. BODI[‡], and K. ROSTKOWSKI[‡]

[†]Research Center for Ultrasonics - Forschungszentrum Ultraschall gGmbH

Köthener Str. 33A, 06118 Halle, Germany

[‡]E-mail: mario.kiel@fz-u.de

[‡]SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH

Abstract

The automotive industry profits of many fully automated processes during its fabrication stages. Most of the processes are performed by robots just like all typical welding processes. To achieve quality requirements testing is necessary. It is recommended that a radiation and contact-free nondestructive testing method is applicable. This ensures a maximum testing speed and a minimum of necessary safety provisions, preparations or post-processing of the test objects. Two special testing scenarios will be discussed using single-sided air-coupled ultrasonic testing. A main advantage is the contactless measurement without the application of any oil or water using high-power ultrasonic pulses. In addition to common transmission mode testing, we present a pitch-catch-technique using Lamb-waves. The influence of geometry effects and the importance of high bandwidth will be discussed. The first test specimen are edge-to-edge laser-welded metal sheets as used for instance in automotive production processes. The goal of a better quality assurance is the immediate control of the welding process. Accordingly, for future testing systems it is recommended to implement the work tool and the testing sensor into the welding robot. The aim of the testing is to monitor the complete performance of the welding and to record interruptions of the weld seam or any reduction of the laser energy. Any discontinuity within the sound path leads to changes of the ultrasonic signal. Due to the fact that the non-welded plates should have no defects, changes of the signal indicate directly a change of the weld seam. The second test samples are adhesive bonds found in composite material structures such as combinations of metal sheets and carbon fiber reinforced plastics (CFRP). The mechanical stability, lifetime and performance of such composite structures strongly depends on the quality of the bond. Air-coupled ultrasonic testing is a promising nondestructive method for the characterization of these bonds. In transmission mode the absence of glue acts as an additional interface within the test object which strongly reduces the transmitted ultrasound wave. Glue application errors can be detected easily.

Keywords: *Ultrasonic Testing (UT), Air-coupled, Contact-free, Bond, Weld, Composites*

1 Introduction

The automotive industry profits of many fully automated processes during its fabrication stages. Most of the processes are performed by robots just like all typical welding processes. To achieve quality requirements testing is necessary. This is normally done using nondestructive techniques at the finished pre-product. The goal of a better quality assurance is the immediate control of the welding process.

Thus, for future testing systems it is recommended to join the work tool and the testing sensor at the welding robot. The aim of the testing is to monitor the complete performance of the welding and to keep records of interruptions of the welding seam. A special welding process is the laser assisted edge-to-edge welding of steel plates. Here it is important to recognize and report any disruption the welding material or the any reduction of the laser energy.

With respect to an industrial application three aspects had to be fulfilled. The method should be nondestructive, should be contactless, should be single-sided applicable and should allow 100% testing. The first two points are intrinsically fulfilled in air-coupled ultrasonic testing. The ultrasonic waves are transmitted and received through the coupling medium air. This method is normally used in through transmission mode, i.e. the transmitting and receiving transducer is located at both sides of the sample. Due to the difference of the acoustic impedances between air and typical samples (plastics, metals, adhesion, composite materials etc.) most of the ultrasonic wave intensity is reflected at the interfaces and only a small fraction reaches the receiver. Therefore high power transducers for transmitting enough signal and highly sensitive receivers and amplifiers are necessary. Typical intensity losses through different samples are in the order of 60 – 90 dB.

The third point of the above mentioned technical requirements, i.e. the single-sided approach is not easy to realize with air-coupled ultrasonic testing. The fact that most of the signal is reflected at the surface of the sample prevents to detect any signal because it is totally hidden within the front surface echo. One possibility is to excite Lamb waves. This allows to separate the two signals in a practical way. Often an additional shielding is used to suppress the signal of the front echo.

In this paper we present a simple method for air-coupled ultrasonic testing of welding seams between thin steel plates. A single-sided approach has been realized in a well-known pitch-catch configuration. Due to the special geometry no additional shielding of the front echo is necessary.

2. Method

The measurements of the present work were performed using the multichannel ultrasonic system SONOAIR of the company SONOTEC (Halle, Germany). The key component of the system is a 4-channel transmitter and a 4-channel receiver unit, respectively. The high-power digital amplifier provides an output with voltages up to 800 V in the frequency range of 50 kHz up to 3 MHz. The receiver unit is able to detect signals in the same frequency range with a gain between 0 dB and 120 dB using low-noise preamplifier and amplifier. An x-y-scanning system is available with different mounts for the ultrasonic transducers. Different drivers of controllers for positioning systems like scanners or robots are included in the software package. Ultrasonic transmitters and receivers are available in different frequencies between 50 kHz and 400 kHz. The measuring software allows the adaptive control of the measuring process such as scanning control, gate set-up, time delays for each transmitter and receiver channel and user defined filter for combining the signals. Moreover, an interface for more complex data processing is available.

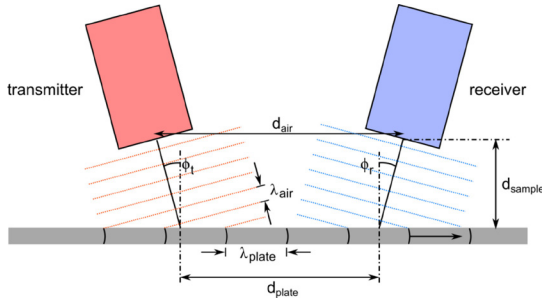


Figure 1: Working principal for single-sided air-coupled ultrasonic testing of lamb waves.

The basic principle of the testing method is shown Fig. 1. Above the sample the transmitter and receiver is placed with a certain angle ϕ_t and ϕ_r with respect to the surface normal. The transmitter emits an acoustic wave with a frequency of 200 kHz which is depicted as dotted lines. This regular air pressure wave hits the surface of the plate and induces an ultrasound wave in the plate. By adjusting the angle of incidence it is possible to tune the distance of the pressure oscillations to the corresponding wave length of the lamb wave in the sample (see Fig. 1). The now excited lamb wave propagates within the sample and leads to pressure oscillations at the interface as well. Therefore ultrasonic waves are reemitted again at the whole path length of the propagating lamb wave. As depicted in the cartoon the receiver detect these reemitted waves.

For the angle ϕ the following relation applies:

$$\sin \phi = \frac{\lambda_{air}}{\lambda_{plate}} = \frac{c_{air}}{c_{plate}} \quad (1)$$

To determine the optimum angle of the transducers it is possible to measure the reemitted wave at different distances d_{air} of both transducers. As the result one gets a B-scan of this measurement as shown in Fig. 2. The positive values of the ultrasonic signal are shown in red and the negative signals in blue color. With an increasing distance d_{air} the distance d_{plate} (see Fig. 1) increases as well. The signal leads to a pattern with a linear slope as depicted in Fig. 2(b). This slope corresponds to the inverse speed of the lamb wave. For the two different plates of 0.8 mm and 1.6 mm thickness velocities of 2100 m/s and 1600 m/s where found, respectively. This nicely fits to the expected behavior that the velocity of a lamb wave strongly depends on the material thickness [1]. Due to the decreasing of sound velocity with increasing thickness of plate a symmetric mode s_0 is observed in this case. The asymmetric mode a_0 is to slow and disappears in the much louder signal of the direct air wave. According to equation 1 the corresponding optimum angles of incident can be calculated to 9.3° and 12.3° , respectively.

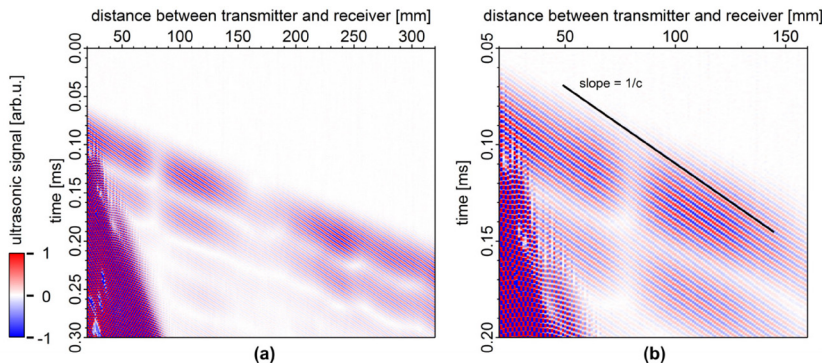


Figure 2: Determination of the sound velocity of the lamb wave within a 0.8 mm thin steel plate (a) and a detailed view (b).

Note that for this measurement it is not necessary to adjust the angle of incidence to the optimum value. Moreover this measurement helps to determine this angle in an easy way without any considering any other experimental boundary conditions for signal optimization. Contrary to a single mode excitation [2] the transmitter is placed within the near field length to the sample to excite even a multi-mode signal.

3. Results

For the characterization of the welding seam the setup as shown in Fig. 3 was used. The ultrasonic transducers with a frequency of 200 kHz have a distance d_{air} of approx. 45 mm to each other. To enable a totally contactless method no additional shielding was applied. It is expected to detect in general two main signals, i.e. the direct sound wave through air between the two transducers and the reemitted lamb wave signal.

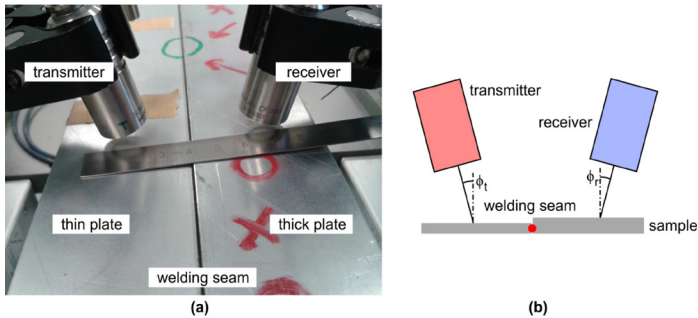


Figure 3: Experimental setup for the welding seam inspection (a) and (b). Tape measure shows mm units.

To separate both from each other it is necessary to adjust the distances in a proper way. Therefore the times of flight of both signals have to be compared. According to Fig. 1 the following equations apply:

$$t_{air} = \frac{d_{air}}{c_{air}} \quad (2)$$

$$t_{sample} = 2 \frac{d_{sample}}{c_{air}} + \frac{d_{plate}}{c_{plate}}. \quad (3)$$

To reach the separation the following condition has to be fulfilled:

$$t_{air} > t_{sample} + t_{pulse} \quad (4)$$

Note that the fulfillment of equation (4) requires an important experimental condition. As already visible in Fig. 3(a) the distance between the transducer and the sample (d_{sample}) should be as small as possible to get the smallest time t_{sample} . Therefore one normally has to adjust the sample within the nearfield length of the transducers. This normally leads to artifacts in traditional scanning methods but seems to be no problem in this special configuration from our point of view. One additional argument is the given geometry of the investigated samples. The only defect should occur within the welding seam. Therefore the direct shape of the ultrasonic wave at the entrance of the plate is less important because the path through the plates is always the same and no additional change of the ultrasonic signal is expected.

In Fig. 4(a) the results of the A-scans at the defect-free and defective region of the sample are shown. At larger times above 0.17 ms the signal through air is visible. Note that the latter one has a much higher intensity because no intensity losses at the sample-air interface occur and normally saturates at this level of signal amplification. At smaller time of flights between 0.08 and 0.15 ms the signal through the sample is recorded and nicely separated from the direct air signal. Comparing the signals at those different sample positions a change of the intensity is observed. The signal is smaller at defective regions. Additionally to the drop of the signal intensity a shift of the signal phase is observed as well as indicated by the dotted line. The whole measurement is shown as a B-scan in Fig. 4(b). Here an

additional change of the intensity and phase behavior at time of flights around 0.15 ms becomes nicely visible. The lateral extension of both patterns (around 0.1 and 0.15 ms) is different and might help to characterize and distinguish between different defect types. However, the B-scan patterns observed in air-coupled ultrasonic testing using lamb waves are comparable with those found in traditional coupled TOFD analysis.

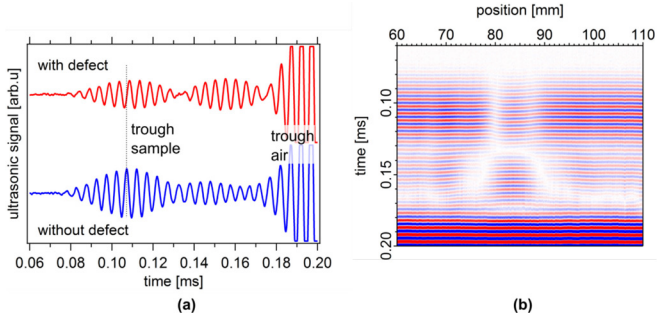


Figure 4: A-scans of defect-free and defective regions of the sample (a). B-scan the whole defective region (b).

For a closer analysis the data of Fig. 4(b) are analyzed in more detail. The results are shown in Fig. 5. The standard intensity analysis is shown on large scale of the position coordinate in Fig. 5(a) and in more detail around the defect in Fig. 5(b). Between 75 and 90 mm an intensity drop is observed. In the center of this feature a small increase of the intensity occurs. For a better comparison of the length scale the black bar indicates the distance of 10 mm which is equivalent to the present defect length. Before and after the defect additional intensity fluctuations are observed. However, those show an increase of the intensity and are most likely due to interference effects of the ultrasonic waves within the sample in the vicinity of the defect. In Fig. 5(c) and (d) the time of flight (ToF) data are shown on the same position scales. As already mentioned above the defect leads to a shift of the signal phase which leads to an increase of the time of flight. Again the black bar indicates the defect length.

Comparing those two analysis methods different conclusions are possible. At first the signal to noise ratio is better for the intensity method. But the results of the ToF measurements are far away from any noise limitations. For an easy characterization of the defect length the ToF is more reliable. The signal change occurs only within the defective region. Note that the small change of the ToF at positions larger than 100 mm is due to the geometry of the sample which is not perfectly flat which changes the distance between the transducer and the sample. However, the additional fluctuations of the intensity data may contain additional information of the defective region and might be used to perform further characterizations of the seam or its defects.

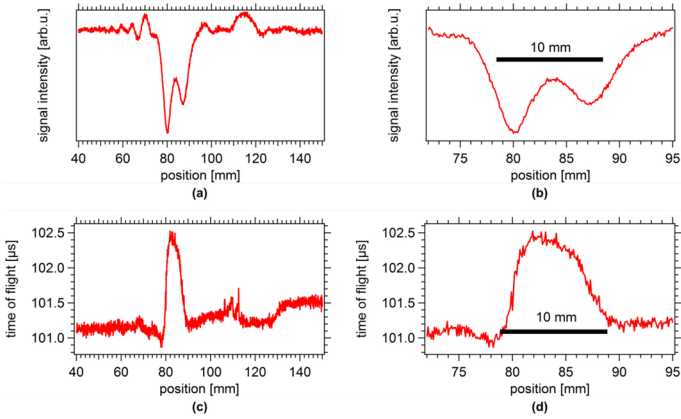


Figure 5: Intensity (a and b) and time of flight analysis (c and d) of the data of Fig. 4(b).

To check the influence of the setup to the signal different arrangements were tested as shown in Fig. 6(a-c). The distance between both transducers are fixed due to the requirement of equation (4). Only the relative position of the welding seam was changed. In configuration (a) the seam is close to the receiver, (b) in the middle of both and in (c) the seam is close to the transmitter. The results of the intensity and ToF analysis are summarized in Fig. 6(d) and (e), respectively. The obtained curves do not show any influence to the exact position of the welding seam. Only the ToF signatures for the asymmetric configurations (blue and green curves) are slightly narrower but in both cases in a similar way.

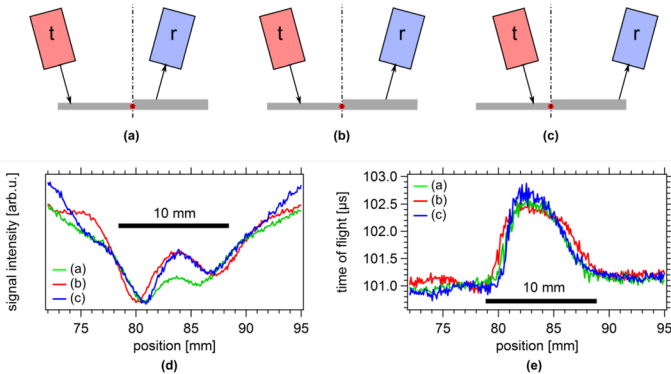


Figure 5: Intensity (d) and time of flight analysis ϵ using different setups (a-c).

4 Summary and outlook

We presented a new approach for the characterization of laser assisted edge-to-edge welding seams. The method is based on single-sided air-coupled ultrasonic testing and based on excitation and detection of lamb waves. The given geometry of the investigated welding seam and the transducer setup allows to measure totally contactless without any shading support.

The obtained ultrasonic data are sensitive to defects of the seam in the signal intensity as well as the time of flight. Both signals allow to characterize the condition of the seam. The dimension of the defect size can be evaluated. The method is independent of an exact configuration of the transducers with respect to seam which allows an easy implementation of this method into automated systems. The applied data analysis has been developed in post-processing but can be fully implemented into online analysis with direct output of the result.

References

- [1] Z. Liu, "Lamb Wave Analysis of Acousto-Ultrasonic Signals in Plat" in *Proceedings of the 15th WCNDT*, Roma, 2000.
- [2] M. Gaal *et al.*, "Detection of flaws with lamb waves and air-coupled ultrasound", *NDT in progress*, Prague, 2009.



HIGH RESOLUTION PHASED ARRAY IMAGING USING THE TOTAL FOCUSING METHOD

Stefan KIERSPEL*, Helge RAST*

*KARL DEUTSCH Pruef- und Messgeraetebau GmbH + Co KG Wuppertal, Germany
Contact e-mail: kierspel@karldeutsch.de

Abstract

Ultrasonic Phased Array techniques are applied in medical and technical fields for many years. Due to increasing computer performances nowadays also advanced imaging techniques can be applied, delivering higher image resolutions compared to traditional sector scans and linear scans which are only based on focused sound beams. The total focusing method (TFM) is a signal processing algorithm using data acquired in full matrix capture mode (FMC). All computations are achieved at a refresh rate up to 80 frames per second. With TFM imaging different ultrasonic modes can be defined for longitudinal waves, shear waves and even sound paths with mode conversions like Long-Long-Trans (LLT). The LLT-technique has the potential to replace traditional tandem techniques due to its advantage concerning space requirements, as only one array probe is needed. Practical results will be demonstrated and discussed within the presentation.

Keywords: *ultrasonic phased array, TFM, high resolution, imaging, sizing*

1. Introduction

The well-known traditional Phased Array Techniques “Sector Scan” and “Linear Scan” provide acoustical images with lateral resolutions of 2 or 3 wavelengths, if the sound beams are focused accordingly. By means of the Total Focusing Method (TFM) a resolution of 1 wavelength can be obtained, if a large aperture with e.g. 64 elements is applied.

2. The Total Focusing Method TFM

2.1 Principle

The total focusing method (TFM) is a signal processing algorithm using data acquired in full matrix capture mode (FMC). A computation zone is specified for the data reconstruction. This zone is meshed, and for each point on this grid, the focal laws are calculated for the entire set of elements of the phased array probe, see Figure 1. All recorded signals are time-shifted accordingly before summation at every point of the grid. The loop ends when the reconstruction is done for each point of the mesh. The main advantages of FMC-TFM are direct imaging of a large area in one probe position combined with optimal focusing and spatial resolution. Although lots of calculations are performed, scanning is possible at a refresh rate of 80 frames per second. TFM can provide a lateral resolution of 1 wavelength, if enough elements, e.g. 64, are applied. Figure 1 presents a test result on the phased array calibration block according to ASTM E 2497 with a vertical row of side drilled holes of 1 mm diameter. Here a probe was used with a sound frequency of 5 MHz, which yields a wavelength of 1.2 mm. The TFM-B-Scan image clearly resolves the 1 mm holes.

Furthermore TFM enables the linear array probe to “look” into all directions, due to the fact that each element with its small pitch generates a sound beam with an extremely large divergence. Figure 1 proves that the entire vertical row of holes is imaged with the sideward probe position:

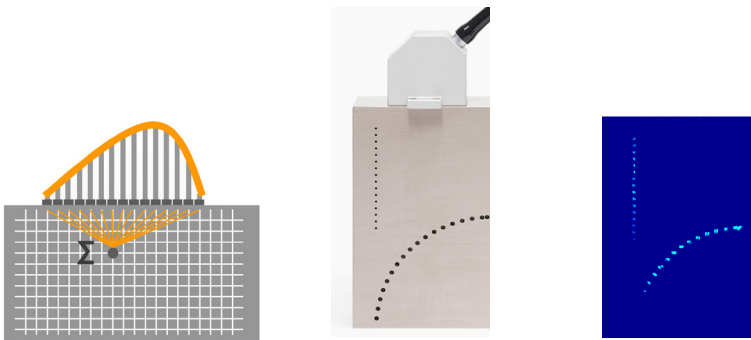


Figure 1: TFM principle, ASTM block and TFM result.

2.2 Analysis and sizing capabilities with TFM

The above mentioned ASTM calibration block also contains a row of holes with a diameter of 1.5 mm. A TFM B scan is presented in Figure 2. If two cursors are selected in the B-Scan, the distances are indicated, here: $\Delta x = 1.5 \text{ mm}$:

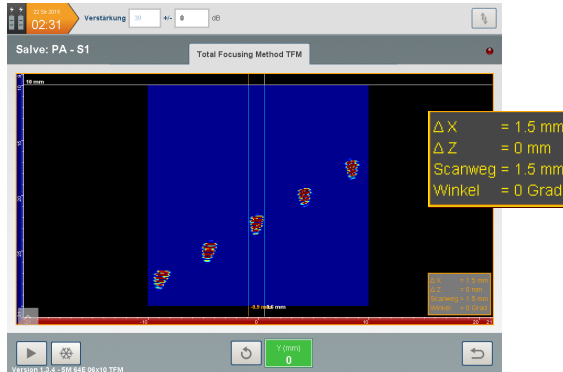


Figure 2: Reflector size determination.

3. TFM applications

3.1 Inspection of a welded T-joint (1)

In the following the inspection of a welded T-joint is presented. T-joints are often critical concerning insufficient through-welding. The sample shown here is a real specimen taken from a steel construction without artificial flaws or disbands. Figure 3 shows the cross section of the T-joint and the position of the probe (5 MHz, 64 elements, 0,6 mm pitch, delay line of rexolite 30 mm thickness). A TFM scan was done with a scan length of 165 mm. Figure 4 shows the corresponding C-scan image, the TFM image at a position of 55 mm scan length and the D-scan section close to the probe center. The combination of all three scans gives a clear indication of a good weld. In Figure 5 the same combination of images show an area from 80 mm to 145 mm scan length, where the disbonded zone is enlarged. Geometrical indications like weld surface and backwall can easily be identified.



Figure 3: Weld inspection on a T-joint with 5 MHz and 64 elements probe.

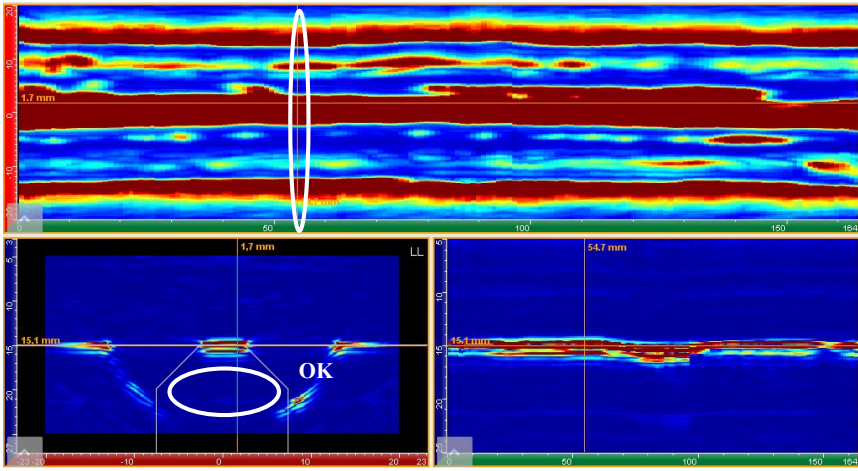


Figure 4: C-scan with TFM and D-scan of a good weld section with visible weld contours.

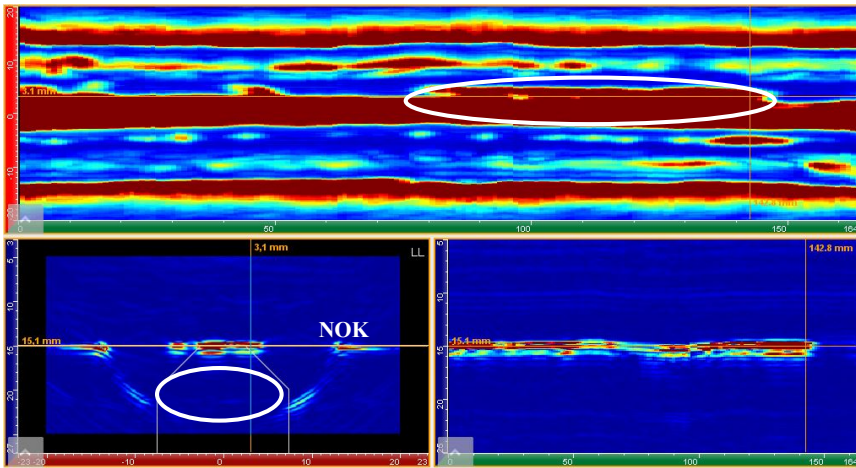


Figure 5: C-scan with TFM and D-scan of a weld section with enlarged disbonding.

3.2 Inspection of a welded T-joint (2)

In the next example a situation is described where there is access to another T-joint from one side only. The inspection task is to determine the depth of the weld and to measure out the area without bonding. In Figure 6 the inspection setup and schematic description of the inspection task is given. The plates (thickness 6 mm) are placed perpendicularly on each other without weld preparation.

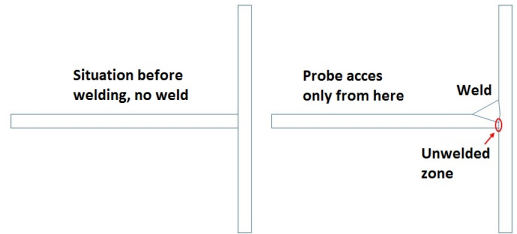
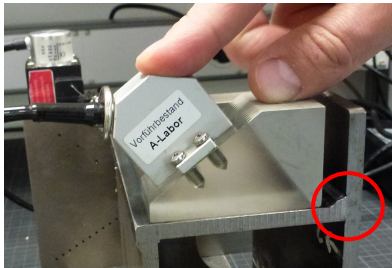


Figure 6: T-joint with probe access only from one side (weld in red circle) Probe with 10 MHz and 32 elements

Areas without bonding can also be detected with phased array sector scans, and by using a position encoder creating a C-scan also allows the determination of the lengths of the bad areas. But to measure out height and area of the disbonded zones is not accurate. A TFM scan in TTT mode delivers accurate results of the lengths and the height and thus the unbonded areas, see Figure 7.

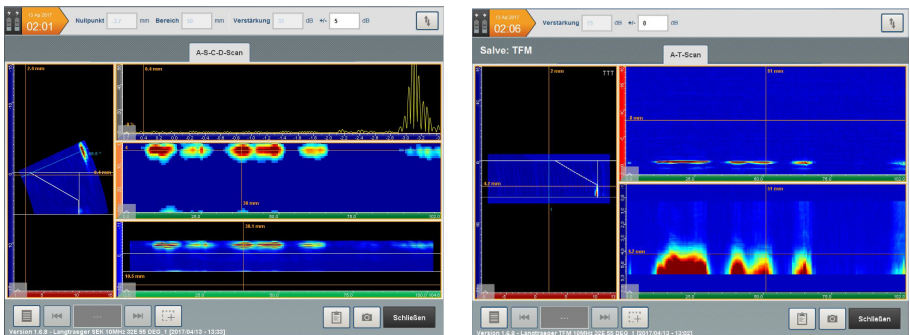


Figure 7: Left: Inspection with phased array sector scan, Right: TFM scan, identical scan length and probe track

3.3 Inspection of connection weld on a tow-bar for vehicles

Another type of weld inspection concerns the weld of tow-bars of vehicles. The bar with the tow-ball is welded to the shaft, which is mounted on the car. This weld has to provide highest strengths concerning all types of stresses.

Conventional ultrasonic inspection cannot be applied as a small unwelded area in the center of the weld remains due to the welding process. This area produces signals that cannot be distinguished from real defects. Phased array inspection with sector scans can determine this area by position but geometrical conditions (bending of the ball rod) does not allow enough offset for the probe positioning.

A TFM inspection setup was developed and carried out using a 5 MHz array comprising 32 elements. The wedge is adapted to the shaft diameter of 40 mm. Water irrigation ensures a constant coupling. Using TFM the probe can be placed close to the weld. A mechanical system with probe holder enables the shaft rotation, see Figure 9. A complete testing around 360° needs 10 seconds, at a scan speed of approximately 13 mm/s. A C scan rollup is displayed and shows ok or nok indication, see Figure 8.

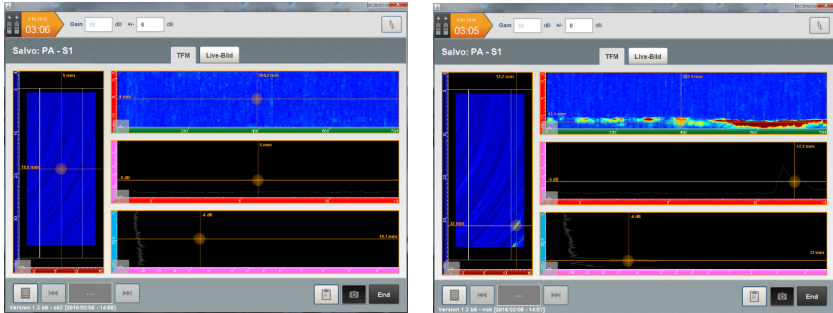


Figure 8: TFM results, left OK, right NOK

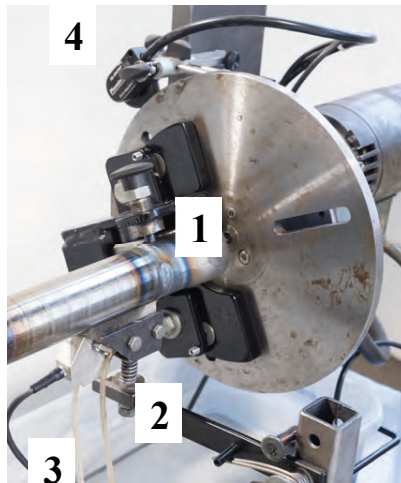


Figure 9: Rotating system with weld [1], probe [2], irrigation hoses [3] and encoder [4]

3.4 Testing of bearing rings

For the ultrasonic testing of bearing rings very high test sensitivities are required, e.g. FBH's with a diameter of 0.5 mm and a depth of 0.5 mm in front of the back wall. The portable phased array flaw detector GEKKO form M2M / KARL DEUTSCH

provides a high contrast and signal-to-noise ratio, due to a very low inter-channel crosstalk of -50 dB, thus fulfilling this requirement.

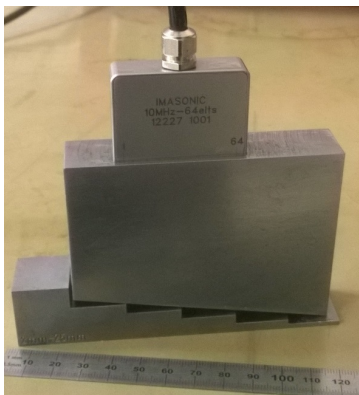


Figure 10: Block with inclined back wall containing 2 FBH's \varnothing 1 mm (1 mm deep) and \varnothing 0.5 mm (0.5 mm deep), probe with 10 MHz and 64 elements, pitch 0,6 mm

However, if the back wall is inclined (see Figure 10), which is often the case with bearing rings, small echoes close to the back wall interfere with the echo of the inclined back wall. Therefore, such reflectors cannot be detected, neither with conventional monoelement probes nor with the traditional phased array sector and linear scans. In this case, TFM is the only successful method, see following Figure 11:

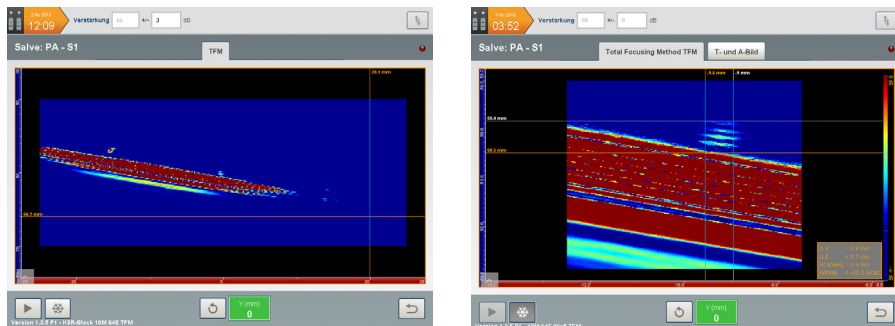


Figure 11: Left: Indications of the 2 FBH's at the inclined back wall, Right: Acoustically zoomed image of the FBH \varnothing 0.5 mm with depth 0.5 mm

3.5 Inspection of castings

Steel and light alloy castings often contain shrinkage cavities. Due to their dendritic surfaces the ultrasonic reflection is poor. If the DGS or DAC methods are applied for

defect size estimation according to the testing standards for castings, we often find a severe under-sizing.

TFM however, transmits in and receives from various directions, thus enabling a much better reflection of the dendrites, which ensures a more accurate defect size determination, compared to the conventional amplitude based methods DGS and DAC, see Figure 12.

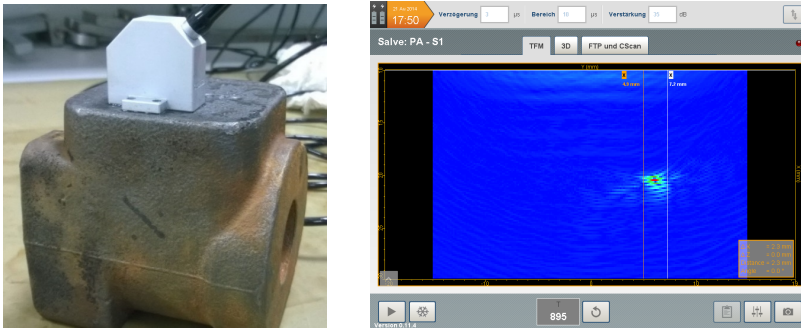


Figure 12: Testing of castings with TFM

3.6 TFM with mode conversion

TFM computation can also consider different kinds of mode conversions. The following example describes a vertical reflector inside a specimen. This has been simulated with a test block containing a side drilled hole, see Figure 13. This setup is traditionally used as test reflector for tandem techniques with two angle beam probes. For different depths the distance between the tandem probes must be changed or various probe pairs must be applied, which makes the tandem technique often cumbersome.

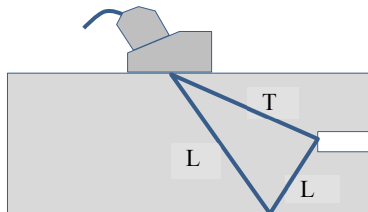


Figure 13: Testblock with vertical flat bottom hole

With a linear array probe and the LLT-technique (Long-Long-Trans) only a single probe is needed, simplifying the probe handling, see Figure 14.

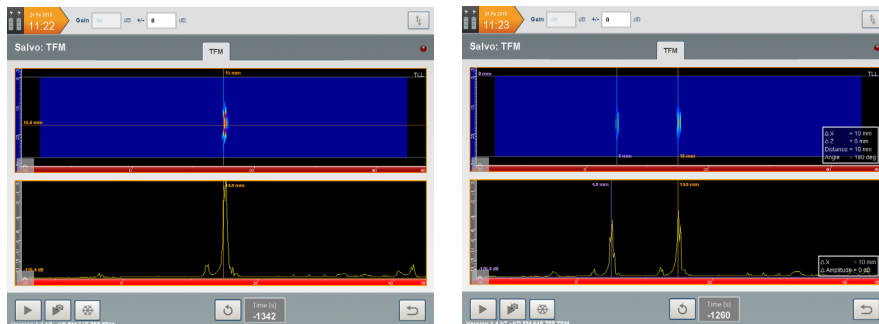


Figure 14: Left: Indication of vertical wall,
Right: Indication of vertical FBH, 10 mm in front of the vertical wall

4 Summary

In contrast to traditional phased array sector and linear scans the Total Focusing Method provides lateral image resolutions of only one wavelength if arrays with 64 elements are applied. TFM permits sideward imaging of reflectors due to the fact that each array element generates a divergent sound beam, thus “looking” into all directions. Beside a short description of the basic principle of TFM several practical examples are shown concerning the inspection of special welds, bearing rings with special geometries and castings, where TFM yields a better sizing of shrinkage cavities.



DIGITÁLNÍ PRŮMYSLOVÁ RADIOGRAFIE - UVEDENÍ TECHNIKY DO PROCESU KONTROL.

DIGITAL INDUSTRIAL RADIOGRAPHY - APPLICATION OF THE TECHNIQUE TO THE TESTING PROCESS.

Bohuslav KOLÁŘ

ATG s.r.o.

Contact e-mail: kolar@atg.cz

Abstrakt:

Cílem tohoto článku je definovat hlediska dle jakých se řídí Digitální průmyslová radiografie, které slouží k tomu, aby byla zachována dostatečná citlivost metody, jak u výrobních, tak u provozních kontrol. Na začátku článku budou představeny jednotlivé aspekty, které mají na citlivost techniky vliv, a které se musí posuzovat z hlediska kvality techniky. Dále by měl referát posluchače seznámit s problematikou aplikování systémů Digitální průmyslové radiografie do procesu kontrol a jednotlivými aspekty, které ovlivňují použití systému respektive aspekty, na které je nutné brát ohledy při pořizování systému.

Klíčová slova: *Digitální průmyslová radiografie, kvalifikace, techniky Digitální průmyslové radiografie*

Abstract:

The aim of this paper is to defined basic rules for Digital Industrial Radiography. These rules are used for keeping sufficient sensitivity of the method in case of manufacturing also in process control. On the beginning of the paper the basic aspects, which have the influences to quality of technique will be introduce. These aspects are necessary take in the account, when the quality and capability of technique are evaluated. On the end the paper should provide the information about application of the systems of Digital Industrial Radiography to the testing process and should provide the information about aspects, which affect usage of these systems respective aspects which are necessary to take in to the account when the systems are buying.

Key words: *Digital industrial radiography, qualification, techniques of digital industrial radiography*

1 Úvod

Tento článek pojednává o základních vlastnostech digitálního zobrazení vytvořeného některou z technik Digitální průmyslové radiografie (DIR), zabývá se definováním jednotlivých technik, vysvětlení základních pojmů, které se k DIR váží a nakonec objasňuje, co vše je třeba z pohledu kvality zobrazení uvažovat při zavádění některé z technik DIR do procesu kontrol.

Cílem článku je poskytnout respondentův základní představu o tom co rozhoduje o tom, jestli je systém Digitální průmyslové radiografie použitelný pro produkci společnosti a poskytnout tak základní informace při pořizování těchto systémů.

Některé základní vědomosti, které jsou k implementování systému DIR do procesu kontrol, mohou být nalezeny v normativních dokumentech. Poté je nutné propojit základní teoretické vědomosti nabitě v rámci personální kvalifikace s těmito požadavky a správně interpretovat.

2 Definice Digitální průmyslové radiografie

Nejprve je třeba definovat význam pojmu Digitální průmyslová radiografie (DIR) a jak se rozlišují jednotlivé techniky. Digitální průmyslová radiografie je jakákoli radiografická technika, jejímž výstupem je digitální obraz zkoumaného předmětu (digitální snímek), přičemž je podstatné, že ať už je obraz získán jakýmkoli způsobem, tak se jeho empirické vlastnosti nesmí lišit s výjimkou Počítačová tomografie (zkoušený předmět je zobrazen ve 3D). Digitální zobrazení se liší pouze kvalitativně v závislosti na použité technice a použitém nastavení. Označení DIR vychází z anglického označení Digital Industrial Radiography.

2.1 Radioskopie (RS)

Radioskopie využívá k převodu neviditelného profilu ionizujícího záření na viditelný obraz zesilovače. Zesilovač obrazu je většinou na bázi elektrooptického převaděče (dříve byly využívány pouze převaděče optické a obraz byl zviditelněn a zkoumán na stínítku). Zesilovač je na vstupu opatřen vrstvou scintilátoru (materiálu, který je schopen převést záření z RTG spektra do oblasti viditelného záření). Tato vrstva je spojena s fotokatodou, kde jsou působením fotonů viditelného světla vyráženy elektrony. Elektrony jsou dále urychleny v anodové trubici a dopadají na výstupní stínítko, které je také opatřeno scintilačním materiálem. Vytvořený obraz je snímkem kamerou a převeden na videosignál.

Je třeba podotknout, že výsledkem je digitální zobrazení s nižší kvalitou, zejména v oblasti celkového rozlišení obrazu. Pro vylepšení vlastností obrazu je nutné použít RTG zdroj s mikroohnskem. V dnešní době jsou zesilovače v radioskopických systémech nahrazovány digitálním detektorem s nízkým rozlišením (400 μm a nižším). Vzniká tak stanice, která odpovídá spíše Digitální radiografii s využitím geometrického zvětšení. Radioskopie je často označována jako radiografická kontrola v reálném čase tzn. při zkoušce je možné s objektem pohybovat.

Je využitelná především při kontrole odlitků z materiálu o nízké hustotě (slitiny hliníku). To je dáno tím, že mikroohnskové RTG zdroje zpravidla nemají takový výkon jako konvenčně používané zdroje, a také tím, že zařízení musí být uzavřené v kabině nebo rentgenové kobce, využívá se tedy pro stabilní aplikace. Tuto techniku je možné využít také tam, kde je potřeba s předmětem po dobu kontroly pohybovat. Kromě odlitků je jedna z možných aplikací, také

kontrola svarů na tzv. „nekonečném potrubí“ potrubí o malém průměru, používané na ropných plošinách, které se svařuje po segmentech, a poté se navijí na cívký.

2.2 Počítačová tomografie (CT)

Počítačová tomografie je technika, která s pomocí rentgenového záření dokáže vytvořit 3D obraz kontrolované součásti včetně všech vnitřních částí. Základem pro vytvoření 3D zobrazení je dostačený počet příčných řezů součásti, které jsou získávány tak, že je zkoumaný díl umístěn do středu kružnice, po které obíhá RTG zdroj a detektor. Jednotlivé řezy jsou vytvářené postupně z různých úhlů. Řezy jsou následně matematicky složeny a je vytvořen 3D obraz skládající se z voxelů (nejmenší rozlišitelná jednotka 3D obrazu).

Výhoda této technologie je, že dokáže přesně zobrazit detaily i ve struktuře materiálu. Nevýhodou je časová a finanční náročnost a závislost velikosti nejmenšího zobrazovaného detailu na velikosti uhlopříčky součásti. Také se stává, že při matematickém výpočtu obrazu může dojít ke zkreslení informací.

Díky časové a finanční náročnosti se tato technika obecně nepoužívá u sériové produkce. Používá se většinou v kombinaci s manipulátorem a RTG kabinou, takže je vhodná pro stabilní aplikace (na přechodných pracovištích se nepoužívá vůbec). Používá pro kontrolu jednotlivých zkušebních kusů např. při nastavování správné licí technologie, při makroskopické kontrole vzorků součástí (svarů, odlitků, výkovků) pro zjištění umístění defektů, a pro laboratorní a experimentální využití například v archeologii.

2.3 Digitalizace filmových negativů (FD)

Tato technika vytváří digitální obraz z analogového záznamu, reprezentovaného filmovými negativy. Pro převedení negativu na digitální obraz jsou využívány skenery na principu liniových nebo kamerových CCD prvků. Skenery pracují na dvou principech, u prvního vytváření digitálního záznamu probíhá tak, že filmový negativ je prosvěcován viditelným světlem a citlivý detektor zachycuje profil dávek světla za negativem a převádí ho na digitální signál. Nebo skenery pracují na principu laserových „point to point“ skenerů, kde je negativ prosvěcován bod po bodu laserovým paprskem o přesné tloušťce. Signál z každého bodu je poté zachycen světlovodem a převeden na napětí na fotonásobiči. Signál je dále digitalizován.

Důležité je, že za předpokladu, že se použije správné zařízení, tak výsledné digitální zobrazení je srovnatelné s ostatními technikami. Samozřejmě se výsledek liší kvalitativně podle toho jaký skener je použit a jak jsou nastaveny parametry skenování.

Jak vyplývá z principu techniky, FD slouží k digitalizaci filmových negativů za účelem lepší (ekonomičtější) skladovatelnosti záznamů. Další možné použití je pro odměřování přesných rozměrů z filmu, nebo když je výhodné použít některý ze softwarových filtrů.

2.4 Počítačová radiografie (CR)

Počítačová radiografie využívá k vytvoření digitálního zobrazení proces Fotostimulované luminiscence (PSL). PSL je proces, kdy spektrálně citlivá sloučenina (v tomto případě je velice často využíván BaF(Br,Cl,I):Eu²⁺) je schopna po excitaci vysokofrekvenčním fotonem emitovat elektromagnetické záření v oblasti viditelného světla. Tato sloučenina je nanášena na zobrazovací

fólii (Imaging Plate - IP), která je svými mechanickými vlastnostmi a používáním srovnatelná s radiografickým filmem. IP se exponuje (aktivní vrstva fólie je excitována) díky kationtu europia je tato informace ve fólii zaznamenána (vytvoření latentního obrazu). Následně je IP vložena do speciálního skeneru, kde je pomocí laserového paprsku emitována informace reprezentovaná viditelným světlem (vlnová délka 450 – 510 nm). Světlo je zachyceno ve světlovodu a dále převedeno fotonásobičem na elektrický signál.

Tato metoda není na rozdíl od ostatních přímá, tzn. detektor (IP) není spojen přímo s počítačem, ale k přečtení informace je třeba skener.

Výhodou techniky počítačové radiografie je to, že detektor (zobrazovací fólie) má podobné mechanické vlastnosti jako film, takže se dá použít pro kontroly na přechodných pracovištích, jako jsou teplárny, elektrárny, rafinérie apod. Je použitelné u celé řady materiálů a výrobků, ale zároveň musíme brát v potaz její citlivost na rozptýlené záření, takže u vysoce legovaných slitin oceli se ukazuje jako méně vhodná. Také je vhodná tam, kde je třeba zachovat metodický postup, co nejpodobnější filmové radiografii. U některých typů přístrojů lze také dosáhnout vysokého až velmi vysokého rozlišení.

2.5 Digitální radiografie (DR)

Digitální radiografie je technika, která pro zobrazení využívá různé typy digitálních detektorů, které jsou schopné vytvořit digitální signál přímo bez nutnosti použití mezioperačního kroku. Z tohoto důvodu je Digitální radiografie někdy nazývána jako Přímá radiografie. V nedestruktivním zkoušení jsou nejčastěji používané detektory, tzv. flat panely, pracují na principu převodu fotonů radioaktivního záření na fotony viditelného světla a následně na elektrony (křemíkové panely). Viditelné světlo je podobně jako v radioskopii vytvořeno scintilační vrstvou, odkud je usměrněno pomocí optických vláken na aktivní křemíkovou vrstvu, která vytvoří volné elektrony nebo převod záření přímo na elektrony díky použití citlivé vrstvy z amorfního selenu. Elektrony poté ve spojení s inteligentními obvody vytvářejí digitální signál, který je odeslán přímo do počítače. Používají se také ostatní typy panelů např. na principu CCD (Computed Charge Device) prvků.

Výhodou této techniky je rychlost, prozařovaný předmět je možné zkoumat téměř v reálném čase.

Digitální detektory se používají především na stabilních pracovištích doplněné o polohovací systém, který nastavuje jak polohu výrobku vůči detektoru a zdroji, tak polohu zdroje a detektoru vůči výrobku. V dnešní době se však začali objevovat i profesionálnější přenosná řešení, která slouží pro kontrolu na přechodných pracovištích. Detektor, ale pořád nejde přizpůsobit tvaru zkoušené součásti. Digitální radiografie může být použita na rozsáhlý sortiment výrobků a materiálů při zachování velmi kvalitního obrazu, ale s nižším rozlišením.

3 Parametry ovlivňující jakost zobrazení pomocí DIR

Jak bylo řečeno výše, všechny techniky DIR vytváří digitální záznam, který musí být svými vlastnostmi srovnatelný s ostatními, tedy kromě Počítačové tomografie, která toto pravidlo ohýbá. Digitální zobrazení musí mít určité kvalitativní vlastnosti, aby mohlo být považováno za vyhovující, tzn., že všechny vady, které měly být dle kritérií přípustnosti zobrazeny, zobrazeny budou. Základními vlastnostmi zobrazení jsou zobrazení požadované oblasti zájmu, správné

označení snímku, zobrazení požadované radiografické jakosti (element použité měřky jakosti obrazu) tyto vlastnosti jsou stejné jako u konvenční filmové radiografie. Dále se na digitálním snímku musí posuzovat vlastnosti, které už jsou spojené výhradně s digitální kvalitou a to jsou artefakty zobrazení, hodnota šedé (GV), odstup signálu od šumu (SNR), a rozlišení snímku. Samozřejmě je třeba také zachovat požadovanou geometrickou neostrost zobrazení, které je dána geometrií prozařování né typem použité techniky.

Výše uvedené parametry přímo ovlivňují kvalitu digitálního zobrazení potažmo zjistitelnost hledaných vad. Z toho důvodu je třeba při výběru vybavení dbát na to, aby byly všechny tyto parametry splněny, tak jak předepisují metodické standardy používané ve společnosti.

3.1 Artefakty zobrazení

Stejně tak jako v případě filmové radiografie i detekční systémy digitální průmyslové radiografie mohou vytvářet různé druhy artefaktů zobrazení. Jestliže je artefakt na okraji snímku, kde nepůsobí rušivě, není třeba se jím zabývat. Jestliže se naopak artefakt vyskytne v oblasti zájmu, je třeba udělat příslušná nápravná opatření (zopakovat expozici, nebo artefakt odstranit).

V DIR se obecně vyskytují dva druhy artefaktů, artefakty mechanického rázu a artefakty spoje s fyzikálními principy použité technologie. Mezi mechanické artefakty můžeme zařadit poškrábání, zaražení prachových zm, otisky prstů nebo nefunkční pixely. Jako artefakty spojené s fyzikálním principem dané technologie můžeme definovat například tzv. Burn-In efekt, což je zachycení zbytkového obrazu na detektoru, které může zakrýt případnou necelistvost.

Při pořizování vybavení je třeba zvážit v jakém prostředí má detektor pracovat. Obecně můžeme říct, že digitální plošné detektory nebo radioskopické zesilovače jsou odolné proti mechanickým i#teplotním a jiným vlivům, takže jsou vhodné do prostředí, kde se počítá s tím, že detektor bude namáhán. V případě zobrazovacích fólií se musí počítat s tím, že fólie se velice rychle poškodí, ale na druhou stranu je cena fólie oproti digitálnímu detektoru mnohonásobně menší.

Jedna z nejčastějších příčin způsobení artefaktů zobrazení jsou také vibrace. Vibrace mohou způsobit jednak rozostření snímku a v krajních případech až zachycení zbytkového obrazu na snímku. Ve většině případů je nutné, aby systém byl od vibračí vhodně odstíněn.

3.2 Hodnota šedé GV

Hodnota šedé je grafickým znázorněním intenzity záření, kterou zachytil každý pixel digitálního snímku. Ukazuje tak, jestli byl snímek správně nebo špatně naexponovaný. Je také využívána pro stanovení dalších důležitých veličin, jako je SNR. Můžeme rozlišovat systémy, který mají jedno bitovou hloubku (nebo také binární) tzn., že na nich můžeme rozlišit pouze dvě barvy černou a#bílou, až po více bitové systémy. V dnešní době je většinou využíván systém 16 bitový (65536 hodnot šedi), ale můžeme se také setkat se systémy 12 nebo 14 bitovými.

Bitová hloubka může zčásti ovlivnit dynamický rozsah systému (rozsah tlouštěk zobrazený na jednu expozici). Z tohoto důvodu se u součástí s velkými tloušťkovými rozdíly jako jsou odlitky, dává přednost 16 bytovým systémům, naopak u svarů dostačují i systémy 12 nebo 14 bitové. Někteří zákazníci, zejména v leteckém průmyslu, předepisují nejmenší bitovou, kterou systém musí mít, aby mohl být používán pro kontrolu dle daného předpisu.

Hodnota šedé je měřena pomocí softwarového nástroje, buď pro každý pixel jednotlivě, nebo jako integrovaná hodnota z určité oblasti. Důležitým softwarovým nástrojem je také histogram, který znázorňuje rozložení pixelů se stejnou hodnotou šedi v na snímku nebo v oblasti zájmu. Na tomto grafu jde rozeznat to, jestli jsou expozicí prozářené všechny tloušťky nebo je snímek exponovaný nedostatečně a naopak saturovaný.

Stejně jako v případě bitové hloubky je v některých předpisech předepsaná minimální a maximální povolené hodnota šedá. Toto omezení se objevuje z důvodů, že při příliš nízkých hodnotách šedi se může stát, že informace bude z větší části vytvořena šumovou složkou (na obrazu bude zobrazený pouze obrys součástí a šum - podobně jako když je na filmu vysoký filmový závoj). Při příliš vysokých hodnotách šedi je nebezpečí tzv. podřezání obrazu, čili zaniknutí okrajů obrazu.

3.3 Odstup signálu od šumu SNR

Odstup signálu od šumu se určuje pro porovnání úrovně signálu oproti rušivému pozadí (šumu). To znamená, že nám říká, kolikrát signál může zmenšit/zeslabit než se dostane na úroveň šumu. SNR je jednou z nejdůležitějších vlastností digitálního snímku. Jestliže snímek bude mít velký šum (tzn. nízký odstup signálu od šumu) stane se to, že detaily na snímku, jako jsou indikace necelistvostí, nebudou rozpoznatelné. Indikace se doslova mohou „ztratit“ v šumu. Je to podobný princip jako u Ultrazvukového zkoušení.

Šum zobrazený na digitálním snímku může být způsobený jak jednotlivými elektronickými nebo mechanickými prvky systému (strukturální šum), tak rozptýleným zářením. Graficky můžeme šum pozorovat jako rozdílné hodnoty šedi mezi sousedními pixely.

Hodnoty minimálního požadovaného SNR jsou definovány příslušným metodickým standardem a jsou závislé na energii záření, které je použito pro zkoušku. Měří se pomocí softwarového nástroje a hodnota je vždy integrovaná z určitého počtu pixelů minimálně však 1100 hodnot, což odpovídá minimální požadované ploše je 22 na 50 pixelů. Je také nutno podotknout, že toto měření musí být stanoveno z originálních hodnot šedé, nikdy né ze softwarově upravených hodnot (např. filtrací obrazu).

To, aby byl systém, pro dané použití schopen dosáhnout minimální požadované SNR zpravidla z velké míry závisí na jeho citlivosti k rozptýlenému záření. Strukturální šum nemůžeme ovlivnit, protože je dán vlastnostmi systému a zpravidla je velice nízký (srovnatelný s vnitřní neostrostí radiografického filmu). Co ovlivnit můžeme, jsou ostatní vlivy, z nich nejpodstatnější je rozptýlené záření. Zatímco digitální detektory se velice dobře s tímto zářením pracují a obecně dosahují dobrých SNR, tak zobrazovací fólie je nutné vhodné před rozptýleným zářením chránit a některé materiály, které produkují velké množství rozptylu, nemusí být pro tuto techniku vhodné.

3.4 Základní prostorové rozlišení

Základní prostorové rozlišení (SR_b) poukazuje na nejmenší detail, který je možné daným systémem zobrazit. Můžeme také říci, že základní prostorové rozlišení odpovídá efektivní velikosti pixelu použitého digitálního detektoru. V počítačové radiografii je velikost základního prostorového rozlišení závislá na tloušťce zobrazovací fólie a šířce laserového svazku skeneru.

Hodnota SR_b hraje zásadní roli při zobrazení požadované necelistvosti a je také nezbytná při výpočtu normalizovaného odstupu signálu od šumu.

Když je základní prostorové rozlišení větší jak minimálně požadovaná necelistvost, nebude tato necelistvost na digitálním snímku zobrazena. Z obecných pravidel popsanych např. v ASMT E 2698 vyplývá, že necelistvost je zobrazitelná pokud se nachází minimálně na dvou až třech pixelech. V ostatních případech se může stát, že indikace necelistvosti splyne se šumem snímku a operátor ji nebude moci rozeznat.

Minimální požadované hodnoty SR_b jsou vždy popsány v odpovídajícím metodickém postupu a jsou závislé na prozařované tloušťce součásti, např. v EN ISO 17636-2 jsou definovány v tabulkách B.13 a B.14. Tyto hodnoty mohou být relativně snadno vyhledány v jakémkoli metodickém standardu pro digitální průmyslovou radiografii, proto je, než je zařízení pořízeno do společnosti nutné zkontrolovat, jestli je systém schopný tyto požadavky splnit.

Hodnota rozlišení musí být vždy ověřena měřením. Pro měření se využívají nejrůznější typy měrek, z nich nejčastěji se využívá měrka dvojdřátková. Přesná pravidla pro měření jsou také popsána v metodických standardech. Je nutné zdůraznit, že pro techniku digitální radiografie bez použití geometrického zvětšení (faktor 1,2 a menší) se hodnota SR_b bude vždy shodovat s efektivní velikostí pixelu. Je technicky a fyzikálně nemožné, aby tato hodnota byla lepší, než je velikost pixelu. U počítačové radiografie je velikost pixelu (SR_b) závislá na více proměnných (tloušťka aktivní vrstvy, šířka laserového svazku, velikost expozice atd.), proto je nezbytné ji určit vždy pro danou aplikaci v dané společnosti a poté ji periodicky ověřovat.

Hodnotu základního prostorového rozlišení snímku jde podstatně vylepšit použitím techniky geometrického zvětšení. Při této technice je předmět umístěn blíže ke zdroji, tím je na detektor zvětšen. Se zvětšením předmětu také vzrůstá geometrické neostrost, která je v tomto případě potlačena použitím mini nebo mikro ohniska.



ISAAK NEWTON A JEHO NEPŘÍMÝ VLIV PRO OBJASNĚNÍ FYZIKÁLNÍCH ZÁKLADŮ NDT

ISAAC NEWTON AND HIS INDIRECT INFLUENCE TO CLARIFY THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF NDT

Bernard KOPEC

QTU

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

Abstrakt

Sir Isaak Newton (1643-1727) byl anglický fyzik, matematik, astronom, ale rovněž alchymista a teolog, což se tak často v jeho životopise neuvádí. Bývá považován za jednu z nevlivnějších osob v dějinách lidstva. Nejen jeho všeobecně známý objev všeobecné gravitace, ale i řada jiných, snad důležitějších objevů z řady oblastí lidského konání, fyzikou nedestruktivního zkoušení nevyjímaje, má neocenitelný význam. Příspěvek se zabývá málo známou činností tohoto genia, jeho nekonvenčními názory na lidský život a vědu vůbec. Jedním z jeho významných počínů je založení exaktní vědy jak zcela nového pohledu na reálný svět, umožňující rozvoj matematizované deduktivní vědy, neodporující křesťanskému postoji.

Klíčová slova: *Isaak Newton, fyzika, nedestruktivní zkoušení, exaktní věda, křesťanský postoj*

Abstract

Sir Isaak Newton (1643-1727) was an English physicist, mathematician, astronomer, but also an alchemist and theologian, which is not so often mentioned in his biography. He is considered one of the most influential people in the history of mankind. Not only his well-known discovery of general gravity, but also a number of other, perhaps more important, discoveries from many areas of human action, including non-destructive testing physics, has an invaluable meaning. The paper deals with the little-known activity of this genius, his unconventional views on human life and science at all. One of his major achievements is the establishment of an exact science of a whole new perspective on the real world, allowing for the development of mathematical deductive science, inconsistent with Christian attitude.

Key words: *Isaak Newton, physics, non-destructive testing, exact science, Christian attitude*

Sir Isaac Newton byl anglický fyzik, matematik (profesor přírodní filozofie), astronom, alchymista a teolog, jenž bývá často považován za jednu z nevlivnějších osob v dějinách lidstva.

Isaac Newton se narodil 4. ledna 1643 (podle tehdy užívaného Juliánského kalendáře 25. prosince 1642) ve Woolsthorpu poblíž Granthamu v Lincolnshire ve východní Anglii. Otec, který se jmenoval také Isaac Newton, byl zámožným vlastníkem půdy, ale neměl žádné vzdělání. Zemřel tři měsíce před narozením syna. Když byly Newtonovi tři roky, provdala se jeho matka, Hannah Ayscough, ještě jednou a přestěhovala se do sousední vesnice North Withamu. Za manžela si vzala rev. Barnabase Smithe. Od té doby, až do otčímovy smrti, se o Newtona starali matčini rodiče. Rodina Ayscoughů stála výše na společenském žebříčku než Newtonové (Newtonův dědeček James Ayscough byl šlechticem a matčin bratr William farářem, který studoval na Trinity College v Cambridge) a proto se díky nim Newtonovi dostalo vzdělání. V roce 1653, po smrti druhého manžela se matka vrátila zpět do Woolsthorpu a desetiletý Isaac opět bydlel se svou matkou a se třemi nevlastními sourozenci (Mary, Benjamin a Hannah Smithovi).

V deseti letech začal chodit do vesnické školy v Skillingtonu a později ve Stoku. Od roku 1655 navštěvoval v Granthamu tamější gymnázium. Ubytován byl v domácnosti lékárníka pana Clarka. V letech 1658–1661 se v Granthamu připravoval na studia v Cambridge.

5. června 1661 za podpory svého strýce Williama nastoupil Newton jako osmnáctiletý studovat na Trinity College v Cambridge. Zde byl jeho učitelem známý fyzik a matematik Isaac Barrow. Základem studia zde sice v té době byly ještě Aristotelovy myšlenky, ale Newton se také zajímal o modernější myslitele, četl díla G. Galilea a R. Descarta. Přečetl Keplerovo dílo „Optics“, seznámil se s Euklidovými „Základy“.

Od srpna 1665 do dubna 1667 byla univerzita uzavřena kvůli morové epidemii a Newton se vrátil do rodného Woolsthorpu, kde mu podle pověsti spadlo na hlavu jablko a on přišel na myšlenku gravitace. Během těchto dvou let pobytu na rodném statku vynalezl svůj **diferenciální počet**, rozvinul svou teorii gravitace a vytvořil vlastní **teorii podstaty světla a barev**.

Roku 1665 získal bakalářský titul a roku 1667 stálé místo na Trinity College. Roku 1668 se stal magistrem svobodných umění a roku 1669 lukasiánským profesorem matematiky, kdy nastoupil na místo po svém učiteli Isaacu Barrowovi. Lukasiánský profesor matematiky (*Lucasian Chair of Mathematics*) je označení pro nositele profesorského titulu matematiky na Univerzitě v Cambridge. Funkce vznikla v roce 1663 přičiněním Henryho Lucase, který v letech 1639–1640 za univerzitu zasedal v Dolní sněmovně. 18. ledna 1664 ji oficiálně ustanovil anglický král Karel II. Stuart. Tento post je považován za jednu z nejprestižnějších akademických funkcí na světě. Mezi jeho nositele patřili George Stokes, Paul Dirac.

V té době sestrojil svůj zrcadlový dalekohled, který řešil problém barevné aberace u dalekohledů. 11. ledna 1672 byl na základě svého vynálezu zvolen členem Královské společnosti. 19. února 1672 vyšla v Philosophical Transactions jeho první fyzikální práce, která byla na téma **teorie barev**. V roce 1703 byl zvolen předsedou Královské společnosti a zůstal jím až do roku 1727. V roce 1705 byl královnou Annou povýšen do rytířského stavu.

Byl poslancem anglického parlamentu a je známo, že v zájmu Anglie odporoval i králi.

V roce 1696 byl jmenován dozorcem v královské mincovně v londýnském Toweru a o tři roky později byl jmenován jejím ministrem. Proslavil se bojem proti penězokazům a dostal jich několik na popraviště. Navíc také zavedl matematickou definici nové měny guiney. Místo v královské mincovně bylo spojeno s příjmem 1500 liber sterlinků a proto se tím zlepšily jeho hmotné poměry tak, že se vzdal profesury v Cambridgi. Přestěhoval se natrvalo do Londýna, kde se o jeho byt starala jeho neteř, dcera jeho sestry Hannah.

2. března 1727 naposledy předsedal Královské společnosti. V té době byl již vážně nemocen (od roku 1722 trpěl dnou a ledvinovými i žlučnickovými kameny) a jeho nemoc se ještě cestou z Kensingtonu do Londýna zhoršila. Newton jí podlehl 31. března 1727 v Londýně (20. března podle tehdejšího Juliánského kalendáře). Je pohřben ve Westminsterském opatství.

Přínos pro lidstvo

Třebaže byl Newton hluboce věřícím křesťanem, stalo se jeho pojetí světa základem racionalismu, osvícenství, a mechanického materialismu. Byl jedním z prvních, kteří začali s publikováním ve vědeckých časopisech (viz Impakt faktor). Úspěšně vedl anglickou Královskou společnost, jež se stala v jeho době nejprestižnější vědeckou institucí světa.

Největším Newtonovým počinem je založení exaktní vědy jako zcela nového pohledu na reálný svět, umožňujícího rozvoj (moderní) matematizované deduktivní vědy. K tomu účelu musel učinit dva zásadní objevy. Definoval nový, dosud neznámý filtr poznání, a to diskrétní filtr, na rozdíl od filtru přirozeného poznání, kterým je vágnost.

Vytvořil umělý formální jazyk, na kterém je postaveno Newtonovo vědecké poznání. Jelikož potřeboval pro své zákony mechaniky jazyk schopný popisovat spojitý dynamický (s uvažováním vlivu setrvačnosti) pohyb (odehrávající se po nekonečně malých přírůstcích jak dotyčné veličiny, tak času), vytvořil teorii fluxí (teorie plynoucího), poněkud nemotorný, ale funkční integro-diferenciální počet. Pak bylo možno např. symbolicky zapsat, že rychlost pohybu je derivací dráhy podle času. Bylo

možno formálně matematicky odvozovat nové, hledané vztahy dynamických zákonů pohybu.

Tak Newton položil základy fyziky, jako moderní, ucelené, deduktivní vědy na úrovni dnes nazývané klasická fyzika.

V mechanice především dokázal, že fyzikální zákony platí nejen na Zemi ale i ve vesmíru. Newtonovým nejnámějším objevem byly jeho tři pohybové zákony:

1. pohybový zákon – Zákon setrvačnosti
2. pohybový zákon – Zákon síly
3. pohybový zákon – Zákon akce a reakce

Dále objevil zákony všeobecné gravitace (Newtonův gravitační zákon). Klasická mechanika se dodnes opírá o jím zavedené pojmy hmotnosti, setrvačnosti, síly a interakce. Objevil mnoho zákonů speciální povahy týkajících se pohybu planet, pohybu v prostředí s odporem, rotujících kapalin atd.

V optice objevil, že světlo je složené a skládá se z barevného spektra (rozklad na optickém hranolu), vysvětlil barvy tenkých vrstev, objevil zobrazovací rovnici, našel slitinu vhodnou ke konstrukci zrcadel a sestrojil první zrcadlový dalekohled (vlastní uspořádání primárního a sekundárního zrcadla) viz Newtonův dalekohled. Také objevil sextant, avšak svůj objev nepublikoval.

Jeho objevy z oblasti optiky jsou fyzikálními základy nedestruktivních povrchových metod – vizuálního zkoušení, prohlížení při kapilární a magnetické práškové metodě.

V matematice položil základy diferenciálního a integrálního počtu (tzv. Kalkulus) a také základy diferenciálních rovnic. Nalezl také metodu pro numerické řešení transcendentních rovnic.

Tam, kde jsou fyzikální základy NDT metod postaveny na matematickém podkladu, jako metoda ultrazvuková (např. Besselova funkce) nebo metoda vířivých proudů daly Newtonovy objevy fundovaný teoretický základ.

Kolem roku 1665 **zobecnil binomickou větu v binomickou řadu.** O objevu fluxí (jak nazýval svůj objev diferenciálního počtu) se Newton zmiňuje ve svém deníku 20. května 1665 a téhož roku pomocí svého diferenciálního počtu určil obsah plochy ohraničené hyperbolou.

Newton také věnoval mnoho času alchymii. V Cambridgi si zařídil laboratoř, ve které ověřoval popsané postupy a procedury.

Kniha *Matematické principy přírodní filozofie* je považována za nejdůležitější práci v celé historii moderní vědy, je v ní popsán například zákon všeobecné gravitace

a Newtonovy pohybové zákony, které položily základy klasické mechaniky. V rámci svého výzkumu také vytvořil (spolu s Gottfriedem Leibnizem; o prvenství vedli nesmiřitelný spor) základy diferenciálního a integrálního počtu.

Rukopis prvního dílu byl předložen Královské společnosti již v roce 1686, ale Newton se snažil svoji práci vypilovat k dokonalosti, a proto s vydáním otálel. Proto Edmund Halley, který byl jeho prací nadšen a tušil, co bude tento spis znamenat pro rozvoj fyziky a astronomie, vydal Newtonova *Principia* v roce 1687 vlastním nákladem. K druhému vydání došlo v roce 1713 a ke třetímu v roce 1726.

V roce 1704 vydal spis *Optics, or a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*, kde popsal své optické objevy.

Newton se zabýval chronologií bible a jeho práce byla vydána po jeho smrti v roce 1728 pod názvem *Chronology of Ancient Kingdoms amended*.

Newton se dlouhou dobu přel s Gottfriedem Leibnizem v otázce, který z nich objevil kalkulus dříve. Newton podle svých slov začal na jisté podobě kalkulu pracovat již v roce 1666, ale výsledky publikoval až o desítky let později, a to navíc jen jako drobnou poznámku na konci jedné ze svých publikací. Leibniz zahájil práce na své podobě kalkulu v roce 1674 a roku 1684 vydal první dílo, kde jej popsal. Britská Královská společnost později ve své studii prohlásila, že skutečným objevitelem kalkulu je Newton, a označila Leibnize za plagiátora. Studie však byla nakonec zpochybněna, když se zjistilo, že pasáže odsuzující Leibnize napsal sám Newton. Tím se rozhořel hořký spor o kalkulus, jenž komplikoval životy obou filosofů až do Leibnizovy smrti v roce 1716. Většina dnešních historiků věří, že Newton a Leibniz objevili kalkulus nezávisle na sobě.

Newton se dostal do sporu i s Robertem Hookem. Nejprve Hooke kritizoval Newtonovy práce na poli optiky, což Newtona natolik urazilo, že se na několik let stáhl z veřejné debaty. V letech 1679 až 1680 pak mezi nimi došlo k zajímavé výměně korespondence. Hooke byl tehdy Královskou společností pověřen, aby se staral o korespondenci, tázal se ostatních členů, na čem pracují a žádal je o komentáře k práci ostatních. V dopisech se Newtona ptal na jeho názor na řadu myšlenek jak vlastních, tak i jiných autorů, a tato korespondenční výměna nakonec Newtona vedla k formulaci zákona všeobecné gravitace. Když pak v roce 1686 prezentoval Newton Královské společnosti první knihu svého díla *Principia Mathematica*, Hooke vystoupil a tvrdil, že některé myšlenky převzal Newton od něj. Oba filosofové se pak až do Hookovy smrti neměli příliš v lásce.

Věda a víra patří k sobě

17.století bylo ve Velké Británii obdobím silného náboženského probuzení. Isaak Newton věřil v Boha Stvořitele, jehož zákony obdivoval a objevoval. Období duchovního probuzení mu pomohlo najít Boha jako Spasitele v Ježíši Kristu. Vědomě počítal s jeho vedením ve svém výzkumu i osobním životě. Vznikla tak syntéza Boží role v duchovní i vědecké rovině.

Literatura

- [1] <http://www.newscientist.com/article/dn3676> - Einstein and Newton showed signs of autism
- [2] Brodetsky, S. Sir Isaac Newton, a brief account of his life and work. London: Methuen&Co. Ltd., 1927.
- [3] Newton. A very short introduction, Oxford University Press, 2007
- [4] Turnbull, H. W. (ed.), Correspondence of Isaac Newton, Vol 2 (1676–1687), Cambridge University Press, 1960



**INFORMACE O KONFERENCI
CERTIFIKACE 2017, VÍDEŇ, 6. - 7. 6. 2017
CONFERENCE INFORMATION
CERTIFICATION 2017, VIENNA, 6. - 7. 6. 2017**

Bernard KOPEC

QTU

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

8. ročník mezinárodní konference o certifikaci a normalizaci v NDT pod názvem CERTIFIKACE 2017 se konala ve Vídni, Rakousko od 6. - 7. června 2017 a byla pořádána Rakouskou společností pro NDT.

Cílem této konference bylo, do jaké míry mezinárodní standard pro certifikaci personálu (ISO 9712) pracoval dobře a které aspekty, by mohly být zlepšeny.

28 řečníků z 15 států celého světa poskytlo své osobní pohledy na potřebné nebo žádoucí změny ISO 9712 a současný stav normy ve svých zemích. 80 delegátů z 29 zemí se účastnilo diskusí.

Pracovní skupina WG1 pro kvalifikaci a certifikaci NDT byla založena v roce 2008 společností ICNDT poskytnout podporu pro harmonizaci v kvalifikaci a certifikaci pracovníků NDT a vypracovat dokumenty a postupy potřebné k dosažení tohoto cíle.

Poslední verze normy ISO 9712 byla zveřejněna v červnu 2012. V každé oblasti působnosti ICNDT (Evropa, Afrika, USA, Amerika, Asie a Tichomoří) byla norma ISO 9712: 2012 implementována jako základ pro certifikaci pracovníků NDT třetí stranou.

Některé požadavky normy vyžadovaly vyjasnění: školení a zkušenosti s potvrzením, hodnocení praktické zkoušky - pokyny k hodnocení apod. Dále by do certifikačního procesu měl být zaveden dohled podle normy ISO / IEC 17024: 2012.

Výsledkem bylo to, že WG1 vypracovala doporučení týkající se interpretace ISO 9712: 2012.

Doporučení ohledně administrace praktických zkoušek, funkcí a odpovědnosti stran, zapojení procesu posuzování shody personálu při "zavádění nových metod a technik NDT", návrh na obnovení substituce opakováním certifikace.

Příspěvky na konferenci CERTIFIKACE 2017 prokázaly, že revize normy EN ISO 9712 je potřebná. EFNDT CEC a ICNDT WG 1 identifikovaly některé společné náměty pro revizi normy ISO 9712:

1. Je třeba jasně definovat a posílit odpovědnost zaměstnavatele. Zejména odpovědnost za dostatečnou průmyslovou praxi v NDT. Personál žádající certifikaci by měl být u identifikovatelného zaměstnavatele (nevyjasněno jak).
2. Recertifikace pracovníků stupně 3 by se měla vrátit do požadavků bývalé evropské normy EN 473.
3. Výcvikové hodiny pro RT a UT stupeň 1 by se měly vrátit k požadavkům evropské normy EN 473. Požadovaných 40 hodin nevyhovuje syllabům.
4. Zjednodušená recertifikace na místo formálního obnovení po 5 letech by mělo velmi pozitivní dopad na zajištění následných dovedností pracovníků NDT.

Bylo zdůrazněno, že mnoho členů CEN TC 138 a ISO TC 135 / SC 7 nemá žádnou odpovědnost a přímý kontakt s národními společnostmi NDT a naopak.

Proces revize normy EN ISO 9712 vyžaduje, aby národní NDT společnosti a národní certifikační orgány spolupracovaly s národním normalizačním orgánem. Normalizační orgán potřebuje vstupy a podrobné návrhy na žádost o revizi normy ISO 9712.

Veškerá doporučení a připomínky k doporučením komise WG 1 byly předány ISO TC 135 SC7, která zpracovává revizi ISO 9712. Připomínkové řízení skončilo 4. září 2017 a je připraven finální návrh (FDIS) na kterém musí být dosaženo shody (kompromisu) 66% hlasujících členů ISO s přijatými návrhy pro konečné znění revize normy.

IDENTIFIKACE ROZVOJE ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ VE SLITINÁCH CU VYROBENÝCH METODOU SLM IDENTIFICATION OF FATIGUE DAMAGE DEVELOPEMENT IN CU ALLOYS PRODUCED BY SLM TECHNOLOGY

Vendula KRATOCHVÍLOVÁ*, František VLAŠIC*, Pavel MAZAL*

*Vysoké učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Contact e-mail: xkrato04@vutbr.cz

Abstrakt

Prezentovaná studie se zabývá hodnocením únavového chování slitiny mědi $Cu_{7,2}Ni_{1,8}Si_1Cr$ vyrobených technologií Selective Laser Melting (SLM). SLM se řadí mezi tzv. technologie Additive Manufacturing, které umožňují vyrábět složité tvarované díly pomocí přidávání materiálu. Hlavní problémem této technologie je poměrně nízká kvalita materiálu, která je způsobena velkým množstvím vnitřních vad, především se jedná o póry a nedostatečně roztavení materiálu. Nejnovější výzkumy se soustředí především na rozšíření škály vyráběných materiálů a využití technologie SLM v praxi. S tím je spojena také kontrola mechanických vlastností včetně meze únavy.

U SLM materiálu byla testována mez únavy v ohybu s měřením akustické emise a výsledky byly srovnány s konvenčně vyráběným (extrudovaným) materiálem AMPCOLOY® ($Cu_{7,2}Ni_{1,8}Si_1Cr$). Ukázalo se, že technologií SLM lze vyrobit materiál o stejné nebo lepší kvalitě jako má materiál extrudovaný. Měření akustické emise ukázalo odlišné chování materiálů při cyklickém zatížení. U obou materiálů jsou zřejmé tři fáze únavy – pre-iniciační, iniciační a post-iniciační. Zatímco u extrudované materiálu je nejdelší pre-iniciační fáze, u SLM materiálu to je fáze post-iniciační.

Klíčová slova: Akustická emise, únava, Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, slitiny mědi

Abstract

Presented study deals with evaluation of fatigue behaviour of copper alloy $Cu_{7.2}Ni_{1.8}Si_1Cr$ produced by Selective Laser Melting (SLM) technology. SLM belongs to Additive Manufacturing technologies which enable to produce parts with complicated shapes by adding of material layers. The main problem of this technology is relatively low quality cost by significant amount of internal defects, mainly pores and unmelted material. Last researches are aimed to increase the range of produced materials and use in real parts. This also involves checking the mechanical properties including the fatigue limit.

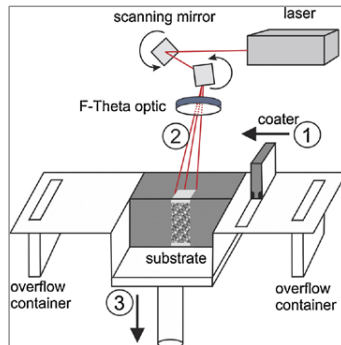
SLM material were subjected to fatigue banding tests with measurement of acoustic emission and results were compared with conventionally produced (extruded) material AMPCOLOY®

(Cu7Ni2Si1Cr). The results showed that it is possible to produce SLM material with same or better quality as extruded material. Measurement of acoustic emission showed different fatigue behaviour. Both materials have three fatigue stages – pre-initiation, initiation and post-initiation. Extruded material longest stage is pre-initiation, but in case of SLM material it is post-initiation.

Key words: Acoustic emission, fatigue, Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, copper alloys

1. Úvod

Technologie additive manufacturing (AM) se v poslední době začínají běžně používat v celé řadě průmyslových odvětví. Mezi hlavní přednosti těchto technologií patří možnost vyrábět díly komplikovaných tvarů v poměrně krátkém čase, což je využíváno především při výrobě prototypů nebo jiných speciálních kusově vyráběných dílů. Technologie selective laser melting (SLM) navíc přidává možnost použití kovových materiálů. Princip SLM technologie je ukázán na obr. 1, díl je vyráběn přidáváním tenkých vrstev kovového prášku, které jsou spojovány laserovým paprskem [1].



Obr. 1 Princip technologie selective laser melting [1]

Fig. 1 Selective laser melting principle [1]

Ve srovnání s tradičně vyráběnými materiály je kvalita materiálu vyráběných technologií SLM nízká. Hlavní problémy, včetně nízké odolnosti proti únavě, jsou spojeny s vnitřními vadami, jako jsou póry, staženiny nebo neroztavený materiál [2,3] a trhliny způsobené zbytkovým pnutím [4]. Na začátku výroby nového SLM materiálu je potřeba řada studií za účelem získání optimálních výrobních parametrů a dosažení co nejlepších mechanických vlastností. Nejdůležitějšími výrobními parametry jsou výkon laseru, rychlost skenování, velikost řádkování a průměr laserového paprsku

[5-7]. Také musí být zohledněna kvalita kovového prášku [8], hlavními indikátory jsou velikost práškových zrn a jejich distribuce, množství malých částic, tekutost, vlhkost a množství oxidů.

Testování slitin mědi (Cu) bylo popsáno v několika pracích. Zhang et al. [7] popisuje vliv hustoty energie laseru na relativní hustotu Cu slitiny K220. Bylo zjištěno, že s rostoucí hustotou energie laseru vzrůstá relativní hustota vyráběného materiálu, dokud nedosáhne 220 J/mm³. S optimálními parametry bylo dosaženo relativní hustoty 99,9 % a mikrostruktura vzorků byla dendritická.

Scundio et al. [9] vyráběl vzorky ze slitiny Cu10Sn. Díky rychlému tuhnutí materiálu bylo dosaženo jemnozrnné mikrostruktury a nejlepší dosažená relativní hustota byla 99,7 %. SLM materiál měl výrazně vyšší mez kluzu i pevnosti (220 a 420 MPa) než srovnávaný litý materiál (120 a 180 MPa).

Předložená studie navazuje na předchozí práce, které se zabývaly únavových chováním hliníkových (Al) slitin s použitím akustické emise (AE) [10,11], a rozšiřuje škálu testovaných materiálů o slitinu Cu_{7,2}Ni_{1,8}Si₁Cr. AE patří mezi standardní metody nedestruktivního testování. Tato metoda umožňuje kontinuální sledování únavové procesu. Srovnávaným materiálem je komerčně vyráběná slitina AMPCOLOY® 944. Tento materiál se používá především pro výrobu forem používaných pro lisování plastových dílů. Využití technologie SLM pro výrobu těchto forem by mohlo přinést řadu benefitů, jak bylo popsáno výše. Hlavním cílem prezentované studie je zjistit únavové chování SLM materiálu. AE patří mezi standardní metody nedestruktivního testování. Tato metoda umožňuje kontinuální sledování únavové procesu.

2. Postup experimentu

2.1. Material

Testovaným SLM materiálem je slitina Cu_{7,2}Ni_{1,8}Si₁Cr, kovový prášek je od firmy Sandvik Osprey. Referenčním materiálem je konvenčně vyráběný (extrudovaný) materiál AMPCOLOY® (Cu₇ni₁Si₁Cr). Srovnání chemického složení obou materiálů je ukázáno v tabulce 1.

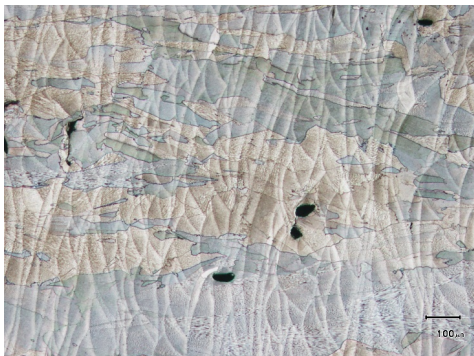
Tabulka 1: Chemické složení (hm. %) SLM a referenčního materiálu

Prvek	Ni	Si	Cr	Others
AMPCOLOY® 944	7	2	1	0.5
SLM powder	7.5	1.8	0.94	0.114

SLM vzorky byly vyrobeny na stroji SLM 280HL od společnosti SLM Solution GmbH. Výrobní parametry byly: výkon laseru 400 W, rychlost skenování 1100 mm/s

a řádkování 90 μm . Bylo dosaženo relativní hustoty 99,5% (měřeno na speciálních vzorcích počítačovou tomografií), meze kluzu 380 MPa, meze pevnosti 545 MPa a tvrdosti 171 HV.

Mikrostruktura SLM materiálu (obr. 2) je charakterizována jasně viditelnými hranicemi přidávaných vrstev, v jejichž blízkosti se nachází vady (především póry a staženiny).



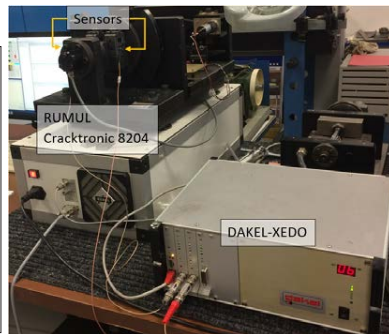
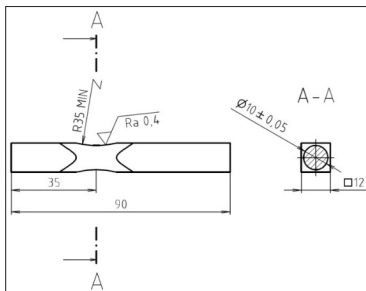
Obr. 2 Mikrostruktura SLM materiálu

Fig.2 Microstructure of SLM material

2.2. Testování únavy a měření akustické emise

Celkem bylo vyrobeno 8 vzorků z SLM materiálu a 7 vzorků z materiálu AMPCOLOY® 644, která byly opracovány dle schématu na obr. 3a. Test únavy v ohybu byl prováděn při pokojové teplotě se sinusovým únavovým cyklem a koeficientem nesouměrnosti $R = -1$. Průměrná zatěžovací frekvence byla 52 Hz.

Signál AE byl detekován pomocí monitorovacího zařízení DAKEL-XEDO za použití dvou piezoelektrických snímačů DAKEL MIDI s 35 dB předzesilovači, viz obr. 3b. Systém XEDO umožňuje 12 bitové synchronní vzorkování se vzorkovací frekvencí 2 MHz a kontinuálním ukládáním dat. Senzory byly přilepeny na obou koncích vzorku, což vytvořilo dvoukanálový lineární lokalizační systém.



a)

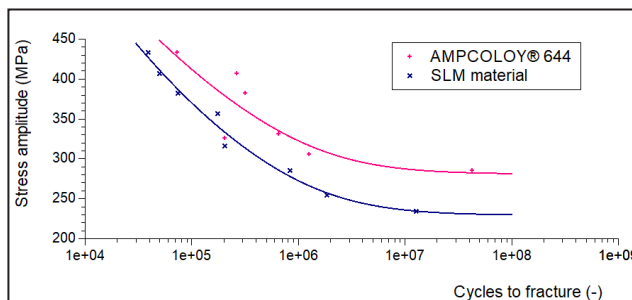
b)

Obr. 3 a) geometrie zkušebního vzorku b) měřicí stanice

Fig. 3 a) geometry of fatigue testing specimen and b) measurement system

3. Výsledky

Výsledky všech zkoušek byly srovnány pomocí S-N křivek a také analýzou signálu AE. S-N křivky obou materiálů jsou ukázány na obr. 4. Mez únavy je asi 235 MPa u SLM materiálu a 285 MPa u materiálu AMPCOLOY®. Při vyšších amplitudách zatěžování (resp. u menšího počtu cyklů) je rozdíl méně výrazný.

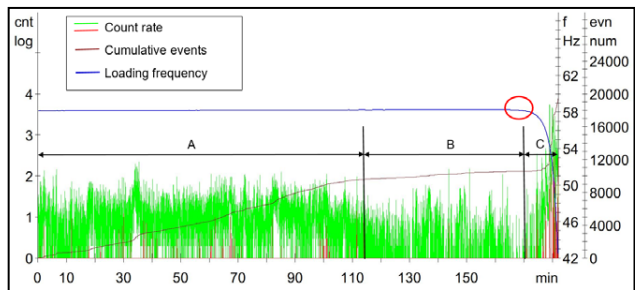


Obr. 4 S-N křivky materiálů SLM a AMPCOLOY®

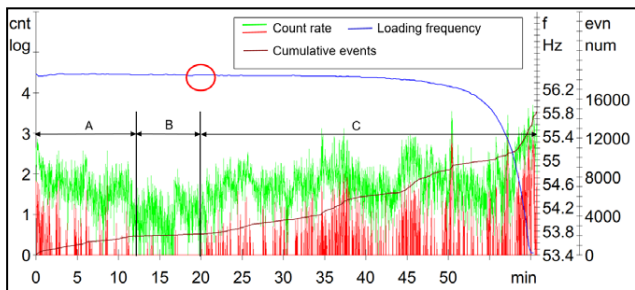
Fig. 4 S-N curves of SLM and AMPCOLOY® 644 materials

Záznamy akustické emise z obou materiálů jsou ukázány na obr. 5. Oba materiály mají tři fáze únavového poškození – pre-iniciační (A), iniciační (B) a post-iniciační (C), červené kroužky označují iniciaci hlavní trhliny. Pre-iniciační fáze (A) na začátku zatěžování je typická výraznou aktivitou AE, která je způsobena změnami v mikrostruktuře materiálu – interakce a pohyb dislokací a vytváření skluzových rovin. Zatímco u materiálu AMPCOLOY® je tato fáze nejdelší a zabere téměř 2/3 celkové

životnosti, u materiálu SLM je to pouze 1/4. Iničiační fáze (B) je charakterizována nízkou a stabilní aktivitou AE, nastává šíření mikrotrhlin. Tato fáze je u referenčního materiálu delší než stejná fáze u materiálu SLM. Aktivita AE opět stoupá v poslední post-iničiační fázi (C), začíná šíření dlouhých trhlin. Tato fáze zabírá většinu životnosti SLM materiálu, ale u materiálu APMCOLOY® je nejkratší. Tyto výsledky ukazují rozdílný mechanismus šíření trhlin. U materiálu APMCOLOY® jsou trhliny šířeny především změnami v materiálové mikrostruktuře, u SLM materiálu je to propojováním výrobních vad.



a)

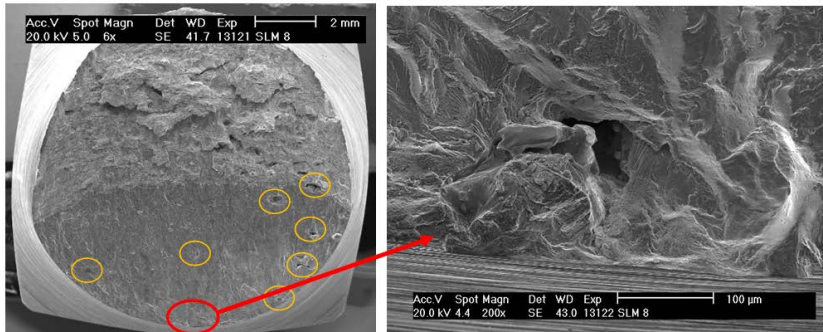


b)

Obr. 5 Signál AE a zatěžovací frekvence: a) APMCOLOY® 644, amplituda zatížení – 331 MPa,
b) SLM materiál, amplituda zatížení – 316 MPa

Fig. 5 AE signal and loading frequency: a) APMCOLOY® 644, stress amplitude – 331 MPa,
b) SLM material stress amplitude – 316 MPa.

Testování únavy a měření AE bylo doplněno fraktografickou studií, viz obr. 6. Fraktografie ukázala, že místo iniciace trhliny je lokalizováno ve výrobní vadě těsně pod povrchem vzorku (červený kroužek na obr. 6). Poměrně členitý povrch dutiny naznačuje, že jde o staženinu. Uvnitř jsou viditelné neroztavené nebo pouze částečně natavené částice kovového prášku, defekt byl tedy vytvořen během výroby. Podobné vady byly pozorovány na celé lomové ploše, což potvrzuje teorii o šíření trhlin spojováním výrobních vad.



Obr. 6 Fraktografie SLM materiálu

Fig. 6 Fractography of SLM material

4. Závěr

V předložené práci bylo popsáno únavové chování slitiny $\text{Cu}_{7,2}\text{Ni}_{1,8}\text{Si}_1\text{Cr}$, která byla vyrobena technologií SLM. Výsledky únavových zkoušek a záznamy AE byly srovnány s konvenčně vyráběným materiálem (extrudovaným) AMPCOLOY®, tato měření byla doplněna fraktografickou studií. Srovnání testu únavy ukázalo, že odolnost proti únavě SLM materiálu je nižší než u materiálu referenčního, ale tento rozdíl je nižší při vyšší zatěžující amplitudě.

Analýza záznamu AE ukázala, že oba materiály mají tři fáze únavy – pre-iniciační, iniciační a post-iniciační, ale poměr těchto fází k celkové životnosti je rozdílný. Zatímco nejdelší fází SLM materiálu je fáze post-iniciační, u referenčního materiálu je to fáze pre-iniciační. Tato pozorování společně s fraktografickou studií naznačují rozdílný mechanismus šíření únavové trhliny.

Další výzkum by měl být zaměřený na hlubší analýzu signálu AE se zaměřením na fázi iniciace trhliny.

5. Poděkování

Autoři práce by chtěli poděkovat Vysokému učení technickému v Brně za finanční podporu projektů č. FSI-S-17-4428 „Vývoj technologie výroby rychlých magnetoreologických ventilů“ a č. FV 17-15 „Detekce iniciace únavové trhliny v SLM materiálu“.

Literatura

- [1] LÖBER, L., SCHIMANSKY, F. P., KÜHN, U., PYCZAK, F., ECKERT, J. Selective laser melting of a beta-solidifying TNM-B1 titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, no. 214, pp. 1852-1860
- [2] RAFI, H. K., STARR, T. L., STUCKER B. E. A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 69, no. 5-8, pp. 1299-1309
- [3] LIU, Q., ELAMBASSERIL, J., SUN, S., LEARY, M., BRANDT, M., SHARP, P. K. The Effect of Manufacturing Defects on The Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated Using Selective Laser Melting. In: 11TH INTERNATIONAL FATIGUE CONGRESS, PTS 1 AND 2. Melbourne, AUSTRALIA, 2014, pp. 1519-1524.
- [4] MERCELIS, P., KRUTH, J-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, vol. 12, no. 5, pp. 254-265.
- [5] SONG, B., DONG, S., DENG, S., LIAO H., CODDET, C. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics and Laser Technology*. 2014, vol. 56, no. 3, pp. 451-460.
- [6] ZHANG, D. Q., LIU, Z. H., LI, S., MUZZAMMIL, M., WONG, C. H., CHUA, C. K. Selective Laser Melting: On the Study of Microstructure of K220. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing*. Singapore, 2014, pp. 176-184.
- [7] SANTOS, E. C., SHIOMI, M., OSAKADA, K., LAOUI, T. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2005, no. 46, 1459-1468.
- [8] FORET, P., BAUER D. Effect of Process Gas And Powder Quality On AlSiMg And Ti64 Powder Bed Fusion Processed Parts For The Aerospace Industry. In: *World PM 2016: Proceedings*. Hamburg, Germany, 2016.
- [9] SCUDINO, S., C. UNTERDÖRFER, K. G., PRASHANTH, H. ATTAR, N. ELLENDT, V. UHLENWINKEL, ECKERT, J. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze. *Materials Letters*. 2015, no. 156, pp. 202-204.
- [10] ZEMANOVÁ, L., KRATOCHVÍLOVÁ, V., VLAŠIČ, F., MAZAL, P. Fatigue Properties of EN AW-2618A Aluminium Alloy Produced by Selective Laser Melting Technology. In: *METAL 2016: 25TH ANNIVERSARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS*. Brno, 2016, s. 1583-1589.
- [11] KRATOCHVÍLOVÁ, V., VLAŠIČ, F., MAZAL, P., PALOUŠEK, D., KOUTNÝ, D. Fatigue Damage of Aluminium Alloy EN AW 2618A Produced by SLM Technology. In: *World PM2016 Proceedings*, 2016, pp. 1-6.



ANALÝZA POŠKOZENÍ PNEUMATICKÝCH VÁLČŮ METODOU AKUSTICKÉ EMISE ANALYSIS OF PNEUMATIC CYLINDER DAMAGE BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

**Houssam MAHMOUD, Frantisek VLASIC, Pavel MAZAL, Libor NOHAL,
Vendula KRATOCHVILOVA**

Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
mazal@fme.vutbr.cz

Abstract

This paper describes the parameters that can be used to compare damaged and undamaged pneumatic cylinders. A lot of difficulties faced the defect detection processing especially that depend on the noise and temperature and friction. Followed methods were trying to separate the external effects from the obtained signal. The relation between Root mean square (RMS) and the displacement describe the movement of piston related with the behaviour of signal during progress and retreat stroke.

A number of undamaged pneumatic cylinders were tested by acoustic emission, after that an artificial defects were made in the same cylinders. The results were compared to find distinctive differences that determine whether the cylinder is damaged or undamaged. The value of total RMS determines the quality of cylinder. And the number and distribution of the count determine whether the cylinder is damaged or undamaged. And also comparing maximum signal between progress and retreat stroke and the obtained signal from two sensor give the supporting result to other parameters.

Key words: Leakage, Pneumatic Cylinder, Defect, Acoustic Emission (AE), Detection Coefficient.

1. Introduction

Cylinders are used in the majority of applications especially in movements that require limit speed, pneumatic actuator convert fluid energy into straight line motion (linear actuators) [1]. A pneumatic actuator is a device that transforms the energy from a compressed air supply into a rotary or linear movement. Actuators perform specific tasks such as clamping, picking and placing, filling, ejecting and tool changing [2].

The detection coefficient was taken from the method FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), and was developed and classified using AE. The Coefficient "S" expresses the severity of a particular defect. This parameter is given in two forms: "S1" for a single defect with no consequences, and "S2" reflecting the worst possible consequences, which may indicate a defect [3], cylinders were chosen according to this coefficient.

AE is the term given to transient elastic stress waves generated by the energy released when microstructural changes occur in a material. The energy is provided by an elastic stress field in the material. [4].

Fundamental principles of AE leak detectors rely on the fact that escaping gas or liquid through a small breach creates a high frequency sound wave that travels through the enveloping system via an acoustic leak path [5]. AERms (Average energy) is used to determine the open and closed positions of valves, such as relief and safety valves. AERms could also be used to indicate the aging and degradation of check valves in nuclear power plants [6].

A number of undamaged pneumatic cylinders were tested with AE. Following this, artificial defects were made on the same cylinders and the results were compared to find distinctive differences which could determine whether the cylinder is damaged or undamaged. In the previous study, undamaged and damaged cylinders were analysed using a frequency spectrum within a specified time. [7].

A set of defects was identified and assigned through this comparison, but this parameter was not sufficient in identifying all defects. After the evaluation of the results of the detection coefficient, the defects were sorted in sets according to the detection coefficient. The frequency spectrum was replaced later by the parameter RMS during the monitoring of changes in the test results. This is possible by using a prototype of the newly developed diagnostic equipment. For a continuous AE signal, the most frequently used AE parameters are the average energy (AERms) [8].

2. The experiment

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

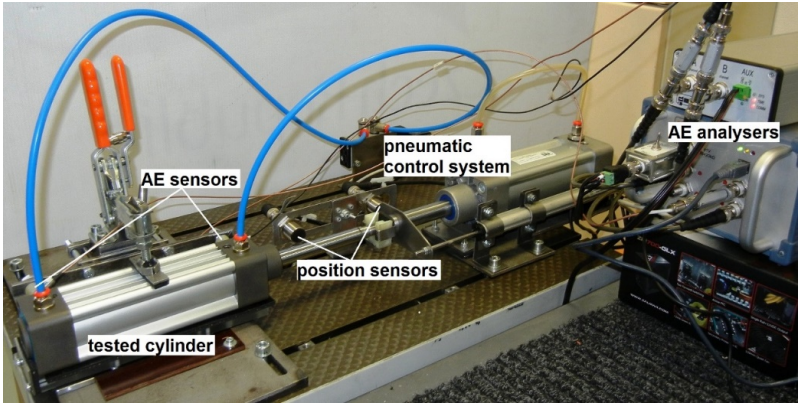


Figure 1. Assembly of experimental equipment

2.1 Parts of pneumatic cylinder

The process of the understanding of defects requires detailed knowledge of the different parts of the cylinder. The main parts are shown in Fig. 2.

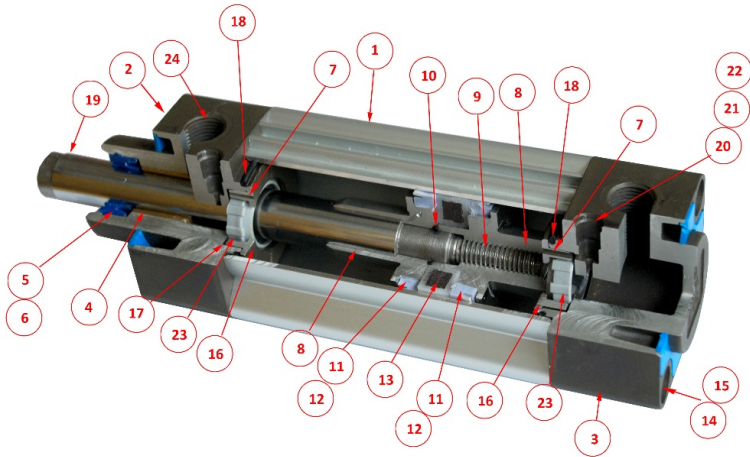


Figure 2. Parts of pneumatic cylinder

(1) Cylinder body (barrel). (2) Head cap. (3) Rear cap. (4) Rod Bearing. (5) Rod wiper (Wiper Seal). (6) Rod Seal lip-seal. (7) Needle valve. (8) Head and rear Piston fastener (Tie Rods). (9) Piston seal lip-seal. (10) O-ring seal piston fastener. (11) Piston seal bumper seal. (12) Piston seal bumper seal. (13) Magnetic ring. (14) Head cap fastener. (15) Rear Cap fastener. (16) Head cap cushion, rear cap cushion. (17) O- Ring seal needle valve. (18) O- Ring

seal cap cushion. (19) Piston rod. (20) Throttle needle valve. (21) O- ring seal throttle needle valve. (22) Throttle knob. (23) Cushion check seal. (24) Porting [10].

2.2 Type of specific defects:

Three types of defects were chosen. Both have leaks and a high value of detection coefficient and one of them has mechanical defect.

2.2.1 Unsealed O-ring thread Piston and leakage - NP08, PP03

A defect was created in undamaged cylinder: an unsealed O-ring between the piston and piston rod produced a leak between the piston and the thread on the inner side. Application of soapy water demonstrated that cylinder produced a leak around the piston rod.

2.2.2 Unsealed O-ring front and rear Piston and leakage - NP07

Defects were created in undamaged cylinder: a missing O-ring between front and rear pistons. Application of soapy water demonstrated that cylinder produced a leak between the front and rear piston.

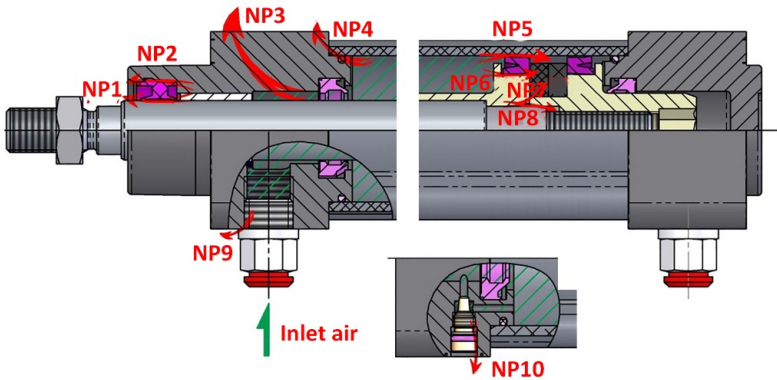


Figure 3. Leaks above the piston during retreat stroke [8]

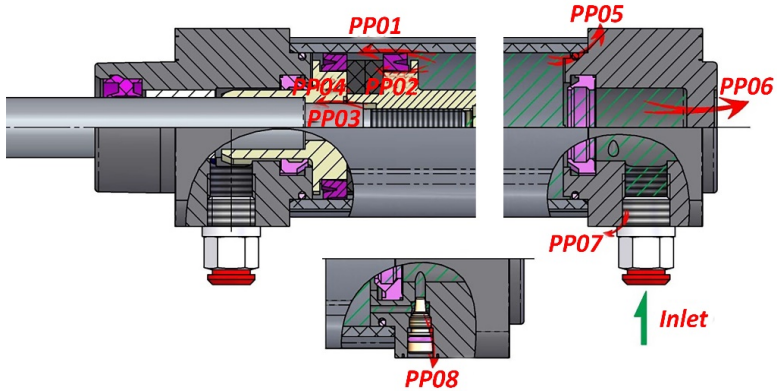


Figure 4. Leaks below the piston during progress stroke [8]

2.2.3 Mechanical Defects Release piston - M04

Piston were loosened $\frac{1}{4}$ turn at undamaged PS cylinders (M04) to give a clearance to the magnets about 0.3 mm. Glue on the Piston seal bumper was left.

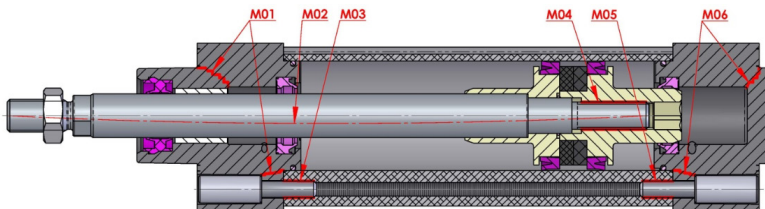


Figure 5. Mechanical defects [10]

3. Results and discussion

The above measurements on undamaged cylinders and cylinders with critical defects have provided valuable information for determining cylinder rating criteria. Initially, changes in the frequency spectrum were monitored using an IPL analyser with 2 MHz continuous sampling. Due to the higher processing demands and the evaluation of these data, the newly developed ZEDO-PNEU analyser was finally able to monitor maximum signal, RMS signal energy, and number of count over threshold.

The measurement signal is mostly a continuous signal, the preamplifier (for active IDK-14: 35 dB), gain (10 dB), sampling value (Global measurement: 0.004 s) and for the displacement sensor (0.0064 s). Other parameters are irrelevant. It has been found that only 5 cycles will be sufficient to fully evaluate the good / bad cylinder and only take the last cycle (eject and slide) for the final work with the signal. The cylinders are already factory set to approximately the same damping value (throttle valve).

The first criterion to compare undamaged and damaged cylinder is AE_{RMS} can be defined as:

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v^2(n)} \quad (1)$$

where v is the voltage signal from an AE sensor, t the initial time, T the integration time of the signal, and N the number of discrete AE data within the interval T . So in this article we are trying to highlight the parameter RMS [10].

If the sum of RMS of signal from sensor B is less than 0.14 V, the cylinder will be undamaged.

The second criterion it was found that the ratio of the maximum RMS value in the progress / retreat stroke of both AE sensors (on head and rear caps) is determining the technical state of the cylinder.

It has been verified for the undamaged cylinder that: if the RMS of the sensor B is greater than the maximum RMS value of the A sensor in the retreat stroke, the ratio of the maximum RMS of the sensor B and the sensor A in the retreat stroke is less than 2.5 or if the maximum value of RMS of sensor A is greater than the maximum value of RMS of sensor B in the retreat stroke, the ratio of the maximum value of the RMS sensor A and the sensor B in the retreat stroke is less than 2.5. Except that it will be damaged. Below are examples of records of undamaged and damaged cylinders covered by the above criteria

3.1 Examples of cylinders

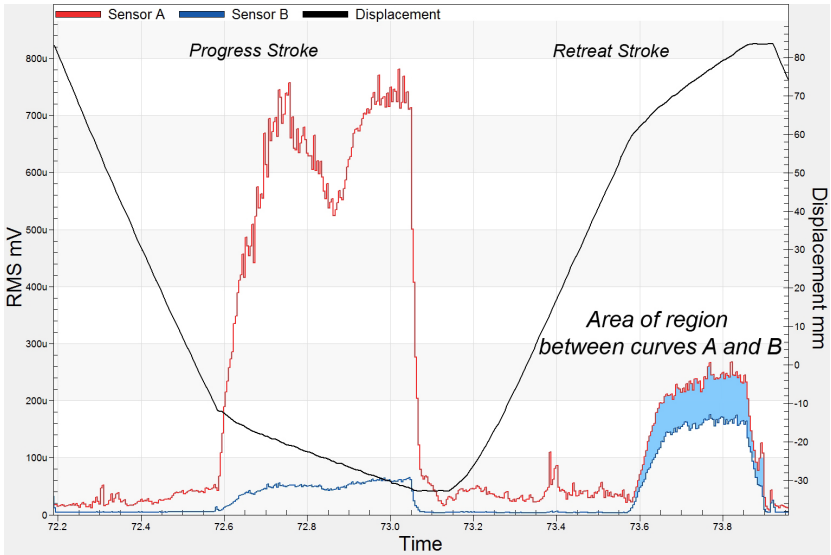


Figure 6. Undamaged Cylinder No.21

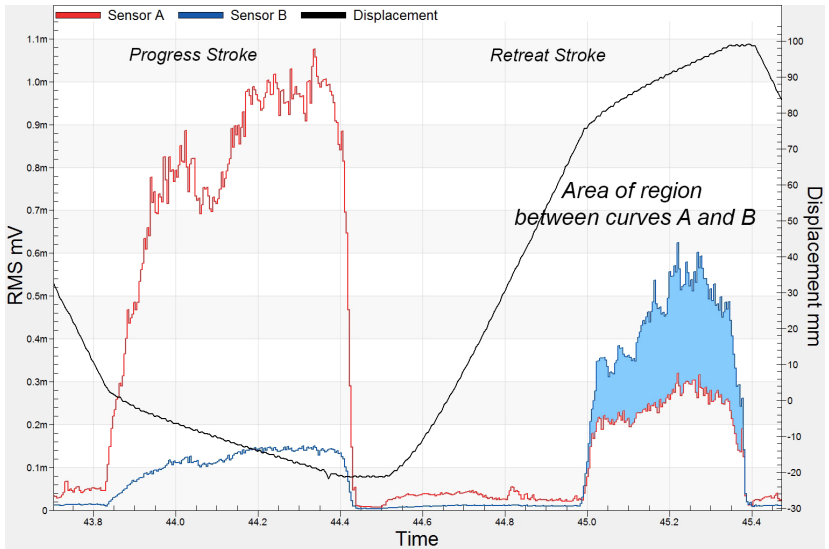


Figure 7. Damaged Cylinder No.21 NP08, PP03

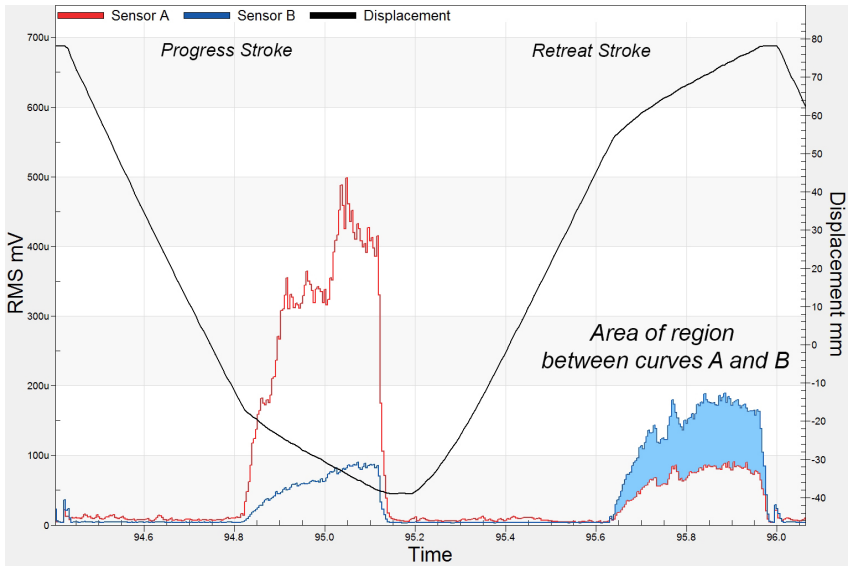


Figure 8. Undamaged Cylinder No.32

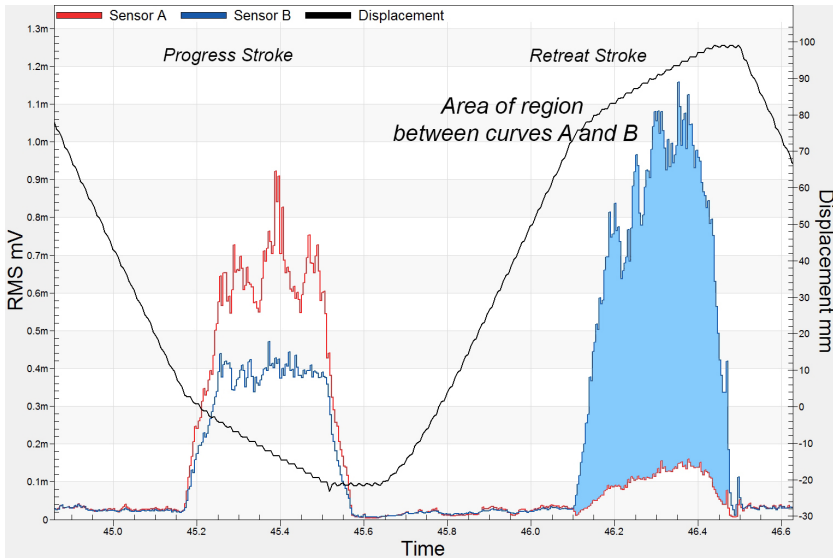


Figure 9. Damaged Cylinder No.32 NP07

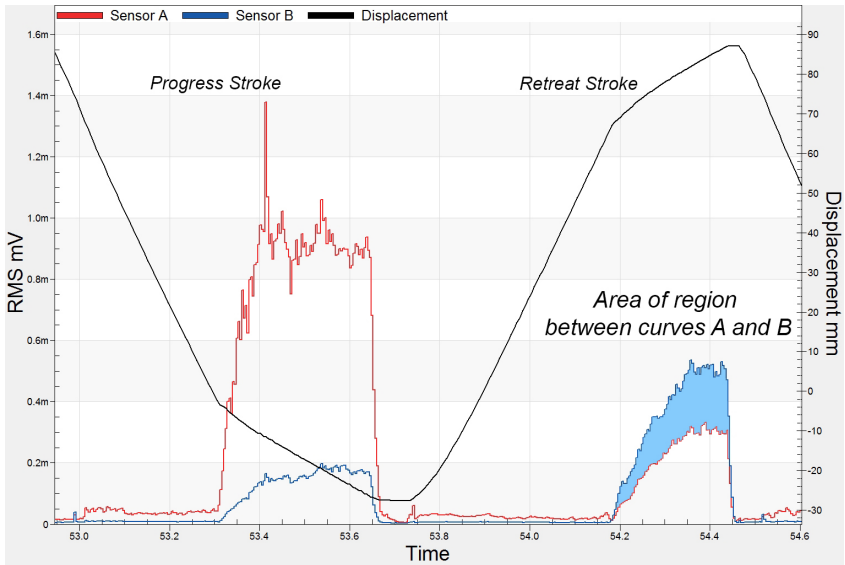


Figure 10. Undamaged Cylinder No.37

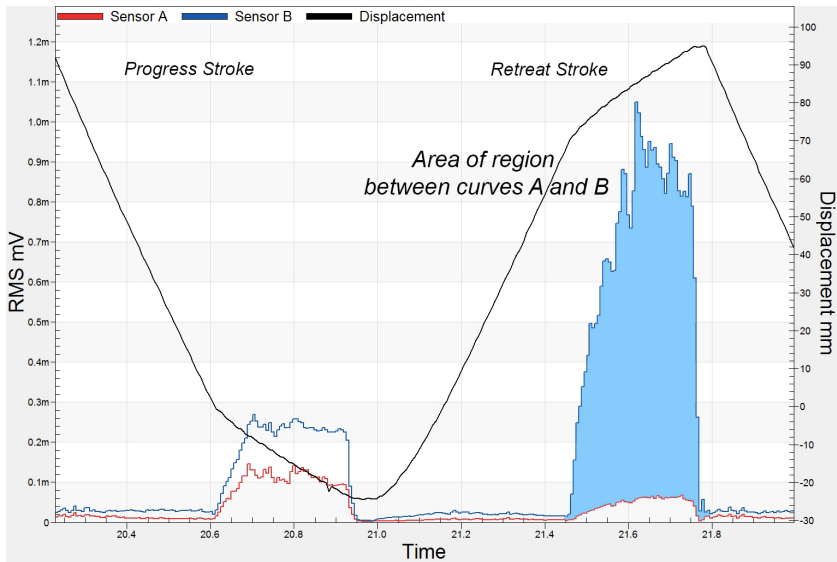


Figure 11. Damaged Cylinder No.37 M04

4. Conclusion

Current results using RMS show strong reliability, repeatability and conformity in the signals and parameters. AE application in this domain of diagnostics when compared with currently used methods, produced higher quality results. Preliminary results of processed measurements confirm the assumption that the configuration that consists of two sensors located on the head and rear caps provides more detailed results than the configuration that uses only one sensor in the middle of the cylinder body. The RMS parameter can evaluate the movements of pneumatic cylinders, particularly in combination with other monitored parameters.

To determine the undamaged / damaged cylinder, it is enough to compare the ratio of the maximum RMS amplitudes of both sensors to the piston insertion phase. If the ratio is less than 2.5, the cylinder is undamaged, otherwise the cylinder is damaged. In general, if the difference in RMS of both sensors in the insertion phase is noticeably larger, it is a damaged cylinder.

Far more accurate, however, would be to compare the difference between the surfaces under the RMS curve of both sensors, i.e. the integral - the signal energy. However, the presented maximization comparison methodology is simpler and, with some exceptions, worked on all tested cylinders.

5. Acknowledgment

This work is an output of research and scientific activities of the Technology Agency of the Czech Republic project No. TA04011374 "The new system is non-invasive diagnostics of pneumatic and hydraulic components" and was also supported by project No. FSI-S-17-4428 "Development of technology for the production of fast magnetoreological valves" and FV17-15 Detection of fatigue crack initiation in SLM material.

6. References

- [1] Local Parker Cylinder Distributor, 'Hydraulic and Pneumatic Cylinder', Safety Guidelines for Cylinder Division Products.
- [2] British Compressed Air Society; British-Pneumatic-Handbook, pp. 1-10
<https://ar.scribd.com/document/253225887/British-Pneumatic-Handbook>.
- [3] H Mahmoud, F Vlasic, P Mazal, M Jana; Damage identification of pneumatic components by Acoustic Emission, Czech Society for Non-destructive Testing, EWGAE, Vol. 32, pp. 315-322, September 07-09, 2016.

- [4] R K Miller, E v K Hill and P O Moore, 'Nondestructive Testing Handbook, Acoustic Emission Testing', American Society for Non-destructive Testing, USA, 2005.
- [5] The American Society for Testing and Materials, Standard E750-88 Standard Practice for Characterizing Acoustic emission Instrument, Philadelphia, PA, Volume 03.03, 1993.
- [6] LEE, Sang-Guk, J Park, Yool, Hong, 'Evaluation of internal leak in valve using Acoustic Emission method', Experimental Mechanics In Nano And Biotechnology, Korea Adv Inst Sci & Technol, Asian Comm Expt, s. 661-664. ISBN 0-87849-415-4. ISSN 1013-9826, Mech, 2006.
- [7] P Mazal, F Vlastic, H Mahmoud, M Jana, The use of Acoustic Emission method for diagnosis of damage of pneumatic cylinders, WCNDT, vol.19, pp. 2016.
- [8] H Mahmoud, F Vlastic, P Mazal, M Jana, Leakage Analysis of Pneumatic Cylinders Using Acoustic Emission, INSIGHT, Vol. 59, No. 9, pp. 499-505. ISSN: 1354- 2575, 2017.
- [9] M Jana, Defects of linear pneumatic actuator PS. TA04011374 - A new non-destructive diagnostics system of pneumatic and hydraulic components. Enterprise standard Polička 5. 5. 2015.
- [10] H Mahmoud, F Vlastic, P Mazal, M Jana, Application of Acoustic Emission Method to Diagnose Damage in Pneumatic Cylinders, ILEC Conference Centre, London, UK , WCCM17 , Vol. , 13-16 June 2017.



KONSTRUKČNÍ NÁVRH ULTRAZVUKOVÉ PŘEDSÁDKY S MĚNITELNOU GEOMETRIÍ ENGINEERING DESIGN OF ULTRASONIC WEDGE WITH ADJUSTABLE INCIDENCE ANGLE

Michal MOLČAN*

* Department of Applied Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering,
VŠB – Technical University of Ostrava
Contact e-mail: michal@molcan.eu

Abstrakt

Předložený článek se zabývá návrhem plexipředsádky s měnitelnou geometrií pro ultrazvukovou defektoskopii. Navržená předsádka slouží ke generaci příčných a Rayleighových vln v testovaném materiálu v požadovaných směrech. Současně je schopna do jisté míry eliminovat nežádoucí odrazy incidentního ultrazvukového svazku pomocí optimalizovaného tvaru výběžku v přední části předsádky. Vlastnosti předsádky jsou dány především odrazem a útlumem ultrazvukových vln v předsádce. Odraz ultrazvukové vlny na rozhraní předsádky je popsán pomocí Snellova zákona a kritických úhlů. Tlumicí vlastnosti předsádky jsou ovlivněny zejména použitým typem plexiskla (PMMA), které má značné absorpční schopnosti. Z této fyzikální podstaty vychází návrh předsádky, u kterého je cílem nasměrovat odražené vlny do výběžku, maximalizovat četnost odrazů vln ve výběžku a pomocí absorpčních vlastností plexiskla je tlumit. Neméně důležitým parametrem předsádky je však i pokles amplitudy vlny procházející do testovaného materiálu, který je zapříčiněn zmíněnou absorpcí plexisklem. Z důvodu minimalizace poklesu amplitudy incidentní vlny vlivem tlumících vlastností plexiskla je kladen důraz na kompaktnost předsádky, tedy minimalizaci délky trajektorie vlny procházející předsádkou. Návrh tvaru předsádky je optimalizován a ověřen metodou konečných prvků pomocí softwaru COMSOL Multiphysics. Vlastnosti navržené předsádky byly následně experimentálně ověřeny na umělé vadě. Výsledné hodnoty byly porovnané s hodnotami komerčně dostupné předsádky.

Klíčová slova: ultrazvuk, ultrazvukové předsádka, ultrazvuková defektoskopie, MKP simulace

Abstract

Presented paper deals with the design of variable angle ultrasonic wedge for ultrasonic testing. The designed wedge will be used for generation of shear and Rayleigh wave in examined sample in desired directions. The wedge is also capable to eliminate the undesired reflection of incident ultrasonic beam by specially designed front part of the wedge. Properties of the wedge are given mainly by the reflection and refraction of the incident wave within the wedge's geometry. Reflection of ultrasonic wave on boundary is described by the Snell law and corresponding critical angles. Attenuation capability of the wedge is determined mainly by absorption properties of used plexiglass (PMMA). From this physical point of view, the main goal is to direct the reflected waves to the front

part of the wedge, maximize number of reflections in the spit and finally damp them by plexiglass absorption capability. Another equally important property of the wedge is the amplitude drop of the wave passing into the test sample, which is caused by the absorption capability of plexiglass. In order of minimization of this decrease, compactness of the wedge is also important, thus the minimization of the wave trajectory passing into the test sample is necessary. The design of the wedge is optimized and proved by FEM simulation using COMSOL software. Properties of the designed wedge were also experimentally verified on artificial defect. Results were compared with commercial available wedge.

Key words: ultrasound, ultrasonic wedge, ultrasonic testing, FEM simulation

1. Úvod

Tento článek se zabývá návrhem tvaru plexipředsádky s měnitelnou geometrií, která slouží ke generaci podélných, příčných a Rayleighových vln v požadovaných směrech. Předsádka disponuje funkční stranou, která vlny incidentního svazku, zpětně odraženého od rozhraní plexisklo/ocel, směřuje mimo snímač a s využitím vlastností plexiskla tyto vlny dodatečně tlumí.

Navržený tvar byl optimalizován simulacemi s užitím metody konečných prvků. Pro analýzy byl použit výpočetní software COMSOL. Dle simulací optimalizovaného tvaru byl vyroben prototyp, na kterém byly experimentálně ověřeny jeho vlastnosti. Naměřené hodnoty byly dále porovnány s hodnotami komerčně dostupné předsádky.

2. Fyzikální podstata

a. Šikmý dopad vlny na rozhraní

Akustické vlny se při průchodu přes rozhraní chovají obdobně jako elektromagnetické vlny. Na rozdíl od elektromagnetických vln se mohou akustické vlny transformovat na jiný typ vln, než byla dopadající vlna. Uvedené zákonitosti popisuje Snellův zákon [1]:

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}},$$

kde α je normálový uhel a c je rychlost vlny v daném prostředí. První index označuje typ vlny (L – podélná, T – příčná), druhý index označuje prostředí.

b. Útlum vlny

Amplituda vlny obecně klesá exponenciálně v závislosti na vzdálenosti a součiniteli útlumu prostředí, který se skládá ze složky absorpční a rozptylové.

Absorpční složka je lineárně závislá na frekvenci vlny, kdežto rozptylová složka závisí kromě frekvence i na struktuře materiálu [2].

U polykrystalických materiálů se mohou v závislosti na poměru vlnové délky vlny a střední velikosti zrna vyskytnout celkem tři mechanismy rozptylu – Rayleighův rozptyl, stochastický rozptyl či odraz na hranicích zrn [1,2].

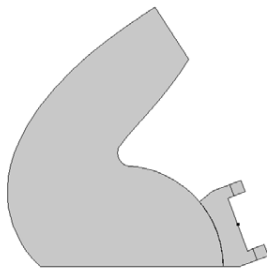
U polymerů je účinná především absorpční složka součinitele útlumu prostředí, rozptylová složka je díky struktuře polymerů minimální.

3. Návrh plexipředsádky

Návrh předsádky vycházel z požadavků na předsádku, tj. aby byla schopná generovat příčné a Rayleighovy vlny v běžně užívaných směrech (dopadový úhel 28° - 70°).

Dále je pro dobrý přenos signálu zapotřebí minimalizovat vzdálenost mezi připevněným snímačem a testovaným materiálem z důvodu značného útlumu vlny při průchodu plexisklem.

Posledním požadavkem je schopnost předsádky eliminovat nežádoucí odražené vlny, které by mohly rušit příchozí signál (echa). Předsádka proto disponuje výběžkem, do kterého jsou nežádoucí odrazy vln směrovány a násobnými odrazy se tyto vlny utlumí (díky tlumícím vlastnostem plexiskla).



Obr. 1 Návrh plexipředsádky

Fig. 1 Ultrasonic wedge design

4. MKP simulace

Simulace byla provedena metodou konečných prvků (MKP) s využitím softwaru COMSOL [3]. Výsledkem simulace bylo nalezení optimálního tvaru funkční stěny předsádky a samotného výběžku.

S ohledem na výpočetní náročnost byla úloha řešena jako 2D úloha rovinné deformace. Součástí modelu byl rovněž fiktivní ocelový plech, ve kterém bylo možné pozorovat šíření generovaných vln. Na povrchu tohoto plechu byl taktéž umístěn testovací bod, ve kterém byly měřeny posuvy generované Rayleighovou vlnou.

Síť byla tvořena elementy o velikosti přibližně desetiny vlnové délky podélné vlny. Pro zaručení stability numerického řešení bylo potřeba dodržet Courant-Friedrich-Lewyho (CFL) podmínku, která je ve tvaru:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}},$$

kde Δt je velikost časového kroku, c rychlost šíření podélné vlny a $\Delta x, \Delta y$ označují velikost elementu.

Úloha byla řešena pro časový úsek od 0 do 120 μs s časovým krokem $\Delta t = 10 \text{ ns}$, který vyhovuje CFL podmínce. Výsledná síť obsahuje 102732 elementů a skládá se z trojúhelníkových a čtyřúhelníkových elementů.

Počáteční podmínka, simulující pohyb piezoelektrického měniče, byla předepsána posuvem v normálovém směru v místě kontaktu měniče s předsádkou ve tvaru:

$$a(t) = A \sin 2\pi f t,$$

kde $A = 1 \mu\text{m}$, přičemž A vyjadřuje amplitudu výchylky, $f = 1 \text{ MHz}$. Bylo vysláno celkem 7 pulzů, modulovaných pomocí Hannova okna, které je ve tvaru:

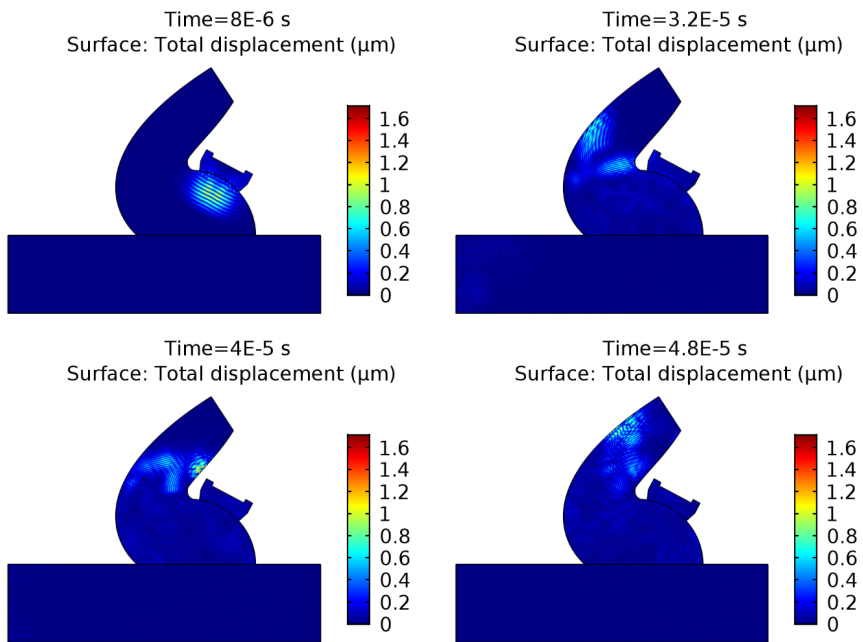
$$w(t) = 0.5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{t_{\text{signal}}} a(t) \right) \right],$$

kde t označuje čas a t_{signal} je délka signálu čítající 7 period kmitů. Tato funkce působí jen v časovém intervalu 0 až t_{signal} .

Na bocích fiktivního ocelového plechu byla zavedena podmínka nízké odrazivosti (low-reflecting boundary condition) z důvodu eliminace odrazů na těchto hranicích.

K posouzení funkčnosti předsádky sloužily časové průběhy šíření vln v předsádce (při dopadových úhlech 28°, 54° a 70°) a dále průběh horizontální a vertikální složky vektoru posunutí v testovacím bodě při dopadovém úhlu 70°.

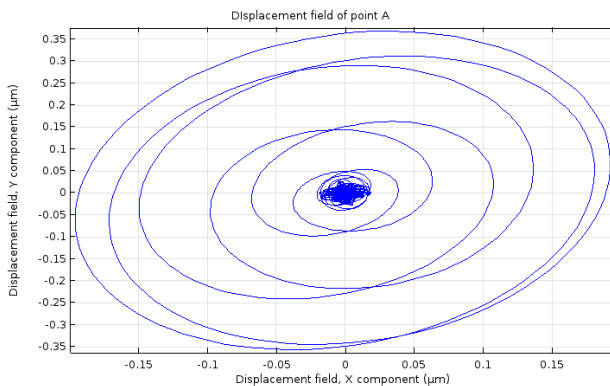
Průběhy šíření vln v předsádce, které jsou vyobrazeny na obr. 2, znázorňují směrování vln pomocí funkční stěny předsádky do výběžku, ve kterém dochází k násobným odrazům a tlumení vln.



Obr. 2 Šíření vln v předsádce při dopadovém úhlu 28°

Fig. 2 Wave propagation in ultrasonic wedge at impact angle 28°

Na obr. 3 lze pozorovat velmi protáhlé elipsy ve vertikálním směru, které svědčí o přítomnosti Rayleighových vln.



Obr. 3 Časová závislost posunutí testovacího bodu v horizontálním (osa x) a vertikálním směru (osa y)

Fig. 3 Time dependant displacement of test point in horizontal (x axis) and vertical (y axis) direction

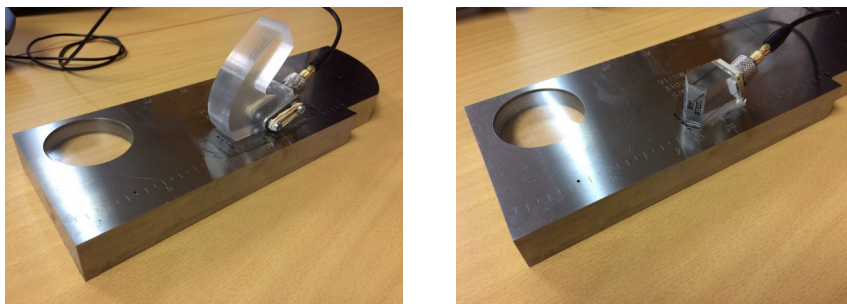
5. Experimentální ověření prototypu předsádky

Prototyp předsádky byl testován oproti plexipředsádce Olympus ABWML-7T-90 s pevným úhlem dopadu vlny, která je vhodná pro generaci Rayleighových vln v oceli. Prototyp byl tudíž testován v konfiguraci 70° dopadového úhlu, při které je schopen generovat Rayleighovy vlny.

Měřicí aparatura byla složena z přístroje Olympus Epoch 600 a snímače Olympus Panametrics A551S-SM (5MHz). Jako vazební prostředek byl použit Ankoril. Měření probíhalo na standardní měrce K1 ve vzdálenosti 100 mm od okraje měrky. Okraj měrky posloužil jako umělá vada.

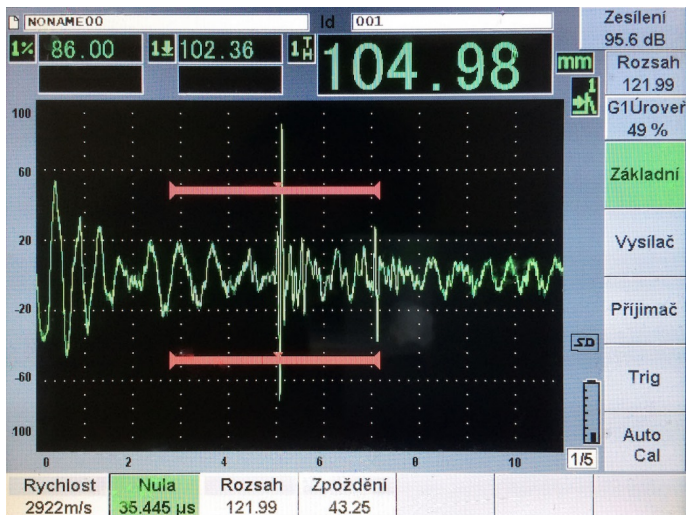
Obr. 4 znázorňuje pozici předsádek při měření, obr. 5 a 6 zobrazují echa zachycené předsádkami. Rozdíl ve tvaru echa je oproti komerční předsádce minimální.

Měření pomocí prototypu předsádky detekuje, po přepočtení na stejné zesílení, amplitudu echa o 6,0335 dB nižší oproti předsádce Olympus ABWML-7T-90.



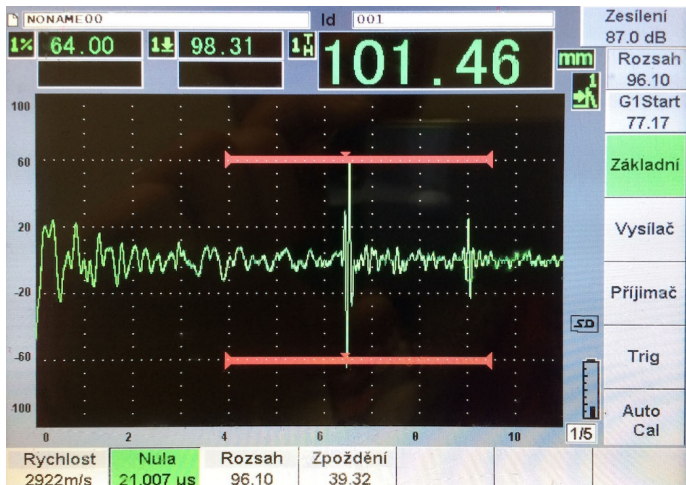
Obr. 4 Měření umělé vady s využitím předsádek (prototyp vlevo, Olympus ABWML-7T-90 vpravo)

Fig. 4 Artificial defect measurement using ultrasonic wedges (prototype – left image, Olympus ABWML-7T-90 – right image)



Obr. 5 Echo od umělé vady zachycené pomocí prototypu navržené předsádky

Fig. 5 Echo made by artificial defect, captured by ultrasonic wedge prototype



Obr. 6 Echo od umělé vady zachycené pomocí předsádky Olympus ABWML-7T-90

Fig. 6 Echo made by artificial defect, captured by Olympus ABWML-7T-90 ultrasonic wedge

6. Závěr

Článek popisuje postup při návrhu plexipředsádky s měnitelnou geometrií, která slouží ke generaci podélných, příčných a Rayleighových vln v požadovaných směrech. Značná část článku se věnuje funkčnímu tvaru stěny předsádky a výběžku, sloužícímu k eliminaci nežádoucích odrazů vln.

Tvar předsádky byl navržen a optimalizován metodou konečných prvků pomocí softwaru COMSOL. Výstupem této simulace byly časové průběhy šíření vln a posuvů testovacího bodu.

Vlastnosti předsádky byly dále ověřeny experimentálním měřením na umělé vadě, kdy prototyp navrhované předsádky dosahoval v porovnání s komerční předsádkou o 6,0335 dB nižší amplitudy echa. Tento pokles je dán zejména většími rozměry navrhované předsádky a tím i delší drahou, kterou musí vlna v plexiskle absolvovat.

7. Reference

- [1] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976.
- [2] HUDGELL, R. J. a B. S. GRAY. *The ultrasonic inspection of austenitic materials: State of the art report*. Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency, 1985.
- [3] PRYOR, Roger W. *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers, c2011. ISBN 0763779997.



TERMOGRAFICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

THERMOGRAPHIC NONDESTRUCTIVE TESTING OF SOLAR CELLS

Lukáš MUZIKA*, Michal ŠVANTNER*

*University of West Bohemia, Czech Republic, Univerzitní 22, 306 14, Plzeň
Contact e-mail: muzika@ntc.zcu.cz

Abstrakt

Solární články umožňují přeměňovat sluneční energii na energii elektrickou. Při jejich výrobě a provozu mohou vznikat vady, které snižují jejich účinnost. Články jsou obvykle velmi tenké a křehké, což komplikuje manipulaci s nimi. Z tohoto důvodu je pro testování jejich defektů vhodné využívat bezkontaktní a rychlé metody. V tomto článku jsou popsány základní vlastnosti solárních článků, jejich rozdělení a metody testování. Infračervené nedestruktivní testování (IRNDT) může být použito pro inspekci povrchu materiálu. Termografická kontrola může být využita například pro inspekci povrchu kompozitních materiálů, pro inspekci tenkých a silných povlaků. Tento typ testování může být také použit pro inspekci solárních článků, na což je tento příspěvek zaměřen. V tomto článku jsou popsány IRNDT techniky, jejich vlastnosti a možnosti využití. Experiment se skládal z měření voltampérových charakteristik a IRNDT inspekce. Termografická inspekce byla provedena ve dvou variantách – Lock-in termografie a pulzní termografie. Měření probíhala na šesti palcových multikrystalických článcích, které byly zkoumány v původním stavu a po tvorbě umělých vad. Výsledky jsou ukázány na konci tohoto příspěvku. Jsou diskutovány možnosti, výhody a omezení použitých termografických inspekcí.

Klíčová slova: IRNDT, aktivní termografie, solární články, testování solárních článků

Abstract

Solar cells are able to transform solar energy to electric energy. Their production and operation can cause defects that reduce their efficiency. Cells are usually very thin and brittle that complicates a manipulation with them and, therefore, a non-contact and fast method of inspection for defects in their structure is very useful. Basic solar cells properties, their categorization, and methods of testing are presented in this contribution. Infrared nondestructive testing (IRNDT) can be used for inspection of material surface. Thermographic

inspection is suitable for material testing near its surface. It can be used for example for near surface layers inspection of composite materials as well as for inspection of thin or thick coatings. It can also be used for inspection of solar cells on which this article is aimed. There are described IRNDT techniques, their properties and their possibilities of use for analyzing of solar cells in this contribution. An experiment consists of VA characteristic measurement and IRNDT inspection. Thermographic inspections were made in 2 variants - Lock-in thermography and pulse thermography. Multicrystalline solar cells (6 inches) were inspected in its original state and after making artificial defects. Results are shown in the end of this contribution. Possibilities, advantages and limitations of the used thermographic inspection methods are discussed.

Key words: IRNDT, active thermography, solar cells, solar cells testing

Úvod

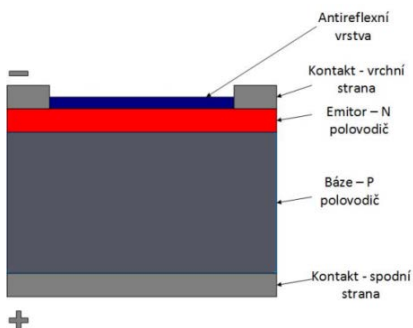
V posledních letech význam energie získaných z obnovitelných zdrojů neustále roste. Jedním z typů této energie je energie získaná ze slunce pomocí solárních článků. Jedním z hlavních parametrů solárních článků je jimi dodávaný výkon. Ten může být výrazně snížen výskytem vad. Pro testování článků se využívá především měření VA charakteristiky, které umožňuje odhalit elektrické vlastnosti testovaných článků. Je možné určit, zda je článek vadný či nikoliv. Není však možné vadu prostorově lokalizovat a je velmi obtížně určit o jaký typ vady se jedná. Určení typu vady je klíčové pro nalezení chyby výrobního procesu.

Existují techniky, které jsou schopny vadu prostorově lokalizovat např. elektroluminiscenční měření, fotoluminiscenční měření, UV fluorescenční měření, Lock-in termografické měření. Hlavní nevýhodou většiny metod testování solárních článků je, že se jedná o kontaktní metody. Problém nastává především z toho důvodu, že články jsou velmi křehké a po přiložení kontaktů mohou prasknout. Je zde tedy snaha vytvořit techniku rychlou a zároveň bezkontaktní. To částečně splňuje jedna z variant Lock-in inspekce, která je bezkontaktní. Její nevýhodou je potřeba delších měřících časů (v řádech desítek minut [1,2]) pro úspěšné odhalení vady solárního článku. V tomto příspěvku je kromě Lock-in termografie také představena pulzní termografie, jejíž využití pro testování solárních článků není typické. Tato technika se hojně využívá v jiných odvětvích pro její rychlost a bezkontaktnost.

V tomto příspěvku jsou popsány techniky Lock-in a pulzní termografie, které jsou demonstrovány na inspekci multikrystalických solárních článků. Termografické inspekce jsou doplněny také měřením voltampérových (VA) charakteristik.

Solární článek

Solární článek přeměňuje energii světla na elektrickou energii za využití fotovoltaického jevu. Článek je složen z polovodiče typu P a typu N (Obr. 1). Při dopadu fotonů vhodné vlnové délky, je energie fotonů přeměněna v PN přechodu na energii elektronů. Elektrony z valenčního pásma se přesunou do vodivostního pásma. Na článku jsou vytvořeny kontakty, které slouží pro sběr těchto elektronů. Kontakt na spodní straně článku je jednoduší a nachází se pod polovodičem typu P (báze). Vrchní kontakty jsou nad polovodičem typu N (emitor). Tyto kontakty mají tvar mřížky. Mřížka brání dopadu záření na článek. Platí, že čím je hustější mřížka, tím lépe odvádí elektrony z článku, ale zároveň se tím zmenšuje jeho aktivní plocha. Mřížka je tvořena hlavními vodiči – busbary a užšími vodiči kolmými na busbary – fingery. Nad polovodičem typu N se ještě nachází antireflexní vrstva. Na Obr. 1 je ukázáno složení solárního článku.



Obr. 1 Složení solárního článku/Composition of solar cell

Existuje více druhů solárních článků. Můžeme je dělit na monokrystalické, multikrystalické (polykrystalické) a tenkovrstvé. Monokrystalické články mají vysokou účinnost a jsou nejdražší. Multikrystalické články disponují dobrým poměrem cena výkon. A tenkovrstvé články bývají levné, mají nízkou účinnost, ale je možné, je vyrábět ohebné.

IRNDT

Nedestruktivní infračervené testování je technika inspekce materiálů a hledání vad pomocí zobrazování teplotního pole. Princip je založen na detekci povrchové radiace v infračervené oblasti spektra.

Při aktivní termografii je testovaný subjekt buzen externím zdrojem např. pomocí flash lampy, halogenové lampy, ultrazvuku, horkého vzduchu, elektrického proudu a dalších. Úkolem těchto zdrojů je dodat do subjektu energii, která způsobí tepelnou

odezvu v materiálu, kterou je možné zachytit pomocí infrakamery. Tato odezva může ukázat změny v tepelném přenosu způsobené různými defekty.

Nejčastěji rozlišujeme IRNDT na 4 základní techniky [3], které se liší zejména tím, jak jsou data získána a jak jsou zpracována. Mezi tyto techniky spadá, Pulse Thermography (PT), Lock-in Thermography (LT), Step Heating (SH) a Vibro Thermography (VT) [3].

Pro testování solárních článků je Lock-in termografie často využívána [4,5,6]. Při této technice je energie do vzorku dodána formou opakujících se pulzů. Jestliže je známa perioda a tvar signálu jsme schopni získat data amplitudového signálu a fázového zpoždění. Vyhodnocení pomocí fáze je méně náchylné na odrazy od prostředí, na odchylky v emisivitě materiálu, na nerovnoměrné ozáření vzorku. Pro testování solárních článků lze využít metodu Lock-in v různých modifikacích (způsob buzení, zatížení článku). Pro většinu z nich je nutné, aby byl článek nakontaktován.

Používané Lock-in metody pro testování solárních článků jsou např. tyto [1,7]:

- Článek není nakontaktován - V_{oc} -ILIT (Open Circuit Voltage – Illuminated Lock-in Thermography)
- Článek je nakontaktován - J_{sc} -ILIT (Short Circuit Current – Illuminated Lock-in Thermography), R_s -ILIT (Series Resistance – Illuminated Lock-in Thermography), DLIT (Dark Lock-in Thermography)

Pro testování článků v tomto příspěvku byla použita metoda, která se v odborné literatuře nazývá V_{oc} -ILIT. To je technika, při které není článek zatížen, je naprázdno. Jedná se o bezkontaktní testování. Hlavní využití této metody je ve fázi výrobního procesu, kdy článek ještě nemá vytvořenou elektrodovou strukturu. Ostatní termografické Lock-in techniky jsou v tomto kroku nepoužitelné, protože potřebují pro svoji funkci, aby byl článek nakontaktován. V_{oc} -ILIT je možné využít i pro články, které již mají elektrodovou strukturu nanesenou. Při této metodě jsou Joulovy ztráty minimální, protože přes mřížku článku (elektrodovou strukturu) neprochází žádný proud. Při osvětlení vznikají v článku nehomogenní teplotní pole způsobené zbytkovými proudy, které jsou nejvyšší při intenzitě srovnatelné se slunečním zářením. Tohoto jevu se dá využít pro zjištění lokální životnosti článku [7].

Při experimentu byla také použita pulzní termografie. Testovaný vzorek se vybudí buzením, které má charakter jednoho pulzu. Většinou se jako zdroj buzení využívají flash lampy. Metoda se dá použít v režimu odrazu i průchodu. Při režimu průchodu snímá infrakamera neosvětlenou část vzorku (vzorek je mezi infrakamerou a zdrojem buzení). Tato konfigurace je vhodná zejména tam, kde jsou vady hlouběji pod povrchem. Nevýhodou je, že se ztrácí možnost vyhodnotit hloubku defektu, což je způsobeno tím, že tepelné vlny cestují stejnou dobu v případě výskytu vady i bez

výskytu vady. V režimu odrazu je infrakamera na stejné straně jako zdroj buzení. Je tedy snímána osvětlená strana. V tomto režimu je možné odhadnout hloubku vady. V oblastech, kde se nachází indikace, se liší tepelná odezva na pulz od oblastí bez indikace.

Měření VA charakteristik

Měřením VA charakteristik se získávají parametry, které popisují solární článek. Standardně se sledují parametry U_{OC} , I_{SC} , FF , P_{MAX} , U_{MAX} , I_{MAX} , n , R_S , R_{SH} . Více informací o těchto parametrech lze najít v [8,9]. VA charakteristiku lze měřit za osvětlení a i bez osvětlení. Nevýhodou měření bez osvětlení je to, že cesty proudu se liší při osvětlení článku a při neosvětlení [10]. Typicky článek využíváme, když je osvětlen, proto je běžnější měřit VA charakteristiku při osvětlení, protože hodnoty, které jsou získány, mají vyšší vypovídající hodnotu. Tato část příspěvku pojednává o měření voltampérové charakteristiky při osvětlení.

Typický systém pro měření VA charakteristiky potřebuje pro svoji činnost světelný zdroj. Využívá se buď přirozeného slunečního záření, nebo umělého zdroje osvětlení. Dalšími částmi je modul, který měří a udržuje teplotu dle požadavku testu a systém pro sběr hodnot VA charakteristiky. Charakteristika se měří tak, že dochází ke změně napětí či proudu, která je způsobena změnou hodnoty elektronické zátěže nebo elektrického zdroje [11]. Přístroj bývá také vybaven referenčním solárním článkem, který slouží k měření intenzity osvětlení.

Popis experimentu

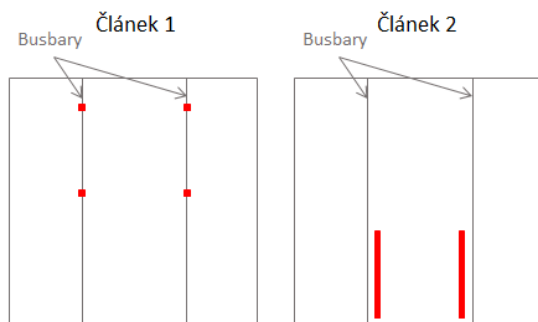
Cílem experimentu bylo otestovat možnost využití pulsní termografie pro testování solárních článků. Tato metoda byla porovnávána s Lock-in termografií, která se pro testování článků hojně využívá. Experiment byl proveden na multikrystalických solárních článcích. Výsledky IRNDT testování jsou demonstrovány na třech článcích (článek 1 až 3). Aby bylo možné ověřit, zda jsou měřicí metody schopny zachytit vady, byly na článek 1 a 2 laserem SPI G3-HS 20 W se skenovací hlavou Scancube 10 s f-theta objektivem ($f=160$ mm) vytvořeny umělé vady. Pro vytvoření vad byl použit veškerý výkon laseru, délka pulzu 200 ns, rychlost 100 mm/s a skenovací frekvence 25 kHz.

Na článek 1 byla vytvořena vada, která na čtyřech místech přerušuje busbary (hlavní vodiče), které mají za úkol spolu s fingery odvedení elektronů z článků. Lze tedy očekávat výrazné zhoršení elektrických parametrů článku. Geometrické umístění vad je naznačeno na Obr. 2. Aby bylo zjištěno, zda vytvořené vady mají skutečně vliv na elektrické parametry článku, byly změřeny i VA charakteristiky. Termografická měření i měření VA charakteristik byly provedeny na článcích v původním stavu (bez vad) a po

vytvoření vad. Po změření VA charakteristik článku 1 došlo při jeho vyjmutí z měřicího zařízení k ulomení části článku (u pravého spodního rohu). Toto odlomení lze indikovat pouze u IRNDT měření článků s umělými vadami. Všechna předchozí měření nejsou ovlivněna.

Vady vytvořené na článek 2 přerušují fingery. Jedná se opět o narušení mřížky, která se stará o odvedení elektronů. Umístění vad je ukázáno na Obr. 2. Oblast mezi těmito vadami je odpojována od zbytku článku. Dá se očekávat výrazné zhoršení elektrických parametrů článku. Pro zjištění, jak vytvořené vady ovlivňují elektrické vlastnosti článku, byly změřeny jeho VA charakteristiky. Termografická měření i měření VA charakteristik byly provedeny na článcích v původním stavu (bez vad) a po vytvoření vad.

Na článek 3 nebyla laserem vytvořena žádná vada. Na jeho zadní straně se nacházela nehomogenita ve formě tmavší oblasti. Testování článku 3 bylo zaměřeno na nalezení této nehomogenity.



Obr. 2 Geometrické rozložení vad/Layout of defects

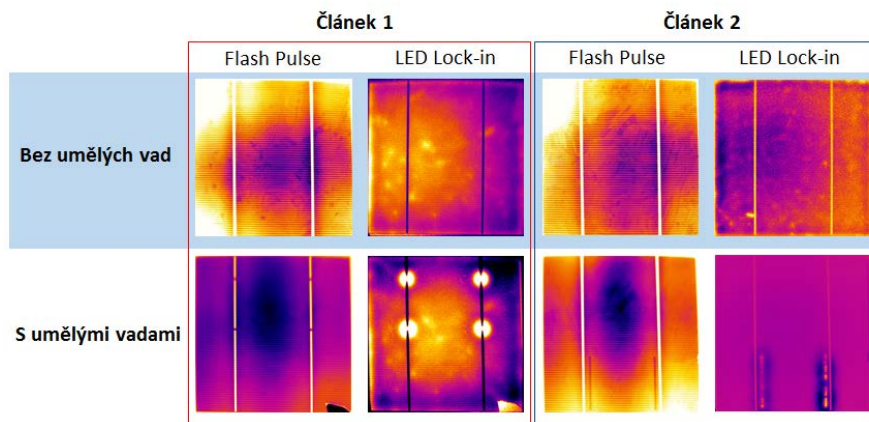
Termografická měření byla provedena infrakamerou Flir SC7650E. Byly použity techniky Flash Pulse a LED Lock-in. Články byly při použití metody Flash Pulse vybuzeny flash lampou o výkonu 6 kJ. Vzorkovací frekvence kamery byla 100 Hz a celé měření trvalo 10 s. Při použití LED Lock-in bylo zdrojem buzení pole 196 LED diod různých vlnových délek, s celkovým výkonem 1,2 W. Buzení mělo tvar periodicky se opakujících pulzů sinusového tvaru o délce 3 s. Vzorkovací frekvence kamery byla 50 Hz a celé měření trvalo 7 minut.

Pro měření VA charakteristik bylo použito experimentální zařízení, které jako zdroj osvětlení využívalo pole LED diod (stejně jako při LED Lock-in inspekci). Všechny VA charakteristiky byly změřeny při intenzitě osvětlení 80 W/m². Použitý zdroj nesplňoval podmínky dle STC (Standard Test Condition-IEC 60904-3). Při měření nebylo dodrženo spektrum světelného zdroje (AM 1,5G) a intenzita osvětlení (1000 W/m²). Měření VA charakteristik v tomto experimentu sloužilo k porovnání toho, zda a jaký vliv

mají uměle vytvořené vady na elektrické parametry článku. Tyto charakteristiky jsou neporovnatelné s VA charakteristikami, které by byly změřeny při splnění podmínek STC.

Výsledky testování

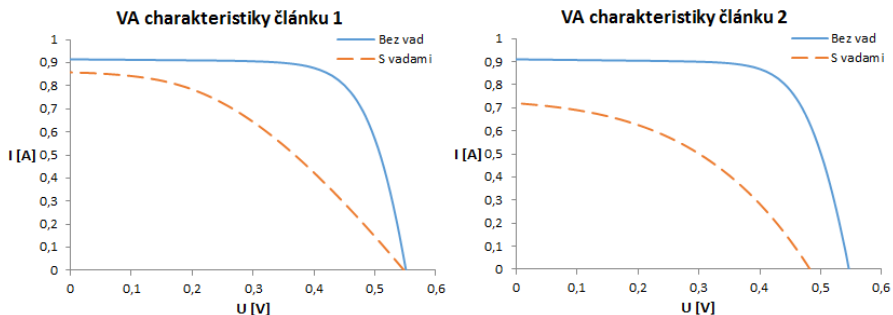
Výsledky IRNDT testování článku 1 a 2 jsou na Obr. 3.



Obr. 3 IRNDT inspekce solárního článku 1 a 2/IRNDT inspection – solar cell 1 and 2

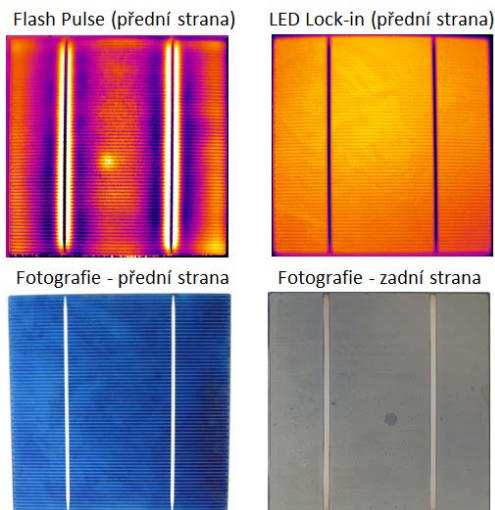
Při všech použitých IRNDT inspekcích lze velmi jasně zachytit busbary. Při LED Lock-in inspekci nepoškozeného článku 1 lze v jeho levé části zachytit nevýrazné bodové indikace. Tyto indikace nemají zásadní vliv na elektrické vlastnosti článku. Při inspekci uměle poškozeného článku lze při metodě Flash Pulse i LED Lock-in zachytit uměle vytvořené vady. Indikace vad je výrazně zřetelnější při využití metody LED Lock-in. V pravém dolním rohu si lze při využití obou IRNDT technik povšimnout odlomení části článku (pravý spodní roh). Z VA charakteristik (Obr. 4) lze zjistit, že po vytvoření vad došlo k výraznému zhoršení elektrických parametrů článku. Došlo ke zřetelnému snížení maximálního výkonu článku (z 363 mW na 194 mW).

Při inspekci nepoškozeného článku 2 lze při využití LED Lock-in vidět u levého busbaru dole bodovou indikaci. Tato indikace není zachycena při využití Flash Pulse inspekce. Dle provedené VA charakteristiky nemá tato indikace zásadní vliv na elektrické vlastnosti článku. Uměle vytvořené vady jsou indikovány při obou použitých IRNDT metodách. Indikace je výraznější při LED Lock-in inspekci. Uměle vytvořené vady mají zásadní vliv na elektrické parametry článku. Došlo ke snížení maximálního výkonu (z 356 mW na 148 mW).



Obr. 4 VA charakteristika solárního článku 1 a 2/VA characteristic – solar cell 1 a 2

IRNDT inspekce a fotografie článku 3 jsou na Obr. 5. Na fotografii zadní strany článku 3 je patrná nehomogenita. Při LED Lock-in inspekci nelze tuto nehomogenitu indikovat. Při využití metody Flash Pulse je vidět velmi výrazně. Z tohoto výsledku se jeví tato metoda použitelná pro zachycení tohoto typu vad.



Obr. 5 Fotografie a IRNDT inspekce - solární článek 3/Photos and IRNDT inspection of cell 3

Shrnutí vlastností metod

Výsledky metod Flash Pulse a LED Lock-in se liší především kvůli charakteru buzení a použitému zdroji osvětlení. Při LED Lock-in inspekci jsou výsledky ovlivněny, zbytkovými proudy, které vytvoří dostatečnou změnu v tepelném přenosu, kterou je možné zachytit infракamerou. Dostatečná odezva vzniká díky vhodnému spektru

a intenzitě osvětlení použitého zdroje a díky delší době zatěžování článku. Při Flash Pulse inspekci vznikají také proudy. V použité konfiguraci (doba záblesku, použitá flash lampa) však nejsou dostatečné pro vytvoření dostačené tepelné odezvy. Při Flash Pulse metodě je výsledek ovlivněn prostupem tepla článkem způsobený přímo zdrojem buzení. Výsledek je prakticky neovlivněn fotovoltaiickým jevem.

Závěr

V příspěvku byly představeny dvě techniky aktivní termografie. Bylo demonstrováno využití metody Flash Pulse a LED Lock-in pro testování solárních článků. Experimenty byly provedeny na multikrystalických solárních článcích. Byly ukázány výsledky 3 experimentů, se vzorky poškozenými laserovým působením, které simulovalo přerušení busbaru, fingerů a vzorek bez laserového poškození s nehomogenitou na zadní straně článku.

Lock-in termografie je pro testování solárních článků často využívána [1,4,5] a v tomto příspěvku byla prokázána její vhodnost. Při LED Lock-in inspekci bylo možné zachytit všechny laserem vytvořené vady. Nehomogenita detekovaná na zadní straně článku nebyla indikována. Délka měření v našem experimentu se při LED Lock-in inspekci pohybovala v řádech minut. Podobné měřicí časy jsou uváděny také v ostatních zdrojích [1,2]. Z tohoto důvodu se jedná o metodu nevhodnou pro sériové testování článků.

Indikace laserem vytvořených vad při Flash Pulse inspekci nebyly tak výrazné jako při použití LED Lock-in inspekce. Nehomogenita na zadní straně článku byla však velmi jasně indikována.

Poděkování

Tento výsledek vznikl v rámci projektu CENTEM, reg. Č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VAVpl, a v jeho navazující fázi udržitelnosti je podpořen projektem CENTEM PLUS (LO1402) financovaného v rámci programu MŠMT NPU I a také v rámci projektu SGS-2016-005.

Použitá literatura:

- [1] BREITENSTEIN, Otwin. Illuminated versus dark lock-in thermography investigations of solar cells. *Int. J. Nanoparticles* [online]. 2013, 6(June 2012), 81–92. ISSN 17532507. Dostupné z: doi:10.1504/IJNP.2013.054983
- [2] HUTH, S, Otwin BREITENSTEIN, A. HUBER, D. DANTZ, U. LAMBERT a F. ALTMANN. Lock-In IR-Thermography – A Novel Tool for Material and Device Characterization. *Solid State Phenomena* [online]. 2002, 82–84, 741–746. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.82-84.741

- [3] LAAKSO, Petri, Henrikki PANTSAR, Heikki LEINONEN a Aino HELLE. Preliminary study of corrosion and wear properties of laser color marked stainless steel. In: W. GUO, Z. B. WANG, L. LI, Z. LIU, B. LUK'YANCHUK a D. J. WHITEHEAD, ed. *ICALEO 2008 - 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. Temecula: LIA, 2008, s. 212–221. ISBN 0912035129, 978-0912035123.
- [4] BAUER, Jan, Otwin BREITENSTEIN, Jan-Martin WAGNER, Max PLANCK a Microstructure PHYSICS. Lock-in Thermography: A Versatile Tool for Failure Analysis of Solar Cells. *The 40th International Test Conference*. 2009, 6–12.
- [5] BREITENSTEIN, Otwin, Jan BAUER, Karsten BOTHE, David HINKEN, Jens MÜLLER, Wolfram KWAPIL, Martin C SCHUBERT a Wilhelm WARTA. Luminescence imaging versus lock-in thermography on solar cells and wafers. *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 2011, 1(2), 1031–1038.
- [6] STRAUBE, Hilmar, Max SIEGLOCH, Andreas GERBER, Jan BAUER a Otwin BREITENSTEIN. Illuminated lock-in thermography at different wavelengths for distinguishing shunts in top and bottom layers of tandem solar cells. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics* [online]. 2011, 8(4), 1339–1341. ISSN 18626351. Dostupné z: doi:10.1002/pssc.201084026
- [7] BREITENSTEIN, Otwin a J P RAKOTONIAINA. Lock In Thermography - a universal tool for local analysis of solar cells. *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 2005, 7(11), 956–963.
- [8] TAMRAKAR, Vivek, S C GUPTA a yashwant SAWLE. Single-Diode and Two-Diode Pv Cell Modeling Using Matlab for Studying Characteristics of Solar Cell Under Varying Conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal* [online]. 2015, 4(2), 67–77. Dostupné z: doi:10.14810/ecij.2015.4207
- [9] ZHANG, Chunfu, Jincheng ZHANG, Yue HAO, Zhenhua LIN a Chunxiang ZHU. A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve. *Journal of Applied Physics* [online]. 2011, 110(6), 7. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.3632971
- [10] HONSBERG, Christiana a Steuart BOWDEN. *PV Education* [online]. [vid. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/>
- [11] KONTGES, Marc, Sarah KURTZ, Corrine PACKARD a Ulrike JAHN. *Review of Failures of Photovoltaic Modules*. 2014.



DEMAGNETIZACE STROJNÍCH SOUČÁSTI – PROBLÉM DODAVATELŮ, I ODBĚRATELŮ DEMAGNETIZATION OF MACHINE PARTS - PROBLEM OF SUPPLIERS AND CUSTOMERS

Josef NEUGEBAUER

PTS Josef Solnař, s.r.o.

Contact e-mail: neugebauer@ptsndt.com

Abstrakt

Intenzita magnetického pole, to je práh, o který zakopávají různí dodavatelé vyrábějící a následně metodou magnetickou (nebo vířivoproudou) zkoušející svoje součásti. Tyto výrobky pak dodávají svým koncovým odběratelům. Tito koncoví odběratelé pak mohou a někteří také vyžadují demagnetizaci součástí na určitou stanovenou mez. A zde občas vznikají spory, spíše nedorozumění, při prokazování a následném ověřování úrovně demagnetizace součástek. Tento článek nedává návod, jak se vyhnout těmto sporům. Nastihuje pouze základní pojmy magnetických jevů, způsoby měření a také některé příčiny, proč dochází k rozdílu mezi naměřenou hodnotou zbytkové magnetizace u dodavatele a u odběratele.

Klíčová slova: demagnetizace, zbytková intenzita magnetického pole, měření magnetických veličin

Abstract

Magnetic field strength may be a problem for some vendors who produce and then test the components by Magnetic Particle Inspection or Eddy Current Inspection. End customers can and some also require demagnetizing components to a certain set limit. Sometimes there are disputes, rather misunderstandings, when proving and subsequently checking the level of demagnetization of components. This article does not provide guidance on how to avoid these disputes. It provides the basic concepts of magnetic phenomena, the measurement methods and, causes of a difference between the residual magnetic field value measured at the supplier and the customer.

Key words: Demagnetization, residual intensity of magnetic field, measurement of magnetic quantities

1. Úvod

Demagnetizace strojních součástí je nikdy nekončící boj mezi dodavatelem a zákazníkem. Příliš velká intenzita zbytkového magnetického pole komplikuje další zpracování polotovarů (např. při obrábění či svařování). Toto je důvodem proč někteří odběratelé požadují od dodavatele zaručenou určitou hodnotu intenzity zbytkového magnetického pole. A tímto požadavkem začínají dodavateli jisté problémy. V první části tohoto článku jsou zmíněny fyzikální veličiny, týkající se diskutovaného problému. Následují fyzikální jednotky a stručný výpis možných měřidel používaných k ověření požadovaných hodnot. Není opomenuta ani legislativa. Na závěr článku je popsán konkrétní případ naměření rozdílných hodnot a experiment, který ukazuje na možný zdroj externího magnetického pole, který může ovlivnit výši naměřených hodnot magnetického pole součástí.

2. Magnetické pole a jeho veličiny

Součásti, které byly vystaveny předchozí magnetizaci, zůstávají dále zmagnetovány. Míra zbytkové magnetizace závisí na magnetických vlastnostech materiálu. Součást z magneticky měkkého materiálu bude vykazovat malou míru zbytkové magnetizace (remanence), naopak velkou míru zbytkové magnetizace bude vykazovat součást z magneticky tvrdého materiálu.

Veličiny, kterými můžeme popsat magnetické pole:

Magnetická indukce (B) je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou (1m^2), kolmou na směr siločar - tj. hustotu (indukčních) siločar daného magnetického pole

Intenzita magnetického pole (H) je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Permeabilita prostředí (μ) je skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou „vodivost“ prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Magnetická indukce a intenzita magnetického pole jsou spolu svázány pomocí permeability vztahem:

$$H = \frac{B}{\mu} \left[Am^{-1} = \frac{T}{Hm^{-1}} \right]$$

Velikost zbytkové magnetizace součástí tedy závisí na materiálu, na typu a míře předešlého budícího magnetického pole. Typ budícího magnetického pole hraje

podstatnou roli při demagnetizaci součástí. Obecně lze říci, že součást zmagnetovaná stejnosměrným magnetickým polem bude hůře demagnetovatelná než součást zmagnetovaná střídavým magnetickým polem.

Bez ohledu na typ budícího magnetického pole je zbytkové magnetické pole stacionární. To znamená, že vektor magnetické indukce B má v určitém bodě stálou velikost i směr.

3. Jednotky, v jakých může být intenzita magnetického pole udávána

Magnetická indukce:

V soustavě SI je magnetická indukce uváděna s jednotkou Tesla [T]

V soustavě CGS je magnetická indukce uváděna s jednotkou Gauss [G].

Převod mezi soustavou SI a CGS je pro magnetickou indukci následující:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Intenzita magnetického pole:

V soustavě SI je intenzita magnetického pole uváděna s jednotkou Ampér na metr [Am^{-1}]

V soustavě CGS je intenzita magnetického pole uváděna s jednotkou Oersted [Oe].

Převod mezi soustavou SI a CGS je pro intenzitu magnetického pole následující:

$$1 \text{ Am}^{-1} = 4\pi / 1000 = 0,0125664 \text{ Oe}$$

4. Měření magnetických veličin – čím, jak

Nejjednodušší způsob, jak zjistit, zda je něco magnetické, je použití kancelářské sponky. Je-li sponka přichycena k předmětu, pak je magnetické pole minimálně 0,002 T (20 Gaussů). Při méně než 0,002 T se sponka neudrží a při více než 0,004 T drží pevně. Železné piliny se lepí při 0,001 T. Pro srovnání se hodnota magnetického pole Země, v závislosti na lokaci, pohybuje kolem 0,0001 T (1 Gauss).

Magnetickou indukci můžeme měřit pomocí tzv. Teslametrů nebo Gaussmetrů.



Obr. 1 Gaussmetr [1]

Fig. 1 Gaussmeter

Intenzitu magnetického pole měříme přístroji cejchovanými v kAm^{-1} s přepínači pro AC nebo DC magnetické pole,



Obr. 2 Měřidla intenzity magnetického pole [2]

Fig. 2 Magnetical field intensity gauges

nebo univerzálním přístrojem, který dokáže měřit ve více různých jednotkách (T, G, kAm^{-1})

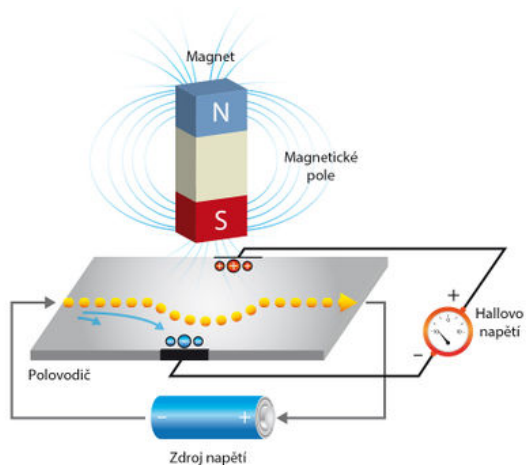


Obr. 3 Univerzální měřidlo magnetického pole [2]

Fig. 3 Universal magnetic field meter

Snímačem pro měření veličin magnetického pole je u většiny přístrojů tzv. Hallova sonda pracující na principu Hallova jevu.

Hallův jev popisujeme jako vznik elektrického napětí příčně ve vodiči, jímž podélně protéká elektrický proud, který je odchylován magnetickým polem kolmým ke směru proudu.



Obr. 5 Hallův jev [3]

Fig. 5 Hall effect

Zařízení využívající Hallův jev pro měření magnetické indukce se nazývá **Hallova sonda**. Zatímco Edwin Herbert Hall pracoval s kovovými foliemi, v nichž je velká koncentrace vodivostních elektronů, dnešní Hallovy sondy obsahují většinou plátek polovodiče s relativně malou koncentrací nosičů nábojů, v nichž je díky tomu jev lépe měřitelný.

Úskalí měření Hallovou sondou je zřejmé. Je nezbytné aktivní prvek sondy orientovat tak, aby magnetické siločáry vstupovaly do aktivního prvku sondy kolmo. Při každém jiném natočení prvku bude měření zatíženo chybou.

5. Standardy, určující minimální hodnotu demagnetovaných výrobků

Demagnetizační systémy eliminují nežádoucí magnetizmus na méně než 0,0005 T. Demagnetizace materiálů je možná různými způsoby a pomocí různých typů zařízení. Záleží na typu, rozměrech a množství produktu. Velmi dobře demagnetizovány mohou být také tvrdé materiály, čímž se významně zvýší jejich životnost. Příkladem je tvrzená ocel, ze které se vyrábějí ložiska nebo ozubená kola. Pokud již odmagnetovaný předmět přijde opět do kontaktu s magnetickým polem, je znovu zmagnetován. Proces demagnetizace lze opakovat. Demagnetizace v žádném případě nemění strukturu materiálu.

Existují různé hodnoty zbytkové magnetizace. Liší se podle standardů (ISO, ASME, podnikové standardy). A samozřejmě se liší i velikostí.

Tak např. ASTM E 709 - Standard Guide for Magnetic Particle Examination; udává hodnotu po demagnetizaci max 3 G ($0,24 \text{ kAm}^{-1}$)

Mezinárodní norma ISO 9934-1 se problémem zbytkové hodnoty magnetického pole nezabývá.

Naopak výrobová norma pro výkovky ČSN EN 10228-1 udává hodnotu $0,8 \text{ kA/m}$

Předpis SKF pro ložiska udává hodnotu menší jak $0,2 \text{ kA/m}$.

Obecně se považuje za přípustnou hodnota $0,2 \text{ kA/m}$ až $0,5 \text{ kA/m}$.

Literatura hovoří o měření tangenciální intenzity magnetického pole při ověřování magnetizace. Pro měření zbytkového magnetizmu je ovšem nezbytné měřit kolmo složku magnetického pole vůči povrchu součásti (radiální) a tím i správně umístit aktivní prvek sondy do magnetického pole.

6. Demagnetizace versus ČSN EN ISO 9934-1

Zde se praví:

Magnetické pole, zbývající po magnetizaci, se může zjistit detekcí intenzity zbytkového pole použitím měřiče zbytkového pole, Hallovy sondy nebo dohodnuté fyzikální metody (např. zkouškou pomocí kompasu). Obecně platí, že to bude vyžadovat pohyb citlivého prvku po povrchu celého dílu se sledováním maximální úrovně. Je třeba věnovat pozornost při použití přístrojů využívajících Hallův jev (navržených k měření intenzity tangenciálního pole), protože ty obvykle nejsou určeny pro měření intenzity zbytkového tangenciálního pole.

Tak můžeme nebo nemůžeme použít přístroj s Hallovou sondou?

Originál normy říká následující:

Magnetic field remaining after magnetization can be determined by detecting the residual field strength using a residual field meter, a Hall effect instrument or by an agreed physical method (e.g. compass test). Generally, this will require moving the sensitive element all over the part and observing the maximum level. Care shall be taken when using Hall effect instruments (designed to measure tangential field strength) because these are not designed to provide accurate, quantitative measurement of fields perpendicular to a surface which may be encountered when checking for residual magnetization.

Příklad by mohl znít třeba takto:

Magnetické pole, zbývající po magnetizaci, se může zjistit detekcí intenzity zbytkového pole použitím měřiče zbytkového pole, Hallovy sondy nebo dohodnuté fyzikální metody (např. zkouškou pomocí kompasu). Obecně platí, že měření vyžaduje pohyb citlivého prvku po povrchu za současného sledování maximální hodnoty. Je třeba věnovat pozornost při použití přístrojů využívajících Hallův jev (navržených k měření intenzity tangenciálního magnetického pole), protože tyto nejsou navrženy k přesnému, kvantitativnímu měření magnetických polí orientovaných kolmo k povrchu, které se mohou vyskytnout při kontrole zbytkového magnetického pole.

Záleží tedy na orientaci aktivního prvku Hallovy sondy

7. A na závěr – praktický problém

Výrobce po ukončení všech výrobních operací a kontrol provede demagnetizaci pro snížení zbytkové hodnoty magnetického pole na zákaznickem požadovanou hodnotu. Vystaví o měření zbytkové hodnoty magnetického pole protokol a pak...

Pak je součást dopravena na místo určení a zákazník vyše svého pracovníka pro přejímku, ať přeměří požadovanou a protokolem deklarovanou hodnotu zbytkového magnetického pole. A nastává problém. Hodnoty naměřené u zákazníka se liší od hodnot naměřených u výrobce.

Konkrétní příklad: Na vyžádání firmy X jsme provedli měření zbytkového magnetického pole u tyčových, strojně opracovaných součástí o délce více jak 2 m. Výše jmenované tyče byly do firmy X dodávány na kamionech. Naměřené hodnoty se pohybovaly od 0,9 do 1,8 kA/m. Jenže protokol od dodavatele, který sídlí v Německu, udával hodnoty v intervalu 0,3 až 0,5 kA/m.

Co se vlastně stalo?

Ne každý si uvědomuje, že nás obklopuje magnetické pole různé intenzity. A feromagnetické materiály toto magnetické pole rády pohlcují a natáčejí své domény tak, jak magnetické pole fouká. Provedl jsem vlastní měření na železničním přejezdu s trolejovým vedením. Jednalo se o trolejové vedení napájené jmenovitým napětím 3kV DC.

Při mém měření jsem přešel přes přejezd se sondou umístěnou ve vzdálenosti cca 4 m od trolejového vedení. Přístroj ukázal hodnotu od $8,3 \cdot 10^{-5}$ T (0,8 Gauss, 0,064 kA/m) až po $1,35 \cdot 10^{-4}$ T (1,3 Gauss, 0,104 kA/m). Přepravovaný materiál je však mnohem blíž troleji a určitě přejel přes více jak jeden železniční přejezd. A to se na své cestě mohl potkat také s přejezdy, kde jmenovité napětí troleje je 25kV AC. Zde je tedy jeden ze zdrojů, který nám zvyšuje hodnotu zbytkového magnetického pole během cesty od dodavatele k zákazníkovi.

Literatura:

- [1] <https://www.parkerndt.com/product/mg-25-magnetic-field-indicator/>
- [2] <https://ptsndt.com/cs/prodej/merici-pristroje/magnetometr-gauss-metr>
- [3] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Hallův_jev_b.jpg



ZKUŠEBNÍ KOMISAŘ PERSONÁLU NDT VERSUS NORMA ČSN EN ISO 9712 EXAMINER PERSONNEL NDT VERSUS STANDARD ISO 9712

Josef NEUGEBAUER

ČNDT; OS 10

Contact e-mail: neugebauer10@seznam.cz

Abstrakt

Zkušební komisař personálu NDT se během své činnosti potýká s nejedním problémem. Nejen, že se musí vypořádat se „škrabopisem“ některých uchazečů, ale také s různými, na první, druhý i třetí pohled nepochopitelnými, souřadnými systémy zkoušených součástí. Také je nutno vypořádat se s termíny, které ucho neslyšelo, oko nevidělo. A aby toho nebylo málo, musí respektovat požadavky normy ISO 9712. Hodnotit testy, to je ještě jednoduché, ale vyhodnotit praktickou část, ať se již jedná o zkoušku vzorků, či vypracování instrukce, už zase tak jednoduché není. Ano, laik by řekl: od čeho máme normu ISO 9712 a v ní Tabulku 5 a přílohu D.1? Podívejme se však na tyto pomůcky podrobněji. A to optikou jednotlivých metod.

Klíčová slova: ISO 9712, zkušební komisař, hodnocení praktické části zkoušky

Abstract

NDT personnel examiner deals with the various problems during his daily work. These include applicants' handwriting, unusual system of coordinates, or unusual technical names. Apart from these problems, the Examiner has to deal with ISO9712. The evaluation of the tests is not difficult. Problems occur when evaluating the practical part of the exam. ISO 9712 gives us instructions on how to do it. But let's take a look at the evaluation of the tests from the perspective of the individual methods.

Key words: ISO 9712, examiner, evaluation practical examination

1. Úvod

Každý nový uchazeč o kvalifikaci a certifikaci v oblasti NDT se musí podrobit kvalifikační zkoušce. Náplň kvalifikační zkoušky a její úroveň poměrně přesně určuje norma ČSN EN ISO 9712, která je tady s námi již 5 let.

Strukturu každé kvalifikační zkoušky definuje kapitola 8. Zkušební komisař (dále jen ZK) tedy musí mít dostatečnou znalost této části normy. Ale ani dokonalá znalost normy nestačí. Je třeba se seznámit se směrnici Certifikačního orgánu, neboť Certifikační orgán stanovuje časy potřebné k vykonání jednotlivých částí kvalifikační zkoušky.

Pokud uchazeč o kvalifikaci a certifikaci dokončí celou zkoušku, aniž by z ní byl vyloučen pro podvodné jednání nebo odešel dobrovolně, pak následuje vyhodnocení jednotlivých částí zkoušky. A zde začíná to pravé martyrium zkušebního komisaře.

2. Hodnocení zkušebních vzorků

Norma ČSN EN ISO 9712 praví: „Hodnocení praktické zkoušky musí být založeno na položkách 1 až 4 uvedených v tabulce 5, podle doporučených váhových faktorů ve vztahu ke stupni a metodě, podle toho, co je vhodné“. Tolik článek 8.2.4.2

Tabulka 5 – Předmět a váhové faktory pro hodnocení – praktická zkouška

Položka ^a	Předmět	Váhový faktor	
		Stupeň 1 %	Stupeň 2 %
1	Znalost NDT přístrojů, včetně funkce a ověření nastavení přístroje.	20	10
2	Provedení NDT na zkušebním vzorku. To sestává z následujících částí: – pro stupeň 2, volba technik a stanovení pracovních podmínek; – příprava (stav povrchu) a vizuální kontrola zkoušeného tělesa; – nastavení přístroje; – provedení zkoušky; – činnosti po zkoušce.	35	20
3	Zjištění a zaznamenání diskontinuit a, pro stupeň 2, jejich charakterizace (poloha, orientace, rozměry a typ) a vyhodnocení.	45	55
4	Pro stupeň 2, navržení písemné instrukce pro stupeň 1.	–	15

^a Tabulka D.1 udává vodítka pro dostatečné podrobnosti ke každé položce, které mají být zohledněny podle uvážení zkušební komisaře.

Tuto tabulku doplňuje návod pro váhové faktory. Tabulka D.1 normy ISO 9712:

Zkusme si projít postup ZK při hodnocení uchazeče u praktické zkoušky v metodě VT a stupni 2. Technika zkoušení je přímá, místní bez pomůček a vzorek bude z výrobního sektoru svary.

Tabulka D.1 – Návod pro váhové faktory v procentech pro praktickou zkoušku pro stupeň 1 a stupeň 2

Předmět	Stupeň 1	Stupeň 2
Část 1: Znalost přístroje pro NDT		
a) kontrola systému a funkční ověření;	10	5
b) ověření nastavení.	10	5
Celkem	20	10
Část 2: Použití NDT metody		
a) příprava zkušebního vzorku (například stavu povrchu), včetně vizuální kontroly;	5	2
b) pro stupeň 2 volba NDT techniky a stanovení podmínek zkoušení;	n/a ^{NP1}	7
c) nastavení NDT přístroje;	15	5
d) provedení zkoušky;	10	5
e) činnosti po zkoušce (například odmagnetování, čištění, konzervace).	5	1
Celkem	35	20
Část 3: Zjištění diskontinuit a záznamy ^a		
a) zjištění diskontinuit, které musí být povinně zaznamenány;	20	15
b) charakterizace (typ, poloha, orientace, zdánlivé rozměry atd.);	15	15
c) pro stupeň 2 vyhodnocení podle kritérií uvedených v pravidlech, normách, specifikacích nebo postupech;	n/a	15
d) sestavení protokolu o zkoušce.	10	10
Celkem	45	55

Část 4: Písemná NDT instrukce (uchazeči o stupeň 2) ^b		
a) předmluva (rozsah platnosti, referenční dokumenty);	–	1
b) požadavky na pracovníky;	–	1
c) přístroje, které mají použít, včetně nastavení;	–	3
d) výrobek (popis nebo výkres, včetně oblasti zájmu a účelu zkoušení);	–	2
e) podmínky zkoušení, včetně přípravy pro zkoušení;	–	2
f) podrobné instrukce pro provedení zkoušky;	–	3
g) zaznamenání a klasifikování výsledků zkoušení;	–	2
h) protokol o zkoušce.	–	1
Celkem	–	15
Celkové hodnocení zkušebního vzorku pro praktickou zkoušku	100 %	100 %
Pro úspěšné složení zkoušky uchazeč musí získat minimálně 70 % v písemné části u NDT instrukci, tj. 10,5 bodů z 15,0 možných.		
^a Uchazeč, který podle podmínek specifikovaných ve vzorovém protokolu nezaznamená do protokolu jednu diskontinuitu specifikovanou jako „povinně protokolovanou pro uchazeče“, musí být hodnocen známkou nula bodů v části 3 praktické zkoušky pro příslušný zkušební vzorek. Pro RT se tato podmínka použije pro vyhodnocení radiogramu, tzn. nezaznamenání jedné „povinně protokolované“ diskontinuity u jednoho radiogramu vede ke známce nula bodů pro soubor radiogramů v části 3.		
^b Od uchazeče o stupeň 2 se vyžaduje sestavení NDT instrukce vhodné pro pracovníky certifikované ve stupni 1, pro vzorek vybraný zkušební komisí. Pokud uchazeč o stupeň 2 zkouší vzorek, pro který se nepožaduje NDT instrukce, výsledná známka se vypočte v procentech ze zbývajících 85 bodů.		

Postupujeme podle Tabulky D.1 normy ISO 9712 kde nebudeme vypisovat text předmětu, ale budeme se držet kombinace číselného a písmenného značení:

Předmět	Váhový faktor [%]	Popis činnosti uchazeče	Poznámka
1 a)	5	kontrola funkce a nastavení luxmetru	5 bodů za banální zapnutí přístroje
1 b)	5	není co ověřovat	5 bodů za nic
2 a)	2	podívá se, zdali není vzorek znečištěný tak, že by nešla vykonat zkouška	vzhledem k častému používání vzorků, úprava povrchu není nutná, 2 body zadarmo
2 b)	7	měl by opsat z normy, že zkouší přímo a intenzita, pozorovací úhel a vzdálenost jsou v intencích normy	pokud všechno správně opiše, 7 bodů, zde mívají někteří uchazeči občas problém, ale nikdy takový, aby to vedlo k odebrání všech 7 bodů
2 c)	5	není co nastavit	5 bodů za nic
2 d)	5	uchazeč správně dodržuje pozorovací vzdálenost i úhel	5 bodů za nic
2 e)	1	vzorek správně uloží do krabice (regálu)	1 bod za nic
3 a)	15	řady končí legrace a je nutno zjistit všechny povinně zaznamatelné diskontinuity	zasloužených 15 bodů, ale co když najde 2x víc nepřipustných indikací, než jich na daném svaru je? Necháme to tak?

3 b)	15	co uchazeč najde, to také musí klasifikovat a zaznamenat, tedy zvolit souřadný systém a určit polohu indikací	zasloužených 15 bodů
3 c)	15	vypočíst mezní hodnotu a porovnat se skutečně změřenou	pokud správně zařadil nalezenou indikaci, pak ji většinou i správně vyhodnotí
3 d)	10	vyplnit předtištěný protokol	10 bodů zadarmo

Pokud se podíváme na uvedený rozbor, vidíme, že 40 bodů z 85 možných (vzorek není navázaný na instrukci) dostává uchazeč více méně zadarmo. Kam však šáhnout v případě, pokud uchazeč najde násobné množství nevyhovujících diskontinuit proti vzorovému protokolu? A kolik bodů mu vlastně za to ubrat?

Jsou uchazeči, a není jich málo, kteří skutečně dokáží v krycí vrstvě tupého svaru objevit i 7 nevyhovujících diskontinuit. Vzorový protokol, vyhotovený třemi odborníky v metodě VT ve stupni 3, na tomtéž svaru uvádí pouze 3 nevyhovující diskontinuity. Je nutno podotknout, že v praxi by byl takovýto výsledek zkoušky docela „drahý“. Tyto neexistující vady musí někdo opravit. A to stojí čas i materiál.

Z které části hodnocení tedy může ZK ubrat? A kolik?

Nabízí se pouze tři možnosti. Všechny za 15 bodů.

3 a) zjištění diskontinuit, které musí být povinně zaznamenány

3 b) charakterizace (typ, poloha, orientace, zdánlivé rozměry atd.)

3c) pro stupeň 2 vyhodnocení podle kritérií uvedených v pravidlech, normách, specifikacích nebo postupech

Z těchto výše uvedených je asi nejpřirozenější ubrat (kolik?) z bodu 3 b) a/nebo 3 c). Kolik procentních bodů je na uvážení konkrétního ZK.

3. Hodnocení instrukce

Zadání pro vypracování instrukce může vypadat následovně:

Napište NDT instrukci pro předložený vzorek tupého svaru. Pro vypracování využijte následující normy:

ČSN EN 13018; ČSN EN ISO 17637; ČSN EN 5817 a ČSN EN ISO 6520-1. Kvalifikace pracovníků, pro které píšete instrukci se řídí ČSN EN ISO 9712.

Stupeň kvality C podle ČSN EN ISO 5817.

NDT instrukci je nutno hodnotit podle tabulky D.1 normy ČSN EN ISO 9712:

Část 4: Písemná NDT instrukce (uchazeči o stupeň 2) ^b		
a) předmluva (rozsah platnosti, referenční dokumenty);	–	1
b) požadavky na pracovníky;	–	1
c) přístroje, které mají použít, včetně nastavení;	–	3
d) výrobek (popis nebo výkres, včetně oblasti zájmu a účelu zkoušení);	–	2
e) podmínky zkoušení, včetně přípravy pro zkoušení;	–	2
f) podrobné instrukce pro provedení zkoušky;	–	3
g) zaznamenání a klasifikování výsledků zkoušení;	–	2
h) protokol o zkoušce.	–	1
Celkem	–	15

Výsledné hodnocení se provede podle článku 8.2.4.5. Výsledek instrukce, která není vázána na vzorek hodnocený u praktické zkoušky, získáme vynásobením získaných bodů koeficientem 100/15.

Vytvoříme si opět tabulku, kde si budeme zapisovat co v jednotlivých bodech od uchazeče očekáváme.

Zkouška bude opět v metodě VT a stupni 2. podle výše uvedeného zadání.

Předmět	Váhový faktor [%]	Popis činnosti uchazeče	Poznámka
4 a)	1	napsat pro co instrukce platí; normy opiše ze zadání,	nebývají většinou problémy
4 b)	1	definovat kdo může a co může	zde bývá problém, zapomínají určit např. metodu
4 c)	3	napsat, že si má vzít Luxmetr, nějakou svarovou měрку a něco, čím měří vzdálenost	málokdy je zde nějaký problém, dostane 3 body skoro za nic
4 d)	2	popsat co zkouší, kde zkouší a co hledá	nebývají větší problémy, a navíc je z čeho brát
4 e)	2	definovat osvětlení a vzdálenosti (úhly), požadavky na povrch	opět bez větších problémů, většinu údajů opišou z normy
4 f)	3	podrobné instrukce pro provedení zkoušky	U VT není moc co psát
4 g)	2	vypracovat výčet nepřipustných diskontinuit včetně rozměrů od kdy jsou určité diskontinuity nepřipustné	těžiště instrukce pro VT zkoušku
4 h)	1	jak co a kam zaznamenat	nebývají většinou problémy

Minimum bodů pro úspěšné složení této části zkoušky je 10,5 bodu z 15. Představme si situaci, kdy uchazeč více méně napíše instrukci podle požadavků, ale vynechá (úplně zkazí) bod 4 g) - *zaznamenání a klasifikování výsledků zkoušení*. Co se stane? Pokud jsme mu ubrali nějaké desetiny bodů v předchozím hodnocení, ty mohou klidně dát v součtu jeden bod, pak mu ubereme 2 body za nesplnění části 4 g). To dělá dohromady 3 body. Co to znamená? Celkově uchazeč získal 12 bodů a je hodnocen

80 %!! Instrukci složil úspěšně, a to i přesto, že má to nejdůležitější špatně, nebo nemá vůbec!

4. Závěr

V tomto článku jsem se pokusil poukázat na nedokonalost normy ČSN EN ISO 9712. I když tato norma dává celkem podrobný návod, jak hodnotit praktickou část zkoušky, u metody VT tento návod selhává. Jakákoliv kreativita při vyhodnocení není ze strany ZK povolena. Špatně se vysvětluje při dozorovém auditu, proč jeden uchazeč dostal za tutéž odpověď jiný počet bodů než jiný uchazeč. Metoda VT je silně subjektivní a také značně závislá na předchozí praxi. A ZK to nemá při hodnocení praktické části zkoušky vůbec jednoduché.



METODA AKUSTICKÉ EMISE APLIKOVANÁ NA AKTIVITU DŘEVOKAZNÉHO HMYZU

ACOUSTIC EMISSION METHOD APPLIED TO THE ACTIVITY OF WOOD BORING INSECTS

Lubos PAZDERA, Libor TOPOLAR, Michaela HODULAKOVA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
pazdera.l@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Tento článek se zabývá možným sledováním aktivity dřevokazného hmyzu metodou akustické emise. Metoda akustické emise je součástí nedestruktivních metod a používá se zejména k monitorování a detekci aktivních defektů materiálu v konstrukci. V poslední době se metoda akustické emise začíná používat i v jiných aplikacích, jako je např. sledování aktivity dřevokazného hmyzu.

Klíčová slova: *metoda akustické emise, dřevokazný hmyz, nedestruktivní testování, zvláštní objekt*

Abstract

This article deals with the possibility of acoustic emission method for using monitoring life of wood boring insects. Acoustic emission method is a part of the non-destructive methods and it is especially used for to monitor and detection active defects of material on construction. In the last time, the acoustic emission method is applied for very interesting application such as to monitor of activity of wood boring insects.

Key words: *acoustic emission method, wood boring insect, non-destructive testing, special object*

1. Úvod

Metoda akustické emise je jednou ze zvláštních postupů nedestruktivního testování. Její nejdůležitější vlastností je sledování změn struktury materiálu pomocí šíření mechanických (napěťových) vln. Tedy, metoda akustické emise v základu není schopna detekovat geometrii materiálu, ale pouze změny v materiálu vyvolané vlivem lokálního uvolnění mechanické (akustické) energie, tedy aktivní poruchy. V současné

době je snaha o netradiční použití metody akustické emise také na aplikace v oblasti biologie (např. chování hmyzu).

Kromě využití vlastní „rozumné“ metodiky měření, tedy počet a umístění snímačů, parametry snímačů, sestavení a parametry celého měřícího řetězce, je důležité nalezení správného vyhodnocovacího postupu. Jak je všeobecně známo, analýza vyhodnocení změřených dat je velmi komplikovaná.

2. Využití metody akustické emise

Sheffran (et al, 1993) používá ke sledování aktivity termitů ruční akumulátorový detektor akustické emise s možností detekce 80 cm v podélném resp. 8 cm v příčném směru vláken dřeva od polohy snímače.

Weaver (et al, 1997) vyvinuli algoritmus s optimalizovanými parametry, aby odpovídaly zvukům od jednotlivých hmyzů použitím křížových korelačních signálů z pole akustických čidel. Tento algoritmus byl optimalizován v řadě pokusů prováděných ve vzorové komoře detektoru hmyzu (Fingerprinting Detector) hluku (ALFID). V experimentu bylo použito 16 snímačů akustické emise umístěných po dvou naproti sobě.

Puntonet (et al, 2005) prvek poplachových signálů při aktivitě termitů je vylepšen v časově frekvenční oblasti je transformací wavelet a její paketovou formou, které využívají analýzy s více rozlišovacími schopnostmi.

Obdobnou analýzu používají De la Rosa (et al, 2007), když využívá frekvenční domény vyššího řádu (HOSA) při aktivitě termitů (krmení a hloubení) pomocí analýzy diagonálních řezů bi-spektra a zkušebního spektra s hlavním cílem snížit subjektivitu při zjišťování možného napadení v hlučném scénáři měření. Spojení metod diskrétní waveletové transformace a spektrální analýzy čtvrtého řádu (exces), což je statistický nástroj, který může naznačovat přítomnost řady přechodových jevů a jejich umístění ve frekvenční oblasti, De la Rosa (et al, 2010) pokračuje v analýze termitího krmení.

Při vzorkování akustického signálu 44 kHz se Ganchev (et al, 2007) snaží dosáhnout obdobného výsledku jako při použití metody akustické emise v klasickém ultrazvukovém pásmu.

Le Conte (et al, 2015) využívá metodu akustické emise pro detekci hmyzu ve dřevěných exponátech muzea. Pro měření využívá snímače akustické emise s frekvenčním rozsahem od 175 kHz do 1 MHz.

Sledování hmyzu pomocí metody akustické emise je stále aktuální, jak je zřejmé ze stále přibývajících článků (Nowakowska et al, 2017).



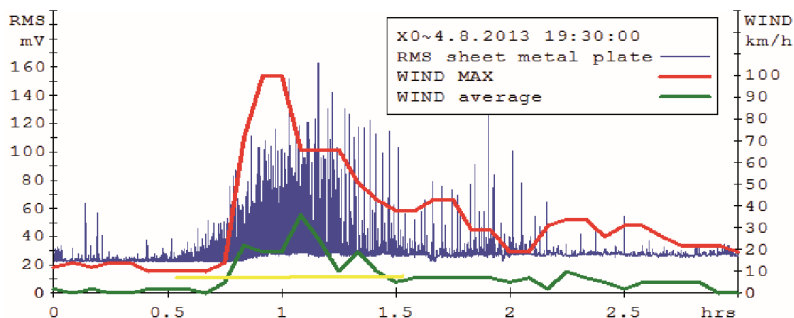
Obr. 1 Larva a dospělý samec tesaříka krovového

Fig. 1 Larva and adult male Hylotrupes bajulus

Jak je zvykem ve Spojených státech amerických je také metoda sledování aktivity termitů pomocí metody akustické emise patentována – Detection of movement of termites in wood by acoustic emission techniques – US 6883375 B2. Zde se využívá filtrace přes vysokofrekvenční a nízkofrekvenční pásmový filtr. Vybrané hodnoty podílů vysokofrekvenčního a nízkofrekvenčního signálu vytvářejí „nový“ signál, který v podstatě eliminuje akustický hluk z vnějšího prostředí.

Asi nejčastější použití metody akustické emise je na sledování života tesaříka krovového ve stavebních dřevěných materiálech (Obr. 1).

Použití akustické emise pro chování včel částečně popsal Tlacobaba (et al, 2014), protože vibroakustické signály jsou důležitou součástí komunikace u včel. Cílem této studie bylo monitorovat akustickou emisi, která se mění v kolonii včel v průběhu různých meteorologických jevů, jako jsou silný vítr, krupobití apod., a odhadnout povahu a rozsah reakcí kolonie včel pomocí analýzy získaných akustických dat. Část analýzy je zřetelná z Obr. 2. Pro popis detailnějšího chování včel při nárazu větru by v tomto případě (Obr. 2) bylo dobré použít další detailnější postupy analýzy signálů, jako jsou „zoom“ analýzy, frekvenční analýzy, „plovoucí“ parametry apod.



Obr. 2 Průměr (čtverce) signálu akustické emise (RMS), průměrná a maximální rychlost větru (WIND) v době kolem sledovaného jevu (žlutá barva označuje časový interval s výskytem jevu)

Fig. 2 RMS of AE, average wind speed and maximal blast around phenomenon (yellow abscissa indicates time interval with the incidence of phenomenon

(Tlabcaba et al, 2014)

3. Závěr

Jak je zřejmé z předchozí části, využití metody akustické emise pro studium chování hmyzu je jednou ze zajímavých a netradičních postupů. Avšak získání „rozumných“ výsledků znamená individuální analýzu dané problematiky, neboť příprava, realizace a vyhodnocení experimentu nepatří k nejjednodušším.

Vlastní hodnocení pak by mělo být založeno jak na detailní analýze, tak na znalostech a zkušenostech uživatele zvoleného monitorovacího systému akustické emise.

4. Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory České společnosti pro nedestruktivní testování se zvláštním zaměřením na podporu mladých vědeckých pracovníků (Libor Topolář) a studentů doktorského studijního programu (Michaela Hoduláková).

5. Literatura

- De la Rosa JG; Lloret I; Moreno A; Puntonet CG; Gorris JM; Higher-Order Spectral Characterization of Termite Emissions Using Acoustic Emission Probes; In 2nd IEEE Sensors Applications Symposium Location: San Diego, CA Date: FEB 06-08, 2007; 2007 IEEE Sensors Applications Symposium Pages: 197-+ Published: 2007
- De la Rosa JJG; Moreno-Munoz A; Gallego A; Piotrkowski R; Castro E; On-Site Non-Destructive Measurement of Termite Activity Using the Spectral Kurtosis and the

- Discrete Wavelet Transform, Measurement, Volume: 43 Issue: 10 Pages: 1472-1488
Published: DEC 2010
- Ganchev T; Potamitis I; Fakotakis N; Acoustic Monitoring of Singing Insects; 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, VOL IV, PTS 1-3, Book Series: International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing ICASSP, Pages: 721-+, Published: 2007
- Le Conte S; Vaiedelich S; Thomas JH; Muliava V; de Reyer D; Maurin E; Acoustic Emission to Detect Xylophagous Insects in Wooden Musical Instrument, Journal of Cultural Heritage, Volume: 16 Issue: 3 Pages: 338-343 Published: MAY-JUN 2015
- Nowakowska M; Krajewski A; Witomski P; Bobinski P; Thermic Limitation of AE Detection Method of Old House Borer Larvae (*Hylotrupes Bajulus* L.) in Wooden Structures, Construction and Building Materials, Volume: 136 Pages: 446-449 Published: APR 1 2017
- Puntonet CG; De-la-Rosa JJG; Galiana IL; Gorriz JM; Recognition of Insect Emissions Applying the Discrete Wavelet Transform, In 3rd International Conference on Advances in Pattern Recognition Location: Bath, England Date: AUG 22-25, 2005, Lecture Notes in Computer Science Volume: 3686 Pages: 505-513 Published: 2005
- Scheffrahn RH; Robbins WP; Busey P; Su NY; Mueller RK; Evaluation of a Novel, Hand-Held, Acoustic Emissions Detector to Monitor Termites (Isoptera, Kalotermitidae, Rhinotermitidae) In Wood, Journal of Economic Entomology Volume: 86 Issue: 6 Pages: 1720-1729 Published: DEC 1993
- Tlabcaba J, Cern M, Dostal P, Pridal A; The Acoustic Emission in the Nest of the Honey Bee Depending on the Extreme Weather Conditions; Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis; Volume 62, 27, Number 1, pages 245-254, 2014
- Weaver DK; Shuman D; Mankin RW; Optimizing and Assessing the Performance of an Algorithm that Cross-Correlates Acquired Acoustic Emissions from Internally Feeding Larvae to Count Infested Wheat Kernels in Grain Samples, In 2nd Symposium of the National-Center-for-Physical-Acoustics on Insect Acoustics Location: OXFORD, MS Date: SEP 06-07, 1995, Applied Acoustics Volume: 50 Issue: 4 Pages: 297-308 Published: APR 1997



DODRŽENÍ MINIMÁLNÍ POŽADOVANÉ RADIOGRAFICKÁ JAKOST PŘI ZKOUŠENÍ SVARŮ TRUBEK MALÝCH PRŮMĚRŮ DLE NORMY ČSN EN ISO 17636-1

MINIMAL REQUIRED RADIOGRAPHIC QUALITY WHILE PERFORMING TESTING OF WELDS ON SMALL DIAMETER PIPES ACC. TO ČSN EN ISO 17636-1

Aleš PETRŮ¹, Bohuslav KOLÁŘ², Tomáš ZAVADIL²

1) ČVUT v Praze, Fakulta Strojní, Technická 4, Praha 6, 166 07, CZ

2) ATG, s.r.o., Toužimská 771, Prague 9, 199 02, CZ

Contact e-mail: kolar@atg.cz

Abstrakt

Tento článek popisuje problém zkoušení trubek malých průměrů technikou prozařování přes dvě stěny s obrazem obou stěn a experimentálně prokazuje, že při umístění měrky na stranu filmu nemusí být dosažena požadovaná radiografická jakost dle normy ČSN EN ISO 17636-1 na straně zdroje. Současně také poukazuje na skutečnost, že na straně filmu je požadovaná jakost splněna i pro případy, kdy je ohnisková vzdálenost snížena na polovinu proti požadavkům normy. Tato skutečnost je v praxi využívána, avšak může vést k závažným pochybením při vyhodnocování přípustnosti indikací.

Klíčová slova: potrubí, radiografická jakost, ISO 17636-1, drátková měrka

Abstract

This paper describes problem of testing of small diameter pipes using double wall double image technique and experimentally proves, that when operator places image quality indicator on the film side the minimal required radiographic quality in accordance with ČSN EN ISO 17636-1 may not be achieved in all volume of tested pipe. At the same time also points to fact that radiographic quality on the film side is acceptable even when the minimal requirements for source to film distance are decreased to an half. This fact is used in the practice and may leads to serious misconducts in evaluation of indication.

Key words: pipe, radiographic quality, ISO 17636-1, wire quality indicator

1. Úvod

Při zkoušení trubek malých průměrů (cca do 100 mm) technikou prozařování přes dvě stěny s obrazem obou stěn v určitých případech může nastat situace, kdy navzdory dodržení postupu dle předepsané normy, nepovede k zajištění dostatečné radiografické jakosti pro celou oblast zájmu na dané součásti, a tím snížení pravděpodobnosti detekce všech požadovaných vad. To vede k nesprávnému vyhodnocení přípustnosti součástí.

I přesto, že tento problém (související s umístěním radiografické měrky na stranu zdroje či na stranu filmu) je dlouhodobě znám, není v žádné publikaci dostatečně, kvalitně a jednoznačně formulován se všemi svými dopady. Tento problém je velmi významný především u provádění radiografických zkoušek podle normy ČSN EN ISO 17636-1.

Tento článek shrnuje výsledky měření provedených v rámci bakalářské práce prvního autora pod odborným vedením specialistů z firmy ATG. Tato práce popsala detailně problém zkoušení trubek technikou prozařování přes obě stěny s obrazem obou stěn a srovnala vliv umístění radiografické měrky na stranu zdroje a na stranu filmu na radiografickou jakost v závislosti na nastavení procesu (vliv ohniskové vzdálenosti a citlivosti filmu).

2. Vymezení problému

Při použití techniky prozařování přes dvě stěny s obrazem obou stěn se vyhodnocuje celý svar trubky najednou. Je tedy nezbytné, aby byla zajištěna radiografická jakost v celé oblasti zájmu (tedy na straně filmu i na straně zdroje). Pokud se radiografická měrka umístí na stranu zdroje a na výsledném radiogramu je vidět dostatečný počet elementů měrky, je zajištěna dostatečná radiografická jakost i na straně filmu.

Za předpokladu, že je radiografická měrka posunuta blíže k filmu, ale SFD (source to film distance) je konstantní, dochází k zvyšování pozorované radiografické jakosti. To je vyvoláno snížením vlivu geometrické neostrosti při zobrazení radiografické měrky na filmu. V praxi lze radiografickou měrku umístit pouze na stranu zdroje nebo na stranu filmu. Při umístění radiografické měrky na film, je geometrická neostrost téměř nulová. Z tohoto vyplývá, že při dosažení radiografické jakosti při umístění měrky na spodní stranu trubky (stranu filmu) automaticky prohlásit, že bude dosažena ve zbytku prozařované části (nad měrkou, tj. na straně zdroje).

ČSN EN ISO 17636-1 povoluje za určitých okolností umístění radiografické měrky přímo na film. Nedefinuje však jednoznačné podmínky, kdy se může radiografická měrka umístit na film a kdy nikoliv.

V praxi je právě nejednoznačnost požadavků pro umístění radiografické měřky na straně filmu používána pro zamaskování nedovoleného zmenšení vzdálenosti ohnisko-výrobek pod minimální požadovanou hodnotu dle normy. Tím se výrazně sníží expoziční čas s dosažením požadované pozorované radiografické jakosti. Taková radiografická jakost je však splněna jen na straně filmu. Pokud se necelistvost bude nacházet blíže zdroji záření, může dojít k přehlédnutí nebo nesprávnému vyhodnocení její indikace.

3. Návrh experimentu

Cílem bylo dokázat, že 1) při umístění radiografické měřky na straně filmu může nastat situace, že na straně zdroje prozařovaného předmětu nebude dosažena požadovaná radiografická jakost dle normy ČSN EN ISO 17636-1, a 2) že radiografická jakost může být dosažena na straně filmu i v případech, kdy není dodržen normativní požadavek pro ohniskovou vzdálenost.

Experiment zahrnoval a analyzoval fyzikální vlivy. Vliv lidského faktoru, přestože nezanedbatelný, analyzován nebyl a byl v maximální míře odstíněn nezávislým posuzováním skupinou vyhodnocovatelů.

Pro srovnání vlivu umístění měřky na stranu zdroje (Z) a na stranu filmu (F) byly použity 2 měřky při jedné expozici, každá na patřičné straně.

Experiment byl proveden na přístroji Baltospot CERAM 235 (70 – 235kV; 0,1 – 5 mA). Bylo posuzováno 10 vzorků o nominálních průměrech 10, 20, .., 100 mm (viz Tabulka 1).

Tabulka 1 Použité rozměry vzorků a typ materiálu dle ČSN 420002.

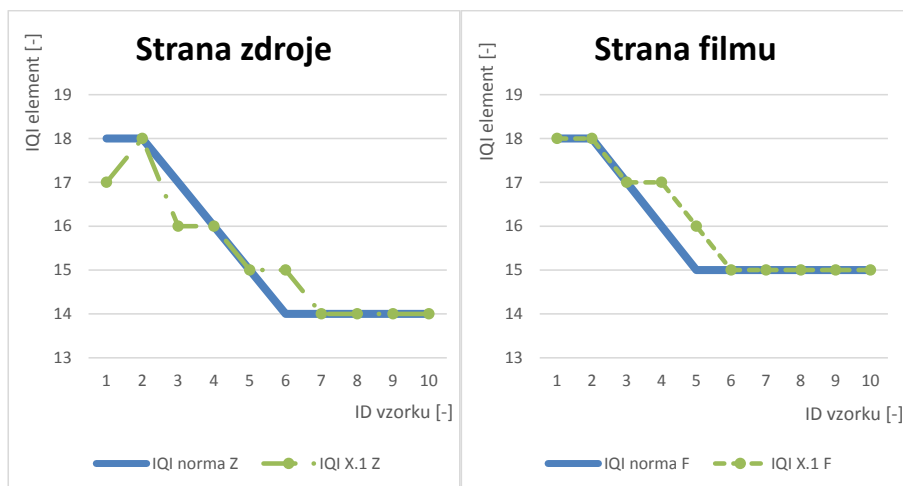
ID vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
De [mm]	10	20	30	40	51	60	75	80	89	100
t [mm]	1	1	2	3	4	6	5	5	4,5	6
Materiál	15 130	15 130	17 347	17 347	11 500	11 500	11 500	11 500	11 500	11 500

V tomto článku jsou uváděny výsledky ze dvou skupin měření. Skupina č. 1 byla provedena dle minimálních normativních požadavků ČSN EN ISO 17636-1. U skupiny č. 2 bylo měření provedeno s poloviční minimální ohniskovou vzdáleností proti požadavku dle ČSN EN ISO 17636-1 (byl zde porušen normativní předpis), ostatní požadavky byly dodrženy stejně jako u skupiny 1.

4. Výsledky

Plné (modré) čáry na následujících grafických zobrazeních znázorňují referenční hodnoty (požadavek dostatečné radiografické jakosti dle normy) a čárkované čáry pozorovanou skutečnost u konkrétních vzorků. Pokud se naměřená hodnota nachází pod referenční křivkou, nepodařilo se uspokojit požadavky normy, naopak pokud se nachází nad ní, radiografická jakost byla vyšší než minimálně požadovaná hodnota dle normy. Hodnoty korelující s referenční křivkou odpovídají očekávanému výsledku dle normy.

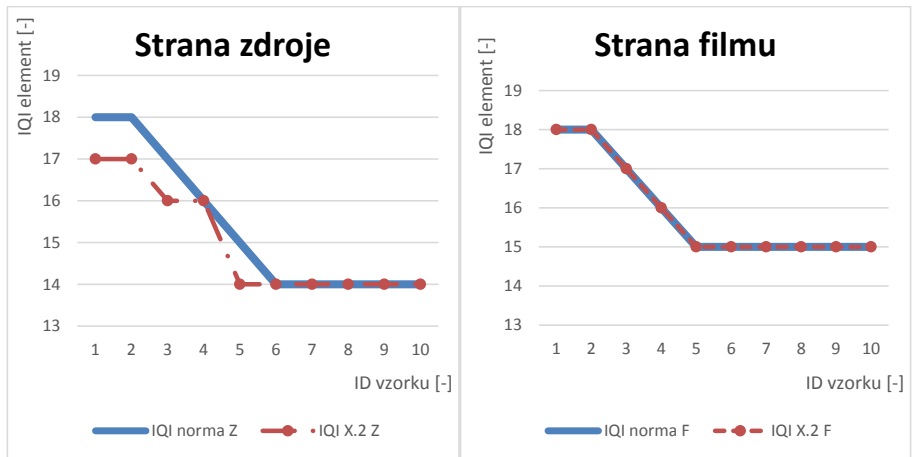
Skupina 1 – minimální požadavky dle normy ISO 17636-1



Obrázek 1 Grafické znázornění srovnání požadavku normy ČSN EN ISO 17636-1 a reálně pozorovaných drátků radiografické měřky pro skupinu č. 1. Uvedený obrázek nepopisuje funkční závislost, spojnice mezi body je použita z důvodu přehlednosti.

U vzorků č. 1 a č. 3 s radiografickou měrkou umístěnou na straně zdroje nebyla dosažena požadovaná radiografická jakost. U všech ostatních případů na zdrojové straně byla radiografická jakost totožná, nebo lepší než požadavek. Na filmové straně je ve všech případech radiografická jakost totožná, nebo lepší, než je požadavek.

Skupina 2 – Minimální požadavky dle normy ISO 17636-1 s poloviční ohniskovou vzdáleností



Obrázek 2 Grafické znázornění srovnání požadavku normy ČSN EN ISO 17636-1 a reálně pozorovaných drátků radiografické měrky pro skupinu č. 2. Uvedený obrázek nepopisuje funkční závislost, spojnice mezi body je použita z důvodu přehlednosti.

U vzorků č. 1, č. 2, č. 3 a č. 5 nebyla dosažena požadovaná radiografická jakost na zdrojové straně. U všech ostatních vzorků na zdrojové straně radiografická jakost dosažena byla. Na filmové straně byla hodnota radiografické jakosti totožná s požadovanou pro všechny vzorky.

5. Diskuse

U skupiny č. 1 byly splněny minimální požadavky normy ISO 17636-1 v plném rozsahu. Z experimentálního měření vyplývá, že při umístění radiografické měrky na stranu filmu je ve všech případech dosažena dostatečná radiografická jakost dle požadavku normy ISO 17636-1. Lze tedy říci, že pokud by operátor umístil radiografickou měrku na stranu filmu, tak má jistotu dostatečné radiografické jakosti (při prozařování podobných vzorků, které byly použity v experimentu).

I přes dodržení všech požadavků normy ČSN EN ISO 17636-1 nedošlo u některých vzorků u trubek s prozařovanou tloušťkou $s = 2 \cdot t < 8$ mm ve skupině měření č. 1 při umístění měrky na straně zdroje k dosažení minimální radiografické jakosti. Nesplnění požadavků normy je na základě provedeného experimentu považováno jako nahodilé (nepodařilo se jednoznačně určit, za jakých okolností k nesplnění dochází). To znamená, že *požadavky normy ČSN EN ISO 17636-1 jsou pro případ umístění měrky na stranu zdroje nedostatečné, neboť při jejich splnění nelze zajistit ve všech případech dostatečnou radiografickou jakost v celé oblasti zájmu na daném vzorku.*

Při experimentu ve skupině měření č. 2 byla použita poloviční vzdálenost ohnisko-výrobek, než je minimální dle ČSN EN ISO 17636-1. Z naměřených hodnot je patrné, že *na straně filmu radiografická jakost vyšla opět ve všech případech jako dostačující, a to i přesto, že nebyl dodržen požadavek ohniskové vzdálenosti*. Pokud operátor naměří na straně filmu požadovanou radiografickou jakost, velmi těžko lze prokázat, že vzdálenost ohnisko-výrobek nebyla dostatečná.

Naopak při umístění radiografické měřky na stranu filmu je patrný celkový posun hodnot radiografické jakosti směrem k horším výsledkům. Při poloviční vzdálenosti ohnisko-výrobek vlivem geometrické neostrosti nebyla ve 4 z 5 případů radiografická jakost dosažena pro vzorky s prozařovanou tloušťkou $s = 2 \cdot t < 8 \text{ mm}$. To je způsobeno geometrickou neostrotí, která se zvětšila díky poloviční vzdálenosti ohnisko-výrobek na dvojnásobek.

Z výsledků je patrné, že pokud operátor umístí měřku na stranu filmu, tak i přes poloviční vzdálenost ohnisko-výrobek může tento radiogram být vyhodnocen dle ČSN EN ISO 17636-1 jako vyhovující. Takto provedená zkouška bude znamenat menší časovou a finanční náročnost pro poskytovatele. Z vypočtených expozičních časů pro skupiny vzorků č. 1 a č. 2 dále vyplývá, že při zkrácení vzdálenosti ohnisko-výrobek na polovinu, lze v průměru zkrátit dobu expozice 3krát. Z jednoduché úvahy plyne, že při poloviční vzdálenosti ohnisko-výrobek lze dosáhnout snížení variabilních nákladů (hodinová sazba operátora) na 33 %.

Takto provedená zkouška ale bude také znamenat velké bezpečnostní riziko, neboť na straně zdroje nebude ve většině případů dosažena požadovaná radiografická jakost. V případě výskytu vad v oblasti na straně zdroje může dojít k zásadním pochybáním při vyhodnocení přípustnosti vad, která bude na odpovědnost poskytovatele.

O této skutečnosti je proto třeba informovat a navrhnout taková opatření, která povedou k omezení nevhodného využití této normy. Zavedení efektivních nápravných opatření je v konečném zájmu obou smluvních stran, poskytovatele i odběratele.

6. Shrnutí a závěr

Tento článek analyzuje problém zkoušení trubek malých průměrů při technice prozařování přes dvě stěny s obrazem obou stěn. Experimentálně potvrzuje, že drátkové umístění měřky na stranu filmu a na stranu zdroje vede k zcela rozdílným pozorovaným hodnotám radiografické jakosti a upozorňuje na skutečnost, že při umístění měřky na stranu filmu je pozorovaná radiografická jakost dostatečná při splnění minimálních požadavků normy ČSN EN ISO 17636-1, ale i při snížení

ohniskové vzdálenosti na 50%. Naopak při umístění měrky na straně filmu nejsou požadavky splněny u některých vzorků i v případě dodržení všech normativních požadavků. Tato dlouhodobě přehlížená slabina normy ČSN EN ISO 17636-1 může být zneužita pro zkrácení expozičních časů a tím i nákladů při fiktivním současném dodržení normativních požadavků. O této skutečnosti je proto třeba informovat a zvolit opatření, která povedou k omezení nevhodného využití této normy.

7. Reference

- [1] ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1:Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Vydání 1, Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.



VYHODNOCENÍ VELIKOSTI VAD PŘI ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM PODLE AMPLITUDY SIGNÁLU S POUŽITÍM KŘIVEK DAC A AVG/DGS DIAGRAMŮ

EVALUATION OF THE DEFECT SIZE IN THE ULTRASONIC INSPECTION ACCORDING TO THE AMPLITUDE OF SIGNAL WAVEFORM USING DAC CURVES AND AVG/DGS DIAGRAMS

Ing. Alexandr POPOV

PTS Josef Solnař, s.r.o.

popov@ptsndt.com

Abstrakt

V tomto článku jsou uvedeny základní principy používání vyhodnocovacích křivek DAC a diagramů AVG/DGS a jejich odlišnosti při používání v praxi.

V článku jsou zmíněny výhody a nevýhody obou technik hodnocení, jakož i případné chyby při jejich používání, které mohou vést k významným nejistotám – chybám – při hodnocení indikací diskontinuit.

Klíčová slova: *nedestruktivní zkoušení ultrazvukem; útlum; součinitel útlumu; náhradní velikost diskontinuity; vyhodnocovací křivka; AVG; DGS; DAC.*

Abstract

This article describes the basic principles of using the DAC evaluation curves and DGS/AVG diagrams and their differences in use in practice.

The article highlights the advantages and disadvantages of both evaluation techniques as well as possible mistakes in their use that can lead to significant uncertainties – errors – when evaluating discontinuity indications.

Key words: *non-destructive ultrasonic testing; attenuation; coefficient of attenuation; equivalent size of a discontinuity; evaluation curve; AVG; DGS; DAC.*

1. Úvod

Jedním z hlavních úkolů nedestruktivního zkoušení (zkoušení bez porušení) je vyhledávání, charakterizace a vyhodnocování vad v základních materiálech a svarech za účelem zajištění bezpečnosti a provozní spolehlivosti strojních zařízení a komponent. V průmyslové výrobě a pak při provozních kontrolách se stále ve větší míře používají nejrůznější metody a techniky nedestruktivního zkoušení, mezi nimiž má nezastupitelnou úlohu i zkoušení ultrazvukem, zejména klasická pulzní odrazová technika.

Základní princip klasické pulzní odrazové techniky zkoušení ultrazvukem spočívá ve vysílání ultrazvukových pulzů do zkoušeného materiálu a následném přijímání a zpracovávání odražených signálů (ech) od diskontinuit, které se nachází v cestě ultrazvukového svazku, zejména časů návratu a amplitud přijímaných signálů, podle kterých se pak hodnotí poloha a velikost zjištěných diskontinuit (vad).

Tento článek se dále zabývá pouze hodnocením velikosti diskontinuit na základě informací získaných při pulzním odrazovém zkoušení ultrazvukem.

2. Obecně

Vzhledem k tomu, že při zkoušení ultrazvukem konvenčními technikami jsou ve většině případů k dispozici pouze informace o vzdálenosti (zvukové dráze) a amplitudě signálu (výšce echa) od nečistoty, je konečné objektivní vyhodnocení obecně omezeno. Při ozvučení z jednoho směru (jednou sondou, pod jedním úhlem) je jistá pouze vzdálenost k nejbližšímu okraji diskontinuity (shluku diskontinuit), zatímco ostatní parametry, jako jsou reálné rozměry, tvar a prostorová orientace diskontinuity jsou „zkombinovány“ ve velikosti amplitudy signálu. Při ozvučování z více směrů (několika sondami, pod několika různými úhly) lze dospět k o něco přesnější představě o skutečné velikosti a charakteru diskontinuity, avšak stále jen do určité míry, zejména vzhledem k omezeným prostředkům a často také kvůli omezené přístupnosti na zkušební povrchu.

2.1. Náhradní velikost vady – náhradní vada

Za účelem sjednocení způsobů hodnocení velikosti zejména menších vnitřních diskontinuit byl do zkoušení ultrazvukem zaveden pojem „náhradní velikost vady“ neboli „náhradní vada“. Podle definice je za náhradní velikost diskontinuity (vady) považován průměr, D , hladkého rovinného reflektoru ve tvaru disku, jehož odrazová plocha je kolmá na směr šíření ultrazvukového svazku a který by se nacházel ve stejné vzdálenosti zvukové dráhy a dával by stejnou amplitudu odraženého signálu (echa) jako hodnocená diskontinuita ve zkoušeném materiálu, přičemž tato definice platí pouze pro reflektory menší velikosti, než je průřez ultrazvukového svazku v dané vzdálenosti. Z této definice je zřejmé, že „náhradní“ velikost diskontinuity bude jen zřídka odpovídat „skutečné“ velikosti – v převážné většině případů bude

skutečná velikost diskontinuity větší než její „náhradní“ velikost. Přesto je tento způsob hodnocení velikosti diskontinuit při konvenčním ultrazukovém zkoušení stále jedním z nejpoužívanějších.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\pi \frac{D_1^2}{4}}{\pi \frac{D_2^2}{4}} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (1)$$

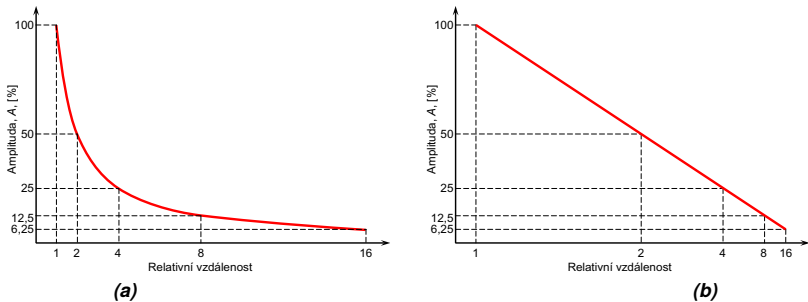
Amplituda odraženého signálu, **A**, od diskontinuity o náhradní velikosti, **D**, je přímo úměrná její ploše, **S**, resp. druhé mocnině průměru, **D**:

2.2. Závislost amplitudy na vzdálenosti

Při šíření ultrazukového svazku ve zkoušeném materiálu dochází k jeho útlumu vlivem struktury materiálu, v důsledku čehož je amplituda odraženého signálu (echa), **A**, od reflektoru určité velikosti nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti odrazové plochy (reflektoru) od sondy (měniče), **L**:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_2^2}{L_1^2} \quad (2)$$

Tato závislost amplitudy odraženého signálu na vzdálenosti má tvar logaritmické křivky (Obr. 1 (a)), případně přímky, použijeme-li logaritmickou stupnici relativní vzdálenosti (Obr. 1 (b)).



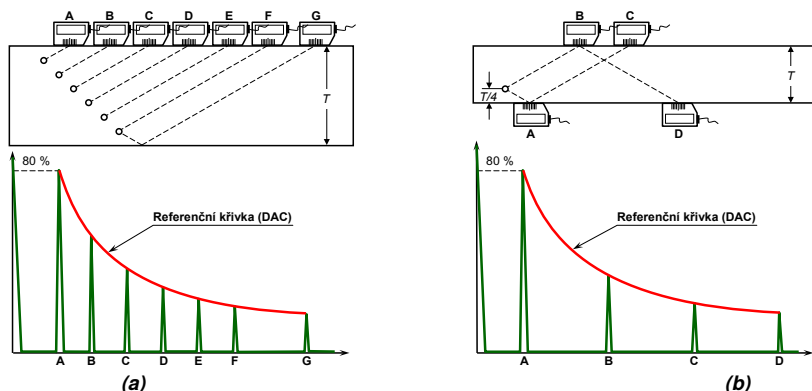
Obr. 1 – Závislost amplitudy na vzdálenosti.

3. Referenční křivky

3.1. DAC

Referenční křivka DAC (z angličtiny – Distance **A**mplitude **C**orrection curve) vyjadřuje závislost amplitudy ultrazukového signálu odraženého od reflektoru určité velikosti a také tvaru – vývrt s plochým dnem, FBH/DSR (**F**lat **B**ottomed **H**ole / **D**isc **S**haped **R**eflector), nebo boční vývrt, SDH (**S**ide **D**rilled **H**ole) – na zvukové dráze (vzdálenosti od bodu výstupu UZ sondy).

Podle všech norem a specifikací musí být referenční křivka DAC vytvořena, při neměnném zesílení UZ přístroje, zaznamenáním maximálních amplitud odrazů **od reálných umělých reflektorů známé velikosti (a tvaru)** v různých vzdálenostech (zvukových drahách) **od bodu výstupu sondy v reálném materiálu** (v referenční měrce), který by měl být stejný nebo alespoň se stejnými akustickými vlastnostmi (rychlost šíření a útlum ultrazvuku) jako materiál, který má být zkoušen. Referenční měrka může mít několik referenčních vývrtů v různých hloubkách (Obr. 2 **(a)**) nebo jen jeden vývrt (Obr. 2 **(b)**), což je v mnoha případech postačující.

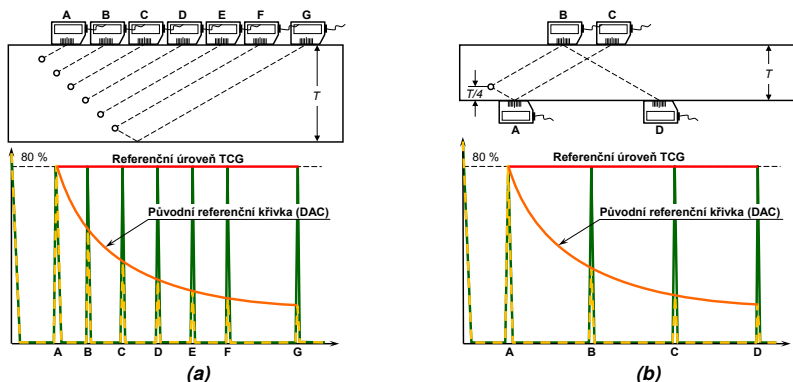


Obr. 2 – Referenční křivka – DAC.

Moderní digitální UZ přístroje umožňují vytvořit křivku DAC přímo na obrazovce postupným „snímáním“ maximálních amplitud ech od umělých reflektorů v různých hloubkách v referenční měrce.

3.2. TCG

TCG (Time Corrected Gain) – časově korigované zesílení – se používá a vytváří v podstatě stejným způsobem a za stejných podmínek jako křivka DAC. Musí se zaznamenat amplitudy odrazů od reálných reflektorů známé velikosti v různých vzdálenostech v materiálu. Pak po zapnutí funkce TCG provede UZ přístroj „narovnání“ amplitud signálů z různých vzdáleností na stejnou úroveň, zpravidla na úroveň signálu od prvního, tj. nejbližšího reflektoru.



Obr. 3 – Referenční přímka s použitím funkce TCG (na základě DAC).

Funkce TCG u většiny digitálních UZ přístrojů navazuje na DAC a dá se mezi nimi libovolně přepínat.

3.3. DGS/AVG

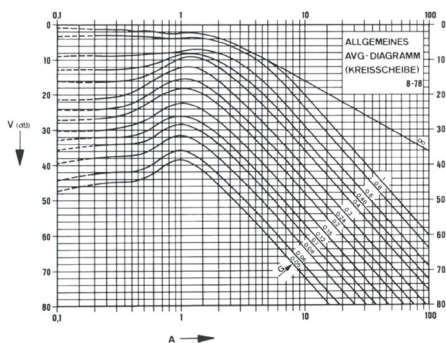
Obecný diagram DGS/AVG (Obr. 4) vyjadřuje **teoretickou** závislost amplitudy UZ signálu odraženého od reflektoru určité velikosti na zvukové dráze (vzdálenosti **od měniče** UZ sondy), přičemž relativní zvuková dráha, **A**, je uvedena v jednotkách délky blízkého pole, **N**, a relativní velikost reflektoru, **G**, je uvedena ve zlomcích velikosti měniče sondy, **D**. Současná zkratka DGS pochází z angličtiny – **D**istance, **G**ain, **S**ize – vzdálenost, zesílení, velikost; zkratka AVG je její obdobou z němčiny – **A**bstand, **V**erstärkung, **G**röße, která se převážně používala dříve a je stále používaná.

Obecný diagram DGS zohledňuje útlum ultrazvuku se vzdáleností pouze vlivem rozbíhavosti ultrazvukového svazku –

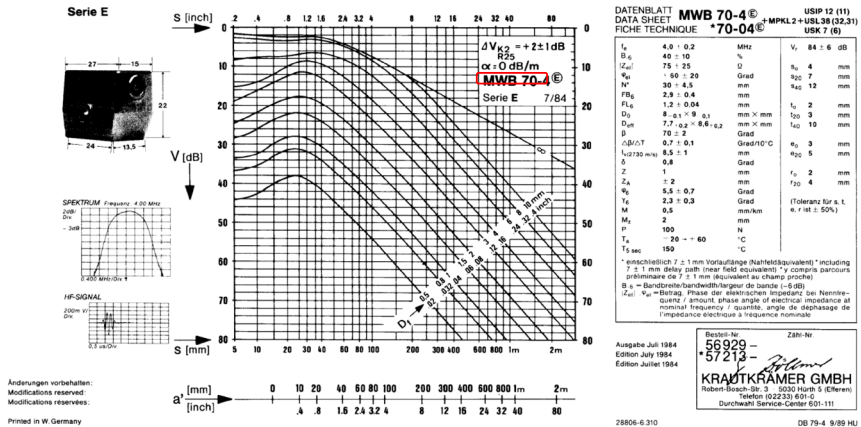
vůbec nezohledňuje útlum způsobený strukturou materiálu ($\alpha = 0$ dB/m).

Dalším omezením obecného diagramu DGS (stejně jako výpočtové metody používané u digitálních UZ přístrojů) je nevhodnost pro použití se širokopásmovými sondami.

Soubory křivek DGS pro konkrétní sondy (diagramy DGS) jsou zpravidla součástí datových listů UZ sond (viz Obr. 5) a jsou dodávány výrobcem sond.



Obr. 4 – Obecný AVG diagram.



Obr. 5 – Příklad datového listu s DGS diagramem pro sondu MWB 70-4.

Je nutno poznamenat, že standardně jsou v diagramech DGS uvažovány reflektory ve tvaru disku (DSR/FBH), které jsou ideálně hladké a kolmé vůči ose dopadajícího UZ svazku – tj. reflektory o tzv. náhradní velikosti vyjádřené průměrem reflektoru. Další podstatnou skutečností je to, že v diagramech od výrobců sond je uvažován nulový součinitel útlumu UZ vln ve zkoušeném materiálu ($\alpha = 0 \text{ dB/m}$). To znamená, že DGS diagramy dodávané se sondami vyjadřují v podstatě ideální (teoretickou) závislost amplitudy odrazu od reflektoru na vzdálenosti (zvukové dráze).

4. Používání referenčních křivek v praxi

4.1. DAC

Referenční křivka DAC se na obrazovce UZ přístroje vytvoří postupem popsaným ve 3.1 výše. Díky tomu, že k vytvoření křivky DAC se vždy používá referenční měrka zhotovená ze stejného materiálu (nebo alespoň se stejnými akustickými vlastnostmi), jako je zkoušený materiál, je při hodnocení amplitud signálů od případných diskontinuit zahrnut útlum ultrazvuku ve zkoušeném materiálu.

Navíc, vzhledem k tomu, že normy a předpisy většinou vyžadují, aby stav povrchu referenční měrky (zejména drsnost, textura a zakřivení) odpovídal stavu povrchu zkoušeného materiálu, není nutno uvažovat žádnou korekci ztrát přenosem.

Tudíž, při hodnocení diskontinuit s použitím referenční křivky DAC lze poměrně přesně určit jejich **náhradní velikost** – není nutno uvažovat žádnou korekce.

Nevýhodou však je nutnost použít referenční měrky s vývrtky a s tím spojené náklady na jejich výrobu, dokumentaci (každá referenční měrka musí být doprovázena patřičnou dokumentací – výkresem, materiálovým atestem, protokolem

o rozměrové kontrole atd.), údržbu a v neposlední řadě také na skladovací prostory – s časem může počet vyrobených referenčních měrek různých rozměrů a z různých materiálů dosahovat desítek až stovek kusů.

4.2. DGS/AVG

Na rozdíl od referenčních křivek DAC, k vytvoření referenčních křivek DGS není zapotřebí používat žádné speciálně vyrobené referenční měrky – postačí kalibrační měrka č. 1 (ISO 2400) a kalibrační měrka č. 2 (ISO 7963).

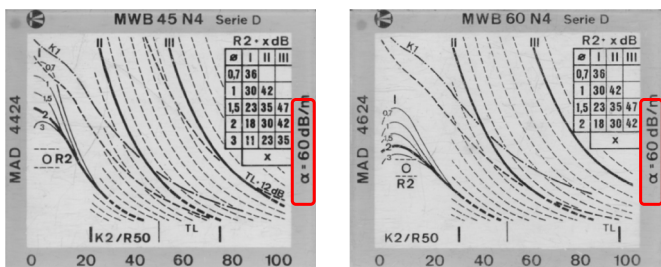
Díky tomu je vyhodnocování indikací diskontinuit podle referenčních křivek DGS stále jedním z nejrozšířenějších způsobů, zejména s vývojem digitálních UZ defektoskopů umožňujících jejich snadné používání.

Referenční křivky DGS by však neměly být používány k hodnocení indikací, které se nachází v blízkém polí UZ sondy – v oblasti před vrcholem referenční křivky.

Před vytvořením křivky DGS se na obrazovce digitálního UZ přístroje je nezbytné zadat základní parametry UZ sondy – jmenovitá frekvence, tvar měniče, efektivní rozměry měniče, délka zpoždění v plexi klínu (některé UZ defektoskopy mají tyto parametry pro některé sondy uloženy v paměti od výrobce).

Pak se nejdříve v příslušném menu přístroje zvolí typ referenčního reflektoru (koncové echo – BW, reflektor ve tvaru disku – DSR/FBH, boční vývrt – SDH) a se sondou na příslušné měrce (při zkoušení přímou sondou – na zkoušeném materiálu) se potom získá signál (odraz) od referenčního reflektoru, který musí překročit příslušnou bránu monitoru (v bráně nesmí být žádný jiný signál s větší amplitudou) a provede se potvrzení nalezení referenčního reflektoru příslušným tlačítkem na přístroji. Následně se vykreslí křivka DGS, přičemž u většiny UZ defektoskopů lze pak zadat (změnit) požadovanou náhradní velikost a křivka bude pak odpovídajícím způsobem upravena automaticky.

V továrním nastavení (z výroby) je prakticky u všech UZ přístrojů nastavena hodnota součinitele útlumu UZ pro materiál měrky i pro zkoušený materiál $\alpha = 0$ dB/m!!! Proto ještě před vykreslením křivky DGS (podle typu přístroje) je nutno v příslušných nabídkách přístroje vždy zadat aktuální (nebo alespoň předpokládanou) hodnotu součinitelů útlumu UZ vln v měrce a ve zkoušeném materiálu, které by měly být zjištěny (změřeny) předem. Jako vodítko lze použít hodnoty součinitele útlumu udávané na předsádkových stupnicích pro analogové přístroje: pro úhlové sondy se jmenovitou frekvencí 2 MHz je to 8 dB/m a pro úhlové sondy se jmenovitou frekvencí 4 MHz je to až 60 dB/m.



Obr. 6 – Příklad předsádkových stupnic pro UZ přístroj USK 7.

Pokud jsou všechny požadované parametry sondy, hodnoty součinitele útlumu a korekce ztrát přenosem (kvůli rozdílu stavu povrchu kalibrační měrky a zkoušeného objektu) zadány správně, budou případné diskontinuity s použitím referenční křivky DGS hodnoceny správně z hlediska jejich náhradních velikostí. Některé digitální přístroje pak udávají hodnotu, o kolik dB amplituda signálu od diskontinuity překročila (podkročila) referenční křivku, nebo přímo náhradní velikost diskontinuity v mm.

5. Chyby při používání referenčních křivek DAC a AVG/DGS

5.1. DAC

Při používání referenčních křivek DAC je nezbytné dodržet dvě základní podmínky:

- 1) referenční měrka musí být zhotovena ze stejného materiálu jako zkoušený objekt (nebo alespoň z materiálu s podobnými akustickými vlastnostmi – rychlost šíření UZ vln a součinitel útlumu);
- 2) stav povrchu referenční měrky (drsnot, textura, zakřivení) musí odpovídat stavu povrchu zkoušeného objektu.

Zdrojem chyb při hodnocení náhradní velikosti diskontinuit bývá právě nedodržení jednoho (nebo obou) z těchto základních předpokladů.

5.2. DGS/AVG

Při používání referenčních křivek DGS vytvářených na digitálních ultrazvukových defektoskopech, stejně jako přenášených na obrazovku analogového defektoskopu „ručně“ z DGS diagramů dodávaných se sondami, se v běžné praxi dosti často (spíše skoro vždy) zapomíná na několik skutečností, které jsou velmi podstatné pro hodnocení náhradních velikostí případných diskontinuit:

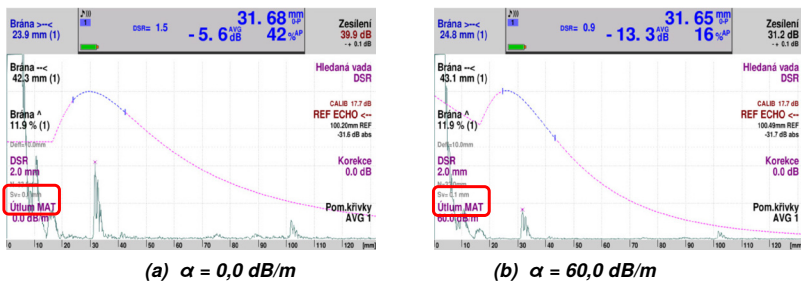
- zanedbání součinitele útlumu ultrazvuku ve zkoušeném materiálu;
- zanedbání součinitele útlumu ultrazvuku v kalibrační měrce;
- zanedbání korekce zesílení při nastavení citlivosti podle koncového echa od oblouku kalibrační měrky;

- použití skutečných rozměrů měniče sondy místo efektivních rozměrů;
- zanedbání ztrát přenosem – rozdílný stav povrchu kalibrační měřky a zkoušeného objektu.

5.2.1. Zanedbání součinitele útlumu ultrazvuku ve zkoušeném materiálu

Při zkoušení přímou sondou a nastavení citlivosti na základě koncového echa získaného na zkoušeném materiálu dochází převážně k nadhodnocení reálných diskontinuit v důsledku toho, že referenční koncové echo se nachází v největší vzdálenosti v mezích zkušebního rozsahu časové základny.

Na Obr. 7 (a) a (b) je vidět, že stejná diskontinuita ve zvukové dráze 31,7 mm je bez zohlednění útlumu v materiálu „nahodnocena“ o 7,7 dB a její náhradní velikost je 1,5 mm, přičemž skutečná náhradní velikost (D_{DSR}) je 0,9 mm (téměř poloviční).

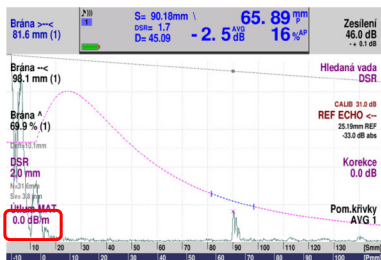


Obr. 7 – Vyhodnocení stejné diskontinuity s použitím křivky DGS vytvořené na základě koncového echa (KE) ve zvukové dráze 100 mm bez zohlednění a se zohledněním součinitele útlumu (α) ve zkoušeném materiálu.

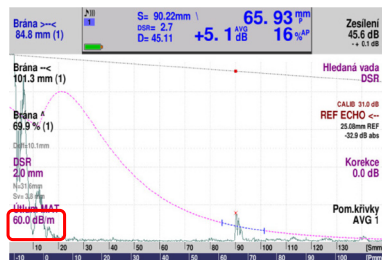
Amplituda signálů odrazů od případných diskontinuit před koncovým echem (KE) ve zkoušeném materiálu (se součinitelem útlumu vždy větším než 0 dB/m), která překročí referenční křivku vytvořenou bez zohlednění útlumu ve zkoušeném materiálu, nemusí vždy překročit také křivku zohledňující útlum. To znamená, že diskontinuita může být vyhodnocena jako nepřipustná, i když fakticky ještě nepřekročila mez přípustnosti. Takovéto vyhodnocení lze ještě tolerovat, protože všechny diskontinuity budou z hlediska požadavků na kvalitu vyhodnoceny s určitou rezervou – tzv. „chyba na bezpečné straně“.

Avšak při zkoušení úhlovou sondou a nastavení citlivosti podle křivky DGS na základě koncového echa získaného na kalibrační měřce, zejména na měřce č. 2 (například, R25), často dochází k dosti významnému podhodnocení náhradní velikosti diskontinuit v důsledku toho, že referenční koncové echo se nenachází v největší vzdálenosti v mezích zkušebního rozsahu časové základny.

Na Obr. 8 (a) a (b) je vidět, že stejná diskontinuita ve zvukové dráze 90 mm je bez zohlednění útlumu v materiálu „podhodnocena“ o 7,6 dB a její náhradní velikost je 1,7 mm, přičemž skutečná náhradní velikost (D_{DSR}) je 2,7 mm.



(a) $\alpha = 0,0 \text{ dB/m}$



(b) $\alpha = 60,0 \text{ dB/m}$

Obr. 8 – Vyhodnocení stejné diskontinuity s použitím křivky DGS vytvořené na základě koncového echa (KE) na kalibrační měrce č. 2 od poloměru R25 bez zohlednění a se zohledněním součinitele útlumu (α) ve zkoušeném materiálu.

Amplituda odrazů od případných diskontinuit ve vzdálenosti (zvukové dráze) větší, než je délka blízkého pole použité sondy ve zkoušeném materiálu (v němž je součinitel útlumu vždy větší než 0 dB/m), překročí křivku zohledňující útlum vždy dříve, než překročí referenční křivku vytvořenou bez započtení útlumu. To znamená, že diskontinuita může být vyhodnocena jako přípustná, přestože fakticky již překročila mez přípustnosti. Takovéto vyhodnocení nelze v žádném případě považovat za správné, protože všechny diskontinuity nacházející se ve vzdálenosti (zvukové dráze) větší, než je délka blízkého pole použité sondy, budou z hlediska požadavků na kvalitu podhodnoceny. Například, když se použije malá úhlová sonda se jmenovitou frekvencí 4 MHz, s nastavením zkušební citlivosti podle křivky DGS na kalibrační měrce č. 2 (KE od R25), bude diskontinuita ve vzdálenosti 125 mm od bodu výstupu sondy, při součiniteli útlumu $\alpha = 60 \text{ dB/m}$ (to je hodnota součinitele útlumu uvedena na předsádce – viz Obr. 6) podhodnocena až o 12 dB!!!

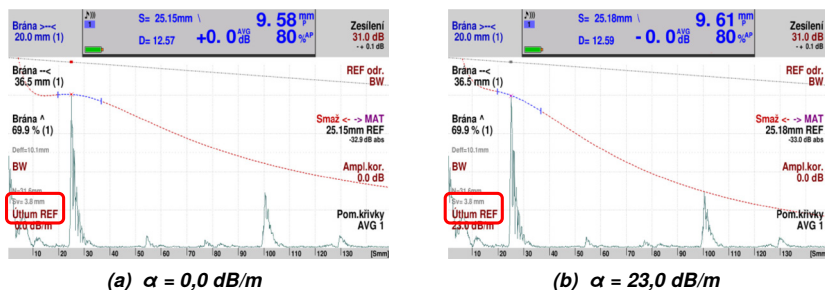
Proto při používání digitálních defektoskopů by měla být ještě před vykreslením křivky DGS vždy zadána hodnota součinitele útlumu UZ vln ve zkoušeném materiálu (nejlépe zjištěná měření na zkoušeném materiálu, nebo alespoň odhad – na základě předchozích zkušeností či z jiných zdrojů, například z předsádkové stupnice fy Krautkrämer (viz Obr. 6) pro obdobnou UZ sondu (stejná jmenovitá frekvence, tvar a rozměry měniče).

5.2.2. Zanedbání součinitele útlumu ultrazvuku v kalibrační měrce

Na průběh referenční křivky DGS má vliv nejen součinitel útlumu ve zkoušeném materiálu, ale také součinitel útlumu v kalibrační měrce.

Níže je uveden příklad vlivu součinitele útlumu ultrazvuku v kalibrační měrce č. 2. V prvním kroku sestrojení křivky DGS se maximalizují signály odrazu od R25 a opakovaného odrazu ve zvukové dráze 100 mm a brána monitoru se nastaví přes signál od R25. Pak se nechá automaticky vykreslit referenční křivka.

Na Obr. 9 (a) je vidět, že referenční křivka koncového echa (BW) prochází skoro 6 dB nad opakovaným koncovým echem – teoreticky by se měla dotýkat špičky opakovaného koncového echa (pokud zanedbáme vliv tvaru kalibrační měrky č. 2). K nápravě dojde až po zadání součinitele útlumu 23,0 dB/m.



Obr. 9 – Referenční křivka koncového echa (KE) na kalibrační měrce č. 2 bez zohlednění a se zohledněním součinitele útlumu (α) v kalibrační měrce č. 2.

Zanedbání hodnoty součinitele útlumu v kalibrační měrce rovněž přispívá k chybám při hodnocení náhradní velikosti případných diskontinuit.

5.2.3. Zanedbání korekce zesílení při nastavení citlivosti pro úhlovou sondu s použitím koncového echa od oblouku kalibrační měrky

Pro nastavení zkušebního zesílení při použití úhlových sond se využívají kalibrační měrky, na kterých se nastavuje referenční zesílení pro koncové echo (KE) od oblouku (pro velké sondy – R100 na kalibrační měrce č. 1; pro malé sondy – R25 na kalibrační měrce č. 2). V těchto případech však je nutno uvažovat zkreslení amplitudy KE v důsledku rozbíhavosti svazku UZ sondy a malé šířky měrky. Hodnoty korekce zesílení bývají (bohužel, ne vždy) uváděny v datových listech sond a měly by se používat, jinak bude docházet jak k podhodnocení, tak i k nadhodnocení diskontinuit – viz Tab. 1.

Tab. 1 – Hodnoty korekce zesílení, ΔV , pro malé úhlové sondy fy Krautkrämer

Typ sondy	MWB 45-2	MWB 45-4	MWB 60-2	MWB 70-2	MWB 70-4
$\Delta V_{K2/R25}$ [dB]	–	$-2 \pm 0,5$	–	–	$+2 \pm 0,5$
$\Delta V_{K1/R100}$ [dB]	$+10 \pm 1$	–	$+10 \pm 1$	$+10 \pm 1$	–

Zkušební zesílení nastavené podle referenčních křivek DGS by mělo být vždy upraveno o hodnotu korekce uvedenou v datovém listu použité sondy (nebo zjištěnou experimentálně).

5.2.4. Použití skutečných rozměrů měniče sondy místo efektivních rozměrů z datového listu sondy

Před sestrojením referenční křivky DGS na digitálním UZ defektoskopu je nutno v příslušných nabídkách do parametrů sondy uvést **efektivní rozměry měniče** z datového listu UZ sondy. Použitím skutečných jmenovitých rozměrů ze štítku sondy (které jsou vždy o 5 až 10 % větší než efektivní rozměry) dojde k chybnému výpočtu průběhu referenční křivky.

Digitální UZ přístroje vytváří křivky DGS na základě výpočtů délky blízkého pole a rozbíhavosti ultrazvukového svazku, které zahrnují právě efektivní rozměry měniče. Ze stejného důvodu je nutno znát a do UZ přístroje zadat skutečnou frekvenci sondy, která se může od jmenovité frekvence lišit o $\pm 10\%$ (EN 12668-2).

Tyto zdánlivé „maličkosti“ mohou vést k významným chybám při hodnocení náhradní velikosti diskontinuit podle referenčních křivek DGS, zejména při zkoušení objektů větších tloušťek.

5.2.5. Zanedbání ztrát přenosem – rozdílný stav povrchu kalibrační měřky a zkoušeného objektu

Vnější povrch kalibračních měrek č. 1 a č. 2 jsou opracovány na drsnost max. Ra 0,8 μm , zatímco drsnost povrchu zkoušených objektů obvykle bývá mnohem větší – povrchy po svařování, ručním broušení, odlitky apod.

V důsledku rozdílného stavu povrchu kalibrační měřky a zkoušeného objektu dochází k rozdílné účinnosti přenosu ultrazvuku ze sondy do materiálu a zpět a proto je vždy nutno uvažovat korekci na ztráty přenosem (přenosové ztráty), která je ve většině případů 2 až 4 dB, ale může být i mnohem větší, což vede vždy k podhodnocení náhradní velikosti diskontinuit, někdy i dosti významnému.

6. Závěr

Zásadní odlišností referenční křivky DAC je to, že se tato křivka vykresluje na obrazovce UZ defektoskopu nikoli na základě teoretické závislosti, nýbrž na základě amplitud odrazů od reálných reflektorů v různých hloubkách referenční měřky (etalonu) zhotovené z materiálu se stejnými akustickými vlastnostmi a se stejným stavem povrchu (drsnost, zakřivení), jako zkoušený materiál. Proto při hodnocení diskontinuit nevznikají prakticky žádné problémy.

Naproti tomu, při používání referenčních křivek DGS musí operátor ultrazvukové kontroly stále mít na paměti, že mnohé parametry, které jsou velmi podstatné pro správný a objektivní výsledek zkoušení, se musí zadávat „ručně“ – např. součinitel útlumu ultrazvuku v kalibrační měřce a ve zkoušeném materiálu, přenosové ztráty, korekce na zakřivení zkušební povrchu apod. Pokud tak neučiní, může být výsledné vyhodnocení indikací (diskontinuit) zatíženo významnou chybou – v převážné většině případů zkoušení úhlovými sondami jsou případné diskontinuity

značně podhodnoceny z hlediska jejich náhradní velikosti (nemluvě o skutečné velikosti, která je prakticky vždy ještě větší).

I přes všechny zmíněné nedostatky je vyhodnocování indikací diskontinuit podle referenčních křivek DGS stále jedním z nejrozšířenějších způsobů, zejména pomocí digitálních UZ defektoskopů umožňujících jejich snadné používání.



ROLE DEFEKTOSKOPICKÝCH METOD PŘI IDENTIFIKACI RIZIK V PRŮMYSLU

ROLE OF METHODS INVESTIGATING THE DEFECTS AT RISKS IDENTIFICATION AT INDUSTRY

Dana PROCHÁZKOVÁ*, Václav SVOBODA**

*ČVUT v Praze, **PREDITEST s.r.o.

Contact e-mail: prochazkova@fd.cvut.cz, svoboda@preditest.cz

Abstrakt

Technologická zařízení jsou důležitými základními veřejnými aktivy lidského systému, kterým je prostředí, ve kterém žijeme. Každé technické dílo je vystaveno celé řadě zdrojů rizik. Provedená detailní analýza technologických havárií ve světě i v ČR odhalila, že jednou z příčin havárií jsou svary, a to speciálně na tlakových nádobách. Předložený článek ukazuje jak případy, kdy svary již neplní svou funkci, tak i metodu vhodnou pro pravidelné sledování kritičnosti svarů.

Klíčová slova: riziko; havárie; bezpečnost; svary; metoda

Abstract

Technological facilities are basic public assets of human system that represents world in which we live. Each technical facility is exposed to whole set of risk sources. The detailed analysis of technological accidents in the world and in the CR revealed that one of the sources there are the welds, especially on the compressive vessels. The paper shows both, the cases when the welds do not fulfil their function send the method suitable for regular monitoring the weld criticality.

Key words: risk; accident; safety; welds; method

1. Úvod

Technologická zařízení jsou důležitými základními veřejnými aktivy lidského systému, kterým je prostředí, ve kterém žijeme. Cílem lidského snažení je zajistit životy, zdraví, bezpečí a rozvoj lidí. Proto lidé musí pečovat o základní veřejná aktiva, tj. i o technická díla, která lidstvu poskytují energii a další důležité komodity a služby,

a v případě kritických podmínek i zdroje pro překonání kritických situací [1]. Žádné technické dílo není v prostoru a čase osamocené; je umístěno do území a do lidské společnosti, které ho ovlivňují. Proto je vystaveno celé řadě zdrojů rizik. Článek se soustřeďuje na přehled o zdrojích rizik, která mají potenciál poškodit technická díla [2]; podrobněji se zabývá zdroji rizik, která souvisí s výrobním procesem, a to hlavně s proměnami v čase[3], které nastávají ve svarech.

Provedená detailní analýza technologických havárií ve světě i v ČR odhalila, že jednou z příčin havárií jsou svary na technologických zařízeních [3], a to speciálně na tlakových nádobách. Jde jak o zdroje rizik, které vznikají v procesu svařování, tak i o zdroje rizik, které souvisí se změnami svarů způsobených změnami materiálů a prostředí během času.

Jelikož technická díla mohou zajišťovat požadované potřeby a služby jen tehdy, když jsou bezpečná, je třeba pro zajištění bezpečnosti technických děl sledovat prioritní rizika, což ve sledovaném případě znamená pravidelně posuzovat velikost rizik spojených se svary. Předložený článek ukazuje jak případy, kdy svary již neplní svou funkci, tj. významně ohrožují bezpečnost technického díla, tj. byly či dříve nebo později mohou být zdrojem havárie, tak i metodu vhodnou pro pravidelné sledování kritičnosti svarů. Na základě výsledků posouzení kritičnosti svarů lze v konkrétních případech zavést buď zacílenou kvalitnější údržbu nebo včasnou opravu či výměnu, kterými se zabrání jedné z častých příčin havárií.

2. Rizika výrobních procesů

Analýza rizik spojených s výrobními procesy v průmyslu [3] odhalila celou řadu zdrojů rizik. Lze říci, že rizika jsou inherentním aspektem typu řízení, který je označován jako ASSET MANAGEMENT [4]. Na základě jeho kritického vyhodnocení lze konstatovat, že při postupech spojených se zvládnutím rizik, které ohrožují průmysl, se nezvažují vnější zdroje rizik a zdroje rizik spojené s lidským faktorem, a to hlavně úmyslným jednáním lidí.

V současné průmyslové praxi se používají hlavně analytické metody, protože jsou pro ně software. Pro reálná řešení konkrétních zařízení v konkrétním místě ideální software nemůže existovat, protože každá technologie či každé zařízení pracuje v jiných podmínkách a jejich časové změny také závisí na podmínkách v daném místě. Proto je třeba používat expertní postup [3], ve kterém se na základě požadavků TQM [5] určují prioritní rizika, se zvážením All-Hazard-Approach [6] a jejich zvládnutí se postupně od samého počátku tvorby zařízení provádí aplikováním zásad Defence-In-Depth [2]. V dalším stádiu zařízení, tj. při provozu, pak už je provedení zásadních technických opatření někdy i nemožné, a lze provádět jen organizační opatření, jejichž účinnost je daleko nižší než účinnost

technických opatření [2]. Možná technická opatření jsou spjatá s údržbou, včasnými opravami či výměnami namáhaných komponent či zařízení. Analýzy příčin havárií, provedené v celé řadě technických zařízení [2], ukazují, že technické příčiny havárií leží právě v chybách, které patří do zmíněných oblastí.

V dalším se soustředíme na zdroje rizik spojených se svary. Práce z oblasti leteckého průmyslu [7] ukazuje detailně řadu zdrojů rizik spojených s provedením svarů. Další rizika v předmětné oblasti vznikají tím, že každý svar se v průběhu času mění v závislosti na materiálových změnách a na působení okolních podmínek [3]. Na základě výše zmíněného konceptu práce s riziky je třeba proto kritické svary sledovat a v případě, že kritičnost přesáhne dovolenou míru, je třeba provést opatření, aby se zabránilo technologickým haváriím a jejich důsledkům na technologické dílo samotné, na lidi a životní prostředí.

3. Příklady havárií, jejichž příčinou bylo selhání svarů na tlakových nádobách

Průmyslových havárií spojených se selháním tlakových nádob bylo již velmi mnoho, jak ukazují např. práce [2,3,8]. Znamé jsou Flixborough 1974, Seveso 1976, Mexico City 1984, Pasadena 1989, které vedly k přijetí Směrnice SEVESO 2012/18/EU. V České republice jsou známé např. havárie Záluží 1974, Semtín 1984, Neratovice 1993, Branice 2012, Záluží 2015 [2,3,8].

Údaje v citovaných publikacích a zdroje, ze kterých byly odvozeny výsledky v předmětných publikacích, ukazují, že velmi často u těchto havárií byly kořenovou příčinou poruchy svarů.

Svařování nebo sváření je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více součástí. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Problematika svařování je popsána např. v pracích [7,9]. Proto je řada norem a standardů pro proces svařování. Komplexní soubor má např. ASME, jehož standardy upravují proces svařování pro různé typy svarů [10].

Dalším aspektem je vliv času a vliv vnějších podmínek. Životnost svaru, a tím i tlakové nádoby závisí jak na materiálech, tak na vnějších podmínkách; čím agresivnější jsou vnější podmínky, tím je životnost kratší. Proto EPRI má plán inspekcí tlakových nádob pro různé vnější podmínky [11] EPRI.

4. Metoda monitorování svarů a příklady výsledků

Tlakové nádoby jsou často součástí různých obsáhlejších systémů. Tlakové nádoby obsahují toxické, reaktivní, výbušné a radioaktivní látky, a proto je důležitá jejich bezpečnost. V nejširším pojetí je podle [2,3] bezpečné zařízení takové zařízení, které ani při svých kritických podmínkách neohrozí ani sebe, ani své okolí. Každé technické zařízení je vyrobeno z určitého materiálu a je v konkrétních podmínkách, tak existují limity, ve kterých je zařízení bezpečné. U tlakových nádob jde o podmínky a limity pro mechanickou integritu. Proto velkou roli hrají inspekce a monitoring poškození zařízení vlivem koroze, strategie údržby, a také systém řízení bezpečnosti [2,3].

4.1. Metoda založená na magnetické paměti látek

Metoda založená na 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** (**S**tress **C**oncentration **Z**ones), poruch a heterogenity v mikrostruktuře materiálu a svarových spojů [12].

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 skenování intenzity magnetického pole H_p těsně nad povrchem materiálu pomocí skenovacího zařízení – jde o vozíček, na kterém jsou upevněny snímací sondy, opatřené kolečky pro snímání vzdálenosti L_x a příslušnou elektronikou pro zesílení a digitalizaci signálů ze sond [12].

Skenovacích zařízení je více typů a liší se hlavně počtem a umístěním sond (např. pro inspekci potrubí). Speciální vysoce citlivé skenovací zařízení je určeno pro inspekci potrubí (např. vodovodní, naftovod, plynovod) v podzemní hloubce 1 až 3 m. Zařízení je propojeno kabelem s Měřičem koncentrací napětí TSC-3M-12, který umožňuje sejmutá data graficky zobrazit na displeji, uložit do paměti a později přenést do PC, ve kterém je speciální SW pro analýzu dat. Na displeji Měřiče koncentrací lze zobrazit skenované hodnoty intenzity H_p , nebo gradientu magnetického pole dH_p/dx v číselné nebo grafické podobě (tzv. magnetogram), data uložit, přečíst, smazat, přenést do PC atd. [12].

Dle [12] metoda založená na magnetické paměti materiálu se používá k:

- určení míst/oblastí s vysokou koncentrací napětí SCZ (Stress Concentration Zones), detekce materiálových vad a defektů v makro i v mikrostruktuře na povrchu i v hloubce materiálů u konstrukcí, zařízení či jednotlivých komponentů,
- inspekci svarových spojů,
- inspekci kritických míst tlakových nádob, potrubí a konstrukcí,
- sledování procesů při únavových materiálových zkouškách a destrukčních testech,
- zvýšení účinnosti a spolehlivosti inspekce kombinací s konvenčními metodami (např. AE, UT).

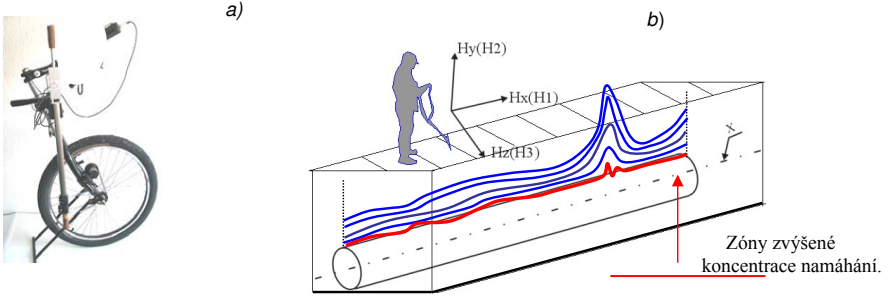
Předmětná metoda má široké oblasti použití, ale i dílčí omezení, vlivem vysoké citlivosti. K limitujícím faktorům patří: nemagnetické materiály, uměle zmagnetované kovy, přítomnost cizích magnetických materiálů v těsné blízkosti kontrolovaného objektu, přítomnost externího magnetického pole nebo elektrického svařování do vzdálenosti 1 m. Dle [12] mezi hlavní výhody 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.

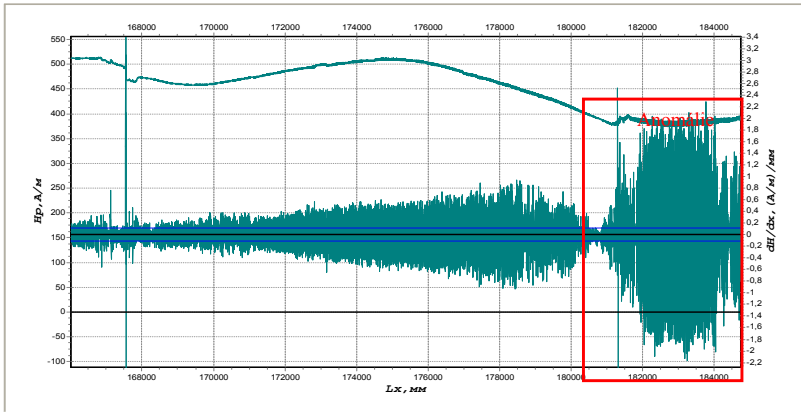
4.2. Příklad aplikace metody MMM

Aplikace NDT metody MMM na úseku NTL plynového potrubí DN 500, umístěného pod zemí v chodníku v blízkosti gymnázia [13]. Bylo použito skenovací zařízení určené pro inspekci potrubí v zemi, které sestává ze sondy pro snímání intenzity magnetického pole H_{xyz} ve třech osách, z kola pro odměřování vzdálenosti L_x . Měřič koncentrací TSC-3M-12 je zobrazen na obrázku 1 a); na obrázku 1 b) je znázorněn způsob skenování.

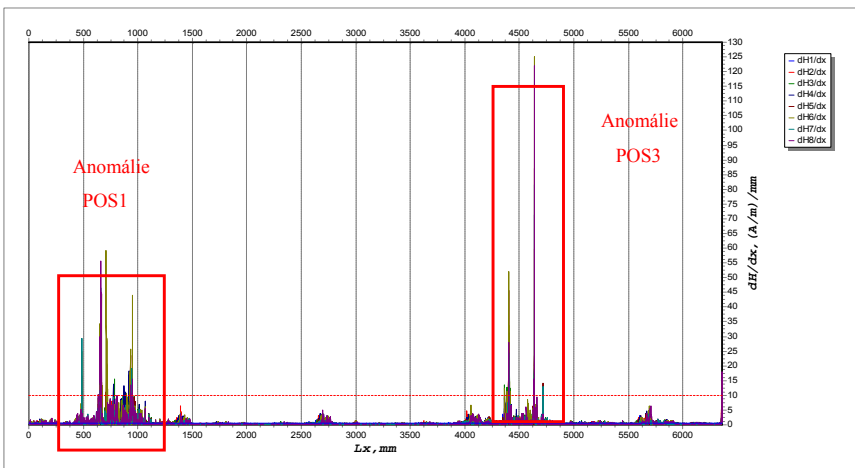
Na obrázcích 2 a 3 jsou uvedeny výsledný magnetogramy; na levé ose y je intenzita magnetického pole H_p (A/m), na pravé gradient dH/dx ((A/m)/mm) a na ose x vzdálenost L_x (mm). Zcela zřetelně jsou na magnetogramech vidět anomálie; jsou ohraničené červenou čarou.



Obr. 1. Schéma přístroje - a); schéma postupu měření – b).



Obr. 2. Magnetogram nad místem anomálie.



Obr. 3. Další příklad magnetogramu.

Na obrázku 4 je fotografie části potrubí po odkopání zeminy v místě anomálie, kde byla následně provedena inspekce ultrazvukovou metodou, která prokázala vadné svary.



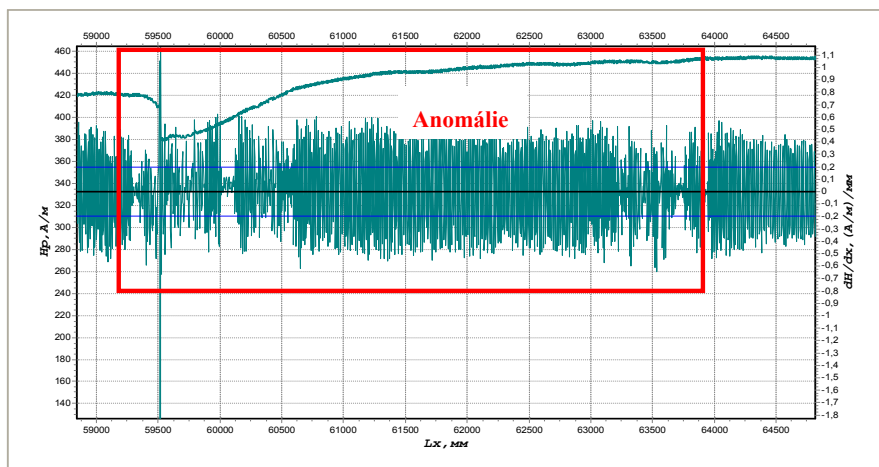
Obr. 4. Porušené svary na odkrytém potrubí v místě anomálie na magnetogramu.

Další příklad aplikace metody MMM je z měření VTL plynového potrubí DN 500 v místě vjezdu do areálu společnosti Mediaprint. Značky označují trasu plynovodu.



Obr. 5. Průběh trasy VTL plynového potrubí na zemském povrchu.

Obrázek 6 ukazuje magnetogram; vidíme výraznou anomálii získanou skenováním bezkontaktní sondou. Obrázek 7 ukazuje fotografii defektu (trhliny) na odkrytém a očištěném potrubí. Následná kontrola ultrazvukem i rentgenem potvrdila přítomnost defektu na potrubí plynovodu.



Obr. 6. Magnetogram získaný měřením nad plynovým potrubím VTL.



Obr. 7. Fotografie defektu (trhlina) na odkrytém a očištěném potrubí.

4.3. Přednosti aplikace metody MMM

Z výsledků měření i z materiálu [14] vyplývají zřetelné přednosti aplikace metody MMM, kterými jsou:

- nedestruktivní metoda,
- rychlost měření,
- inspekce je možná i za provozu,
- není třeba úprava povrchu měřeného materiálu,
- ochranná antikorozní vrstva při inspekci nevádí,

- včasná diagnostika únavového poškození,
- snadné rozpoznání nových a použitých strojních součástí,
- AE a vibrace nemají vliv na měření,
- doplněním a porovnáním výsledků s jinými metodami lze významně zvýšit kvalitu inspekce.

5. Závěr

Tlakové nádoby jsou kovovými obaly, které obsahují tekutinu nebo plyn pod tlakem. Látka pod tlakem v tlakové nádobě obsahuje energii, která se používá k vykonání určité práce. Tlakové expanzní nádoby mají uplatnění v mnoha oblastech a to jak v průmyslu, tak i v soukromých oblastech. Tlakové nádoby mohou být i potápěčské láhve, přetlakové komory, destilační věže a autoklávy. Uplatnění najdou tlakové nádoby i v hornické činnosti, v ropných rafineriích, petrochemických závodech, jaderných reaktorech, na lodích, v ponorkách a pro skladování zkapalněných plynů jako je amoniak, propan-butan, chlór a LPG. Proto je třeba dbát o to, aby byly bezpečnými systémy.

Pro zajištění jejich bezpečnosti je třeba dbát o správné řízení procesů, včasnou údržbu a správnou kulturu bezpečnosti. Velmi důležitou roli hraje monitoring. Výše je ukázáno, že metoda MMM je velmi vhodná pro aplikaci v praxi.

Literatura

- [1] PROCHÁZKOVÁ, D. *Strategické řízení bezpečnosti území a organizace*. ISBN: 978-80-01-04844-3. Praha: ČVUT 2011, 483p.
- [2] PROCHÁZKOVÁ, D. *Bezpečnost složitých technologických systémů*. ISBN: 978-80-01-05771-1. Praha: ČVUT 2015, 208p.
- [3] PROCHÁZKOVÁ, D. *Zásady řízení rizik složitých technologických zařízení*. e-ISBN: 78-80-01-06182-4. Praha: ČVUT 2017, 364p. <http://hdl.handle.net/10467/72582>
- [4] US EPA. *Asset Integrity Management*. Washington: EPA 2017.
- [5] ZAIRI, M. *Total Quality Management for Engineers*. Cambridge: WoodheadPublishing Ltd, 1991
- [6] FEMA. *GuideforAll-Hazard Emergency Operations Planning*. State and LocalGuide (SLG) 101. Washinton: FEMA 1996.
- [7] MAREŠOVÁ, Š. *Nástroj ke snížení rizik při výrobě specifických dílů pro motor letadla*. Praha: ČVUT, fakulta dopravní 2017, 66p.
- [8] PROCHÁZKOVÁ, D., BUMBA, J., SLUKA, V., ŠESTÁK, B. *Nebezpečné chemické látky a chemické přípravky a průmyslové nehody*. ISBN 978-80-7251-275-1. Praha: PA ČR, 2008, 420p.

- [9] BERNASOVSKÝ, P. *Prípady havárií zváraných konštrukcií*. Bratislava: Priemyselný inštitút SR 2017, 97p.
- [10] ASME. *ASME Codes and Standards for Welding*. <http://www.asme.org>
- [11] EPRI. *Characterizing and Controlling Weld Residual Stress*. <http://www2.epri.com>
- [12] SVOBODA, V., OLMR, Z. Metoda magnetické paměti materiálu. In: *Defektoskopie 2011*. Ostrava: Czech Society for Nondestructive Testing 2011, pp. 225-260.
- [13] SVOBODA, V., OLMR, Z. *Výsledky měření a fotografická dokumentace o zjištěných defektech na NTL a VTL plynovém potrubí Ø 500 mm v Bratislavě*. PREDITEST s.r.o., Praha: 2011.
- [14] SVOBODA, V., OLMR, Z. *Propagační materiál Method for non-destructive testing METAL MAGNETIC MEMORY*. PREDITEST s.r.o., Praha



PROJEKT CANUT A AUTOMATIZACE NDT CANUT PROJECT AND AUTOMATION OF NDT

Zdeněk SKÁLA, Jan VÍT, Jindřich FORMAN, Lukáš STAINER

ŠKODA JS a.s.

Contact e-mail: zdenek.skala@skoda-js.cz

Abstrakt

V rámci projektu CANUT (Centrum pokročilých jaderných technologií) je řešena i automatizace nedestruktivního zkoušení součástí jaderných elektráren. Při řešení této problematiky ŠKODA JS a.s. úzce spolupracuje se Západočeskou univerzitou v Plzni (ZČU), fakultou aplikovaných věd (FAV). Výsledkem této spolupráce jsou dva dokončené manipulátory a jeden manipulátor rozpracovaný. V příspěvku jsou uvedeny cíle, současný stav a dosažené výsledky tohoto projektu v oblasti automatizace NDT a přínosy spolupráce mezi firmou ŠKODA JS a.s. a Západočeskou univerzitou.

Klíčová slova: *Automatizace, manipulátor, ultrazvuk, vířivé proudy, tlaková nádoba reaktoru, svary potrubí*

Abstract

Non-destructive testing of nuclear power plants automation is solved within the framework of CANUT (Centre for Advanced Nuclear Technologies) project. ŠKODA JS a.s. co-operates closely University of West Bohemia in Pilsen, Applied Sciences Faculty. Results of this co-operation comprise two finished manipulators and one manipulator under development. The paper presents goals, present status and results of this project in the field of NDT automation and benefits of mutual co-operation between ŠKODA JS a.s. and University of West Bohemia.

Key words: *Automation, manipulator, ultrasonics, eddy currents, reactor pressure vessel, piping welds*

1. Úvod

V roce 2012 byl v rámci programu Technologické agentury ČR na podporu rozvoje dlouhodobé spolupráce ve výzkumu, vývoji a inovacích mezi veřejným a soukromým sektorem „Centra kompetence“ zahájen na Západočeské univerzitě projekt Centrum pokročilých jaderných technologií (CANUT - Centre for Advanced Nuclear Technologies). Do projektu CANUT je zapojeno konsorcium, jehož členy jsou

- Západočeská univerzita v Plzni
- Vysoké učení technické v Brně
- České vysoké učení technické v Praze
- Centrum výzkumu Řež s.r.o.
- ÚJV Řež a.s.
- ŠKODA JS a.s.
- ZAT a.s.
- ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s.

Tento projekt číslo TE01020455 je řešen s finanční podporou TA ČR a předkládaný příspěvek vznikl v rámci tohoto projektu.

CANUT se zabývá celkem sedmi výzkumnými tématy označovanými jako pracovní balíčky. ŠKODA JS a.s. se zapojila do pěti pracovních balíčků, ve dvou je vedoucím řešitelem. Jedním z nich je pracovní balíček 7 „Zařízení pro kontroly součástí primárního okruhu tlakovodních jaderných reaktorů“.

2. Cíle projektu

Cílem pracovního balíčku 7 je vývoj zařízení, která zvýší kvalitu a zkrátí dobu provádění nedestruktivního zkoušení součástí primárního okruhu jaderných elektráren s tlakovodními reaktory při zachování rozsahu kontrol. Výstupem tohoto pracovního balíčku jsou návrhy zařízení pro automatizované nedestruktivní zkoušení a postupy zkoušení těmito zařízeními, kvalifikované podle metodiky ENIQ používané v jaderné energetice. Výroba a kompletace navržených zařízení nejsou z projektu CANUT financovány a musejí být pořízeny z prostředků ŠKODA JS a.s.

Projekt CANUT a tedy i pracovní balíček je rozdělen do dvou období – 2012 až 2015 a 2016 až 2019.

V prvním období byly řešeny dva úkoly – zařízení pro zkoušení tlakových nádob reaktorů z vnitřního povrchu a manipulátor pro zkoušení svarů potrubí s omezeným přístupem.

Cílem prvního úkolu bylo nahradit dosud používané zařízení SKIN tak, aby mohl být rozšířen rozsah zkoušení při zachování či zlepšení jeho kvality. Dalším důležitým požadavkem bylo zkrácení doby zkoušení, zkrácení doby použití jeřábu při montáži manipulátoru a možnost použití zařízení i na jiných typech jaderných reaktorů, než jsou v ČR v současné době v provozu.

Cílem druhého úkolu bylo vyvinout manipulátor použitelný k automatizovanému zkoušení svarů potrubí při co nejmenších rozměrech manipulátoru tak, aby jím bylo možné zkoušet svary nedostupné pro manipulátory dosud používané společností ŠKODA JS a.s. Zkoušení bude prováděno ultrazvukem, třemi technikami – impulsní

odrazovou, difrakční TOFD a Phased array. Rozměry manipulátoru měly umožnit zkoušení svarů na potrubí o vnějším průměru od 200 mm do 1200 mm, přičemž v okolí některých svarů jsou v extrémním případě překážky vzdálené 70 mm v radiálním směru a 60 mm ve směru osy potrubí.

Pro druhé období byl po dohodě s ČEZ a.s. vybrán vývoj zařízení pro automatizované zkoušení svarů nátrubků víka reaktoru VVER 1000. Cílem tohoto úkolu má být zařízení pro automatizované zkoušení, které nahradí vizuální kontrolu a zkoušení kapilární metodou, které jsou dosud prováděny manuálně.

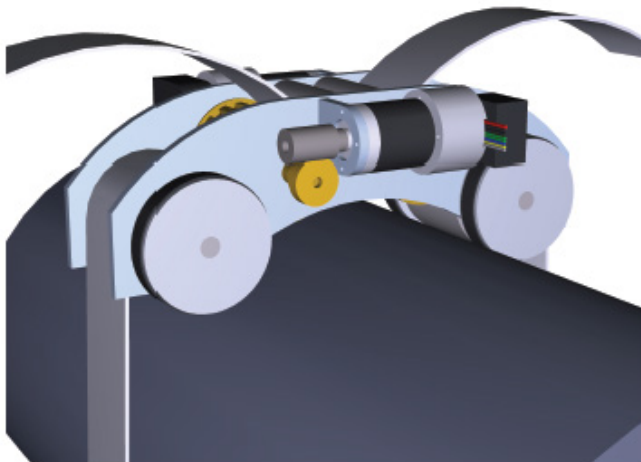
3. Průběh prací

Do pracovního balíčku 7 jsou zapojeny tři subjekty, ŠKODA JS a.s., Západočeská univerzita a ZAT a.s. Protože všechny úkoly řešené v pracovním balíčku 7 se týkají automatizace nedestruktivního zkoušení, je v něm Západočeská univerzita zastoupena Fakultou aplikovaných věd, Katedrou kybernetiky, jejíž pracovníci mají teoretické znalosti i praktické zkušenosti s vývojem automatizovaných zařízení.

Automatizované zkoušení tlakových nádob reaktorů z vnitřního povrchu provádí ŠKODA JS a.s. od roku 1982 a zařízení SKIN pro toto zkoušení již úspěšně vyvinula a provozuje. Práce na novém zařízení s názvem MKS byly zahájeny ještě před spuštěním projektu CANUT [1, 2] a tak i podrobný návrh mechaniky manipulátoru [3], systému řízení [4], postupů zkoušení [5], a zkoušek celého zařízení [6, 8, 9], provedli pracovníci ŠKODA JS a.s. Na Západočeské univerzitě byl vytvořen virtuální model sloužící pro odladění funkce systému řízení [7]. Celé zařízení bylo vyrobeno a odzkoušeno, nedostatky zjištěné při zkouškách byly odstraněny a po úspěšném provedení kvalifikačních zkoušek bylo připraveno k nasazení na jaderných elektrárnách.

Svary potrubí ŠKODA JS a.s. zkouší automatizovaně již od roku 1997 zařízeními zakoupenými od externích dodavatelů a nemá zkušenosti z vývoje vlastního zařízení. Uvítala proto možnost zapojit do vývoje manipulátoru pro zkoušení svarů potrubí s omezeným přístupem, nazvaného MOPS, další členy konsorcia.

Práce na manipulátoru MOPS byly zahájeny v roce 2013. Nejprve byl zpracován přehled svarů na obou jaderných elektrárnách, které by měly být vyvíjeným manipulátorem zkoušeny. V tomto přehledu byla uvedena i prostorová omezení v okolí těchto svarů. Návrhu konstrukčního řešení se ujali pracovníci ZČU, kteří již měli zkušenosti s vývojem malých manipulátorů a robotů. Zpracovali dvě varianty konstrukce manipulátoru a jeho uchycení ke zkoušenému potrubí [11].



Obr. 1 Návrh obvodového pojezdu manipulátoru pro zkoušení svarů potrubí

Fig. 1 Lay-out of circumferential car of manipulator for piping welds testing

Pro další vývoj byla vybrána varianta sestávající z vozíku, který se pohybuje po odvodu potrubí a lineárního posuvu ve směru osy potrubí [12]. Vozík je osazen dvěma motory a je uchycen k potrubí pomocí ozubeného řemene s volnými konci. Dopínání řemene za provozu manipulátoru je realizováno pomocí rozdílných otáček každého z motorů, resp. je stanovena tažná síla, která má být vyvinuta na upínací řemen. Toto dopínání zajišťuje řídicí software. Bylo nutné konstrukčně vyřešit vedení ozubeného řemene kladkami vozíku a přizpůsobení vozíku různým průměrům potrubí.

Po dokončení návrhu byl vyroben prototyp manipulátoru, vypracován program jeho zkoušek [13] a tyto zkoušky zahájeny.

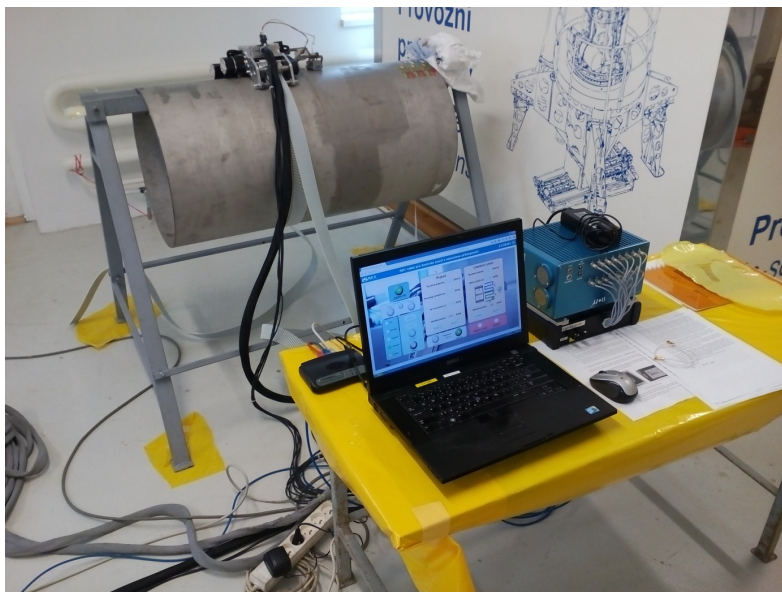
Práce na zařízení pro zkoušení svarů nátrubků víka reaktoru VVER 1000 byly zahájeny v roce 2016 posouzením možností zkoušení a stanovením základních požadavků na manipulátor [13]. Byly rozpracovány dvě varianty koncepce manipulátoru, o dalším pokračování bude rozhodnuto po jejich porovnání.

4. Dosažené výsledky

Zařízení MKS bylo již plně odzkoušeno a nasazeno při kontrolách jaderných elektráren Temelín i Dukovany. První zkušenosti s nasazením tohoto zařízení byly obsahem příspěvku na konferenci Defektoskopie 2015 [10]. Nasazení na jaderných elektrárnách prokázalo splnění některých cílů stanovených před zahájením vývoje.

Zlepšila se kvalita a zkrátila doba zkoušení při zachování jeho rozsahu, snížil se počet montáží a čas na jejich provedení a zkrátila se doba použití jeřábu.

Manipulátor MKS získal v ČR od Úřadu průmyslového vlastnictví osvědčení o užitém vzoru č. 28120 a patent č. 306034, oboje s názvem „Manipulační kontrolní zařízení“. Patentovou ochranu již získal tento manipulátor v Rusku a na Ukrajině a jeho další průmyslově právní ochrana v zahraničí je v jednání.



Obr. 2 Zkoušky manipulátoru MOPS na modelu potrubí o průměru 500 mm

Fig. 2 Tests of MOPS manipulator on a mockup of OD 500 mm piping

První prototyp manipulátoru MOPS byl vyroben a byly zahájeny jeho zkoušky na vzorcích potrubí. Dosud byl manipulátor odzkoušen na potrubí o vnějším průměru 500 mm a 270 mm, zkoušení bude pokračovat na vzorku potrubí o vnějším průměru 1100 mm. I když tento prototyp je menší, než dosud používané manipulátory, nebude jím možné v plném rozsahu zkoušet některé svary potrubí, v jejichž okolí jsou překážky. Hlavního cíle – zkoušení svarů dosud nepřístupných pro používané manipulátory – bylo ale dosaženo.

Manipulátor získal v ČR osvědčení o průmyslovém vzoru č. 29605 s názvem „Manipulátor pro zkoušení potrubí, zejména pro kontrolu svarů s omezeným přístupem“ a patent č. 306666 s názvem „Manipulátor pro zkoušení potrubí, zejména

pro kontrolu svarů s omezeným přístupem, a způsob uchycení manipulátoru k tomuto potrubí“. Jeho průmyslově právní ochrana v zahraničí je v jednání.

Pro zkoušení svarů nátrubků víka reaktoru VVER 1000 byly vytipovány možné metody a postupy zkoušení a navržen koncept manipulátoru pro zkoušení z vnitřního povrchu. Byl také vytvořen model čtvrtiny víka reaktoru VVER 1000 se simulovanými nátrubky, který slouží k odzkoušení mechaniky a systému řízení manipulátoru a bude využit i pro zkoušky postupů zkoušení.

Vzhledem k tomu, že i pro toto zařízení bude vyřizována průmyslově právní ochrana, nelze v současné době poskytnout více informací.

5. Přínosy

Zapojení do projektu CANUT a spolupráce s Fakultou aplikovaných věd Západočeské univerzity přinesly pracovníkům ŠKODA JS a.s. možnost seznámit se s posledním vývojem hardwaru i softwaru používaných v řídicích systémech manipulátorů a využít znalostí a zkušeností pracovníků této fakulty i vybavení laboratoří. To vedlo ke zrychlení vývoje nových zařízení, tvorbě simulačních modelů vyvíjených manipulátorů, inovativnímu řešení mechaniky manipulátorů a použití ověřených prvků a algoritmů v systémech řízení manipulátorů.

Pracovníkům ZČU přinesla spolupráce na projektu možnost seznámit se osobně s prostředím na jaderných elektrárnách, ve kterém navrhované manipulátory budou pracovat. Získávají také informace o chování manipulátorů a jejich řídicích systémech v praxi a o případných problémech a možných vylepšeních.

6. Závěr

Spolupráce společnosti ŠKODA JS a.s. se Západočeskou univerzitou se osvědčila, vede k rychlejší aplikaci moderních postup řízení manipulátorů i k využití inovativních koncepcí mechanické konstrukce zařízení pro automatizované zkoušení součástí jaderných reaktorů. Zkoušky navržených manipulátorů a jejich praktické nasazení odhalily nedostatky a problémy, jejichž řešení a odstranění vede ke zlepšení původních návrhů a slouží jako zpětná vazba konstruktérům a tvůrcům softwarového vybavení.



Obr. 3 Maketa čtvrtiny víka reaktoru VVER 1000

Fig. 3 Mockup of one quarter of VVER 1000 reactor cover head

Literatura

- [1] Rausch I.: *Modulární kontrolní systém – Technická studie, výzkumná zpráva (Ae 12255/Dok)*, Škoda JS a.s., Plzeň, 2007.
- [2] Rausch I.: *Modulární kontrolní systém – Popis úvodního návrhu, výzkumná zpráva (Ae 13253/Dok)*, Škoda JS a.s., Plzeň, 2010.
- [3] Suchý J.: *Modulární kontrolní systém – Technický popis projektu, technická zpráva (Ae 14910/Dok)*, Škoda JS a.s., Plzeň, 2013.
- [4] Beneš V.: *Systém řízení polohy manipulátoru MKS, pracovní režimy, komunikace s obsluhou a výstupy pro NDT přístroje, technická zpráva (Ae 15316/Dok)*, Škoda JS a.s., Plzeň, 2013.
- [5] Forman J., Samek J.: *Přístroje, zařízení a postupy nedestruktivního zkoušení tlakových nádob reaktorů z vnitřního povrchu, technická zpráva (Ae 15188/Dok Rev 0)*, Škoda JS a.s., Plzeň, 2014.

- [6] Šmolík P. a kol.: Předkomplexní a komplexní vyzkoušení manipulátoru MKS, technická zpráva (Ae 15349/Dok Rev. 2), Škoda JS a.s. Plzeň, 2015.
- [7] Severa O., Jáger A., Štětina M.: Virtuální model manipulátoru MKS, Report, ZČU v Plzni, FAV/KKY, 2013.
- [8] Vít J. a kol.: Porovnání výsledků ultrazvukového zkoušení kvalifikačního bloku KB 190 manipulátorů SKIN a MKS, technická zpráva (Ae 15882/Dok Rev. 0), Škoda JS a.s. Plzeň, 2015.
- [9] Forman J. a kol.: Ověření způsobilosti systému MKS k provádění provozních kontrol vířivými proudy, technická zpráva (Ae 15920/Dok Rev. 0), Škoda JS a.s., Plzeň, 2015.
- [10] Skála Z., Stainer L., Vít J.: První zkušenosti s MKS – novým zařízením pro zkoušení tlakových nádob reaktorů, konference Defektoskopie 2015, Brno, 2015
- [11] Čechura T., Švejda M.: Případová studie navrhovaných architektur manipulátorů pro NDT svarů potrubí, Průběžná zpráva, ZČU v Plzni, FAV/KKY, 2014.
- [12] Čechura T., Jáger A.: Návrh vozíku s obvodovým pojezdem manipulátoru pro zkoušení obvodových svarů s omezeným přístupem, technická zpráva (ZČU v Plzni, FAV/KKY, 2014.
- [13] Sedláček R. a kol.: Předkomplexní a komplexní vyzkoušení manipulátoru pro zkoušení svarů potrubí s omezeným přístupem, technická zpráva (Ae 16354/Dok Rev. 0), Škoda JS a.s., Plzeň, 2015
- [14] Forman J. a kol.: Nedestruktivní zkoušení nátrubků LKP, KNI a TK víka tlakové nádoby reaktoru VVER 1000 typ V-320/Č, technická zpráva (Ae 16632/Dok Rev. 0), Škoda JS a.s., Plzeň, 2016



AKUSTICKÁ A MAGNETICKÁ NEDESTRUKTIVNÍ STRUKTUROSKOPIE VYBRANÝCH NEŽELEZNÝCH SLITIN ACOUSTIC AND MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE STRUCTUROSCOPY CHOICE NONFERROUS ALLOYS.

Břetislav SKRBEK

Technická univerzita v Liberci
Contact e-mail: bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá průzkumem využití akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie aluminidů železa, slitin mědi a kobaltu. Na základě naměřených hodnot posoudit vhodnost akustického a magnetického testování. Na základě numerických výsledků a poznatků vytvořeny podklady pro další výzkum relativně opomíjené nedestruktivní strukturoskopie těchto slitin.

Klíčová slova: *nedestruktivní strukturoskopie, aluminidy a Cu a Co slitiny*

Abstract

This lecture the use of acoustic and magnetic non-destructive scructuroscopy of irone aluminides and cooper and cobalt alloys. The mean task of this work is to assess the suitability of the acoustic and magnetic testing on the base of the measured values. The aim of this lecture is to use obtained results and findings to create a bassis for further research of relatively neglected non-destructive structuroscopy of lecture alloys abstraktu.

Key words: *non-destructive scructuroscopy, aluminides and cooper and cobalt alloys*

1. Úvod

Cílem této práce je posoudit vhodnost využití akustické a magnetické nedestruktivní strukturoskopie [1, 2] pro konstrukční materiály - aluminidy, slitiny mědi a kobaltu. Doposud byly tyto metody používány pro testování ocelí a litin, zatímco o testování již zmíněných slitin není zatím zcela obvyklé. Logicky se častěji aplikují metody vířivých proudů.

2. Experimenty

Pro experimentální techniky byly použity vzorky materiálů intermetalických sloučenin (aluminidy železa), slitiny mědi (hliníkové bronzy) a slitiny kobaltu (Stellit 6 a Stellit 12). Jejich chemické složení a vlastnosti jsou popsány v tabulkách. Jde o vybrané slitiny z řady technických neželezných s předpokladem alespoň slabého feromagnetizmu.

2.1. Experimentální materiál

Aluminidy jako slitiny Fe s vysokým obsahem Al (jsou poměrně levné) se neustále na půdě TU v Liberci vyvíjejí coby potenciální náhražky žárupevných drahých ocelí [3].

Tab. 1. Složení
aluminidů
Table 1.
Composition
aluminides

Označení	Č	Prvek						
		Al [at.%]	Zr [at.%]	Cr [at.%]	Ti [at.%]	C [at.%]	B [at.%]	Fe [at.%]
ACr4ZrB (V)	1	19,904	0,493	4,151	0,074	0,062	0,277	75,039
ACr4C (L)	2	26,479	0,268	3,578		0,479		69,196
AB1Cr4 (V)	3	27,843	0,488	3,521	0,425	0,028	1,094	66,601
ATi2,3 (V)	4	29,307			2,384	0,039		68,27
A553 C (V)	5	39,107				0,934		59,959
A 635 (V)	6	40						60

(V) ... válcovaný stav (L) ... litý stav

Hliníkové bronzy

Jedním z představitelů Al bronzů je slitina CuAl10Ni5Fe4 s vysokou pevností (i za zvýšených teplot), odolná proti korozi, kyselinám a louhům, vysokým teplotám i opotřebením. Slouží k náročným kluzným aplikacím [4]. Chemické složení zkoušené slitiny je v tabulce 2.

Tab.2. Složení
bronzu.
Table 2.
Composition
brass.

Materiál vzorku	Prvek [hm. %]										
	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Si	Sn	P	Cr	Zn	As
CuAl10Ni5Fe4	78,5	10,2	5,75	4,3	1	0,12	0,016	0,012	0,012	0,01	0,009

Tepebné zpracování Al bronzů přináší úžasnou variabilitu mechanických vlastností.

Tab. 3. Tepebné zpracování a mechanické vlastnosti.
Table 3. Heat treatment and tensile properties.

Vzorek	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A5 [%]	HV30	E [GPa]
Dodaný stav	911	767	14.6	265	118
Žhánno 750°C, pec	788	591	18.9	228	114,9
Žhánno 750°C, vzduch	844	625	11.9	236	111,2
Zakaleno, žhánno 750°C, pec	823	524	10.5	226	121,2
Zakaleno, žhánno 750°C, vzduch	865	549	10.8	235	119,7
Zakaleno 930°C	972	702	2.0	305	91,7
Zakaleno 930°C + stárnuo 400°C	1057	1051	1.1	400	106,4
Žhánno 850°C, pec	681	355	16.0	182	104,6
Žhánno 850°C, vzduch	823	444	10.5	219	114,3

Slitiny kobaltu

Zástupcem slitin kobaltu jsou například slitiny zvané stellity, které jsou velmi odolné proti mechanickému opotřebení, otěru a korozi. Tyto kladné vlastnosti si zachovávají i za vysokých teplot [5].

Pro experiment byla použita sedla sacích a výfukových ventilů pístových plynových a naftových motorů, litá jako přesné odlitky na voskový model. Sací sedlo je odlito ze Stellitu 6 (chemické složení viz tab. 4) a výfukové sedlo ze Stellitu 12 (chemické složení viz tab. 5).

Tab. 4. Stelit 6.
Table 4. Stelit 6.

Materiál vzorku	Prvek [hm. %]								
	Cr	W	Fe	Ni	Si	C	Mn	Mo	Co
Stelit 6	26 - 33	4 - 5	< 3	< 3	0,4 - 2	0,9 – 1,4	< 1	< 1	zbytek

Tab. 5. Stelit 12.
Table 5. Stelit 12.

Materiál vzorku	Prvek [hm. %]								
	Cr	W	Fe	Ni	Si	C	Mn	Mo	Co
Stelit 12	26 - 33	7 - 9	< 3	< 3	0,4 - 2	1,1 – 1,9	< 1	< 1	zbytek

2.2. Výsledky [5]

K měření rychlosti zvuku sloužil univerzální defektoskop DIO1000 s dvojími sondami 2 a 4MHz i 10MHz a měření zbytkového magnetizmu zabezpečil přístroj DOMENA B3 při slabé M2 a silné M8 magnetizaci.

Zkoumány byly vzorky o různém složení a rozměrech 8 až 60 mm. Proto byla uvažována jen rychlost zvuku, ne útlum.

Tab. 6. Aluminidy Table 6. Aluminides.

Č.	M		A/m	A/m	V _L	MHz
	M2	M8	dM		2	4
1	23,8	31,2	7,4		5131	5230
2	183	190	7		4884	5052
3	21,4	34,2	12,8		6094	6228
4	188	222	42		7635	7763
5	1,9	2	0,1		6508	6665
6*	166	195	29		7933	7846
6	11,7	17,1	5,4		5737	5684

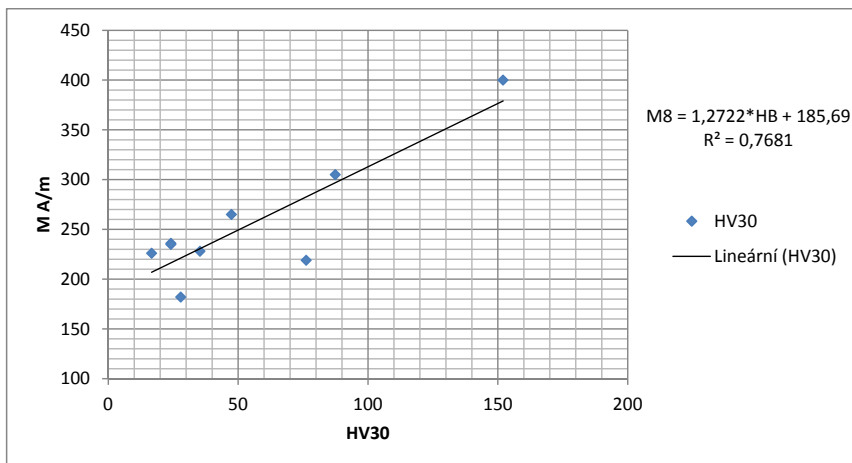
*...450°C /120h

Z tab. 6 plyne, že válcování za tepla aluminidů legovaných Cr vede k výraznému snížení magnetické tvrdosti a zvýšení akustické rychlosti. Legování Ti přináší nejvyšší hodnoty zbytkového magnetizmu i rychlosti zvuku. 1% uhlíku prakticky ruší feromagnetismus aluminidu. Dlouhodobé vytvrzování při 450°C čistého tvářeného aluminidu vede k extrémnímu zvýšení rychlosti zvuku a magnetické tvrdosti. Vztahy k mechanickým vlastnostem a struktuře jsou předmětem dalšího výzkumu. Vysvětlí i velký rozsah – téměř 3000 m/s rychlosti zvuku zkoumaných aluminidů.

Tab. 7. Varianty TZ a výsledky měření hliníkového bronzu.
Table 7. Variants HT and results measurement aluminium brass.

Vzorek	[A /m]			2MHz	10MHz
	M2	M8	dM	[m/s]	[m/s]
Dodaný stav	23,5	47,4	23,9	5244,1	5265
Žíháno 750°C, pec	18,8	35,3	16,5	5134	5134
Žíháno 750°C, vzduch	12,2	24,1	11,9	5134	5177,5
Zakaleno, žíháno 750°C, pec	5,4	16,7	11,3	5032	5082,8
Zakaleno, žíháno 750°C, vzduch	9,0	24,1	15,1	5046,3	5087,3
Zakaleno 930°C	28,8	87,4	58,6	4741,3	4827,5
Zakaleno 930°C + stárnuto 400°C	105	152,0	47,0	5005,1	5097,8
Žíháno 850°C, pec	16,2	27,9	11,7	4573,5	4665
Žíháno 850°C, vzduch	20,7	76,2	55,5	5519	5519

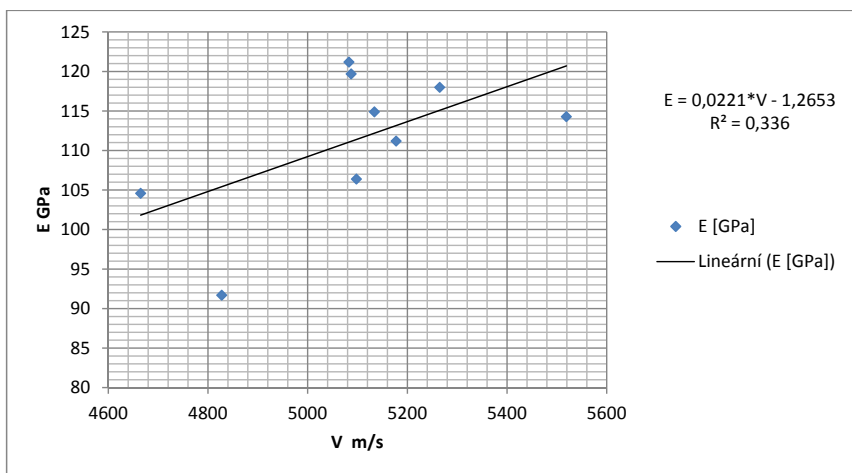
Porovnáme-li hodnoty mechanických vlastností tab. 3 a fyzikálních z tab. 7, tak nejtěsnější korelace s přiřadí silná magnetizace M8 tvrdosti HV30.



Obr. 1. Vztah tvrdosti k intenzitě remanentního magnetizmu.
 Fig.1. Relation hardness to intensity remanent magnetism.

Ani rychlost zvuku k modulu pružnosti E (ze směrnic lineárních průběhů) tahových zkoušek nedosahuje použitelné těsnosti regrese – obr. 2.

Al bronzы v žíhaném stavu jsou slabě feromagnetické. Jejich magnetismus roste s tvářením, kalením a hlavně vytvrzováním. Změny rychlosti zvuku tepelným zpracováními jsou také významné, ale bez patrné souvislosti. Slabá je i korelace rychlosti zvuku k modulu pružnosti (obr. 2). Bude nutno pokračovat ve výzkumu a zvlášť hodnotit stavy žíhané a vytvrzované.



Obr. 2. Slabá korelace rychlosti zvuku a modulu pružnosti.
 Fig.2. Weak correlation speed sound and modulus elasticity.

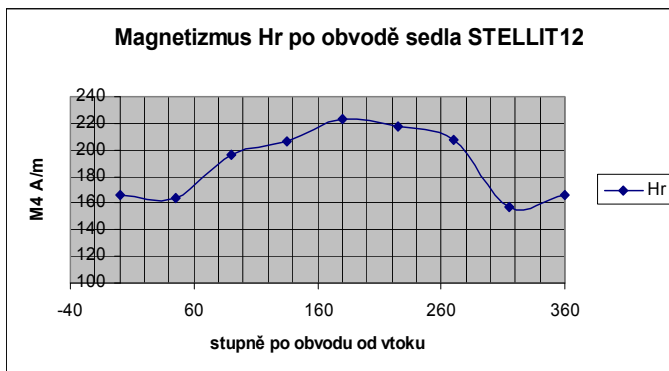
Příklad sedla ventilů pístového spalovacího motoru je v příloze.

Tab. 8. Střední hodnoty v litém stavu.

Table 8. Mean value – molten state.

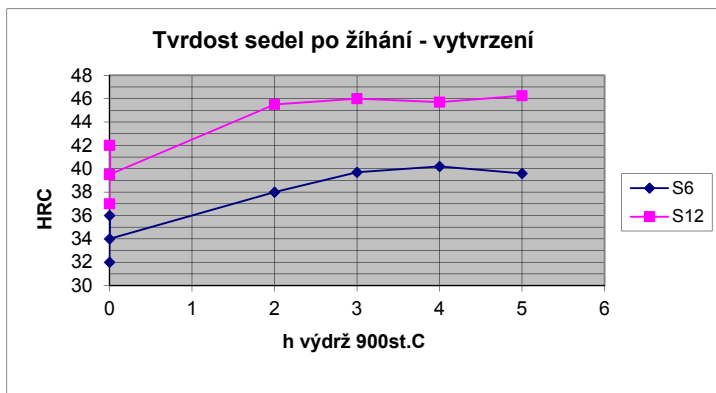
Všechna sedla	Sací stellit 6		Výfuková stellit 12	
	Vtok	zbytek	vtok	zbytek
HRC	45,3+-1,3	46,9+-0,7	47,2+-1	49,2+-0,5
M 2 A/m	588+-47		22,7 +-5,8	
V m/s	6015		6024	

Měření M po obvodu sedel vždy určí místo vtoku kovu do odlitku sedla (místo s minimální hodnotou tvrdosti dle tab. 8) – obr. 3.



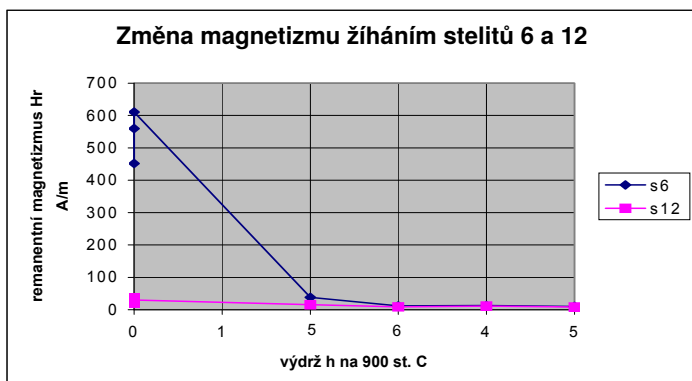
Obr. 3. Magnetismus sedla ventilu.

Fig. 3. Magnetism saddle valve.



Obr. 4. Vytvrzování sedel ventilů ze stellitu 6 (S6) a 12 (S12).

Fig. 4. Hardening saddles valves from stellite 6 (S6) a 12 (S12).



Obr. 5. Vytvrzením ztrácí stellity feromagnetizmus.
 Fig. 5. Hardening loses stellites magnetism.

Hodnoty rychlosti zvuku se u stelitů prakticky s typem a stavem nemění.

V litém stavu stellity 6 a 12 vykazují velmi rozdílnou hladinu hodnoty remanentního magnetizmu Hr. Na obvodu obrobeného sedla lze metodou magnetické skvrny najít místo vtoku; lze spolehlivě rozlišit stav vysokoteplotně žíháný a nežíháný. Stellity 6 a 12 zcela ztrácí feromagnetické složky ve struktuře vytvrzením. Hodnoty Hr charakterizují strukturní stav a geometrii měřeného místa sedla, nikoliv hodnotu tvrdosti.

V dalším výzkumu třeba provést zkoušky žíháním v intervalu do 2h výdrže na 900° C; RTG difrakcí analyzovat fáze, které mají za důsledek feromagnetické chování stelitů v litém stavu.

5. Závěr

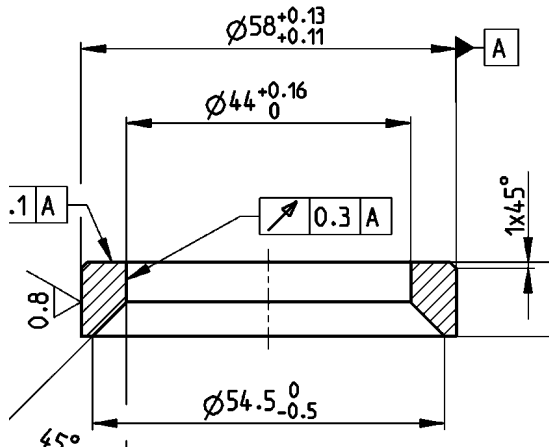
Měření rychlosti zvuku a remanentního magnetizmu zkoumaných neželezných slitin prokázalo strukturní citlivost. Cílem dalších studentských prací bude dosažení v praxi použitelných matematických modelů k užitným vlastnostem uvedených technicky významných neželezných slitin.

This publication was written at the Technical University of Liberec as part of the project " The study and evaluation of the material's structure and properties " with the support of the Specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2017.

Literatura:

- [1] Skrbek, B. Metoda magnetické skvrny. Teze profesorské přednášky, TU v Liberci. 2008, ISBN 978-80-77372-428-3.
- [2] Skrbek, B. Combined nondestructive structuroscopy of dispersion metallic materials. 11th European Conference on NDT, Prague, 1014, part P7.16, Isbn 978-80-214-5019-6.
- [3] Hotař, A. Aluminidy železa – perspektivní materiály pro vysokoteplotní aplikace. Moderní materiály, publikace 55-125-14, TU v Liberci, 2014, s. 102 – 130, ISBN 978-80-7494.
- [4] Skrbek, B. and kol. Solution of modern pair of guide and valve of piston engines. COMAT 2010, Conference proceedings, pp. 32 – 36, Plzeň 2010, ISBN 978-80-254-8683-2.
- [5] Suchánek, J., Kuklík, V. ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ MATERIÁLŮ. ČVUT Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03659-4.
- [5] Toth, M. Akustická a magnetická nedestruktivní strukturoskopie aluminidů, slitin mědi a kobaltu. Diplomová práce, TU v Liberci, 2014.

Příloha





POSOUZENÍ PARAMETRŮ A PODMÍNEK MAJÍCÍCH VLIV NA PROCES ODMAGNETOVÁNÍ

REVIEW OF PARAMETERS AND CONDITIONS HAVING INFLUENCE ON DEMAGNETIZING PROCESS

Jaroslav ŠNAJBERK, kolektiv pracovníků PTS

Josef Solnař, PTS s.r.o

Abstrakt:

V tomto příspěvku je popsána existence a projevy zbytkového magnetizmu s ohledem na některé technické aplikace z hlediska pozitivního i negativního, Popsán je v těchto souvislostech magnetický stav předmětu v různých jeho partiích pomocí příslušných charakteristik. Principy jsou demonstrovány na modelech tyče a trubky, Popsány jsou podoby a místa zmagnetování a důležité okolnosti i podmínky mající vliv na proces odmagnetování.

S ohledem na tvar předmětu je diskutován vliv demagnetizačního činitele a rovněž tak odhad potřebných minimálních hodnot pro odmagnetování za pomoci magnetizačních charakteristik daného materiálu.

Při aplikaci cyklického odmagnetování je uvažován vliv pracovní frekvence, počtu cyklů a časové sekvence poklesu amplitudy magnetického pole.

V příkladu je ukázáno přibližné početní a grafické rozložení magnetického pole co do velikosti a fáze v daném průřezu předmětu. Diskutována je nemožnost výpočtu vedoucího k přesné shodě s reálným stavem.

Popsáno je měření zbytkového magnetického pole v laboratorních a provozních podmínkách. Diskutovány jsou možnosti automatizovaného měření. Uvedeny jsou používané jednotky a jejich přepočty.

Ukázán je vliv zemského magnetického pole a jeho podoba v dané lokalitě v souvislosti s odmagnetováním.

Prezentovány jsou některé způsoby částečné kompenzace vlivu zemského magnetického pole.

Diskutována je také rychlost procesu odmagnetování s ohledem na provozní podmínky.

Je také uvedena relace mezi rozměry odmagnetovacích cívek a dosažitelným magnetickým polem. Zmíněny jsou energetické ztráty oteplením.

Diskutovány jsou důvody častých sporů zákazníka s dodavatelem, pokud se jedná o měřené hodnoty zbytkového pole.

Klíčová slova: koercivita, demagnetizační efekt, lift-off, zbytkové pole, rezonance, činitel jakosti

Abstract:

This paper deal with existence and prove of residual magnetism in terms of positive or negative effects at various technical applications. There are different magnetic conditions in the object at various parts of its volume and it is described using particular magnetic characteristic. Principles are shown on models of bars or tubes. Appearance magnetized areas and spots are pictured as an exaple. Important circumstanes and conditions having an influence on a demagnetiting process are described.

In terms of shape of an object influence of demagnetizing factor is considered and as well as an estimate of correct external minimum demagnetizing field values for the process at a particular object and its material. Corresponding magnetic characteristics has been used.

In case of application of cyclic demagnetization influence of frequency and cycles rate and time dependance of magnetic field decay has been discussed.

An approximate calculation and grafic presentation of magnetic field distribution at particular bar cross section for both, field amplitude and phase has been made as an example. There is impossible to carry out an exact calculation that could completely fit to real conditions.

Residual magnetic field measurement in laboratory and under industrial conditions and possibilities of automatized measurement are presented and used units and their conversion too.

Influence of the Earth's magnetic field and its distribution at a particular locality in connection with demagnetizing process is described.

Some partial compensation techniques of Earth's magnetic field influence are shown.

The influence on speed of demagnetization process in connection with performance conditions is under discussion.

There exists relations between dimensions of demagnetization coils and attainable magnetic field. Energy losses and warm up limit are mentioned.

Reasons of frequent disputes between customer and supplier in terms of measured values of residual fields are the subject of discussions.

Key words: coercivity, demagnetizing effect, lift-off, residual field, resonance, quality factor

1. Úvod

Tento příspěvek je zaměřen na výběr nejdůležitějších aspektů problematiky odmagnetování.

Zabývá se mimo jiné především odmagnetováním dlouhých předmětů s návazností na předchozí zkoušení vířivými proudy anebo rozptylovými magnetickými toky na výrobních linkách. Ocelové trubky a tyče včetně nekruhových profilů se při zkoušení vířivými proudy podélně magnetují ve jhu velmi silným stejnosměrným polem, které dosahuje hodnot podélné tečné složky na trubce až 240 kA/m. Je zřejmé, že postup po zkoušení zanechá větší nebo menší hodnotu zbytkové indukce v těchto předmětech. Většinou bývá odmagnetování těchto výrobků zákazníkem požadováno a požadováno je také měření a průkaznost hodnot.

Příspěvek není výsledkem systematického výzkumu nebo vývoje, podává pouze výběr technických poznatků a informací, čerpaných z materiálů, které byly v daném čase dostupné.

2. Vznik zbytkového magnetického pole a jeho projevy

Lze uvést stručný přehled několika všeobecně známých příčin existence zbytkového magnetizmu.

- 1) Vlivem elektromagnetických jevů
- 2) Vlivem mechanických procesů
- 3) Na základě neznámé historie předmětu

- 1) Vlivem elektromagnetických jevů

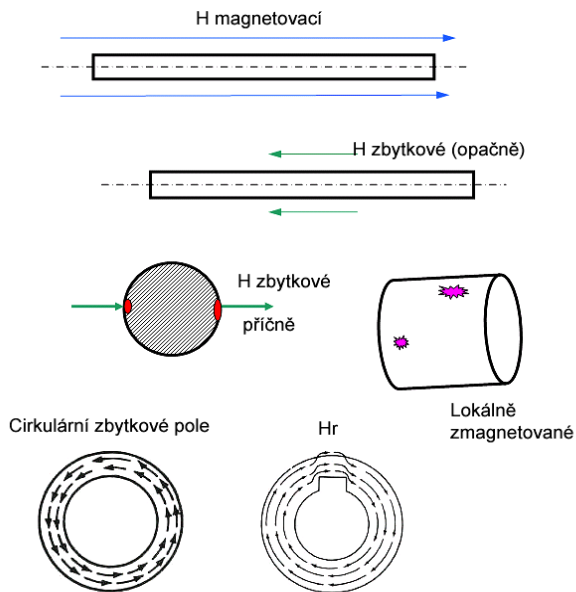
- A) Sváření včetně výrobního postupu podélně svařovaných trubek i z austenitických materiálů
- B) NDT techniky
- C) Jeřáb s elektromagnetem
- D) Blízkost jiných magnetovaných dílů nebo celků
- E) Magnetické upínání při obrábění
- F) Blesk
- G) Vliv zemského magnetického pole
- H) Přeprava
- I) Další vlivy

- 2) Vlivem mechanických procesů

- A) Vrtání
- B) Řezání
- C) Ohýbání a rovnání
- D) Prostřihování
- E) Kování za studena
- F) Jiné mechanické namáhání
- G) Eroze

Obrázek 2.1 znázorňuje základní konfigurace zbytkového magnetického pole na velmi jednoduchých předmětech.

Patrný je podstatný rozdíl situace na předmětu, který představuje uzavřený magnetický obvod nebo předměty s volnými konci, případně lokální zmagnetování.



Obr. 2.1 Konfigurace zbytkového magnetického pole na předmětech jednoduché geometrie:

Fig.2.2 Configuration of residual magnetic fields at various objects of simple shape

3. Příklady problémů vznikajících přítomností zbytkového magnetizmu

seskupování součástek

kotva relé – „lepení při odpojení“

v měřicí technice – ovlivnění čidel a přístrojů

NDT – měření povlaků magnetickými metodami – vznik chyby

tvoření hrubšího povrchu při galvanickém pokovování

přidržování prachu a částic (feromagnetických)

přidržování malých součástek k nástrojům nebo dílům strojů

opotřebení ložisek

obecně snižování životnosti a riziko poškození pohybových částí strojů

náchylnost ke korozi – vodíková křehkost

problémy při elektrickém svařování až zabránění procesu

Další ...

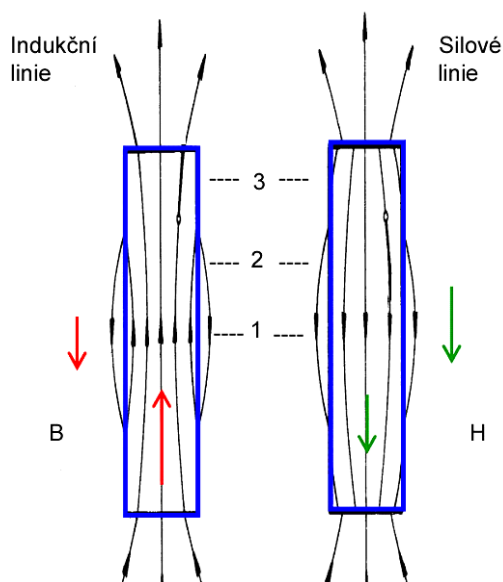
4. Zbytkový magnetizmus tyče a prstence

Ocelová tyč, která byla podélně magnetována a vykazuje zbytkový magnetizmus s existencí pólů v blízkosti svých konců, vytváří ve svém okolí i uvnitř svého objemu poměry, které jsou symbolicky znázorněny na obrázku 4.1a.

Jak je z levé části obrázku patrné, indukční linie (B) jsou ve střední části tyče zhuštěny a vně tyče probíhají v opačném směru, než uvnitř tyče. V pravé části obrázku je naznačen průběh silových linií (siločar) (H). Tyto linie jsou u konců tyče zhuštěny. Orientace je na rozdíl od linií indukčních ve vně i uvnitř tyče shodná. Viz. pravá část obrázku.

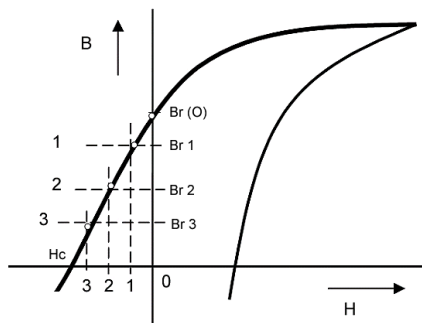
Na obrázku 4.1.b je orientačně znázorněna pozice pracovních bodů v závislosti B - H, které přísluší třem zvoleným pozicím po délce tyče. Je zřejmé, že zmagnetovaná tyč nemůže vykazovat hodnotu zbytkové magnetické indukce B_r přímo na ose B, tak jak je tomu u uzavřeného magnetického obvodu (prstence), kde leží pozice bodu zbytkové magnetické indukce na ose B a pole H je nulové.

Situace u tyče nebo trubky tedy atd. umožňuje měření pole v blízkém okolí, zejména u konců takových předmětů.



Obr. 4.1.a Zbytkový magnetizmus tyče

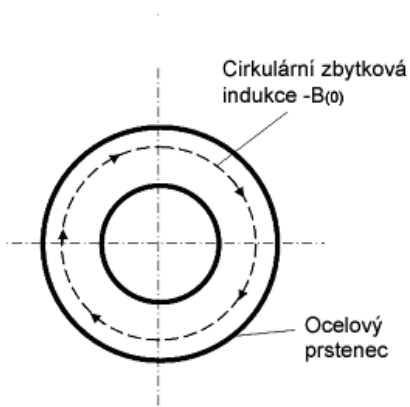
Fig. 4.1.a Residual magnetism at bar



Obr. 4.1.b Pracovní body v různých místech délky ocelovětýče

Fig. 4.1.b Working points at different spots along the steel bar

Jiná je situace u prstence ze stejného materiálu (viz obr. 4.2), který představuje homogenně zmagnetovaný uzavřený magnetický obvod bez anomálií. Prstenec byl magnetován buď pomocí provlečeného vodiče, anebo za použití toroidního vinutí, rovnoměrně rozloženého po obvodu. Tento případ lze charakterizovat vztahy $H = 0$ a $B = B_r(0)$. Magnetické pole je tedy nulové.



Obr.4.2 Cirkulární zbytková magnetická indukce ocelového prstence

Fig.4.2 Circular residual flux density of steel ring

5. Základní možnosti odmagnetování

Ideální stav po odmagnetování je popsán následujícím vztahem:

$$B = 0 \quad \text{a současně} \quad H = 0$$

Postupy a způsoby odmagnetování:

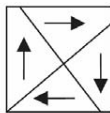
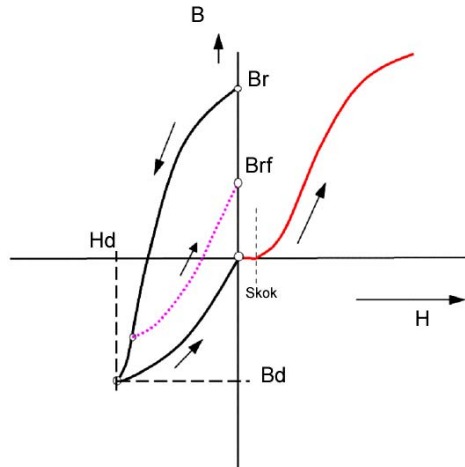
1) Termické

Ohřátím na teplotu přes 760°C nad Curieovu teplotu (červený žár) a pomalé ochlazení v prostředí minimálního magnetického pole.

Použití - velmi výjimečně, například u hornin (magnetit)

2) Jednorázovou aplikací opačného magnetického pole, než bylo pole původní

Tento postup vede k nestabilnímu stavu a případné obnově zbytkové indukce.



Odmagnetování
- stabilní stav -

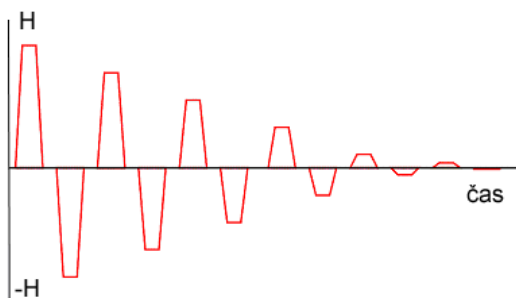


Odmagnetování
- nestabilní stav -

Obr. 5.1 Znárodnění nevyhovujícího postupu odmagnetování a důsledek v uspořádání domén (symbolicky)

Fig. 5.1 Demonstration of bad demagnetization process and its consequence on domains arrangement

- 3) Vystavení součásti řízenému ss magnetickému poli ve stejném směru, jak bylo pole původní. Orientaci nastavit opačným směru přesně - a na hodnotu, která je zlomkem pole původního, magnetovacího.
Tato hodnota se mění v závislosti na typu materiálu (oceli), tepelném zpracování
Je to spíše pro laboratorní práci – nehledě na stabilitu po odmagnetování
- 4) Silnými nárazy – velmi vyjímečně – hrozí poškození
- 5) Za použití stejnosměrného pole a jeho řízenou reverzací (viz. obr. 5.2) a to s následným postupem:
 - a) zavedení vysoké hodnoty pole
 - b) prodleva
 - c) snížení pole nulovou hodnotu
 - d) prodleva
 - e) otočení polarity pole a opětovné jeho zavedení se sníženou intenzitou o malou hodnotu
 - f) opakovaný postup po mnoha krocích až k téměř nulovým hodnotám pole



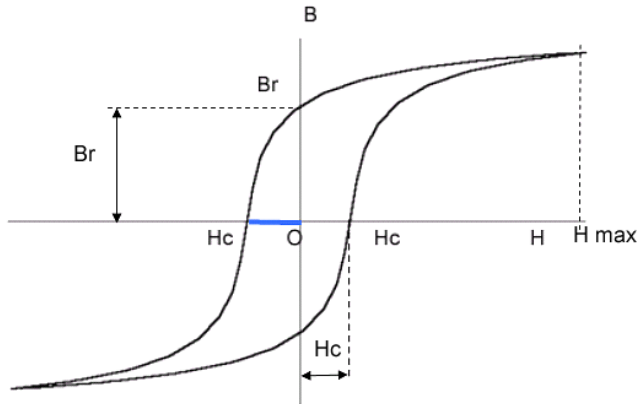
Obr .5.2 Postup odmagnetování řízenou reverzací stejnosměrného pole

Fig. 5.2 Demagnetization process by controlled DC magnetic field reversal

- 6) Spojité cyklické snižování intenzity pole a současně opakovaná reverzace (střídavý proud v cívkě)
 - Snižování - regulací proudu
 - vzdalování předmětu (pomalé vytahování z cívky)
 - použitím rezonančního systému při jednom budicím impulsu
- 7) Jiné způsoby
 - Cyklické odmagnetování
 - Rezonanční systém

Pro vyhovující výsledek odmagnetování daného předmětu by se mělo vycházet z jeho elektrických a magnetických vlastností. Při stanovení minimální hodnoty pole pro odmagnetování by měla být vzata v úvahu poloha bodu jeho hysterezní smyčky, kde se vzestupná a sestupná větev sbíhají. Toto odpovídá hodnotě H_{max} (viz obrázek 5.3). Zde je již jistota nasyceného stavu a zde by měl proces odmagnetování začínat. Je patrné, že tato hodnota potřebného pole zřetelně převyšuje hodnotu koercivity H_c .

Zmíněná hodnota je ovšem potřebná v celém objemu předmětu, odmagnetován musí být celý profil, což vzhledem k existenci skin efektu představuje, jak je uvedeno dále, značný problém a to jak technický, tak i ekonomický.



Obr. 5.3 Určení minimálního pole k odmagnetování pro daný materiál

Fig. 5.3 Determination of minimum degaussing magnetic field for a particular material.

6. Cyklické odmagnetování

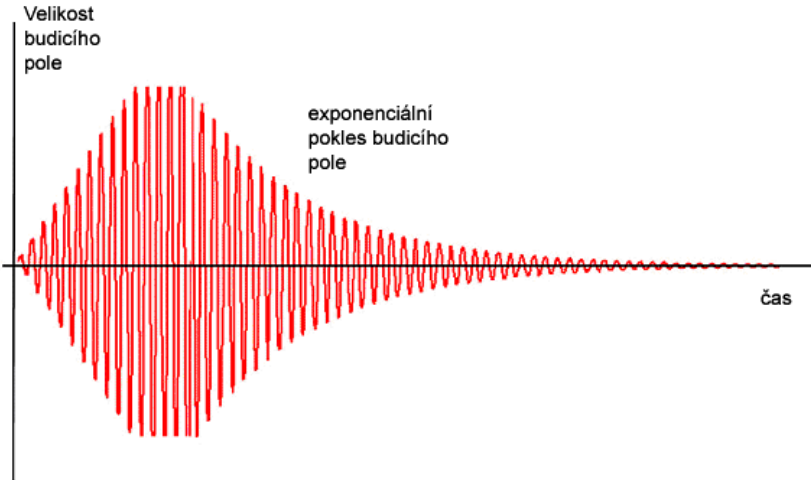
Princip cyklického odmagnetování spočívá ve vystavení předmětu potřebné intenzitě magnetického pole a jejím postupném snižování na nulovou hodnotu při periodicky opakované změně orientace působícího pole (jeho reverzaci).

Proces je znázorněn na obr.6.1.

Vzhledem k existenci známých jevů uvnitř elektricky vodivého magnetického materiálu vyžadují jednotlivé kroky a jejich sled určitý čas. Podmínkou je také již zmíněná potřebná minimální velikost magnetického pole v počátku procesu odmagnetování.

Časové nároky vznikají na základě následujících skutečností:

Proces přemagnetování při změně orientace pole se projevuje časovým (fázovým) zpožděním magnetické indukce v objemu předmětu oproti budicímu poli.



Obr.6.1 Průběh budícího pole při odmagnetování

Fig.6.1 Alternating AC demagnetizing field decay vs time

Vztah pro časový průběh poklesu amplitudy budícího pole je uveden takto:

$$u = U \times e^{-bt} \times \sin(2 \times \pi \times f \times t)$$

u okamžitá hodnota amplitudy

U.... maximální amplituda

t čas

b koeficient určující strmost poklesu amplitudy (0,1, 0,4 atd.)

Pokles mezi jednotlivými cykly - nelze předem exaktně stanovit, ale je důležitý.

Doporučení: V maximech minimálně 4 až5 cyklů, v oblasti poklesu minimálně 30 -cyklů

Další názor je, aby maximální diference v následných amplitudách nepřesáhla 4%.

Proces odmagnetování doprovází u elektricky vodivých materiálů. vznik vířivých proudů a jejich stínící efekt. V důsledku působení vířivých proudů nastává postupně v jednotlivých vrstvách materiálu předmětu pokles velikosti magnetického pole (i magnetické indukce) současně s fázovým zpožděním.

Toto je spojeno s pojmem magnetický skin efekt. S magnetickým skin efektem je tedy skin efekt elektrický svázán. Znamená to, že s poklesem hustoty vířivých proudů směrem od povrchu do hloubky předmětu nastává i pokles velikosti magnetické indukce. V obou případech je pokles doprovázen rostoucím fázovým zpožděním oproti situaci v povrchové vrstvě. Avšak oba průběhy poklesu tj. magnetické indukce a hustoty vířivých proudů se vzájemně liší.

Pro úspěšný proces odmagnetování je nutné zajistit, aby minimální velikost budícího pole nutná v počátku procesu, vyhovovala nejen v povrchových vrstvách, ale i ve vrstvě, která je nejvíce vzdálená od vinutí cívky.

Z tohoto důvodu je nutné se zabývat hloubkou vniku magnetického pole, která je závislá na permeabilitě daného materiálu, jeho konduktivitě a budicí frekvenci, která je použita.

Distribuci magnetického pole do hloubky lze ovšem zjistit u feromagnetických materiálů velice obtížně, výpočet je jen přibližný a to ještě za zjednodušujících předpokladů. A to vzhledem k nelinearitě magnetizačních charakteristik.

Přesto lze provést výpočet a grafické znázornění průběhů a to pro konkrétní materiál a budicí frekvenci.

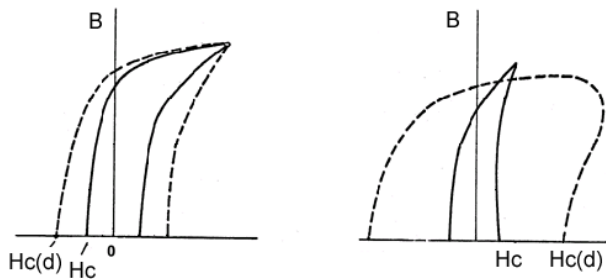
Shrnutí jevů při cyklickém odmagnetování:

- 1) Skinefekt – magnetický i elektrický - vznik vířivých proudů
- 2) Hysterezní jevy
- 3) Časové zpoždění
- 4) Vznik vyšších harmonických frekvencí
- 5) Ohřívání předmětu, energetické ztráty
- 6) Silové účinky

Hysterezní jevy:

Plocha hysterezní smyčky – přemagnetování vyžaduje energii, závislost na frekvenci f je zde lineární.

Ztráty vířivými proudy rostou s frekvencí kvadraticky f^2



*Obr. 6.2 Znázornění tvaru hysterezní smyčky při různých režimech magnetování
Čárkovane – při střídavém magnetování. Plnou čarou – při stejnosměrném magnetování*

*Fig.6.2 Shape of hysteresis loop under different conditions
Dot lines - under AC field. Solid line - under DC controlled field*

7. Výpočet vniku magnetického pole

Způsob výpočtu vniku magnetického pole do hloubky tyče z feromagnetického materiálu je výhodný za použití Besselových funkcí, jak je následně uvedeno.

Velikost a fázová pozice vektoru magnetické indukce v dané hloubce je vyjádřena vztahem:

$$B_x = B_{max} * \frac{J_0(x*Y)}{J_0(a*Y)} = B_{max} * \frac{q_{ox}}{q_{oa}} * e^{j(\Phi_{ox} - \Phi_{oa})}$$

B_x časový vektor magnetické indukce (T) ve vzdálenosti x od osy válce

B_{max} časový vektor magnetické indukce na povrchu válce $x = a$ (m)

$\frac{q_{ox}}{q_{oa}}$... relativní velikost vektoru B ve vzdálenosti x od osy

q_{oa}

Φ fázový posuv B ve vzdálenosti x od osy ($^\circ$)

$(x*Y)$... argument Besselovy funkce 1. druhu, nultého řádu J_0

j imaginární jednotka

$$Y = (-j \omega * \sigma * \mu_r * \mu_0)^{1/2}$$

Y viz výpočet

ω úhlová frekvence (Hz)

σ konduktivita (S/m)

μ_r relativní permeabilita

μ_0 magnetická konstanta

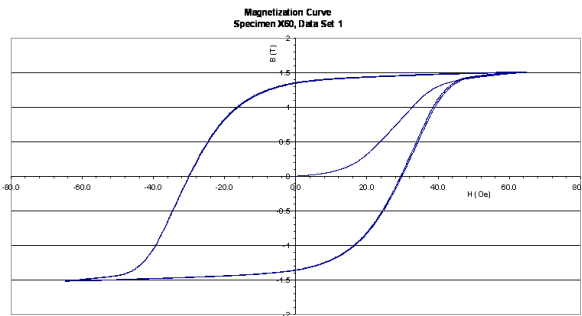
Příklad pro zvolený skutečný materiál:

H_c = cca 2,4 kA/m

B_r = 1,3 T

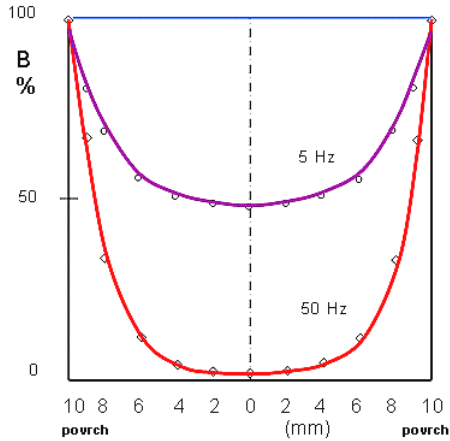
μ_r = cca 400

σ = 5 MS/m



Obr.7.1 Hysterezní smyčka zvoleného materiálu

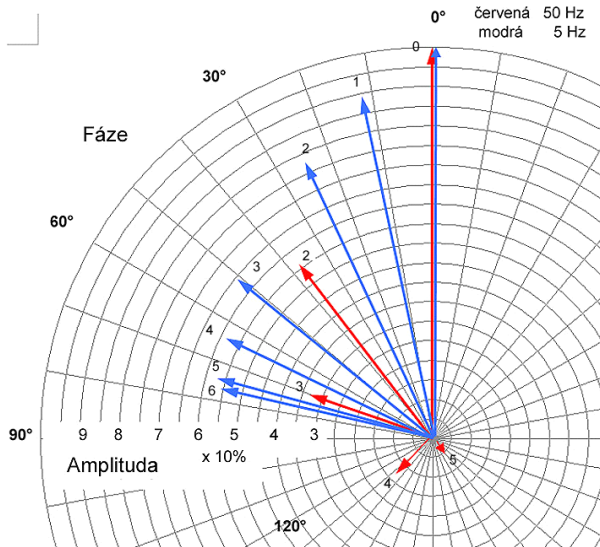
Fig. 7.1 Hysteresis loop of a selected material



Obr.7.2 Poměrná hodnota magnetické indukce ve vrstvách po průřezu tyče $d = 20$ mm z konkrétního uvedeného materiálu a to pro frekvence $f = 50$ Hz a $f = 5$ Hz

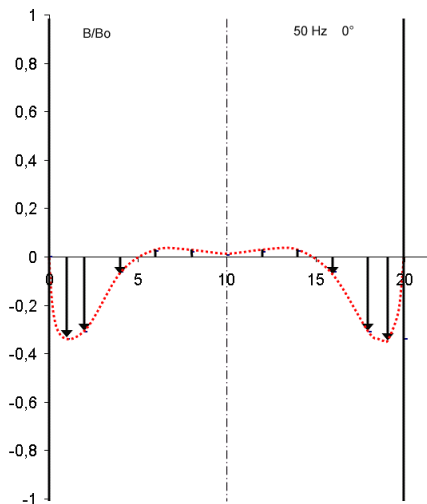
Fig.7.2 Relative values of flux density at different depth of bar cross section $d = 20$ mm. Bar made from the material mentioned above. Frequencies $f = 50$ Hz and $f = 5$ Hz.

Na následujícím obrázku 7.3 je vynesena závislost amplitudy a fáze magnetické indukce v různých hloubkách tyče v podobě polárního diagramu pro frekvence 50 Hz a 5 Hz.



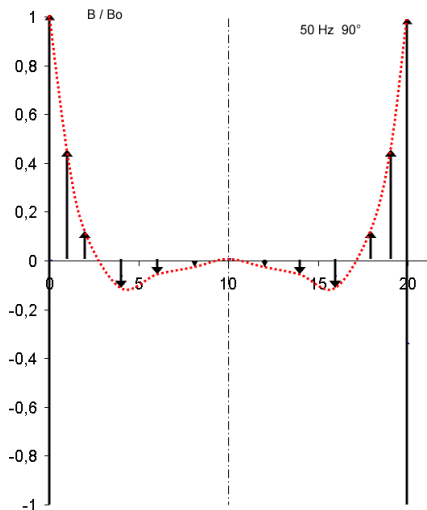
Obr.7.3 Diagram amplitudových a fázových poměrů v jednotlivých hloubkách pod povrchem tyče $d = 20$ mm pro uvedený materiál pro frekvence $f = 50$ Hz a $f = 5$ Hz

Fig. 7.3 Diagramm amplitude and phase at various depth under of the bar surface. Material mentioned above, $d = 20$ mm Frequencies $f = 50$ Hz and $f = 5$ Hz.



Obr. 7.4 Vektory magnetické indukce B v různých vrstvách po průřezu tyče $d = 20$ mm z uvedeného materiálu v daném časovém okamžiku harmonického průběhu $f = 50$ Hz (čas 90°)

Fig. 7.4 Vectors of flux density B at various depth on bar cross section at selected time shot of period. $f = 50$ Hz (phase 90°)



Obr.7.5 Vektory magnetické indukce B v různých vrstvách po průřezu tyče $d = 20$ mm z uvedeného materiálu v daném časovém okamžiku harmonického průběhu $f = 50$ Hz (čas 0)

Fig.7.5 Vectors of flux density B at various depth on bar cross section at selected time shot of period. $f = 50$ Hz (time 90°)

8. Rezonanční zapojení demagnetizéru

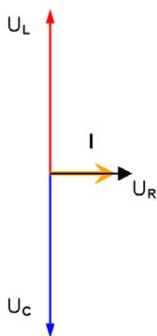
V řadě případů se používá rezonančního uspořádání. Pro odmagnetování dlouhých předmětů na lince rezonance seriová. Tímto způsobem lze efektivně zvýšit proud cívkou a tím i její pole. Proud v cívce je podstatně větší, než by byl v zapojení bez kondenzátoru a bez rezonance

Pro rezonanci přibližně platí Thomsonův vztah:

$$X_L = X_C$$

$$\omega \times L = 1 / \omega \times C$$

Reálná cívka vykazuje ohmický odpor vinutí R , do kterého se ještě připočítávají činné ztráty při magnetování předmětu.



Obr. 8.1 Vektorový diagram poměrů seriové rezonance

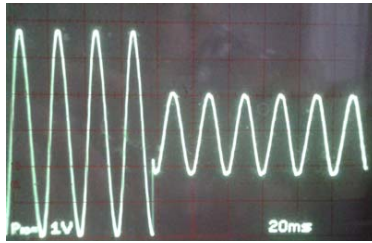
Fig. 8.1 Vector diagram for series resonance

Proud v soustavě (v seriové kombinaci L , C , R) skutečně v rezonanci je potom velikost proudu odpovídá pouze poměru:

$$I = U / R$$

Pokud by se hodnota R blížila nule, seriový obvod by se choval jako zkrat.

Pro demonstraci je zde podán osciloskopický záznam stavu malého demagnetizéru ve stavu rezonance a mimo rezonanci. Zaznamenán je poměr magnetického toku v trubce pro oba případy. Na trubce byla navlečena měřicí cívka v zóně magnetovací cívky. Viz obrázek 8.2.

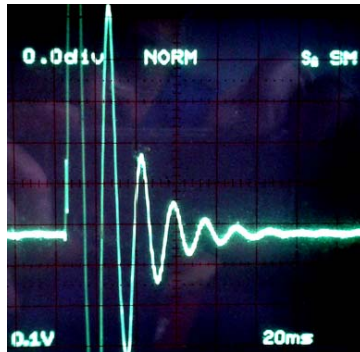


Obr.8.2 Indukované napětí v měřicí cívkě nasunutě na trubku a to uvnitř magnetovací cívký
Vlevo: v blízkosti rezonance Vpravo: bez rezonančního zapojení

Fig.8.2 Voltage induced in circumferential measurement coil around the tube inside the magnetizing coil.
Left: near to resonance condition Right: out of resonance

Pro odmagnetování jednotlivých kusů je v některých případech vhodné použít cívkou zapojenou v paralelním kmitavém rezonančním obvodu, který vytváří harmonický průběh proudu a tím i pole s postupně klesající amplitudou. Tento jev je vyvolán přerušением stejnosměrného proudu cívkou. V tomto momentě působí paralelní kmitavý obvod bez vnějšího napájení.

Pro demonstraci je na obrázku 8.3 záznam průběhu indukovaného napětí, které je úměrné magnetickému toku v ocelové tyči. Použita je měřicí cívka, navlečená na tyč.



Obr.8.3 Pokles magnetického toku cívkou v paralelním rezonančním obvodu po přerušení stejnosměrného proudu.

Fig. 8.3 Magnetic flux decay in magnetizing coil at parallel resonant circuit after DC current interruption.

Pokles amplitudy je zde poměrně rychlý, použitá cívka má nízký činitel jakosti.

Ten je definován jako poměr induktivního a činného odporu cívký:

$$Q = \omega \times L / R$$

Prvý kmit silně přesahuje rozsah zobrazení, nastavení bylo zvoleno tak, aby byly zřetelné kmity následující. Patrných je zde cca 8 period.

9. Vliv zemského magnetického pole

Zemské magnetické pole je jedním z rušivých faktorů, které ovlivňují měření zbytkového pole i samotný proces odmagnetování. Zemské magnetické pole jako vektor je v daném čase závislé na geografické poloze.

Na obrázcích je znázorněný vektor tohoto pole a jeho složky:

Platí následující skutečnosti:

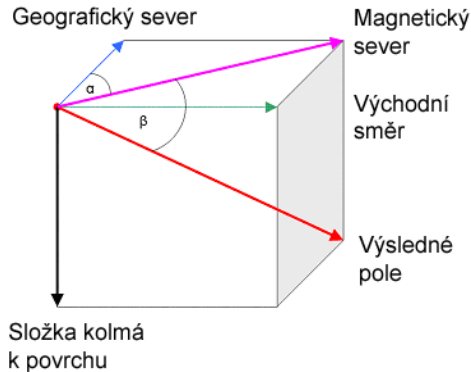
- 1) Osa rotace není shodná s osou magnetickou
- 2) Oba póly se necházejí hluboko pod zemským povrchem
- 3) Magnetické pole Země obsahuje složku horizontální a vertikální
- 4) Složka vertikální je větší, než složka horizontální – např.: v USA (70° sklon výsledného pole) a v České republice. Sklon existuje i díky pozici pólu pod povrchem.
- 5) Magnetické souřadnice geomagnetického pole jsou proměnné nejen místně, ale i časově.

Úhel mezi směrem celkového vektoru a horizontální složkou se nazývá magnetická inklinace a ta je u nás kolem 65°.

Tabulkové hodnoty pro r. 1975 v Praze a v Brně jsou:

$H = 15,45 \text{ A/m}$, $\delta = -0,59^\circ$, $i = 66,09^\circ$, $T = 38,13 \text{ A/m}$

$H = 15,83 \text{ A/m}$, $\delta = +0,15^\circ$, $i = 65,42^\circ$, $T = 38,06 \text{ A/m}$



Obr. 9.1 Zemské magnetické pole a jeho složky

Fig. 9.1 Earth magnetic field and its components

I dlouhé feromagnetické součásti orientované v pozici sever – jih působí jako koncentrátor magnetického pole země – a to vzhledem k vyšší magnetické vodivosti v porovnání s okolím.

- a) I dlouhá součást (předmět) se celá nachází v relativně homogenním magnetickém poli. Součást je polarizována.
- b) Demagnetizační účinek je zde malý nebo zanedbatelný, vysoká hodnota (L/D)

10. Kompenzace zemského pole při odmagnetování

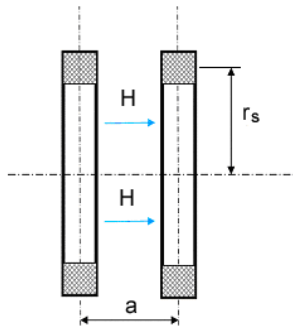
Časté doporučení je odmagnetování provádět při pozici předmětu východ – západ.

Kompenzace: Pomocné vinutí v demagnetizéru, napájené z regulovatelného proudového zdroje s měřením proudu

Kompenzace okolních polí spočívá v zavedení dalšího pole, které má opačný smysl oproti poli rušivému a stejnou velikost. Toto kompenzační pole je podle konkrétní situace možno vytvořit např. pomocí permanentních magnetů nebo různých konstrukcí cívek. Některé demagnetizéry mají již kompenzační vinutí vestavěno, napájené je z regulovaného proudového zdroje s měřením proudu.

Jedná se zejména o případ odmagnetování trubek nebo tyčí na výrobních linkách.

Další variantou kompenzace zejména při odmagnetování jednotlivých předmětů i při ruční manipulaci je použití Helmholtzových cívek. Jedná se o dvojici stejných cívek, jejichž uspořádání je principiálně znázorněno na obrázku 10.1.



Obr 10.1 Základní uspořádání Helmholtzových cívek

Fig. 10.1 Fundamental arrangement of Helmholtz coils

Ve směru osy mezi cívkami je v definované zóně vytvářeno homogenní magnetické pole.

Jeho velikost je dána vztahem:

$$H_0 = \frac{1,6}{\sqrt{5}} * \frac{N * I}{r} \quad \text{za předpokladu } a = r$$

H_0 (A/m)

I proud cívky (A)

N počet závitů jedné cívky

r střední poloměr cívky (m)

V této souvislosti lze zmínit i triaxiální uspořádání Helmholtzových cívek, které je včetně přibližných proporcí znázorněno na obrázku 10.2. Lze tak získat významný prostor bez vlivu okolních polí, tedy nejen pole zemského.



Obr.10.2 Triaxiální uspořádání Helmholtzových cívek

Fig .10.2 Triaxial arrangement of Helmholtz coils

Jedním ze způsobů získání prostoru bez cizích magnetických polí zejména pro měření je použití stínících krytů. Viz obrázek 10.3.



Obr.10.3 Stínící kryt pro měření

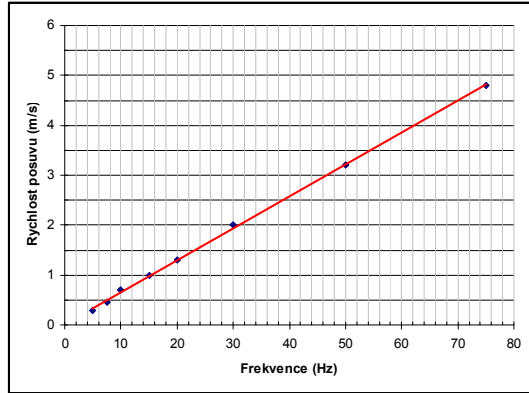
Fig. 10.3 Shielding cabinet for measurement

Notoricky je znám problém při obloukovém sváření potrubí. Řešen bývá vytvořením cívký, nebo dvou ve formě navinutého kabelu v blízkosti konců trubky. Cívky jsou napájeny z řízeného zdroje.

11. Relace rychlosti a frekvence při cyklickém odmagnetování

Věc spočívá ve stanovení minimálního počtu period demagnetizačního pole, které stačí působit na krátký úsek trubky nebo tyče, které se při posuvu nachází v cívice. Toto při dané rychlosti závisí na rychlosti průchodu předmětu cívkou a opačně.

Graf na obrázku 11.1, sestrojený na základě údajů výrobce konkrétního demagnetizéru ukazuje lineární závislost maximální přípustné rychlosti průchodu předmětu na nastavené frekvenci.



Obr.11.1 Závislost rychlosti posuvu na pracovní frekvenci f demagnetizačního pole

Fig. 11.1 Transportation speed vs frequency of demagnetization field

Pro daný případ je délka cívky cca 260 mm a zvolena frekvence $f = 5$ Hz. Doba jedné periody odpovídá 0,2 sec. Dovolená maximální rychlost pohybu je 0,3 m/sec. To znamená, že počet cyklů připadajících na jedno místo trubky uvnitř cívky vychází cca 4,4. Počítá se zřejmě s dozníváním procesu odmagnetování ještě mimo cívku.

12. Možné důvody nevyhovujícího výsledku odmagnetování

- 1) Chybný odhad potřebné minimální hodnoty pole v počátku procesu
- 2) Příliš vysoká pracovní frekvence pro daný předmět
- 3) Nedostatečný počet cyklů
- 4) Příliš velký úbytek amplitudy pole v následných krocích postupu
- 5) Interference cizích okolních polí včetně pole zemského
- 6) Přítomnost magnetických součástí v blízkosti předmětu, který je právě odmagnetován
- 7) Příliš vysoká rychlost posuvu (viz. také bod 3)
- 8) Náhodný poruchový stav v napájení cívky
- 9) Předčasné vyjmutí předmětu ze zóny klesajícího pole nebo vypnutí proudu před úplným dokončením procesu

- 10) Chybná orientace umístění předmětu – nesoulad mezi orientací zbytkového pole a pole demagnetizéru
- 11) Opomenutí provádění změn polohy předmětu v zóně pole magnetizéru vzhledem k poli magnetizéru, pokud to geometrie předmětu vyžaduje
- 12) I po řádném dokončení procesu odmagnetování pak umístění předmětu do nevhodného okolí včetně následného kontaktu s předměty, které jsou zdrojem magnetického pole

13. Měření v rámci ověření výsledků odmagnetování

V této souvislosti je nutné respektovat existenci normálové a tečné složky magnetického pole. K provozním měřením se téměř výhradně používá přístrojů s Hallovou sondou, která má schopnost reagovat na orientaci pole, tedy na směr i polaritu.

Sonda musí splňovat následující základní požadavky, což je:

- a) vyhovující linearita
- b) dosažitelné malé rozměry
- c) rozeznání směru a polarity
- d) zanedbatelný drift a co nelepší teplotní stabilita
- e) potřebný měřicí rozsah
- f) schopnost plné funkce v těsné blízkosti feromagnetického předmětu na kterém se měření provádí

V současné době řada typů Hallové sondy uvedené požadavky splňují, přímo v pouzdru sondy bývá zabudován elektronický systém, který zajišťuje teplotní kompenzaci a zanedbatelný drift. Výstup sondy je koncipován s nízkou impedancí, takže není problém s délkou spojovacího kabelu a případnými rušivými jevy.

V této souvislosti je také vhodné konstatovat, že pro tento účel není vhodná např. feromagnetická sonda.

Indukci B v objemu předmětu nelze jednoduše měřit, k hodnocení zbytkového magnetizmu je používána metoda měření pole vystupujícího z předmětu do vzduchu. V souladu s předpisy a dlouhou tradicí se měření provádí v definovaném místě a v definované pozici sondy.

U tyčí a trubek to bývá měření normálové složky na čele tyče a na čele stěny trubky. Na hraně čela lze naměřit hodnoty vyšší, vzhledem ke značnému gradientu pole v této pozici a tím i veliké citlivosti na změnu pozice (naklopení sondy) to není výhodné.

U předmětů, které mají vzhledem ke způsobu magnetování charakter uzavřeného magnetického obvodu jako je na příklad prstenec, ložiskový kroužek, je situace poněkud odlišná. Po skončení cirkulárního magnetování je zbytkové pole v cirkulárním směru nulové, ale zbytková indukce B_r má svou hodnotu, kterou nelze běžně zjistit.

Existenci pole ve směru rotační osy kroužku lze zjistit a pole měřit. Rovněž i pole v příčném směru – kolmo na osu.

Jednotka intenzity magnetického pole ... 1 A / m v soustavě SI

Jednotka intenzity magnetického pole ... 1 Oe (Oersted) v soustavě cgs

79,6 A / m odpovídá hodnotě 1 Oe

Jednotka magnetické indukce B T (tesla) (SI)

G (Gauss) v soustavě cgs

1 T odpovídá hodnotě 10 000 G

Ve vzduchu je magnetické pole o velikosti 1 Oe číselně rovno hodnotě magnetické indukce 1 G

K dispozici jsou i přístroje se stupnicí v jednotkách na příklad mT – militesla, což je jednotka magnetické indukce, nikoliv pole. V případě zájmu se pak provede přepočítání na hodnotu pole, také v soustavě SI, tj. A/m.

Proto se stupnice některých měřičů pole takto koncipují.

Platí následující přepočty:

$$H = B / \mu_0$$

pro hodnotu 1T ve vzduchu:

$$H = 1 / (4 \times \pi \times 10^{-7}) \times 1 = 796 \text{ kA/m}$$

Pro hodnotu 1 mT ve vzduchu:

$$H = 0,796 \text{ kA/m} = 796 \text{ A/m}$$

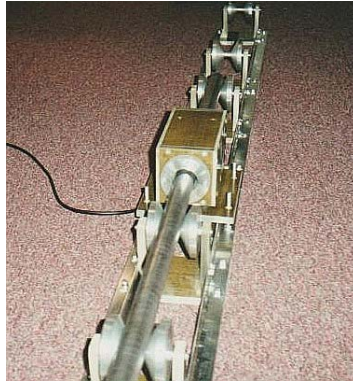
což odpovídá ...10 G ---- 10 Oe



Obr13.1 Příklad měřiče zbytkového pole s Hallovou sondou

Fig. 13.1 Example of residual field measurement device with Hall probe

Byly učiněny kroky pro vývoj zařízení pro automatizované měření zbytkového magnetizmu trubek nebo tyčí za jejich plynulého pohybu na lince. Protože nelze v tomto případě měřit přímo na čele trubky, měřena je hodnota normálové složky na konci trubky nebo tyče. Na obrázku 13.2 je znázorněno umístění snímací části, která je napojena na elektronickou část. Ta obsahuje zesilovače, detektor špičkové hodnoty, prahový monitor a napájecí část.



Obr.13.2 Snímací část vývojového vzorku firmy PTS pro kontinuální měření zbytkového pole trubek nebo tyčí

Fig.13.2 Sensing part of developed apparatus sample PTS company for continuous residual field measurements of tubes and rods.

Mezi snímanou špičkovou hodnotou normálové složky a odpovídající hodnotou na čele existuje pro daný typ výrobku určitý vztah pro přepočít.

V době vývoje však nebyl o tuto záležitost větší zájem.

14. Poznámky ke koncepci zařízení

V zóně působení budící demagnetizační cívky by se neměly používat konstrukční a spojovací součásti z magnetických materiálů včetně přepážek, krytů, šroubů podložek atd. Konstrukční díly demagnetizéru v blízkosti vinutí by měly být opatřeny tak, aby byla co nejvíce omezena cesta vířivých proudů. To znamená konstrukční přerušení cest, kudy by jinak vířivé proudy mohly protékat. Demagnetizér umístit v dostatečné vzdálenosti (0,6 až 1,5 m) od ostatních konstrukcí nebo zařízení, které mohou produkovat magnetické pole.

Instalovat kompenzační prvky okolního magnetického pole. Umístění kompletu zařízení ve směru východ – západ je bohužel většinou nereálné.

Rozměry cívek nebo tunelu co nejvíce přezpůsobit rozměrům předmětů, které budou odmagnetovávány.

Nadměrné rozměry cívek vedou k nevhodnému využití a dosažitelná hodnota magnetického pole je nižší ve srovnání s cívkou menšího průměru o stejné délce a stejném počtu závitů při daném proudu. Při větším průměru cívky je větší celková délka drátu vinutí a při zachování průřezu drátu i vyšší hodnota ohmického odporu. Vyšší je pak i hodnota reaktance cívky a tím i impedance, což vede k nutnosti použití vyššího napětí zdroje.

V této souvislosti platí lineární vztah pole – proud, ale bohužel kvadratická závislost ztrátového výkonu – proud ($P = R \times I^2$), což má za následek výrazný nárůst oteplení při každém zvýšení proudu.

Pokud pro daný předmět je nutné vytvářet velmi silná pole, činné ztráty mohou i po optimalizaci cívky vysoké. Proto bývá nutností použít chlazení a to nuceným prouděním vzduchu nebo vody.

Pro snížení tepelných ztrát přispívá rovněž provoz v přerušovaném režimu.

V některých případech je vhodné použití demagnetizéru pracujícího s magnetovacím jhem. Jedná se například o případy odmagnetování menších součástek ve skupinách, kde je nutno vyloučit vzájemná kontakty. Jsou to např. precizní součástky s ostrými funkčními hranami kde není přípustné jakékoliv mechanické poškození. K tomu je vhodné použít jednobuňkové zásobníky ve kterých jsou tyto součástky ve vzájemně izolované pozici fixovány. Tím je zabráněno jejich seskupování a vzájemnému odírání vlivem značných silových účinků magnetického pole jha.

15. Příklady provedení demagnetizérů:



Obr. 15.1 Demagnetizační tunel DT-250F, Zdroj s frekvenčním měničem, cívka světlost 250x250 mm, intenzita magnetického pole ve středu cívky je 44,1kA/m při frekvenci 25Hz (PTS comp.)

Fig. 15.1 Demagnetizer DT – 250F , supplied by power frequency converter, coil input dimensions 250 x 250 mm, maximum field strength 44,1 kA/m at coil center, at frequency 25 Hz, (PTS comp.)



Obr. 15.2 Demagnetizační cívka do linky, vnitřní průměr 800mm, intenzita magnetického pole ve středu cívky je 6,8kA/m při frekvenci 50Hz

Fig. 15.2 Demagnetizer for production line, inner diameter 800 mm, field strength 6,8 kA/m at coil center, frequency 50 Hz, (PTS comp.)



Obr. 15.3 Demagnetizační tunel DT-1300F, Zdroj s frekvenčním měničem, cívka světlost 1300 x 550 mm, intenzita magnetického pole ve středu cívky je 9,1kA/m při frekvenci 30Hz

Fig. 15.3 Demagnetizer DT – 1300F , supplied by power frequency converter, coil input dimensions 1300 x 550 mm, field strength 9,1 kA/m at coil center, frequency 30 Hz, (PTS comp.)

U jader transformátorů v energetice bývá zapotřebí odmagnetovat jádro, po testech, kde se provádějí stejnosměrná měření. Důvodem je přechodový jev, který vzniká v okamžiku připojení transformátoru. Přechodový jev vznikne vždy, ale v případě jádra vykazujícího zbytkovou indukci je nárazový proud daleko vyšší, než v případě jádra bez stejnosměrného předpětí. Extrémně vysoký nárazový proud vyvolá silové účinky ve vinutí, které mohou mít za následek vážné poškození transformátoru a návazné problémy.

16. Závěr

Vzhledem k množství výrobků nebo součástí různých zařízení není možno rozebírat celý rozsah této problematiky v jediném příspěvku (například téma odmagnetování ve výrobě a montáži ložisek a další).

I přes skutečnost, že toto téma je dlouhá léta stále předmětem diskusí včetně příležitostných sporů mezi výrobcem a zákazníky, zůstává řada věcí v tomto oboru stále nevyřešených a to jak v teoretických základech, tak i v postupech.

Někdy bývají ze strany zákazníků vzhledem k finálnímu použití výrobku vyžadována i zbytečně přísná kritéria pro maximální měřenou hodnotu zbytkového pole.

Velmi často se stává, že i po správném a důkladném odmagnetování je celé úsilí a výsledek práce prakticky zničen bezprostředně po dokončeném postupu naprosto nevhodnou manipulací. Je to např. vložení do blízkosti ostatních zmagnetovaných předmětů, nepromyšleným transportem, seskupením jednotlivých kusů atd.. Hrozivá je manipulace pomocí jeřábu s magnetickým uchopením. "

Literatura:

- [1] Vallon GmbH: Degaussing finished and semi-finished industrial products
- [2] Trnka: Teoretická elektrotechnika II – učební texty ČVUT
- [3] Foerster: Demagnetizer 2.980 - Informační materiály
- [4] Hejtmanová, Draxler: Elektrická měření ČVUT – 1996 – učební texty
- [5] Draxler, Dufek, Hrabák: Magnetické prvky – ČVUT – přednášky
- [6] Kubala, Solnař, Šnajberk: Postup při odmagnetování a měření zbytkového magnetického pole. Referát – Konference ČNDT 2000
- [7] Gescheidtová, Rez: Průnik magnetického pole do součástí při různých průbězích magnetovacího proudu. Referát – Konference ČNDT 2001
- [8] Rez: Vliv tvaru součástí při magnetické kontrole struktury. Konference ČNDT 1993
- [9] Mauer magnetic AG: Demagnetization of large surface object - Informační materiály
- [10] Duben: Přednášky z elektromagnetických metod
- [11] Hassdenteufel, Květ: Elektrotechnické materiály – SNTL 1967
- [12] Annis: Precision demagnetizing and testing equipment Informační materiály firmy R.B. Annis instruments, Inc



INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE V NDT

INFRARED THERMOGRAPHY IN NDT

Jiří Svoboda

“TMV SS“ spol. s r.o.

Contact email: jiri.svoboda@tmvss.cz

Abstrakt

V příspěvku je úvod do infračervené termografie používané v NDT, která je známa pod názvem Infrared thermographic testing (TT). V další části je vysvětlen základní rozdíl mezi aktivní a pasivní termografií, včetně základních principů a metod a používané techniky. Bude podána informace o stávajících a připravovaných normách zaměřených na infračervenou termografii používanou v nedestruktivním zkoušení.

Klíčová slova: *aktivní a pasivní infračervená termografie, metody a principy, technika*

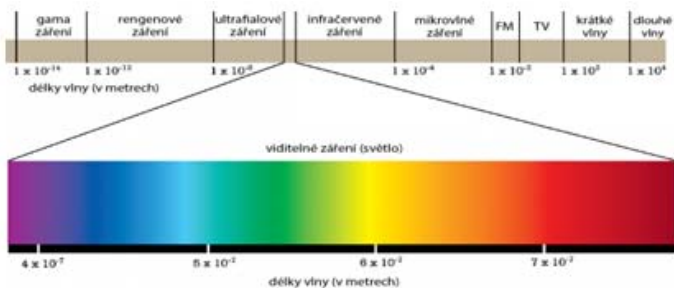
Abstract

In this paper is an introduction to infrared thermography used in NDT, known as Infrared Thermographic Testing (TT). The next part explains the basic difference between active and passive thermography, including basic principles and methods and used techniques. Information on current and prepared standards for infrared thermography used in non-destructive testing will be provided.

Key words: *active and passive infrared thermography, methods and principles, technique*

1. Úvod

Když v roce 1800 William Herschel objevil pomocí hranolu, kterým procházely sluneční paprsky, a kterým rozkládal sluneční záření na jednotlivé části/barvy, které přitom měřil teploměrem (nejvyšší teplotu naměřil za červenou barvou), svět pro lidské oko neviditelného tepelného záření (lidské oko je schopno „vidět teplotu“ objektů, jejichž teplota je vyšší než 130 °C). Byl tak vytvořen základ další pro výzkum a práce i v části elektromagnetického spektra, dnes nazývaného infračervené záření, které je definováno vlnovými délkami cca 800 nm až 1 mm – viz obr. 1



Obr. 1 Rozdělení elektromagnetického spektra / Distribution of electromagnetic spectrum

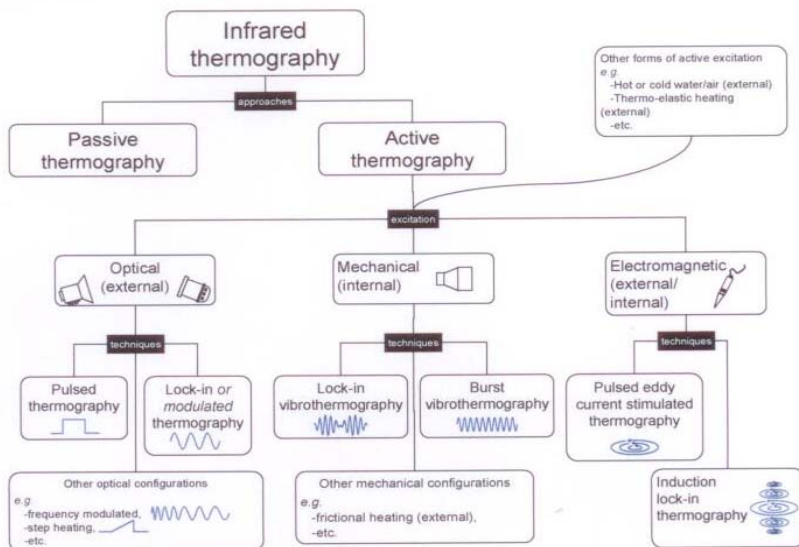
Legenda k obr. 1:

Gama záření – gamma radiation, rentgenové záření – X rays, ultrafialové záření – UV radiation, viditelné záření (světlo) – visible radiation (light) infračervené záření – infrared radiation, mikrovlnné záření – microwave radiation, krátké vlny – short wave, dlouhé vlny – long wave

Pozn.: Prapředci Williama Herschela Jelínkové pocházeli z Heršpic u Slavkova, kteří po emigraci do Německa se přejmenovali na Hirschelové a následně Friedrich William Hirschel, který se narodil v Hannoveru, si po přestěhování do Anglie změnil jméno na William Herschel. (William Herschel byl velmi nadaný, byl astronomem, objevil mj. planetu Uran, byl hudebníkem, celkem složil 24 symfonií, 14 koncertů, 44 komorních skladeb, byl konstruktérem dalekohledů, v roce 1789 dokončil dalekohled s průměrem 122 cm a ohniskovou vzdáleností asi 12 m.) Experiment s hranolem později zopakoval Johann Wilhelm Ritter, který objevil v roce 1801, při podobném uspořádání pokusu, ultrafialové záření, kdy za modrou barvu položil proužek papíru namočeného do roztoku chloridu stříbrného, který působením neviditelného záření zčernal. /1/ Pro informaci je možné doplnit, že syn W. Herschela John Herschel navrhl prototyp IR zobrazovače – evaporograf, kde sluneční záření bylo zaměřeno na rozptýlené částičky (suspenzi) uhlíku v alkoholu a získaný obraz nazval v roce 1840 názvem termogram, což je výraz který se používá dodnes.

Samozřejmě po objevu tepelného záření v r. 1800, trvalo mnoho dalších let, než byly vyrobeny (v šedesátých rocích minulého století) první termografické systémy/kamery (vyráběla je dnes již zaniklá švédská firma AGA IRS, která jejím výrobkům dala název Thermovision®). Dnes vyrábí termografické systémy další firmy a společnosti, současně době vyráběná infračervená termografická technika (dále IRT) je dostupná v celé řadě typů a technických provedení.

2. Základní rozdělení IRT



Obr. 2 Rozdělení IRT / Distribution of IRT

Na obr. 2 je uvedeno rozdělení IRT na dvě základní části na:

- pasivní termografii
- aktivní termografii.

Podle používané techniky je dále možné rozdělit IRT na:

- systémy s nechlazenými (mikrobolometrickými) detektory
- chlazenými (fotonovými) detektory.

Pozn.: Popis jednotlivých IRT by přesáhl rámec tohoto příspěvku, další informace jsou uvedeny např. v [2]. Nicméně se zaměřením na název tohoto příspěvku, bude v dalším textu hlavně zmíněna IRT s chlazenými fotonovými detektory.

Podle používaných metod je možné rozdělit použití IRT na:

- 1) Monitorování stavu a diagnostika nazývané také CM α D
- 2) Termografické testování (TT)

3. Porovnání termografických metod CM α D a TT

CM α D	TT
Pasivní	Aktivní
Měření absolutních teplot na povrchu pro vyhodnocení stavu	Použití změn povrchových teplot měnících se v závislosti na ohřevu pro vyhodnocení pod-povrchových vlastností
Jeden termogram většinou postačuje	Výsledný termogram se skládá ze sekvence termogramů
Okolní teplota může mít vliv na výsledný údaj	Není závislé na okolní teplotě
Emisivita je důležitý parametr	Emisivita není podstatná

3.1 Monitorování stavu a diagnostika

Použití v tomto oboru je velmi široké, jedná se především o pasivní IRT. Nejvíce se používá IRT v průmyslu, energetice, ve stavebnictví, ale také ve výzkumu a vývoji, zdravotnictví, prakticky všude tam, kde je možné zobrazovat, kvantifikovat a analyzovat teplotní pole na zaměřovaných objektech, předmětech apod.

Metody vyhodnocování jsou v podstatě dvě: kvalitativní a kvantitativní

Kvalitativní metoda je vyhodnocování odstínů či kontrastů v obrazech-termogramech bez toho, aby byly vypočítávány/kvantifikovány absolutní hodnoty teplot.

Kvantitativní metoda, je vypočítávání/kvantifikace absolutních hodnoty teplot. Zde jenom krátké připomenutí, že žádný termografický systém (a ani standardní bezkontaktní teploměr) neměří teplotu přímo. Pro výpočet či kvantifikaci teplot musí být uvažovány a co nejpřesněji použity všechny fyzikální zákony a parametry IRT, aby byly získány správné hodnoty absolutních teplot. Těmito parametry jsou: emisivita, odražená zdánlivá teplota, vzdálenost a relativní vlhkost atmosféry (vyhodnocení přenosu atmosférou) a teplota atmosféry. V případě, že je ještě použita tzv. externí optika, tj. optický, v dané spektrální IR oblasti transparentní prvek-okno, které je v optické ose mezi měřeným objektem a měřícím systémem, je nutné znát jeho propustnost a v době měření i jeho teplotu.

Při monitorování stavu a diagnostice se hlavně používá IRT s nechlazenými (tepelnými) mikrobolometrickými detektory – rozsah měřených teplot (samozřejmě záleží na typu) je většinou od - 20 °C až + 1200 °C. Určitým omezením u těchto typů je opakovací rychlost obrazu /snímková frekvence, která v základním režimu je 50 Hz resp. 60 Hz. Pokud je změněna velikost

zobrazovaného obrazu/ termogramu např. na polovinu, tak je možné zobrazovat termogramy s frekvencí 100 Hz resp. 120 Hz.

3.2 Termografické testování

Termografické testování, správně zkoušení, má široké uplatnění v NDT a tato metoda je uvedena mezi ostatními metodami používanými v NDT. V dalších odstavcích bude uveden podrobnější popis TT, zde jenom informace, že při TT se využívají hlavně IRT s chlazenými fotonovými detektory. Hlavními jejich přednostmi, při srovnání s IRT s nechlazenými detektory jejichž integrační čas je v průměru cca 10 ms, je integrační čas IRT s chlazenými detektory, který může být až v jednotkách μs .

3.3. Pojmy a termíny vztahující se k TT NDT

Anizotropie; dutina; delaminace; emisivita; koroze; napětí; odrazivost; porosita; složení/skladba; spojování; stav vytvrzení; tepelná vodivost; tepelná jímavost; hloubka tepelného průniku; koeficient odrazu tepla; dynamický teplotní kontrast; amplitudový obraz; fázový obraz; tvarování; tloušťky pokovení; tloušťka; tepelné zpracování; vlhkost

4. Aktivní termografie

Aktivní termografie vyžaduje externí energetický zdroj pro tepelnou stimulaci zkoušeného objektu. Pro zkoušení daného objektu musí být zvolen vhodný zdroj energie a metoda buzení. Existuje řada budících zdrojů, např. zdroj optického záření, generátor horkého plynu, indukční cívky, vibrační sondy a chladicí zařízení. Jako příklady buzení je možné uvést pulz, krok a harmonické.

Použití jednotlivých tepelných budících zdrojů je uvedeno v tabulce 1. /3/

Tepelný budící zdroj	Výhody	Nedostatky
Laser	Velmi vysoká, stabilní a nastavitelná hustota energie, její stejnost, rychlý ohřev	Malá oblast zahřátí (je možné pomocí lineárního skenování vychylovat paprsek laseru), bezpečnostní požadavky odpovídající použití vysoko výkonných laserů
Záblesková lampa	Rychlé zahřátí, velká oblast zahřátí, může být zaznamenán celý průběh teplot při zahřívání	Malá hustota energie, nestejnost, jsou vyžadovány bezpečnostní požadavky (ochrana očí)
Halogenová lampa	Stabilní a nastavitelná hustota energie, velká oblast zahřátí	Nízká hustota energie, její nestejnost

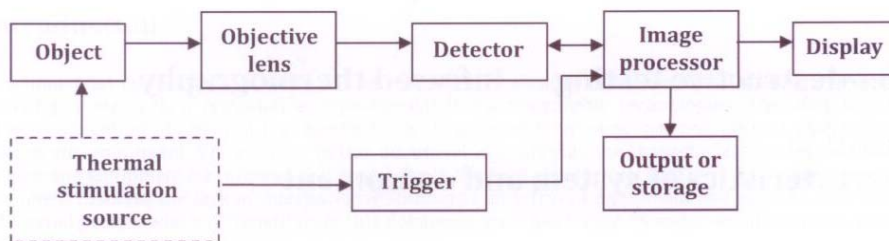
Bodové světlo	Opakovatelné zahřívání, vysoká hustota energie, její stejnost	Malá oblast zahřátí
Generátor horkých plynů	Rychlé zahřátí, velká oblast zahřátí, nestejnost	Nízká hustota energie
Zařízení elektromagnetické indukce	Velká oblast zahřátí, vysoká hustota energie	Pouze (elektricky) vodivé materiály
Vibrační zařízení	Velmi velká oblast zahřátí, vysoká selektivita, vnitřní zahřívání	Nízká hustota energie, nestejnost, vazební problémy

Tabulka 1 – Přednosti a nedostatky různých zdrojů tepelného buzení/ Advantages and drawbacks of different thermal stimulation sources

4.1 Uspořádání IR systému pro aktivní termografii

Na obr. 3 je zobrazeno uspořádání IR systému pro aktivní termografii, které má několik částí:

- zdroj tepelného buzení
- zkoušený objekt
- spouštěč
- termografický systém (objektiv, detektor, obrazový procesor, displej)
- výstup nebo ukládání



Obr. 3 Uspořádání IR systému pro aktivní termografii/ IR system setup

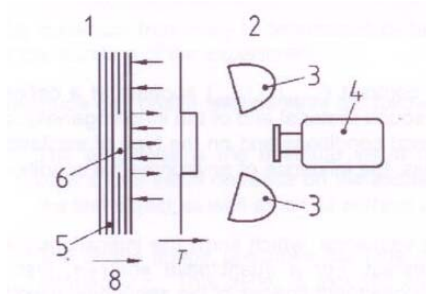
Legenda: Object/(zkoušený) objekt; Objective lens/objektiv; Detector/detektor; Image processor/obrazový procesor; Display/obrazovka; Output or storage/výstup nebo ukládání; Thermal stimulation source/zdroj tepelného buzení; Trigger/spoušť (spouštěcí impuls)

4.2 Typické uspořádání IRT v aktivní termografii

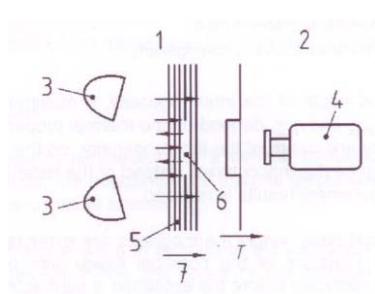
4.2.1 Uspořádání odrazu a prostupu

V uspořádání odrazu jsou zdroj tepelného buzení a IR kamera umístěny na té samé straně zkoušeného objektu (obr. 4.1). Pokud je buzení provedeno zdrojem záření, je třeba vzít v úvahu, že tento zdroj může vyzařovat záření ve spektrální citlivosti IR kamery.

V uspořádání prostupu jsou zdroj tepelného buzení a IR kamera umístěny na protilehlých stranách zkoušeného objektu. (obr. 4.2). Toto uspořádání může být použito pouze u zkoušených objektů, které jsou přístupny z obou stran a obecně mají tloušťku menší nebo rovnou délce tepelné vlny.



Obr. 4.1 Uspořádání odrazu/
Reflection configuration



Obr. 4.2 Uspořádání prostupu/
Transmission configuration

Legenda:

1 zadní strana/backside, 2 čelní strana/ frontside, 3 zdroj buzení např. halogenová lampa/ excitation source e. g. halogen lamp, 4 IR kamera/IR camera, 5 zkoušený objekt/tested object, 6 diskontinuita /diskontinuity, 7 prostupující vlna/ permeating wave, 8 vlna odražená na diskontinuitě/ wave reflected on diskontinuity, T teplota/ temperature

5. Typy excitací/buzení

Typy buzení lze rozdělit na časově omezené a na prostorové.

5.1 Časově omezená buzení:

- Pulzní termografie
- Aktivní termografie se skokovou excitací
- Modulační termografie (lock-in termografie)
- Aktivní termografie s relativním pohybem časově nezávislého zdroje energie vzhledem k testovanému objektu

5.2 Prostorová buzení

- Dvourozměrné
- Místní
- Celého objemu

V praxi se samozřejmě používá kombinace obou typů buzení v závislosti na podmínkách/cílech zkoušení a na zkoušeném objektu.

6. Teorie tepelné vlny, materiálové veličiny

Metody aktivní termografie se opírají o tzv. teorii tepelné vlny. Tato teorie, kterou se poprvé zabývali francouzský matematik Fourier (1826) a švédský fyzik Ångström (1863), říká, že teplota v daném čase, v dané hloubce polo-nekonečného vzorku ohříváného zdrojem energie z jeho povrchu závisí především na materiálových vlastnostech a frekvenčních charakteristikách tepelného zdroje.

$$T(z, t) = T_0 \cdot e^{-\frac{z}{\mu}} \cdot \cos\left(\Omega \cdot t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \text{ [K]}$$

$T(z; t)$ je změna teploty ve vzorku oproti střední hodnotě „kmitání“ teplotního buzení na povrchu (sinusově modulovaný ohřev), T_0 je amplituda teploty tohoto buzení ($z = 0$).

$\Omega = 2\pi f$ [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] je úhlová frekvence tepelné vlny (vychází z modulačního kmitočtu zdroje) a λ je její vlnová délka.

$$\lambda = 2\pi\mu \text{ [m]}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\Omega}} \text{ [m]}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

μ se nazývá hloubkou vniku a vyjadřuje vzdálenost od povrchu, kde je teplota rovna $\frac{1}{e}$ násobku povrchové teploty. Dalšími konstantami jsou součinitel teplotní vodivosti α , součinitel tepelné vodivosti k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], hustota ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a měrné teplo C_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Obdobně se tak dá vyjádřit rychlost šíření tepelné vlny v materiálu.

$$v = \lambda \cdot \frac{\Omega}{2\pi} = 2 \cdot \Omega \cdot \alpha \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Podobně jako jiné vlny (např. ultrazvuk) i u tepelných vln dochází k jejímu odrazu v místech, kde dojde ke skokové změně vlastností šíření, v tomto případě tepelné jímavosti. Těchto jevů se následně využívá v různých metodách aktivní termografie. Jednou z nejdůležitějších materiálových vlastností, z hlediska aktivní termografie je tepelná vodivost. Jedná se o schopnost materiálu vést teplo, resp. udává tepelný tok jednotkovým průřezem materiálu na jednotkový gradient teploty při ustáleném vedení tepla. Veličinou určující tuto schopnost je součinitel tepelné vodivosti k . Teplotní vodivost vyjadřuje schopnost prostředí vyrovnávat teploty při neustáleném vedení tepla; pro určení míry se používá součinitel teplotní vodivosti α . Tepelná jímavost/tepelná

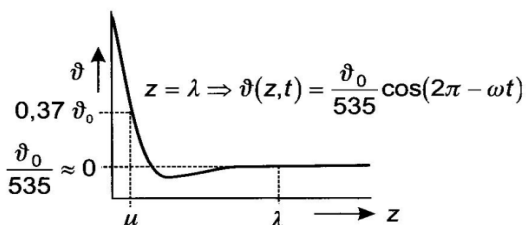
setrvačnost je schopnost materiálu přijímat teplo, resp. je to míra odporu materiálu ke změně teploty. Její velikost se vyjadřuje součinitelem tepelné jímavosti e .

$$e = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} \left[\frac{J}{s^2 \cdot m^2 \cdot K} \right]$$

Pozn.: Celá tato pasáž byla převzata z /4/, kde jsou odvolávky na další použité literatury. Zde je doplněno, že pro součinitel tepelné vodivosti se normovaně používá symbol λ k se používá pro součinitel prostupu tepla /5/. V literatuře /5/ a také v tomto článku, je symbol λ použit pro vlnovou délku tepelné vlny.

6.1 Hloubka vniku tepelné vlny

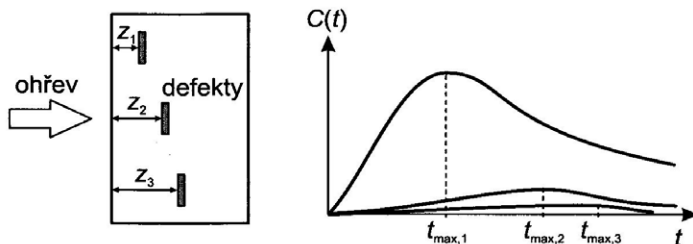
V literatuře /6/ je uveden diagram hloubky vniku tepelné vlny, kdy při modulovaném ohřevu povrchu objektu úhlovou frekvencí ω se v podpovrchové oblasti šíří velmi tlumená a rozptýlená tepelná vlna, kde je ϑ (teplota) v hloubce z a v čase t a μ je hloubka vniku tepelné vlny, při které teplota klesne na hodnotu $1/e^{\vartheta_0}$, kde ϑ_0 je teplota na povrchu objektu.



Obr. 5.1 Hloubka vniku tepelné vlny/ Depth of penetration of thermal wave

Diskontinuita v objektu způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny a na povrchu objektu lze pozorovat na teplotním poli podle čela tepelné vlny oblasti s rozdílnými teplotami.

V důsledku tohoto jevu se diskontinuity ve větší podpovrchové hloubce projeví/zobrazí později a se sníženým kontrastem.



Obr. 5.2 Závislost relativní hodnoty kontrastu C na hloubce z / Dependence of relative contrast value C on the depth z

6.3 Vyhodnocení naměřených dat

Pro vyhodnocení dat se používají dva postupy:

- vyhodnocení dat v časovém intervalu
- vyhodnocení dat ve frekvenčním intervalu

6.3.1 Vyhodnocení dat v časovém intervalu

Pokles kontrastu je úměrný třetí mocnině hloubky z . Pro vyjádření kontrastu se zavádí teplotní kontrast $C(t)$ jako funkce jednotlivého pixelu (i,j) dle vztahu

$$C(i, j, t) = \frac{\Delta T_d(i, j, t)}{\Delta T_s(t)} = \frac{T_d(i, j, t) - T_d(i, j, t = 0)}{T_s(t) - T_s(t = 0)}$$

kde je:

$C(i, j, t)$ teplotní kontrast na pozici pixelu (i, j) ,

t čas,

T_s teplota v oblasti bez závad,

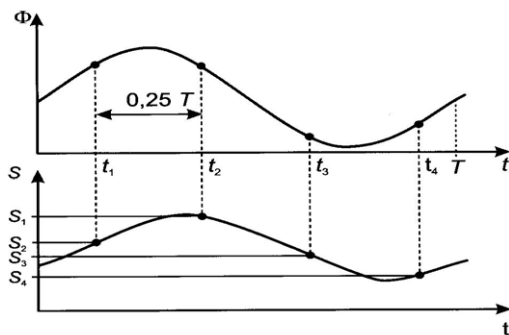
T_d teplota nad nehomogenitou

V definované hloubce nehomogenity se objeví největší teplotní kontrast $C_{max}(i, j, t_{max})$ při definovaném čase t_{max} . C_{max} a t_{max} závisí na tepelných vlastnostech materiálu bez závad a na nehomogenitě, na geometrii a hloubce nehomogenity, na okolním prostředí a na typu excitace.

6.3.2 Vyhodnocení dat ve frekvenčním intervalu

Používá se při tzv. lock-in termografii nebo pulzní fázové termografii, která je založena na modulaci řízeného tepelného toku dopadajícím na diagnostikovaný objekt při definovaných excitačních frekvencích. Tepelná (obvykle sinusová) tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí, tj. anomálie/odchylky ve struktuře materiálu testovaného objektu se odráží zpět k povrchu. Na povrchu objektu dochází k interferencím objektem vyzařovaného a na objekt dopadajícího zářivého (tepelného) toku, kdy potom termogramy snímané termografickou kamerou jsou modifikovány tepelnou vlnou emitovanou z vnitřku diagnostikovaného objektu. Rozborem signálu z každého pixelu detektoru kamery lze stanovit odděleně jak amplitudu, tak i fázový posuv odezvy.

Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (emisivita, pohltivost) a nehomogenním rozložením dopadajícím tepelným tokem na povrch objektu. Avšak ve fázové modulaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkrácené informace o „podpovrchové“ teplotě objektu.



Obr. 6.1 Princip vyhodnocení amplitudy a fáze u lock-in termografie/ The principle of evaluation of amplitude and phase in lock-in thermography

Pozn.: Nahoře je dopadající modulovaná vlna a dole je vlna vyzařovaná objektem.

Vyhodnocení amplitudy a fáze lze docílit různými způsoby, jako jsou duální synchronizace detekce, FFT analýza anebo nečastěji zpracováním čtyř o 900 fázově posunutých obrazů – viz obr. 6.1.

Po zprůměrování více obrazů lze u každého pixelu vyhodnotit amplitudu a fázi dle vztahů:

$$\varphi = \arctg \frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4} \quad A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2}$$

Vypočítaná fáze není fázovým posunem mezi dopadající modulovanou stimulační vlnou na povrchu objektu, ale veličiny navzájem souvisí.

Jinou metodou vyhodnocení v případě lock-in termografie je signál odezvy analyzován při jeho excitační frekvenci f nebo jeho vyšších harmonických.

Stanovení jaké frekvenční spektrum se provede při použití diskrétní jednorozměrné Fourierově transformaci pro každý pixel sekvence teplot:

$$F(t) = \sum_k^{N-1} T(k) e^{\frac{2n\pi i k f}{N}} = R_e(f) + I_m(f)$$

kde je:

R_e reálná část,

I_m imaginární část,

n přírůstek frekvence,

N počet měřených bodů,

k číslo termogramu v sekvenci

Výsledek výpočtu amplitudy A a fáze Φ_n :

$$A(f) = \sqrt{R_e(f)^2 + I_m(f)^2} \quad \Phi(f) = \arctg \frac{I_m(f)}{R_e(f)}$$

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} \quad n= 1, \dots, N/2$$

kde je:

- Δt časové rozlišení,
 n přírůstek frekvence

Maximální frekvence je určena podle poloviny hodnoty počtu termogramů za sekundu.

Minimální frekvence je stanovena dobou trvání experimentu.

Amplitudové a fázové obrazy mají následující vlastnosti:

- Amplituda je absolutní hodnota změn teploty při dané frekvenci f_n . Mimo jiného tato hodnota závisí na amplitudě buzení, na frekvenci, vlastnostech tepelné odezvy testovaného objektu a také na vlastnostech povrchu (např. na jeho emisivitě)
- Fázový obraz charakterizuje časové zpoždění tepelné vlny vzhledem na excitaci a definované frekvenci f_n . Toto zpoždění je vyvoláno nehomogenitami v testovaném objektu nebo geometrii testovaného objektu.

7. Závěr

Záměrem tohoto příspěvku bylo přiblížit rozvíjející se a poměrně novou metodou zavedenou v NDT a to Infračervené termografické testování. Je to metoda, která na rozdíl o monitorování a diagnostiky stavu (strojů, objektů, ...) je poměrně náročná jak na přístrojové vybavení, tak i na určité potřebné znalosti pro vyhodnocování stavu zkoušených objektů či materiálů.

8. Použitá literatura

- /1/ Martin Šolc Od slunečních skvrn k astrofyzice – Milníky historie pozorování a výzkumu Slunce, Časopis Astroprís speciál 2007
- /2/ Peřková, Svoboda, Termodiagnostika, ISBN 978-80-8126-132-9
- /3/ ČSN ISO 18251-1 Nedestruktivní zkoušení – Infračervená termografie – Část 1: Charakteristiky systému a zařízení
- /4/ Jan Pilař Diplomová práce Nedestruktivní kontrola kompozitových konstrukcí pomocí aktivní infračervené termografie, ČVUT Praha FS 2015/2016
- /5/ ČSN ISO 80000-5, Veličiny a jednotky, Část 5: Termodynamika
- /6/ Marcel Kreidl, Radislav Šmýd Technická diagnostika ISBN 80-7300-158-6
- /7/ Maldague and P Xavier. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. John Wiley & Sons, INC., 2001



APLIKACE MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU PŘI ÚNAVOVÉM POŠKOZENÍ ATYPICKÝCH VZORKŮ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

APPLICATION OF METAL MAGNETIC MEMORY METHOD (MMM) DURING FATIGUE DAMAGE OF ATYPICAL METAL SPECIMENS

Václav SVOBODA¹, Eva SVOBODOVÁ¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

Abstrakt:

Pro hodnocení poškozovacích procesů v kovových tlumičích energie byla navržena metoda magnetické paměti materiálu (MMM) a metoda ultrazvuková (UT). Tyto kovové tlumiče jsou navrhovány jako pasivní seismický prvek pro kontrolu struktury budov. Jsou instalovány tak, aby v případě vzniklého zemětřesení snížily jeho energii plastickou deformací. Právě snížení účinku zemětřesení umožňuje zachování stability základních prvků nosné stavební konstrukce. Problém vysokocyklové únavy ve spojení s nízkocyklovou únavou vyvolává vyčerpání plastické deformace v těchto tlumičích energie. Hodnocení zbytkové plasticity tlumiče je možno provést metalografickým hodnocením, což je velmi nákladné. Pomocí metody MMM a případného ultrazvukového testování lze určovat míru poškození a vyčerpání plasticity daného materiálového tlumiče. Výsledky ukazují úspěšnou korelaci mezi stupněm cyklického zatěžování vzorků a signály naměřenými oběma metodami.

Klíčová slova: NDT testování, Rozvoj defektů, Seismicita, MMM metoda, metoda UT

Abstract:

Ultrasonic Testing (UT) and Metal Magnetic Memory (MMM) are proposed to quantify damage of hysteretic dampers (also known as metallic dampers) used as passive seismic control of building structures. Hysteretic dampers are special devices that are installed in a structure to dissipate most of the energy input by an earthquake through plastic deformations. Minor or moderate earthquakes do not exhaust the energy dissipation capacity of the dampers, though they cause damage. High-cycle fatigue problems can also arise when the damper is subjected to a large number of cycles of deformation in the elastic due to frequent loads such as wind. For these reasons, continuous or periodic inspection of the dampers is required in order to decide if they need to be replaced. Paper focus on a particular type of hysteretic damper that consists of plates made of stainless steel. These plates are intended to be used in conjunction with shape memory allows to develop a new brace-type damper with recentering properties. Both inspection methods have been validated on dampers subjected to quasi-static (low-frequency) cycling tests of increasing amplitude by means a high capacity actuator. Results showed a successful correlation with a well-established mechanical energy-based damage index based on the amount of accumulated plastic deformation and energy dissipation.

Atypické vzorky byly zatěžovány dle následující tabulky. Celkem šlo o 14 vzorků s různým stupněm zatěžování.

	Počet cyklů	Maximální posunutí (mm)	Vzorky
D1	2	0.8	C02
D2	6	2.4	C03, C04
D3	8	3.2	C05, C06, C11, C12
D4	10	4	C07, C08
D5	13	5.2	C09, C10, C13, C14

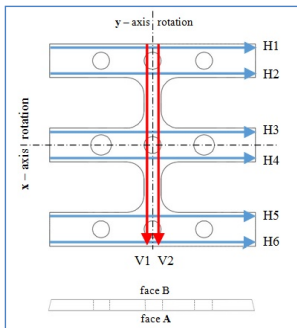
Tab. 1 – Zatěžování vzorků

Popis měření

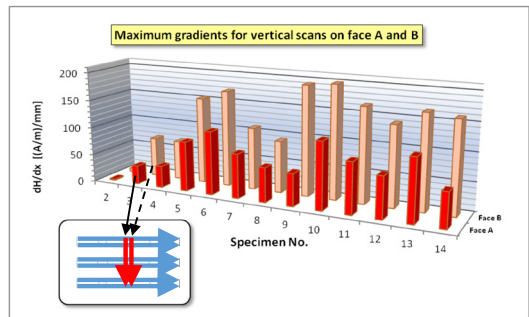
– modré šipky (H1-H6) odpovídají horizontální linii scannování, červené šipky (V1 a V2) jsou vertikálními liniemi. Použito bylo měřicí zařízení se **dvěma senzory**.

Jeich vzdálenost byla nastavena podle měřených linií (H1+H2, H3+H4, H5+H6 a V1+V2). Tímto způsobem byly měřeny **2 linie najednou**.

Každé měření bylo opakováno 3x, měření probíhalo ze strany A (rub) i ze strany B (líc).



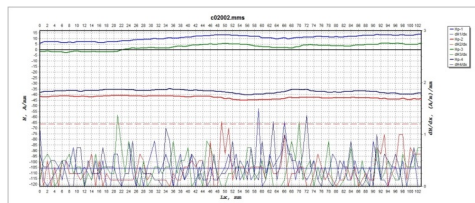
Obr. 1 – Schéma měření



Obr. 2 – Graf maximálních gradientů V1 a V2

Vybrané vzorky:

– **Vzorek č. 2**, kde nebyly nalezeny zóny koncentrace namáhání (Stress Concentration Zones), max. průměrný gradient = 3,9 (A/m)/mm a nevykazuje žádné známky poškození, zařazen do **kategorie I**

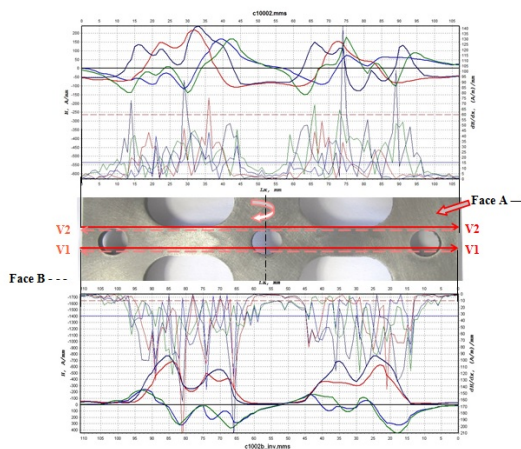


Obr. 3 – Magnetogram vzorku č. 2, strana B

– **Vzorek č. 6**, kde byly nalezeny vysoké zóny koncentrace namáhání (Stress Concentration Zones), max. průměrný gradient = 141,5 (A/m)/mm a s vysokou pravděpodobností, že integrita materiálu byla ovlivněna a poškozena. Nepřípustná hodnota gradientu, konstrukce musí být zkoumána doplňujícími NDT metodami před uvedením do provozu (pokud ne, zakáz uvedení do provozu). Vzorek zařazen do **kategorie 3**

– **Vzorek č. 10**, kde byly nalezeny **velmi vysoké zóny koncentrace namáhání** (Stress Concentration Zones), max. průměrný gradient = 158,6 (A/m)/mm, na straně B max. gradient = 199,3 (A/m)/mm

Vizuálně patrné poškození (přítomnost trhlin byla prověřena přístrojem na indikování povrchových trhlin). Vzorek zařazen do **kategorie 3**, což znamená, že konstrukce, kde by se objevily zóny koncentrace namáhání s takto vysokými hodnotami gradientů, byl by vydán okamžitý zákaz provozu (vzhledem k vysoké pravděpodobnosti nehody, poškození zdraví osob či smrtelných zranění).



Obr. 4 – Magnetogram vzorku č. 10

Závěr:

Z měření MMM provedených na atypických vzorcích lze konstatovat:

1. Metoda magnetické paměti materiálu je vhodná technika NDT pro rychlé vyhodnocení úrovně poškození vzorku v důsledku různých podmínek zatěžování.
2. Měření podle linií V je významnější ve srovnání s liniemi H.
3. Z experimentálních naměřených dat nezatěžovaných vzorků je zřejmá velmi malá úroveň oblastí koncentrací namáhání ve sledovaném objemu vzorku.
4. Různá úroveň zatížení vzorků představuje různé úrovně plasticity a odpovídající degradace materiálu na místech, kde byla aplikována deformace.
6. Vizuální pozorování testovaných vzorků potvrdilo plastickou deformaci, což vedlo k mikrodefektům a počáteční fázi závažných defektů, typu trhlin.



DETEKCE DEFEKTŮ - VMÁČKLIN V POTRUBÍ PLYNOVODŮ V KOMBINACI S DALŠÍMI TYPY POŠKOZENÍ

DETECTION OF DENTS IN PIPELINES IN COMBINATION WITH ANOTHER DEFECTS

Václav SVOBODA¹, Lubomír GAJDOŠ², František ŽEMLIČKA¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

²ÚTAM AV ČR, v.v.i, Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9, Czech Republic
gajdos@itam.cas.cz

Abstrakt:

Jednoduchá vmáčklina (dent) je definována jako poškození, které způsobuje hladkou změnu křivosti stěny trubky bez zmenšení její tloušťky, t.zn. že neobsahuje žádné defekty nebo imperfekce. Jednoduché vmáčkliny nesnižují významně destrukční pevnost trubky. Únavová životnost trubky, obsahující jednoduchou vmáčklinu, je však menší než únavová životnost nedeformované kruhové trubky, neboť vmáčklina působí jako napěťový koncentrátor. Tvar vmáčkliny se nejeví jako kritický parametr, pokud je vmáčklina hladká. Podobně ani délka či šířka vmáčkliny se nejeví jako kritická. Nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňuje destrukční (monotonní) i únavovou pevnost jednoduché vmáčkliny je však hloubka vmáčkliny. Při posuzování konkrétních vmáčklin bude nutné zohlednit tento parametr.

Klíčová slova: Dent, Poškozovací procesy, Potrubí, Destrukce, Koncentrátor napětí

Abstract:

Simple dent is defined as a damage of pipe, which causes smooth change of curve on wall of the pipe, without reduction of wall thickness. Simple dent doesn't seriously reduce the destruction integrity of pipe. On opposite site, defects and imperfections reduce wall thickness. They play very important role, mainly if the pipe is under fatigue loading. Worst case is, if simple dent contains defect (crack type). This article describes how the stress concentration factor can be influenced by combination of various type of damage, which can appear in the reality on pipe, after long time of service.

Žlábkem rozumíme povrchové poškození potrubí, způsobené cizím předmětem a charakterizované zmenšením tloušťky stěny trubky. Z hlediska pevnostních účinků patří tedy do skupiny defektů spojených se ztrátou kovu z povrchových vrstev, kam patří i široká skupina povrchových poškození korozního typu. Kromě vrubového účinku a zmenšení tloušťky stěny přistupuje zde ještě riziko deformačně zpevněné vrstvy pod žlábkem. Tato deformačně zpevněná vrstva je způsobena teplem vzniklým při poškozujícím procesu a plastickou deformací. Jejím doprovodným znakem je snížení lokální tažnosti, takže nelze vyloučit ani vznik trhliny po odstranění tlačící síly a částečném návratu trubky do svého původního tvaru. Při hodnocení žlábků bude proto nutné vzít v úvahu zpevněnou vrstvu pod žlábkem a vliv snížené houževnatosti materiálu v tomto místě.

Jednoduchá vmáčklina (dent) je definována jako poškození, které způsobuje hladkou změnu křivosti stěny trubky bez zmenšení její tloušťky, t.zn. že neobsahuje žádné defekty nebo imperfekce. Jednoduché vmáčkliny nesnižují významně destrukční pevnost trubky. Únavová životnost trubky, obsahující jednoduchou vmáčklinu, je však menší než únavová životnost nedeformované kruhové trubky, neboť vmáčklina působí jako napěťový koncentrátor. Tvar vmáčkliny se nejvíce jeví jako kritický parametr, pokud je vmáčklina hladká. Podobně ani délka či šířka vmáčkliny se nejvíce jeví jako kritická. Nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňuje destrukční (monotonní) i únavovou pevnost jednoduché vmáčkliny je však hloubka vmáčkliny. Při posuzování konkrétních vmáčklin bude nutné zohlednit tento parametr.

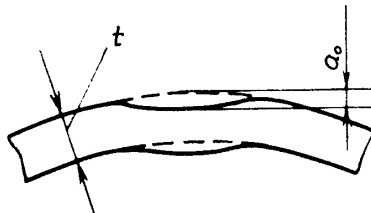
Lomená vmáčklina se liší od jednoduché vmáčkliny tím, že obsahuje prudké změny obrysu, t.zn. že je zjevně zkrivená. Lze očekávat, že trubky s lomenými vmáčklinami budou vykazovat velmi nízké destrukční tlaky a nízké únavové životnosti, neboť v místě prudké změny tvaru stěny bude vysoká koncentrace napětí.

Nestísňené a stísňené vmáčkliny (vmáčkliny spočívající na kamenech). Nestísňená vmáčklina může elasticky odskočit, když je odstraněno vnikové těleso a může se zaokrouhlit, když se vnitřní tlak média zvýší. Stísňená vmáčklina nemůže ani elasticky odskočit ani se nemůže zaokrouhlit při zvýšení tlaku, protože vnikové těleso není odstraněno. Tak je tomu například u vmáčkliny ležící na podkladě s kamennými výstupky. Stísňené a hladké nestísňené vmáčkliny nesnižují významně statickou (destrukční) pevnost trubky. Nejpravděpodobnější způsob porušení stísňené vmáčkliny je proražení stěny, avšak jediné tehdy, když je vnikové těleso (např. kámen) dostatečně tvrdý a ostrý a nosné zatížení je vysoké (a rostoucí). O únavové pevnosti stísňené vmáčkliny se dá soudit, že je větší než u ekvivalentní nestísňené vmáčkliny, a to vzhledem k tomu, že u stísňené vmáčkliny je menší rozkmit deformace.

Kombinace vmáčkliny s různými druhy defektů je velmi nebezpečná jak z hlediska statické, tak i únavové pevnosti. V tomto případě se jedná o násobný poškozující efekt, jehož výsledkem je velmi nízký lomový tlak. Je tomu tak proto, že samotný defekt, reprezentovaný určitým součinitelem koncentrace napětí, se již nachází v zóně zvýšeného napětí od účinku vmáčkliny, takže výsledný napěťový účinek je daný součinem obou součinitelů koncentrace napětí.

Nyní se soustředíme na případ vmáčkliny (dentu) v kombinaci s ostrým defektem. Již jsme se zmínili o tom, že pokud se vyskytne v máčklině napěťový koncentrátor, bude se jednat o násobný poškozující efekt, jehož výsledkem je velmi nízký lomový tlak. Vyplývá to ze skutečnosti, že samotný napěťový koncentrátor (drážka, vrub, zářez, tupá trhlina) se již nachází v oblasti zvýšeného napětí od vmáčkliny. Proto je výsledný napěťový účinek daný součinem obou součinitelů koncentrace napětí.

Situace je ilustrována na následujících obrázcích.



Obr. 1 - Schematické znázornění typické vmáčkliny ve stěně trubky

V místě vmáčkliny dochází ke koncentraci obvodového napětí. Součinitel této koncentrace lze popsat vztahem (1):

$$k_0 = 1 + \frac{6a_0}{t} \quad (1)$$

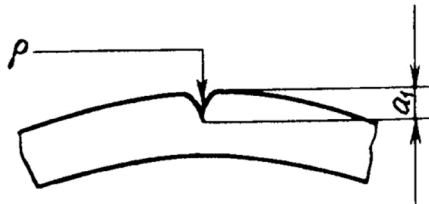
To znamená, že pokud je např. hloubka vmáčkliny (v nezátíženém stavu) $a_0 = 0,2$. t, získá součinitel koncentrace napětí takovéto vmáčkliny hodnotu $k_0 = 2,2$.

Když se nachází ve stěně trubky lokální koncentrátor napětí (vrub) s hloubkou a_1 a poloměrem kořene ρ (viz obr. 2), je podle Neubergera (2) pro mělké vruby hodnota součinitele

$$k_1 = 1 + 2\sqrt{\frac{a_1}{\rho}} \quad (2)$$

koncentrace napětí

Nebezpečnost takového koncentrátoru si můžeme představit dosazením konkrétních hodnot hloubky a_1 a poloměru ρ do rov.(2). Uvažujme hloubku pouze 1 mm a poloměr kořene 0,25 mm. Výsledkem bude součinitel koncentrace napětí $k_1 = 5$.



Obr. 2 Lokální koncentrátor napětí v podélném směru trubky

Nyní uvažujme lokální koncentrátor ve vmáčklině (dentu) podle obr. 3.

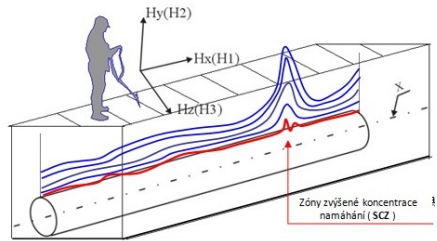
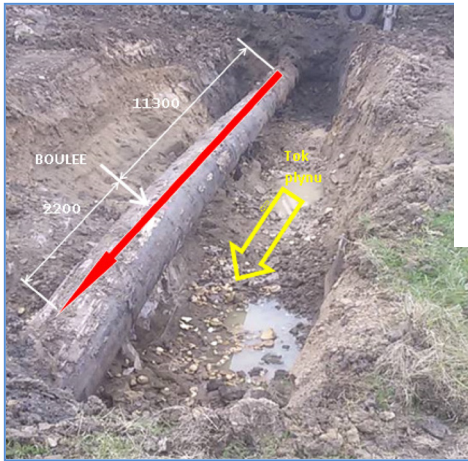
Zde se již uplatní oba koncentrátoři: jak základní (vmáčklina), tak i lokální (vrub). Pokud je součinitel koncentrace napětí vmáčkliny k_0 a lokálního koncentrátoru k_1 , pak bude celkový součinitel koncentrace napětí $k_c = k_0 \cdot k_1$. Pro výše uvažované parametry bychom dostali

$$k_c = k_0 \cdot k_1 = 2,2 \cdot 5 = 11$$



Obr. 3 Schematické znázornění lokálního napětového koncentrátoru ve vmáčklině

Vysoká hodnota součinitele koncentrace napětí znamená výrazně snížený lomový tlak trubky při monotonním zatížení anebo velmi rychlou nukleaci trhliny v kořeni koncentrátoru při cyklickém zatěžování trubky s následným růstem podle klasických zákonitostí rozvoje únavových trhlin.



Obr. 2.1 – Snímání magnetického pole nad potrubím v zemi v ose potrubí



Obrázky a schemata měření potrubí metodou MPM – Magnetická paměť materiálu (Metal Magnetic Memory Method)



ANALÝZA PORUŠOVÁNÍ KARBONOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

DAMAGE ANALYSIS OF CARBON COMPOSITE MATERIALS

Jaroslav ZAČAL¹, Michal ŠUSTR¹, Petr DOSTÁL¹, Michal ČERNÝ¹,
Martin BRABEC²

¹Department of Technology and Automobile Transport Faculty of Agronomy

²Department of Wood Sciences

Mendel University in Brno Zemědělská 1, 613 00 Brno, Czech Republic

Contact e-mail: jaroslav.zacal@mendelu.cz

Abstrakt

V práci je použita metoda akustické emise pro monitorování materiálového stavu. Akustická emise je nedestruktivní vyhodnocovací technika, která může být použita pro detekci mikrostrukturálních změn v kompozitním materiálu. Práce popisuje způsob získávání akustických emisí při tahovém zatížení karbonových kompozitních materiálů. V průběhu tahového poškození byl kompozit monitorován optickou metodou, která aplikuje principy korelace digitálního obrazu (DIC). Optická stereovizní metoda umožňuje spočítat pole posunutí a pole poměrných deformací na povrchu kompozitu. Cílem je analýza porušování karbonových kompozitních materiálů a využití metodiku zpracování signálů AE k usnadnění diagnostiky včasného odhalení poškození a prognózy strukturálního selhání. Pro dosažení cíle práce byla navržena experimentální sestava pro získání dat z 50 jmenovitě identických kompozitních vzorků při tahovém zatížení. Zatížení aplikované na vzorky byly synchronně zaznamenávána s akustickými emisemi a obrazovými daty. Experimentální data byla následně analyzována tak, aby byly popsány typické jevy v rámci každého měření. Výsledky ukazují, že sledování zdrojů AE může být použito k usnadnění diagnostiky časného poškození a vytvoření prognózy selhání. Jedná se o studium změn uvnitř kompozitních materiálů.

Klíčová slova: akustická emise, uhlíková vlákna, tah, nedestruktivní testování

Abstract

This paper describes use of acoustic emission method for material state monitoring. Acoustic emission is nondestructive evaluation technique, which is feasible for detection of microstructural changes in composite material. Paper presents detection of acoustic emission signals during tensile loading of composite materials. In process of inflicting damage the composite was monitored with optical method that applies the Digital Image Correlation (DIC) principles. The stereovision optical method uses information obtained from the surface of composite and describes the possibilities of assessing the deformation values. Objective of this study is to analysis damage of carbon composite material and develop signal enhance the methodology of AE signal processing to facilitate the diagnostics of early damage and failure prognostics. For achieving this objective we designed the experimental setup for data collection from 50 nominally identical composite samples subjected to tensile loading. Loading

was conducted with tearing machine. Applied load were obtained simultaneously with acoustic emission signals. Data from experiment were subsequently analyzed to provide better understanding of sample behaviour in course of individual measurement. Results suggest that observation of AE sources is applicable for facilitation of early damage diagnostics and failure prognostics. It could be also employed for providing insight into inner structure of composite materials.

Key words: *acoustic emission, carbon fiber, tesile test, non-destructive testing*

1. Úvod

Tradičním konstrukčním materiálům se polymerní kompozity vyztužené uhlíkovou tkaninou vyrovnávají svými mechanickými vlastnostmi a jsou použitelné u nosných prvků konstrukcí v leteckém průmyslu. Jsou vhodné pro náhradu kovů a jiných tradičních materiálů [7].

Přes množství výhod jsou polymerní kompozity ve srovnání s kovovými materiály více náchylné k mechanickému poškození, když jsou vystaveny delším působením vnějších sil např. tahu, tlaku nebo nárazu, což může vést k mezivrstevní delaminaci [9]. Při delším použití zatížení se delaminace šíří prostřednictvím mezivrstev, jejichž oslabení vede ke katastrofálním selhání kompozitní struktury [8].

Testování mechanických vlastností kompozitních materiálů hraje nezastupitelnou roli při kontrole technologie výroby, jakosti výrobků a vývoji nových materiálů. K získání materiálových charakteristik při mechanickém zatěžování jsou používány různé metody např. vibrační metody, vizuální kontrola, termografie [13]. Každá tato metoda poskytuje specifické dílčí výsledky. Teprve vyhodnocením a syntézou získaných hodnot je možné dosáhnout objektivního hodnocení stavu materiálu [4].

V průběhu mechanického zatěžování bylo zjištěno, že jsou generovány emisní signály, které lze využít k indikaci vzniku mikrotrhlin ve vnitřní struktuře namáhaných kompozitních materiálů. Zajímavou vlastností těchto signálů je skutečnost, že se objevují již ve stadiu zatěžování, které předchází makroskopickému porušení materiálu a jeho strukturnímu poškození. Pro diagnostiku a monitorování mechanicky zatěžovaných materiálů lze použít uvedenou metodu a výsledky aplikovat v predikci jejich celkového selhání. Akustická emise především poskytuje informace o poloze nově vzniklé trhliny nebo defektu. Zpracování signálu AE tak umožňuje přesněji studovat vznikající změny materiálu.

2. Materiál a metodika

Všechna testování kompozitů v této práci byla prováděna na vzorcích kompozitního materiálu HEXCEL. Pro výrobu zkušebních vzorků byla použita prepregová uhlíková PAN tkanina. Pro formování polymerních kompozitů byly použity prepregy založené na epoxidové matici s označením 8552 (viz Tab. 1).

Tab. 1 Použitý typ prepregového materiálu

Tab. 1 Used prepreg material

Označení	Vazba	Hmotnost [g/m ²]	Typ vlákna
GG245T	keprová	245	HS 3K
GG 630T	keprová	630	HS 12K

Tab. 2 Typy prepregů pro experiment

Tab. 2 Prepregs used in experiment

Typ prepregu	Počet vrstev prepregu	Šířka [mm]	Délka [mm]	Tloušťka [mm]	Orientace vláken	Počet [ks]
GG 245T	1	25	250	0,94	[0°, 90°, 0°, 90°]	50
GG 630T	1					

Celkem bylo vyrobeno 50 kusů vzorků této skladby (Tab. 2). Desky byly následně rozřezány a rozměrově upraveny dle požadavků normy ČSN EN ISO 527-4 [13]. V této práci byly použity pravoúhlé vzorky polymerních vláknových kompozitů vyztužených uhlíkovým vláknem o délce 250 mm. Obecně platí, že pravoúhlé vzorky jsou vyžadovány pro charakterizaci kompozitních materiálů, protože typ „psí kosti“ má tendenci se rozdělit v oblasti, kde se mění šířka vzorku [5]. Čelisti trhacího stroje přenášejí na vzorek vysokou koncentraci napětí. Aby se tento účinek minimalizoval, musí být vzorek upnut koncovkami, aby se eliminovalo nežádoucí zatížení smykem.

Základní prvkem měřicího pracoviště je univerzální zkušební trhací stroj Zwick Z050/TH 3A (Obr. 1), který je určený pro aplikaci externí mechanické zátěže na vzorky testovaných materiálů. Podmínky zatížení byly synchronizovány prostřednictvím softwaru TestXpert 11.02 (ZwickRoell AG). Vzorky byly upnuty do samosvorných čelistí. Tahová síla byla aplikována siloměrnou hlavou s kapacitou 50 kN při konstantní kvazi-statické rychlosti 2 mm min⁻¹ až do selhání vzorku. Selhání bylo definováno výrazným poklesem síly spolu s viditelnými znaky fragmentace vzorku.

3. Měření deformací

Posunutí a poměrná deformace ve směru zatížení byly realizovány bodovým měřením, které bylo provedeno pomocí konvenčních mechanických extenzometrů vybavených dvěma párovými sensorovými rameny. Ramena snímače byla od sebe vzdálena 30 mm. Úplné údaje o deformaci byly získány za použití optického systému, který aplikuje principy Digital Image Correlation (DIC). Měřicí systém zahrnuje dvě kamery CCD AVT Stingray Cooper F-504B, velikost světlo citlivé buňky 3,45 μm a rozlišení 2452 × 2056 pixelů =5 MPx) vybavené objektivem Pentax C2514-M (Pentax Precision Co., Ltd., ohnisková vzdálenost 25 mm) v stereovizní (3D) konfiguraci, jak je znázorněno na Obr. 1. Kontrast mezi komponenty vzorku na vzorkovaném povrchu vzorku byl podpořen dvěma zdroji studeného světla SobrietyCube 360 vybavené LED čipy Luminus Phlatlight CSM-360.

Pro maximální prostorové rozlišení vzorkovaného povrchu bylo zorné pole přizpůsobeno oblasti zájmu (AOI), která zaujímá celkovou plochu povrchu vzorku 25 x 150 mm². Takové zorné pole bylo získáno při umístění kamer do vzdálenosti 504 mm, která byla změřena pomocí laserového dálkoměru BOSH GLM 50 Professional. Kamery byly umístěny na společné rameno ve vzdálenosti 733 mm. Akviziční set byl umístěn do takové pozice, aby střed zorného pole souhlasil se středem oblasti zájmu (AOI). Pro kamery byla nastavena clona f/6 pro dosažení dostatečné hloubky pole, která je schopna zcela pokrýt polohu AOI mimo rovinu snímače kamery. Popisovaná geometrie optického nastavení byla kalibrována pomocí série z kamery 30 levých a pravých snímků kalibrační mřížky s roztečí 5,5 mm při různých geometrických orientacích. Toto optické uspořádání poskytuje konverzní faktor 4,11 px mm⁻¹.

Experimentální data byla synchronně získávána každých 0,25 s (4 Hz) pomocí hardwarového spouštěcího zařízení. Zvolený časový interval je vhodný vzhledem k aplikované kvazi-statické rychlosti zatížení a také k rozpoznání spektra skvrn používaným softwarem. Deformační pole byla vypočítána z parciálních derivací posunutí pomocí Lagrangeovy metody v softwaru Vic-3D verze 2010. Poměrné deformace byly vypočteny lokálně pomocí pole 3 x 3 bodů a velikosti deformačního filtru 5 x 5 bodů. Velikosti subsetu 25 x 25 pixelů a subset step 5 pixelů poskytly optimální poměr mezi hustotou korelovaných bodů (6 bodů/mm²) a robustnost při párování obrazu. Přesnost měření byla stanovena na základě pole posunutí a poměrných deformací zjištěných na 5 snímcích bez zatížení. Deformace ve směru zatížení byla určena s přesností 0,008935 %.



Obr. 1 Experimentální sestava: vlevo – optický stereovizní systém, vpravo – umístění snímačů AE [Autor]

Fig. 1 Experimental setup: on the left – optical stereovision system, on the right – placement of AE sensors [Author]

4. Měřicí aparatura AE

Pro analýzu a vyhodnocení akustických parametrů byl použit modulární systém Dakel. Před měřením AE aktivity během testování je velmi důležité najít vhodnou konfiguraci pro sledované parametry AE v softwaru DaeMon. Proto byla provedena řada Hsu-Nielsenových pentestů. Po provedení sady pentestů byly nastaveny vhodné vstupy pro detekci signálů v této oblasti. Tyto parametry byly nakonfigurovány do softwaru DaeMon, aby bylo možné správně zaznamenávat údaje o akustických emisích. AE byla kontinuálně monitorována během tahové zkoušky. Systém byl kalibrován na vzorkovací frekvenci 4 MHz a zesílení 35 dB předzesilovačem Dakel [3].

V experimentu byly použity dva piezoelektrické senzory typ MDK-13. Umístění senzorů pro zkoušky tahem je znázorněno na Obr. 1. Oba kanály byly osazeny předzesilovačem se ziskem 35 dB a speciálním nízkofrekvenčním slotem v analyzátoru Dakel XEDO.

5. Výsledky a diskuze

Základním grafickým výstupem při vyhodnocování experimentálních dat je měření zatěžovací charakteristiky, tedy závislost aplikovaného napětí σ na posunutí ϵ . Výrazně vyšší vypovídací hodnotu o průběhu vyhodnocovaného měření mají následující grafické výstupy. Do společného grafu je vynesena i odezva daného vzorku na aplikovanou mechanickou zátěž ve formě četnosti výskytu typických událostí AE [2]. Diagram tak reprezentuje pro danou skupinu vzorků

kontinuální záznam událostí AE, detekovaných během tahového zatěžování. Na základě získaných výstupů je možné podrobněji analyzovat, jak se daný vzorek struktury kompozitu deformuje a projevuje se na aktivitě detekovaných signálů AE [11]. Signály AE byly zachyceny s hlavním záměrem nalézt typické signály charakteristické pro projevy destrukce kompozitní struktury s danou orientací vláken, které by mohly být použity k popisu odpovídajícího typu chování při statickém zatěžování. Během tahového namáhání byla použita stereovizní metoda, která využívá informací získaných na povrchu kompozitu a popisuje možnosti zjišťování hodnot deformací. Celou sekvenci vyhodnocených snímků z měření lze krokově analyzovat pomocí barevné škály. Můžeme sledovat jednotlivé posuny na axiální ose v čase. Typické deformační pole během tahového napětí, které lze identifikovat na základě prodloužení ϵ [%], rozdělujeme na 4 fáze [1]. Na základě charakteristik těchto fází jednoznačně dobře rozlišujeme deformační subregiony. Hranice mezi jednotlivými fázemi jsou následující:

Fáze I. vznik mikrotrhlin v matrici

Během první fáze se poškození projeví v první řadě jako vznik mikrotrhlin v matrici. Celkové poškození během této fáze je relativně malé a vyskytuje se na počátku prodloužení ϵ [%] vzorků. Ztráta tuhosti je typicky méně než 10 % původní hodnoty a pokles pevnosti je zanedbatelný.

Fáze II. porušení matrice, oddělování vláken od matrice

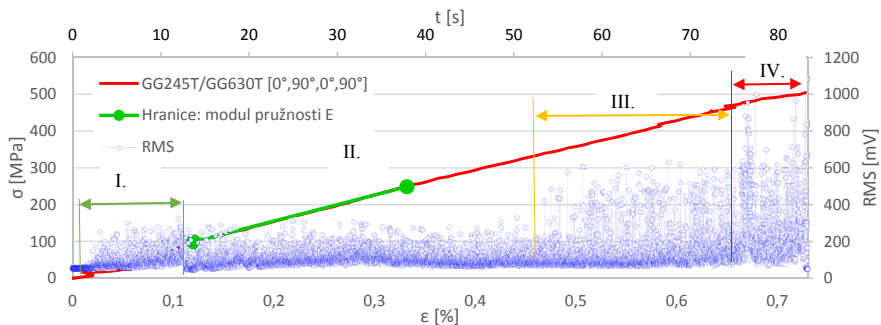
Mechanismy poškození jsou silně závislé na mikrotrhlinách matrice, které se iniciovaly během této fáze. Trhliny v matrici se nejprve projevují ve vrstvách s orientací 90° . Nejvíce se projevují při tahovém zatížení. Při kontinuálně rostoucím zatížení se vlákno začne deformovat odlišně od matrice a na jejich rozhraní je tak vyvíjena vysoká úroveň smykového napětí.

Fáze III. spojování prasklin a iniciace delaminací

Třetí fáze se skládá zejména ze seskupení trhlin a lokálních rozpadů a iniciací delaminací. Poškození se vyvíjí pomaleji než v případě Fáze II. Následkem narůstajícího zatížení dochází k akumulaci napětí na rozhraní trhlin v matrici a vyztužujících vláken s orientací 0° . Je způsobeno tím, že trhliny v matrici jsou ukončeny na vlákních s orientací 90° . Vytváří se tak podmínky pro vznik koncentrace napětí. Následkem těchto jevů dochází k praskání vláken v přilehlých vrstvách. Velké tahové napětí se vyskytuje na špičkách trhlin v matrici a následně iniciuje pozdní spárování ve směru 0° k vláknům. Tento mechanismus spojování prasklin je v podstatě kombinací praskání matrice a praskání podélného vlákna.

Fáze IV. růst delaminací a přetržení vláken

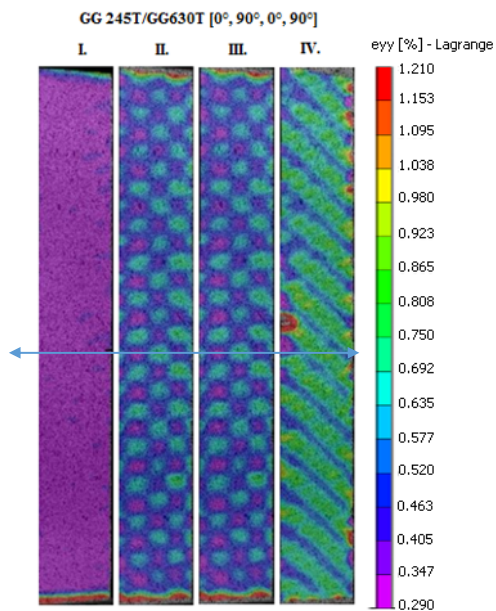
V závěrečné fázi IV Obr. 3 způsobí vnitřní napětí nárůst intenzity mechanismů poškození. Podélné trhliny rostou, a to způsobí izolaci vláken s orientací 0° . Tímto způsobem dochází k růstu delaminací, které odizolují jednotlivé vrstvy laminátu a vytvoří sérii jednotlivých složek (maximální červené zobrazení na vzorku Obr. 3). V této fázi dochází k výraznému poklesu tuhosti. Dojde ke zredukování pevnosti laminátu natolik, že dojde ke kolapsu struktury.



Obr. 2 Typický diagram napětí-deformace s akustickou emisí RMS vzorku GG 245T/GG630T orientaci $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$

Fig. 2 Typical diagram of tension-deformation with acoustic emission RMS of sample GG 245T/GG630T orientation $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$

Obr. 2 znázorňuje diagram napětí-deformace a odpovídající AE signály z testovaného kompozitního materiálu. V diagramu jsou také zaneseny jednotlivé fáze z optického měření, které deklarují, v jaké části vznikají informace získané na povrchu kompozitu v průběhu měření.



Obr. 3 Deformační sub-regiony sestávající z tahového namáhání

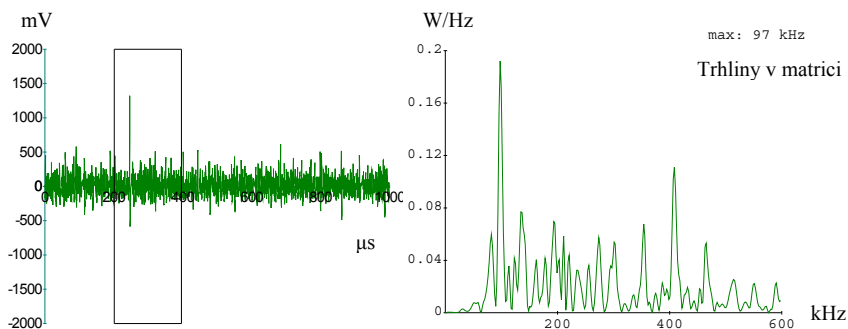
Fig. 3 Deformation subregions consisting of tension stress

Na Obr. 3 je vidět srovnání deformací zatěžovaného vzorku. Maximální červeně zbarvená deformace značí největší poškození materiálu, naopak fialová barva značí nejmenší deformaci. První snímek zleva je z počátku zatěžování fáze I. a pozorujeme na něm napětí v matici vyjádřené fialovou barvou. Je patrné, že zpočátku zatěžování se vzorek téměř nedeformuje. Ve II. fázi je viditelné, že na vlákna 90° působí větší napětí (jsou v zeleném odstínu) zatímco vlákna 0° nejsou vystavena tak značnému napětí (jsou zobrazena fialovou barvou). Ve III. fázi se napětí koncentruje a uspořádání barev šachovnice se mění na intenzivnější zbarvení v celém vzorku. Ve IV. fázi je pozorovatelné, jak jednotlivé složky kompozitu podléhají deformaci a vlákna s orientací 90° na okraji kompozitu vykazují červené zbarvení, které značí nejvyšší poruchu materiálu v tomto bodě (delaminace). Z důvodu tvorby dalších trhlin při zatěžování je největší smykové napětí, které se v povrchových vrstvách seskupují do pásů na rovinách, které svírají úhel 45° se směrem vnějšího napětí. Vlákna 0° jsou vystavena maximálnímu napětí a dochází zde k přetržení vláken a vytahování vláken z matrice.

Z experimentu byly zaznamenány hodnoty, ze kterých je možné velmi efektivně zjistit různorodost signálu. U těchto výsledků je vhodné provést spektrální analýzu měřených signálů, což může přinést další důležité informace o tvorbě trhliny a jejím časovém vývoji. Vznik trhliny v mechanicky zatěžovaném materiálu je obecně náhodný proces. K popisu náhodných signálů ve frekvenční oblasti se obvykle používá spektrální výkonová hustota (PSD analýza), jejíž výpočet vychází z rychlé Fourierovy transformace (FFT) [6].

U experimentálního měření bylo systémem XEDO navzorkováno značné množství signálů AE. Vzorky signálů byly zpracovány pomocí transformace do frekvenční oblasti a bylo provedeno vyhodnocení maxim funkce PSD. V této fázi vyhodnocení experimentu bylo provedeno pouze vizuální porovnání jejich funkce PSD s cílem rozlišit alespoň ty nejvýznamnější jevy, probíhající na experimentálních vzorcích, a stanovit základní mapování příslušných vzorků signálu [10]. Na následujících obrázcích je vlevo vzorek signálu s viditelným výběrovým oknem Hanninga a vpravo pak frekvenční analýza signálu.

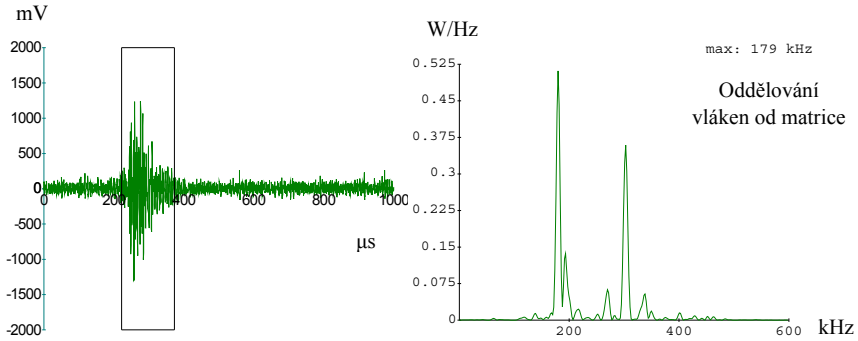
Srovnání analýzy průběhu frekvence pro každou jednotlivou kategorii umožňuje jasnější identifikaci mechanismu odpovídajícího poškození. Následující obrázky znázorňují průběh signálu a odpovídající frekvenční analýzu každého klasifikovaného signálu. Signál klasifikovaný jako trhliny v matici je selhání charakteristické vysokou intenzitou v oblasti nízké frekvence, jasně viditelným ve špičkové frekvenci Obr. 4. Předchozí testy ukázaly, že čím vyšší je úhel mezi orientací vláken a směrem zatížení, tím vyšší je množství špičkových vln v signálu. Toto je případ selhání klasifikované matrice, neboť je to převládající vlnový režim ve vzorku.



Obr. 4 Osciloskop a odpovídající funkce PSD [Autor]

Fig. 4 Oscilloscope and corresponding PSD function [Author]

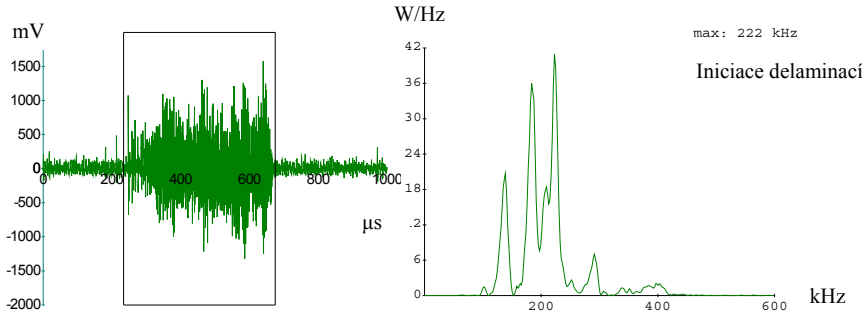
V případě selhání na mezifázovém rozhraní vlákno × matrice je tento signál charakterizován vyšší frekvencí (179 kHz), což je typické pro tento signálový vzor Obr. 5.



Obr. 5 Osciloskop a odpovídající funkce PSD [Autor]

Fig. 5 Oscilloscope and corresponding PSD function [Author]

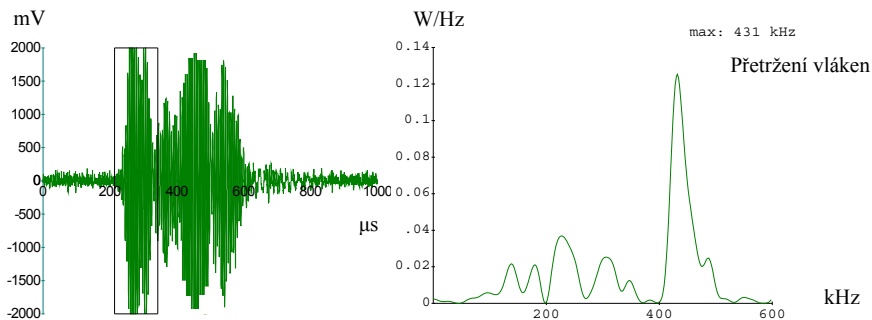
Frekvenční analýza iniciace delaminací také ukazuje určitý podíl kmitání vláken. Jde však o klasifikovaný signál vyznačující se nízkou intenzitou vyšších kmitů Obr. 6. To může být přičítáno slabému mezifázovému rozhraní.



Obr. 6 Osciloskop a odpovídající funkce PSD [Autor]

Fig. 6 Oscilloscope and corresponding PSD function [Author]

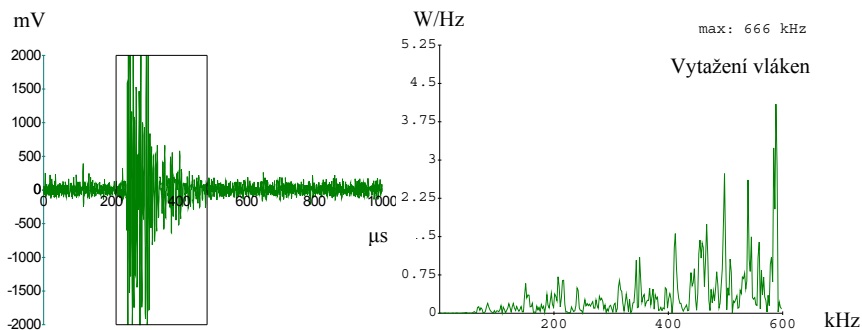
Signály klasifikované jako přetržení vláken vykazují velmi krátkou dobu trvání signálu, což lze připsat krátkým relaxačním časům. Ve srovnání s rozhraním matrice je tento signál charakterizován velmi vysokým frekvenčním vrcholem Obr. 7



Obr. 7 Osciloskop a odpovídající funkce PSD [Autor]

Fig. 7 Oscilloscope and corresponding PSD function [Author]

Signály byly identifikovány jako vytažení vlákna z matrice. Jsou charakteristické krátkou dobou trvání signálu. Maxima PSD u těchto událostí AE se pohybovala kolem 670 kHz Obr. 8.



Obr. 8 Osciloskop a odpovídající funkce PSD [Autor]

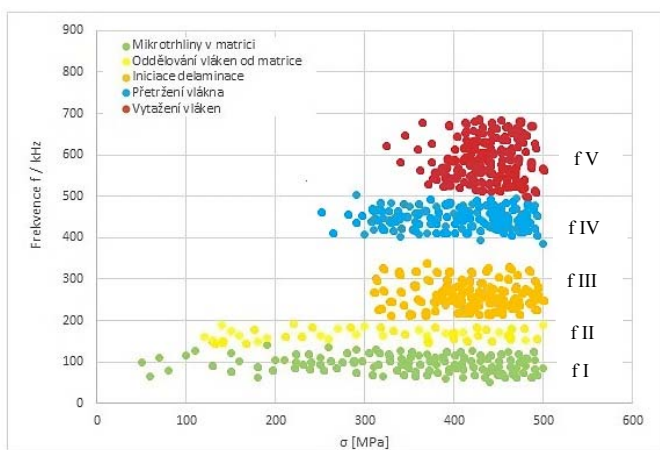
Fig. 8 Oscilloscope and corresponding PSD function [Author]

Studie rozpoznávání vzorků signálu odhalila, že události nalezené ve špičkových frekvenčních rozděleních jsou klasifikovány na základě četnosti a rozsahu špičkových frekvencí a frekvenčních pásmech definovaných výše (Obr. 4-8).

Tato část určuje hlavní parametry signálu AE, který je nutno použít pro analýzu poškození v testovaných kompozitech. Pro tento účel byly parametry AE optimalizovány na jednotlivé kategorie. Tato optimalizace umožnila definovat hlavní parametry signálu AE a optimální počet kategorií. Rozpoznávání vzorků prokázalo, že existují shodné znaky, které lze pozorovat na frekvenčním rozhraní a které souvisí se specifickými charakteristikami testů, použitých pro klasifikaci mechanismů poškození. Analýza rozpoznávání jednotlivých oblastí odhalila, že konzistentní události pozorované v každém testu existovaly ve špičkových frekvenčních rozděleních. Je analyzován vrcholový frekvenční diagram pro stanovení klasifikace mechanismů selhání.

6. Závěr

Signály AE byly shromážděny z rozsáhlého testovacího programu, sestávajícího ze standardních tahových zkoušek s orientací uhlíkových vláken $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$ pro charakterizaci mechanismů uvnitř a mezi vrstvami lomu. Výhodou těchto zkoušek pevnosti při tahových zkouškách s použitím AE je rozpoznávání poruchových mechanismů jak na povrchu, tak uvnitř struktury. Testovací metoda poskytuje nejlepší kvalitu výsledků a nízké výpočetní nároky. Při aplikaci měření AE byly sledovány identifikované vzory s distribucí shlukování špičkových frekvencí. Frekvenční spektra zde uvedená odpovídají signálům z individuální tahové zkoušky během testování jednotlivého typu kompozitního materiálu. První frekvenční oblast začíná počátkem tesů a její počet událostí se zvyšuje v charakteristických bodech iniciálního růstu trhliny. Z těchto důvodů se frekvenční oblast fI s největší pravděpodobností pojí se vznikem mikroskopického popraskání matrice. Druhá frekvenční oblast fII je spojována s oddělováním vláken od matrice. Režim selhání v oblasti fIII je delaminace. Hlavním mechanismem selhání při delaminaci praskání matrice fI a fII je oddělování vláken od matrice. V následujícím frekvenčním diagramu je zřejmé že oblasti fIV a fV často začínají blízko u sebe. Tento typ chování je v souladu se sledem událostí zjištěných v souvislosti s delaminací přetržením vlákna a vytažením vlákna. Frekvenční oblast fIII byla přidělena delaminaci tudíž fIV a fV mohou odpovídat selhání vlákna nebo vytažení vlákna z matrice. Pásmo fIV začíná dříve a je spojováno s přetržením vlákna, zatímco fV je spojováno s vytažením vlákna z matrice.



Obr. 9 Frekvenční odezva typické události pro vzorek GG 245T/GG630T orientaci $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$

Fig. 9 Frequency response of event typical for sample GG 245T/GG630T orientation $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ]$

Definování režimů selhání v polymerních kompozitech vyztužených uhlíkovými vlákny s použitím frekvenčního obsahu akustických emisí je slibná metoda precizní analýzy strukturálních charakteristik. Z výsledků vyplývá, že z analýzy zaznamenaných impulzů AE je možno přesně určit typ a rozsah poškození kompozitu, a tak předpovědět chování vzorků v průběhu namáhání. AE je metoda, která poskytuje informace o strukturní integritě zkoumaného materiálu. Ve spojení se stereovizní analýzou odhaluje lokalizaci možného strukturálního selhání vzorku. Následná analýza Fourierovou transformací doplňuje získaná data o generalizované charakteristice kategorie poškození. Spojení metod AE a stereoskopické analýzy je vhodným diagnostickým nástrojem pro posouzení strukturní integrity kompozitních

materiálů. V posledních letech vzrůstá zájem o tzv. ("chytré materiály" smart materials). Elektrické vlastnosti kompozitů z uhlíkových vláken byly zkoumány s přihlédnutím k potenciálnímu využití jako chytrých materiálů. Využití elektrických vlastností pro posouzení stavu kompozitů je perspektivní oblastí pro výzkum. Je možné vyrábět kompozity z uhlíkových vláken s piezoelektrickými vlastnostmi, bylo by pro základní výzkum vhodné zjistit, jestli je jejich pevnost ovlivnitelná elektřinou.

Poděkování

The research has been supported by the project TP 6/2017: Defectosopic quality assessment of technical and organic materials; financed by IGA AF MENDELU.

References

- [1] GREENHALGH, E. S. – HILEY, M. J.: Fractography of polymer composites: current status and future issues. In: *Proceedings of the 13th European conference on composite materials (ECCM13)*. Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2008.
- [2] W. H. Prosser, "Wave form analysis of ae in composites," *Proceeding of the Sixth International Symposium on Acoustic Emission From Composite Materials*, vol. 3700, pp. 61–70, 1998
- [3] DAKEL. *Uživatelská dokumentace k programu Daemon*. Praha: Dakel, 2011. str. 37. Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech, Středisko technické diagnostiky DAKEL.
- [4] J. Abry, Y. Choi, A. Chateauminois, B. Daloz, G. Giraud, and M. Salvia, "In-situ monitoring of damage in cfrp laminates by means of ac and dc measurements," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 855–864, 2001.
- [5] N. Angelidis, C. Wei, and P. Irving, "The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing)*, vol. 35, no. 10, pp. 1135–1147, 2004.
- [6] TŮMA, J. A KOL., 1997: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha, Sdělovací technika, ISBN 80-901936-1-7.
- [7] SCHINNER, G. – BRANDT, J. – RICHTER, H.: Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1996, vol. 9, no. 3, s. 239-245. ISSN 1530-7980.
- [8] *Composite Materials Handbook – Volume 1. Polymer Matrix Composites, Guidelines for Characterization of Structural Materials* [online]. Fort Washington, Department of Defense, 2002. 586 s. URL: <<http://www.acm-nevada.com/Technical/HDBK17-1F.pdf>>
- [9] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha, Nakl. Scientia, 2009. 352 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] ZAČAL JAROSLAV, DOSTÁL PETR, ŠUSTR MICHAL, DOBROCKÝ DAVID. 2016. Monitoring of Changes Signal Acoustic Emission Signals Using Wave guides. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(4): 0000–0000.
- [11] ZAČAL JAROSLAV, DOSTÁL PETR, ŠUSTR MICHAL, DOBROCKÝ DAVID. 2017. Acoustic Emission During Tensile Testing of Composite Materials. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(4): 0000–0000.
- [12] Y. A. Plotnikov and W. P. Winfree, "Visualization of subsurface defects in composites using a focal plane array infrared camera," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 3700, pp. 26–31, 1999.
- [13] ČSN EN ISO 527-4. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny*.



USE OF ELASTIC WAVES IN DEVELOPMENT AND DIAGNOSTICS COATINGS AND CONNECTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

Zinaida ZAKHARENKO I, Valentina ZAKHARENKO II

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
(BelSUT, Gomel, Republic of Belarus) I,
Postgraduate (BNTU, Minsk, Republic of Belarus) II
Contact e-mail: zaharenkozn@yandex.by

Annotation

The results of development of multi-layer sound-absorbing coverings with the use of sound waves are presented. The regularities of the propagation of sound waves in layered media with alternating layers with different frequency dependences of the propagation constants of sound are studied. The use of ultrasonic waves in diagnosing is shown using the example of a welded pipe joint for a cleaning system in an oil drilling rig.

Key words: *elastic waves, acoustics, ultrasonic waves, the sound absorption coefficient, ultrasonic testing*

1. Introduction

The rapid development of technology in various industries of production entails the need to develop new materials and structures, as well as economical and rapid methods of their diagnosis.

Acoustics is an important scientific field that allows not only to create certain coatings with specified characteristics, but also to subsequently investigate and diagnose their condition in the process of exploitation.

Depending on the frequency, infrasound, sound, ultrasound and hypersonic elastic waves are distinguished. Each type of wave found its application in this or that production sphere. For example, sound waves are widely used in the development of sound-absorbing coatings for machine building, and ultrasonic waves - when diagnosing hardening coatings and their compounds.

2. The use of sound waves in the development of sound-absorbing coatings.

In the process of developing multilayer sound-absorbing coatings, the following main problems were posed, the effective solution of which is possible using the use of sound waves:

- study of the regularity of the passage of sound waves in layered media with alternating layers with different frequency dependences of the propagation constants of sound;
- investigation of the influence of additional functional layers and their location in the multilayer coating on its acoustic properties and the development of a complex of new coatings that ensure effective sound absorption and sound insulation in the frequency range of sound waves of 125 - 8000 Hz. For theoretical calculations, the laws of propagation of acoustic waves in layered media with damping were used. The experimental determination of the sound absorption coefficient and the sound insulation index was carried out on the instruments of Bruel & Kjaer (Denmark) and an acoustic interferometer of the original design, including an attachment for measuring the drop in the noise level when passing through a sample with a precise pulse noise meter and an octave filter.

The acoustic properties of layered coatings, used as sound-absorbing, were studied experimentally. It is shown that, for layered coatings, the energy of sound vibrations can be reduced not only by the thickness of the structure, but also by the rational combination of the layers and their orientation relative to the source of sound. For samples consisting of two fiber-porous layers of the same thickness, the sound absorption coefficient in the frequency range 125-2000 Hz increases with the arrangement of denser porous layers of basalt cardboard closer to the sound source. For a three-layer material, with a different orientation of the layers to the source of sound waves, the absorbing capacity is the greater, the more pronounced the mismatch of the impedances of successive layers of the structure. Waves, falling on fibrous canvas, as they spread, decrease their intensity. At the interface between the layers of fibrous canvas - basalt cardboard, due to the substantial difference in their properties, a significant part of the sound waves is reflected. Passed sound waves are absorbed in basalt cardboard and in the next layer by fibrous canvas, and reflected - in the previous one. Thus, for a three-layer sound-absorbing coating, it is advisable to have a denser intermediate layer between the layers of the fibrous web. Adding one more layer of fibrous web from the side of propagation of sound waves increases the absorbing capacity of the material.

Analyzing the frequency dependences of the sound absorption coefficient for different coating designs, it can be noted that the arrangement of more dense layers of material to the sound source shifts the maximum of sound absorption by 1/3 octave to the region of lower frequencies, depending on the thickness of the fibrous web. Thus, for a two-layer material, the maximum is at a frequency of 1000 Hz, and for a three-layer material at a frequency of 800 Hz. For samples consisting of four layers, the maximum is at frequencies of 630 and 500 Hz, respectively. It should be noted that the placement between two fibrous canvases of basalt cardboard contributes to the disappearance of sharp values of absorption maxima in the frequency range of 500 - 2000 Hz. The absorbing power of such a material is more stable in the investigated frequency range.

Thus, the obtained results show that when forming layered sound-absorbing coatings, it is necessary to take into account the combination of different density layers and their location in the direction of the sound source.

The effect of the thickness of the air gap between two layers of fibrous-porous structure on the sound absorption coefficient of such a system was studied. It is established that when the dimensions of the air layer change, the sound absorption of the material in the low-frequency region changes as follows: at an air gap thickness of 60 - 70 mm, an increase in the sound absorption coefficient at a frequency of 160 Hz is observed, and at 40 - 50 mm at a frequency of 200 Hz. Scattering of low-frequency waves with increasing thickness of the air gap increases. The length of the sound wave becomes commensurate with the overall thickness of the structure. Thus, the greater the thickness of the air gap, the lower the absorption maximum decreases in frequency. In the frequency range 250 - 800 Hz, an increase in the thickness of the air gap corresponds to an increase in the absorptivity of the material. Thus, with an increase in the thickness of the air layer from 10 to 70 mm, the sound absorption coefficient at 500 Hz increases from 0.28 to 0.88.

In the high-frequency region of the frequency dependence of the sound absorption coefficient, there is a maximum, with an increase in the thickness of the air gap, it is more pronounced and gradually shifts toward lower frequencies. At an air gap thickness of 20 mm, the maximum absorption is at a frequency of 1600 Hz, and the sound absorption coefficient $\alpha = 0.9$, and with an air-gap thickness of 70 mm, the maximum point corresponds to a frequency of 630 Hz, $\alpha = 0.93$. Thus, the combination of fibrous-porous layers and air gap allows to shift the region of greater absorption towards low frequencies and, thus, to regulate the sound absorption characteristics of the coating.

The use of materials of a porous-fibrous or porous-sponge structure without an air gap can't provide good sound absorption in the low-frequency region, regardless of

the thickness of the porous layer. The maximum sound absorption coefficient of six layers of non-woven fabric at a frequency of 1000 Hz is 0.74, and that of an eight-layer nonwoven fabric at frequencies of 500 - 2,000 Hz is 0.64 - 0.72, which is much less than in an air-interlayer design.

The dependence of the absorptive power of polyurethane foam on the thickness is as follows: when the thickness of the sample is increased from 10 to 80 mm, the absorption of sound waves at a frequency of 250 Hz first decreases somewhat from 0.10 and then gradually increases to 0.41. A similar situation occurs at a frequency of 500 Hz, only the minimum is less pronounced. At a frequency of 1000 Hz, the absorbing capacity increases uniformly as the thickness of the sample increases. At a frequency of 2000 Hz at a thickness of 60 mm, a minimum is observed in the region of high values of the sound-absorption coefficient.

Based on the experimental results obtained, the design of a layered coating with an air gap has been developed. The technological process of its creation is proposed. The sound-absorbing coating was formed from two sheets of needle-punched fabric. To fix the gap between the canvas, glued waste from the cutting of flexible polyurethane foam (the area of one cell is not more than 0.02 m², the thickness of the partitions between the cells is not less than 20 mm), or n-polyurethane strips 30 - 50 mm in size, located at a distance of 100 - 150 mm from each other. Thus, air volumes were formed inside the material, which contribute to the dissipation of the energy of sound waves. One of the most important factors in the formation of a material with an intermediate, air layer is the adhesion strength of the elastic foamed polyurethane and non-woven fabric. It is shown that the discrete arrangement of adhesion compounds increases the sound absorption coefficient of the porous structure.

One of the promising directions for improving the acoustic properties of materials is the creation of an inhomogeneous compression deformation field in layers. Studies were conducted on the creation of compression deformation in the process of joining the layers of the material with needle piercing, when a mixture of polyurethane foam particles and synthetic fibers was used as an intermediate layer. Additional compression of the intermediate layer was carried out by heating the material.

3. Use of ultrasonic waves in the diagnosis of joints and hardening coatings.

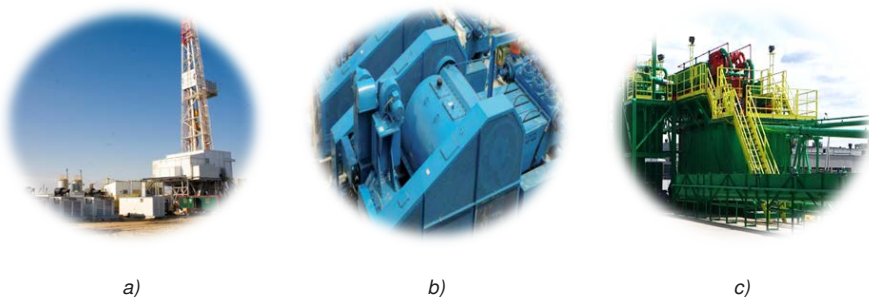
The basis for diagnosing, as separate designs, and the nodes of their connection with each other is the task of searching for so-called defects - each separate discrepancy of products with established requirements. Regardless of the type (external, internal and geometry) of defects, they are subdivided into three types: critical, significant, insignificant.

Ultrasound defectoscopy is a method proposed by S. Ya. Sokolov in 1928, based on a study of the process of propagation of ultrasonic vibrations in controlled products with the help of special equipment, the ultrasonic flaw detector. It is one of the most common methods of NDT. An improved method of standard ultrasonic flaw detection is ultrasonic testing using phased arrays. Phased array antenna (PA) - antenna array (a set of emitters placed in a certain way in space). Phased antenna arrays are a new type of transducers, significantly different in that their characteristics (types of excited waves, input angles, directional patterns, etc.) can be controlled by a computer using specified programs. A large number of scientists in various laboratories of the world are engaged in studying PA. The ultrasonic method with phased arrays is used in many areas of production.

The advantage of the ultrasound method with a phased array is a visual scan, which allows to significantly reduce the time of recognition of defects, due to visualization on the screen of the flaw detector, as well as the use of a one-sided access to the object of control, a change in the angle of entry, a significant acceleration of the monitoring process, security. It is also possible to print a screen representation of the defect, which allows you to quickly document the results of the control.

The problem of technical diagnostics of oil drilling rigs becomes very actual, since its design is specific, the operating mode reaches its limit values, and the consequences of failure acquire serious, in some cases catastrophic consequences.

The oil drilling rig is a giant metal structure. Each welded element of oil rig equipment requires careful monitoring by various methods. Elements such as: mast with crown block, drilling pumps, manifold, circulation system for cleaning drilling mud, etc (Fig.1). Loaded assemblies of parts or pipelines by more than 70% require 100% inspection by the methods of NDT welds or base metal.



a) mast with crown block HP1500; b) mud pump;
c) circulation system for drilling mud cleaning

Fig. 1 - The most important designs of the oil platform, which are subject to compulsory diagnostics

As an example of the effective use of ultrasonic methods for monitoring similar critical structures, let us consider the defectiveness of a welded pipe joint for a cleaning system in an oil drilling rig. We have replaced standard ultrasound monitoring with ultrasound control using a phased array. The application of the phased array enhances the possibilities of ultrasonic inspection of complex-shaped products, simplifies operation and improves productivity. There are linear (one-dimensional), two-dimensional and ring-shaped phased arrays. The most commonly used linear gratings of 8 ... 128 (their number is usually equal to $2n$) of identical piezoelectric elements. In linear PA, the elements are arranged in one line. Therefore, they control the configuration of the field in one plane. Inside the welded seam artificial defects of various types are laid with the help of glass fiber threads: two bulk defects and one plane defect.

At inspection on a welded pipe were used: Equipment A1550 Intro Visor; the converter with the phased lattice PPA 2L16W-1610 (16-element); SOP with flat-bottomed cylindrical holes; CO (European type V-1); gel.

For the purity of confirmation of the experiment, the defects were initially detected using the radiation method. After carrying out the radiation method of the sample and the subsequent decoding of the image on the X-ray film, three defects were detected: a pore diameter of 3.0 mm, a pore diameter of 4.5 mm, a linear defect with a length of 21.0 mm.

After the ultrasound control of the sample using PA with simultaneous interpretation of the defects, three defects were detected on the flaw detector display: pore diameter 3.1 mm, pore diameter of 4.7 mm, linear defect with a length of 24.0 mm.

To date, the promising direction in engineering is the use of various hardening coatings. Applied by various methods: surfacing, spraying, etc. Due to which the technical characteristics of the base metal of the article are increased. At present, a technique is being developed for using the acoustic method to assess the quality of adhesion of layers (coatings) to the substrate and to determine their thickness.

4. Conclusions

1. Sound waves are widely used in the development of new sound-absorbing building coverings. As a result, the laws of the propagation of sound waves in layered media with the alternation of layers with different frequency dependences of the propagation constants of sound were studied. It is established that for multi-layer sound-absorbing coatings, the decrease in the energy of sound waves can be achieved not only by an increase in the thickness of the coating, but also by an increase in the sound absorption coefficient due to a change in the parameters of the structure of the sample.

2. The use of ultrasonic waves in the diagnosis of compounds and hardening coatings made it possible to accelerate the control process without destroying them. And also, quickly document the results of monitoring, visualizing defects on the screen.



ASME ANDE-1 – ZCELA NOVÝ PŘÍSTUP KE KVALIFIKACI PERSONÁLU

ASME ANDE-1 – COMPLETELY NEW APPROACH TO PERSONNEL QUALIFICATION

Tomáš ZAVADIL

ATG, s.r.o., Toužimská 77, Prague 9, 199 02, CZ
Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

ASME ANDE-1 je nový nezávislý kvalifikační systém pro NDT a QC personál. Jako první přichází s požadavkem na ověření praktických schopností NDT personálu na základě prokázání schopnosti vykonat všechny požadované aktivity namísto požadavku na délku praxe a zařazuje do zkouškových setů vzorky bez vad pro simulování reálných situací v praxi, kdy je třeba rozhodnout o přípustnosti. Tento dokument je kombinací analýzy předpisu ASME ANDE-1 a výsledku jednání ATG task group ku příležitosti 25. výročí vzniku společnosti ATG, které se účastnil i bývalý prezident ASNT a vedoucí projektu ANDE-1, Michael L. Turnbow.

Klíčová slova: kvalifikace, certifikace, ASME, ANDE-1, způsobilost

Abstract

ASME ANDE-1 is a new independent qualification system for NDT and QC personnel. It is the first one to come with a requirement of performance-based experience of NDT personnel on basis of practical demonstration to perform all required activities rather than length of experience. It also adds unflawed samples to test sets in order to simulate real situation in industrial practice, where decision about the acceptance is necessary. This document is a combination of ASME ANDE-1 standard and results of ATG task group debates held during the 25th anniversary celebration of ATG Ltd. company, where also participated former president of ASNT and current chair of ANDE-1 project, Mr. Michael L. Turnbow.

Key words: qualification, certification, ASME, ANDE-1, eligibility

1. Úvod

Kvalifikace NDT personálu je spolu s kvalifikací svářečů a svářečského dozoru jedna z nejpracovanějších v průmyslové praxi. Důvodem je stěžejní úloha NDT v průmyslu. Každá firma dodávající výrobky na evropský trh nese odpovědnost za bezpečnost uvedení svých výrobků do provozu. Potřebuje tak kvalifikovaný a zkušený NDT personál, který spolehlivě dokáže ověřit požadavky na jakost polotovaru či finálního výrobku.

Existuje celá řada kvalifikačních předpisů, často rozdělovaných do skupin na *nezávislou kvalifikaci a certifikaci a zaměstnavatelskou kvalifikaci a certifikaci*. Ve střední Evropě jsou nepoužívanější ISO 9712 [1] (nezávislá), SNT-TC-1A [2] a EN4179 / NAS 410 [3] (zaměstnavatelské). Ve skutečnosti však těchto kvalifikací je mnohem více.

ASME (American Society of Mechanical Engineers) v roce 2015 představila nový kvalifikační předpis, který přistupuje zcela novým způsobem k prokázání a ověření praxe – největší slabiny většiny současných kvalifikačních systémů. Tento předpis, nazývaný ANDE-1 [4], je jedním z přípustných kvalifikačních předpisů akceptovaných ASME BPVc 2017 (společně s SNT-TC-1A a ANSI/ASNT CP-189), ISO 9712 je též přípustné, ale jen v omezené míře.

Tento článek je kombinací analýzy předpisu pro nezávislou kvalifikaci a certifikaci NDT a QC personálu ANDE-1 a výsledku jednání ATG task group ku příležitosti 25. výročí vzniku společnosti ATG, které se účastnil i někdejší prezident ASNT a vedoucí projektu ANDE-1, Michael L. Turnbow. Tento článek se zabývá výhradně částí kvalifikace NDT personálu a jeho závěry nelze automaticky vztáhnout i na QC personál.

2. Pozadí vzniku

Úkolem každého kvalifikačního systému bez rozdílu je připravit NDT inspektora /operátora, který je schopen vykonávat své svěřené úkoly správně a odpovědně, který plně chápe svou úlohu v procesu NDT a který rozumí svým pravomocem a odpovědností a chová s v souladu s nimi.

NDT personál však často postrádá některé z těchto vlastností. Kořenovou příčinou většiny problémů ženoucích zaměstnavatele k odpovědnosti *se ukazuje být jejich nedostatečná praxe*. Tento problém se poprvé objevil v roce 1982, kdy NDT personál nedokázal odhalit mezikrystalickou korozi pod napětím na prvním bloku jaderné elektrárny Nine Mile Point, vedoucí ke kolapsu potrubí 20. března stejného roku a následně dvouleté odstávce. Dokonce, i když vady byly zřetelně vidět, (médiem unikalo trhlinami), nebyl NDT personál schopen detekovat vady pomocí UT [5].

Následné přezkoušení personálu ukázalo, že pouze 18 % bylo schopno nalézt požadované vady, navzdory tomu, že byli všichni řádně kvalifikováni (většinou dle SNT-TC-1A) a s dlouholetou praxí. ASME v roce 1990 implementovalo PDI (Performance Demonstration Initiative) pro monitorování stavu způsobilosti NDT personálu. Od roku 1982 byl zjištěn rostoucí trend kompetence personálu, který v současnosti činí stále jen 50% [5-7]. PDI však pouze monitoruje současný stav a kvalitu praxe nezvyšuje. Navzdory tomu daňové poplatníky od jeho zavedení stálo 150 000 000 USD [5].

Dle názoru některých zástupců ASME *jen 40% firem v USA implementuje do své organizace kvalifikační systém SNT-TC-1A správným způsobem*. Mimo USA je toto číslo obecně ještě nižší. V roce 2010 byl proto založen projektový tým s úkolem přípravy Written Practice pro potřeby ASME. V roce 2012 byl tento požadavek přehodnocen a požadovaným výstupem se stal zcela nový normativní předpis pro centrální (nezávislou) kvalifikaci NDT personálu.

První verze vyšla 18. listopadu 2015. Dokument byl od začátku tvořen jako zcela univerzální [8], avšak tlaková zařízení zůstala patrným základním stavebním prvkem.

3. Čím se ASME ANDE-1 liší od jiných nezávislých kvalifikačních systémů

Kvalifikace je stejně jako u ISO 9712 rozdělená na metody (ANDE-1 rozeznává pouze metody ET, MT, PT, RT, UT, VT, tj. metody s relevantním průmyslovým dopadem) a 3 kvalifikační stupně. Obdobně jako ISO 9712 rozeznává průmyslová odvětví (např. energetika), která ale až dále dělí do sektorů (např. elektrárny, fosilní paliva, obnovitelné zdroje, offshore atd.) a charakteristických aplikací (např. výroba, výstavba, uvedení do provozu, údržba).

Pro každou takovou skupinu odvětví-sektor-aktivita definuje pro danou metodu a stupeň požadavky na znalosti a dovednosti a odpovídající potřebu kvalifikace personálu včetně obsahu kvalifikace pomocí metodiky JTA (*Job Task Analysis*), které provádí tzv. *SIS committee (Specific Industry Sector)*, uskupení odborníků z průmyslové praxe v daném sektoru) [5,9]. Jasně je tak vymezeno, co musí operátor umět pro výkon činnosti v daném odvětví/sektoru/aktivitě.

JOB/TASK ANALYSIS
ULTRASONIC

Duty Code: 100		Job Duty Area: Ultrasonic (Basic)					Date: 08/15/2013	
Task ID Number: 4.0		Task Description: Perform Examination						
Element No.:	Performance Steps (Elements)	*D	*I	*F	S	K	Skill (S) Knowledge (K)	Level I II or III
4.03E	Apply couplant	1	3	5	S	K	UT wave propagation, reflection, air interfaces Recognizing transducer coupling to component requirements and issues associated with incorrect application	I, II
4.03F	Determine scan start position, based on L_s , W_s	2	4	5	S	S	Ability to correctly locate datum 0° s	I, II
4.03G	Adjust scan gain in accordance with procedure. Ensure proper signal noise (S-N) is achieved.	2	5	5	S	K	Ability to recognize screen presentations and make adjustments Comprehension of S/N (signal to noise ratio) requirements	I, II
4.03H	Determine scan directions US, DS, CW, CCW	2	4	5	S	K	Understand scanning requirements and orientation	I, II
4.03I	Perform preliminary examination to determine ID geometric conditions, metallurgical responses and potential standing waves caused by wedge geometry or component configuration.	2	3	5	S	S	Capability to distinguish geometric reflectors	I, II
4.03J	Scan component in accordance with procedure maintaining required scan speed, overlap and oscillation	2	5	5	S	S	Ability to manipulate transducer - hand eye coordination	I, II
4.03K	Continually observe signal response during scanning.	3	5	5	S	K	Comprehension of spurious signal issues and methods for correction Ability to differentiate valid response signals from spurious signals	I, II

*DIF Determination (see attached definition and numerical rating)

Page 16 of 31

Obrazek 1 Příklad JTA pro metodu UT s požadavky na konkrétní činnosti a z toho plynoucí požadavky na znalosti (K - knowledge) a dovednosti (S – skills) a stanovení obtížností (D – difficulty), důležitosti (I – importance) a frekvence potřeby (F – frequency) [10].

Způsobilost

Primárním požadavkem pro způsobilost být kvalifikován je minimální vzdělání. Kvalifikační předpisy obecně požadují základní vzdělání (schopnost číst) s dostatečnou znalostí matematiky (ISO 9712 odst. 7.2.3). Školící střediska se však často setkávají s problémy chápání základní matematiky jako je trojčlenka, goniometrické funkce či úprava rovnic. ASME ANDE-1 proto požaduje od všech uchazečů minimálně středoškolské vzdělání (odst. 1-5.2).

Požadavky na školení, průběh ověření praxe, závěrečnou zkoušku a případné další požadavky na certifikaci musí vycházet z JTA (ANDE-1 odst. 1-2.3).

Certifikační orgán tak na rozdíl od ISO 9712 nemá úplnou nezávislost, ale musí být implementovány požadavky SIS committee (ANDE-1 odst. 1-3.7). Tento přístup je částečně podobný s přístupem tzv. NANDTB (národního leteckého boardu pro NDT), zastoupeného primárními kontraktory a držiteli typových certifikátů, kteří mohou částečně vstupovat do procesu kvalifikace NDT personálu jinak prováděné zaměstnavatelem (EN4179 odst. 3.19 a 4.4.2 [3]).

ANDE-1 zpřísňuje i požadavky na zrakovou způsobilost a předpokládá požadavek na schopnost vidět na blízko, na dálku, rozlišovat barvy a za předpokladu použití různé zrakové korekce dokonce i ověření jednotlivých typů zrakové korekce (odst. 1-1.6.a4). Zaměstnavatel je poté povinen vytvořit svůj Written Practice nebo Eye Examination Program, kde vymezí interní požadavky na zrakovou způsobilost, které nebudou v rozporu s touto normou (odst. 1-1.6.b1).

Školení

Školení probíhá v souladu s JTA podle schváleného manuálu certifikačního orgánu (ASME) a SIS committee.

Instruktor provádějící školení je osoba kvalifikovaná Level 3 v dané NDT metodě a současně způsobilá provádět kvalifikaci personálu. Způsobilost pro výkon školení je dána buď praxí instruktora na státním vzdělávacím institutu, nebo dodatečnou kvalifikací v rozsahu minimálně 40 hodin pro zvládnání komunikačních schopností a schopností učit (odst. 1-4.5).

Tento požadavek odráží skutečnost, že ne každý, kdo je dostatečný odborník, je i schopný lektor, tzn. umí předat správný obsah v daném omezeném čase takovým způsobem, že jej uchazeč pochopí a bude schopen úspěšně aplikovat v budoucnu [11]. Požadavek na dodatečné doškolení v oblasti komunikačních činností je proto naprosto relevantní. Bohužel tento požadavek by měl být povinný i pro profesorský sbor na vysokých školách, který často také neumí své odborné znalosti adekvátně předat, a kterých se tento požadavek podle ANDE-1 netýká (pozn. autora).

Praxe a zkušenosti

Důležitou změnou oproti jiným nezávislým kvalifikačním systémům je prokázání praxe a zkušeností na základě prokázaných schopností, nikoliv na základě délky praxe v oboru.

Každý uchazeč při předložení požadavku na zkoušku musí předložit i vyplněnou tzv. *Qualification/Continuity Card* (zkráceně *Qual Card*; odst. 1-4.2). Tento dokument podrobně popisuje jednotlivé znalosti (musí chápat a být schopen implementovat) a dovednosti (musí umět vykonat), které uchazeč musí zvládnout před tím, než je připuštěn ke zkoušce. ANDE-1 tak požaduje splnění praxe před zkouškou, na rozdíl od ISO 9712, které připouští získání části zkušeností až po zkoušce, v rozsahu dle uvážení certifikačního orgánu, viz ISO 9712 odst. 7.3.1.

Kvalifikační karta musí být kompletně vyplněna a podepsána odpovědnou osobou, kterou může být buď Level 3 [5], nebo ve vybraných případech autorizovaný inspektor (např. jaderná energetika, mandatorní příloha 1, odst. I-2.5).

QUALIFICATION CARD

CANDIDATE: _____ ID: _____

METHOD: Ultrasonic (Basic)

PERFORMANCE AREA:

Double Side $\geq 4"$ to $\leq 6"$ Diameter Elbow to Pipe - Austenitic

ACTIVITY TITLE: Inspection Request/Component Information

Applicable Procedures, Drawings and/or Reference Documents:

ELEMEN T NO	ACTIVITIES	Action Code	Candidate Initials /Date	Level I II & III Initials /Date	COMMENTS / REMARKS
6.01	Determine if indication is geometric or non-geometric	P			
6.01A	Follow procedure for recording a geometric indication	P			
6.01B	Determine if additional surface conditioning is required for sizing techniques for non-geometric indication	P			
6.01B	Obtain through wall and length sizing	P			
6.01B	Determine if indication is ID connected	P			
6.03	Determine aspect ratio for a Section XI indication including linear interpolation if required	P			
6.04	Determine acceptability of indication	P			
6.05	Document results and submit for review	P			

* See JTA "Ultrasonic Basic" for identified elements and the associated skills and knowledge.

I have received adequate experience for the task as listed above and can perform this task in a proficient manner.

Candidate: _____ Date: _____

I have evaluated the subject Candidate in the above task and the performance results are acceptable.

Final Evaluator: _____ Evaluation Action Code(s) _____ Date: _____

Action Code (P) Perform (S) Simulate (D) Discuss

Page 14 of 14

Obrazek 2 Příklad části Qual Card pro UT personál, základní část (konvenční ultrazvuk), pro zkoušení svarů austenitických ocelí [12].

Tento nový přístup přináší zásadní změnu pro zajištění dostatečných praktických znalostí NDT personálu. Samozřejmě je možné, že jeden podpis dostatečné praxe z hlediska hodinového rozsahu bude pouze nahrazen rozsáhlou sérií podpisů z hlediska odborného rozsahu. Pro takové kopírování si pak odpovědný Level 3 bude muset sehnat jen kvalitní „bramborové“ razítko. Nicméně zcela jiná situace nastane v případě, že se prokáže, že operátor nebyl schopen např. kalibrovat ultrazvukový přístroj nebo nastavit si křivku DGS. V případě ISO 9712 prokázání praxe nikterak nezavazuje zaměstnavatele a jeho Level 3 (pokud jej vůbec má), aby zajistil schopnost svého personálu takové úkony být schopen provést. V případě ASME ANDE-1 však bude existovat dokumentovaný záznam, že před samotnou zkouškou tyto znalosti operátor měl a řádně předvedl svému Level 3. Pokud při inspekci takové znalosti nebude schopen replikovat, existuje nezvratný důkaz, že zaměstnavatel prostřednictvím svého Level 3 neadekvátně připravil svého NDT operátora a může tak být hnán k přímé odpovědnosti. Právě obava z jednoduché prokazatelnosti případných podvodů může vést ke zvýšení požadavků zaměstnavatelů na způsobilost svých pracovníků.

Závěrečná zkouška

Zkouška podle ANDE-1 je rozdělena do dvou částí, písemná zkouška a praktická demonstrace schopností. Nerozlišuje tak na všeobecnou a specifickou část, ale znalost předpisů, norem, specifikací a kódů i nadále požaduje (odst. 2-2.2.c). V obou případech je pro absolvování zkoušky požadována úspěšnost 80% (odst. 2-2.2.d a 2-2.3.a1c), na rozdíl od ostatních předpisů.

ANDE-1 požaduje, aby obsah závěrečné zkoušky byl v souladu s JTA a dle návrhu SIS committee a aby otázky pokrývaly celou aplikaci metody (ISO 9712 požaduje jen minimální počet otázek, viz ISO9712 odst. 8.2). Počet otázek pro jednotlivé mandatorní aplikace pak může být libovolně rozdělen dle manuálu kvality certifikačního orgánu (tabulka 2-2.2-1). Zkouška probíhá bez pomůcek, norem i standardů, s výjimkou referenčních materiálů definovaných certifikačním orgánem (odst. 2-2.2.b).

Praktická demonstrace schopností musí proběhnout na minimálně 3 vzorcích (přímo ASME požaduje 5 [13]), které budou obsahovat *maximálně 1/3 vzorků s povinně detekovatelnými vadami* (odst. 2-2.3.a2h). To představuje zásadní změnu v pojetí praktické zkoušky, neboť uchazeč se nemusí pouze rozhodnout, která vada je nepřípustná (ISO 9712 požaduje reportovatelnou vadu v každém zkušebním vzorku, kromě výjimek, viz odst. 8.2.3.3 a 8.2.3.4), ale zda se ve zkušebním vzorku vada vůbec nachází. Taková praktická demonstrace schopností se mnohem více blíží realitě v průmyslové praxi, kdy je NDT operátor tlačěn k nalezení všech relevantních vad, ale k minimalizaci chybných vyhodnocení, které vedou k zvyšování zmetkovitosti a tudíž i nákladů.

Certifikace a recertifikace

ASME ANDE-1 je nezávislý kvalifikační systém pro NDT personál a QC inspekční personál. Certifikaci provádí nezávislý certifikační orgán, v tuto chvíli však výhradně ASME [9].

Certifikát je udělen po splnění všech požadavků na certifikaci na dobu 5 let (výhradně). Pro zajištění platnosti certifikátu však musí uchazeč každoročně posílat aktualizovanou Qual Card k přehodnocení, aby bylo zajištěno, že držitel certifikátu stále disponuje všemi znalostmi a dovednostmi potřebnými k výkonu práce (odst. 1-6.2, resp [9]). Tento princip je v souladu s principy zaměstnavatelských kvalifikačních systémů: *Annual Maintenance* dle normy EN 4179 (odst. 8.6) a *Technical Performance Evaluation* dle doporučení SNT-TC-1A (odst. 10).

Obdobně jako u ISO 9712 i ANDE-1 nepřipouští významné přerušení (na dobu delší než 24 měsíců) a porušení etického kodexu (odst. 1-6.5).

4. Shrnutí a závěr

ASME ANDE-1 jakožto nový kvalifikační systém pro nezávislou kvalifikaci NDT a QC personálu vznikl v důsledku dlouhodobých problémů se způsobilostí NDT personálu. Navzdory své povaze se však poučil z mnoha chyb ISO 9712 a inspiroval se i výhodami zaměstnavatelské kvalifikace tak, aby vytvořil robustní systém schopný prověřit schopnosti NDT personálu vykonávat svou práci správně a odpovědně a chápající své delegované role a odpovědnosti.

Předpis především zpřísňuje požadavky na získání praxe, a to zásadním způsobem, neboť mění celý koncept uspokojení požadavku na praxi. ANDE-1 požaduje od každého uchazeče prokázání znalostí a schopností podle definovaného vzoru (Qual Card), který získá pod dohledem odpovědné osoby. Tato osoba potvrdí ověření získání daných znalostí a schopností svým podpisem u každé dílčí aktivity a tím i přebírá odpovědnost za plnou způsobilost svého pracovníka.

Zkouška v pojetí ANDE-1 klade vyšší nároky na prokázání znalostí (minimum 80 %) a požaduje soulad s typickými požadavky průmyslového odvětví, sektoru a návazných aktivit. Současně požaduje zařazení dostatečného množství zkušebních vzorků bez reportovatelných vad do zkušebních setů tak, aby uchazeč musel uvážit možnost, že zkoušený díl je v pořádku, a tím aby se zkouška přiblížila co nejvíce skutečnému výkonu činnosti v praxi.

ANDE-1 si plně uvědomuje, že jednou získané znalosti nepřetrvávají navěky, a tudíž požaduje od svých uživatelů každoroční prokázání způsobilosti podle aktualizovaných Qual Cards, obdobně jako požadují zaměstnavatelské kvalifikační systémy (Annual Maintenance v EN 4179 resp Technical Performance Review v SNT-TC-1A) a akreditace podle PRI NADCAP a PRI TPG.

Systém ASME ANDE-1 je v tuto chvíli ve fázi implementace. Jediným certifikačním orgánem je v tuto chvíli ASME a je důvodné se domnívat, že tak zůstane i po několik dalších let. Jak bude kvalifikační předpis úspěšný je závislé hlavně na schopnosti penetrovat na mezinárodní trh. To však ukáže až čas.

5. Poděkování

Tento článek vznikl na základě výsledku diskusí ATG task group ku příležitosti 25. výročí vzniku společnosti ATG, které se účastnil i někdejší president ASNT a vedoucí projektu ANDE-1, Michael L. Turnbow. Děkuji tímto za jeho cenné rady, názory a interpretace konkrétních částí ASME ANDE-1, bez kterých by tento dokument nemohl vzniknout.

6. Reference

- [1] ISO 9712:2012. *Nondestructive Testing – Qualification and Certification of NDT personnel*. June 2012.
- [2] ASNT SNT-TC-1A:2016. Personnel qualification and certification in Nondestructive Testing. March 2016.
- [3] EN4179:2017. Aerospace series – Qualification and approval of personnel for non-destructive testing.
- [4] ASME ANDE-1:2015. *ASME Nondestructive Examination and Quality Control Central Qualification and Certification Program*. November 2015.
- [5] M. L. Turnbow. ANDE-1, *An ASME Nondestructive Examination and Quality Control Qualification and Certification Standard*. Conference PVP2014, Anaheim, California, USA. July 20-24, 2014
- [6] *Nondestructive Evaluation: A Review of NDE Performance Demonstrations – NDE Round Robin Report*. EPRI, Palo Alto, CA2008, 1016969.
- [7] *NDE Performance Demonstration Test for Intergranular Stress Corrosion Cracking*. EPRI, Palo Alto, Accession Number ML100140091
- [8] ANDE Certification Program for Non-Destructive Examination. *Resources*. [cit. 2017-09-30] URL: <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation/personnel-certification/ande/resources>
- [9] M. L. Turnbow. *ANDE-1 ASME Nondestructive Examination and Quality Control Qualification and Certification Standard*. NDTMA 2015 Conference, Las Vegas, 2015. [cit. 2017-09-30] URL: <http://www.ndtma.org/wp-content/uploads/2015/02/Turnbow.pdf>
- [10] Skills Commons. *ASME/ANDE JTAs*. [cit. 201709-30] URL: <https://www.skillscommons.org/handle/taaccct/9421>
- [11] ZAVADIL, T. *Quality in qualification and certification of NDT personnel*. Sborník Defektoskopie 2016
- [12] Skills Commons. *ASME/ANDE NDE Qual Cards*. [cit. 201709-30] URL: <https://www.skillscommons.org/handle/taaccct/9334>
- [13] ANDE Certification Program for Non-Destructive Examination. *ANDE Application Process & Testing*. [cit. 2017-09-30] URL: <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation/personnel-certification/ande/ande-application-process-testing>

**ABSTRAKTY A PŘÍSPĚVKY
DODANÉ PO TERMÍNU**

**ABSTRACTS AND PAPERS
AFTER DEADLINE**



ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VÍŘIVÝMI PROUDY

EDDY CURRENT TESTING OF COMPOSITE MATERIALS

Marie BOHÁČOVÁ

INDETEC ndt, s.r.o., Na Bělidle 926, 430 01 Chomutov
marie.bohacova@indetec.cz

Abstrakt

Uhlíkové kompozitní materiály jsou rapidně implementovány do oblastí výroby v různých průmyslových odvětvích. Vzhledem k jejich specifickým vlastnostem jsou využívány zejména při výrobě leteckých konstrukcí, s čímž souvisí i nedestruktivní kontrola kompozitních částí/celků již při výrobě a následně při údržbě letadel za provozu. V současné době představuje podíl kompozitních materiálů na draku letadla více než polovinu. Kompozity jsou obecně přizpůsobivější než kovy, mají vynikající konstrukční tlumící vlastnosti a lepší únavovou a lomovou odolnost než např. hliníkové slitiny. Primárně k odhalení poškození se využívá ultrazvukové nebo ultrazvukové phased array metody a další velice dobré výsledky vykazuje i laserová shearografie. Nicméně, každá z uvedených metod má své limity a z hlediska zajištění letové bezpečnosti je vyvíjen neustálý tlak na vývoj nových technologií, které zajistí rychlou detekci poškození (např. delaminace) v leteckých konstrukcích. Jednou z těchto nových technik může být například právě metoda vířivých proudů, kterou lze jednoznačně odhalit různé typy poškození a materiálových vlastností jako je orientace vláken.

Klíčová slova: *Uhlík, kompozit, vířivé proudy, nedestruktivní zkoušení, letectví*

Abstract

Carbon composite materials are rapidly implemented into manufacturing in various industries. Due to their specific properties, they are especially used in the production of aircraft structures related with the subsequent non-destructive inspection of the composite parts/assemblies during the manufacture and subsequent in-service aircraft maintenance. Currently, the portion of composite materials represents more than half in the airframe. Generally, composite materials are more adaptable than metals, have excellent structural absorbing properties and better fatigue and fracture endurance than aluminium alloys. Ultrasonic or ultrasonic phased array method is primarily used to detect damage, and laser shearography give very good results too. However, each of these methods has its limits and, in terms of flight safety,

constant pressure is being put on the development of new technologies to ensure rapid detection of damage (for example delamination) in aircraft structures. One of these new techniques may be eddy current method by which can unambiguously detect different types of damage and material properties such as fiber orientation.

Key words: *Carbon, composite, eddy current, non-destructive testing, aerospace*



LINEÁRNÍ URYCHLOVAČ JAKO ZDROJ ZÁŘENÍ PŘI PROZAŘOVÁNÍ SVARŮ A ODLITKŮ

Martin FAJKUS

VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.

Výhody a úskalí využití lineárního urychlovače jako zdroje ionizujícího záření o velmi vysoké energii pro radiografickou kontrolu širokého spektra svařovaných výrobků a odlitků s přihlédnutím k 38 letům provozování tohoto zdroje ve Vítkovicích. Porovnání s jinými zdroji ionizujícího záření včetně ukázek aplikace použití lineárního urychlovače na různé typy výrobků.



OPTIMALIZACE VÝBĚRU SENZORŮ PRO LOKALIZACI ZDROJŮ AKUSTICKÉ EMISE

OPTIMIZATION OF SENSOR SELECTION FOR ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCATION

Milan CHLADA, Zdeněk PŘEVOROVSKÝ

Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., NDT Laboratory

Contact e-mail: chlada@it.cas.cz

Abstrakt

Podobně jako v případě globálního polohového systému (GPS) se v případě lokalizace materiálových defektů metodou akustické emise (AE) setkáváme s efektem tzv. snížení přesnosti vlivem geometrie (GDOP). Kromě možnosti stávajících přístupů k analýze a porovnání různých konfigurací senzorů z hlediska přesnosti lokalizace přináší nově navržená metoda další výhody při detekci kritických oblastí charakterizovaných velkou citlivostí k chybám určení začátků signálů. Analogicky k parametru GDOP umožňuje výpočet tzv. citlivostních map i pro případy nespojitých těles, či anizotropních materiálů. Vychází z algoritmu hledání nejkratších cest v diskretně zadaných tělesech, což umožňuje jiný pohled na celou problematiku prostřednictvím podobnostní mapy a schémat nejednoznačnosti.

Klíčová slova: Akustická emise, lokalizace zdrojů AE, geometrické vlivy

Abstract

Similarly to Global Positioning System (GPS), location of material defects by acoustic emission method meets the geometrical dilution of precision (GDOP) phenomena. Besides the several attitudes how to mathematically express its measure and compare particular sensor configurations in accordance with desired location precision, recently proposed method brings extended possibilities for detection of critical regions characterized by strong sensitivity of location results to signal arrival time changes or errors. Analogically to GDOP parameter it yields the sensitivity map available even for non-continuous or anisotropic materials. For computation it uses an algorithm of shortest ways finding in discretized bodies, which furthermore enables to view the problem through the so-called similarity and ambiguity maps.

Key words: Acoustic emission, AE source location, geometrical effects.

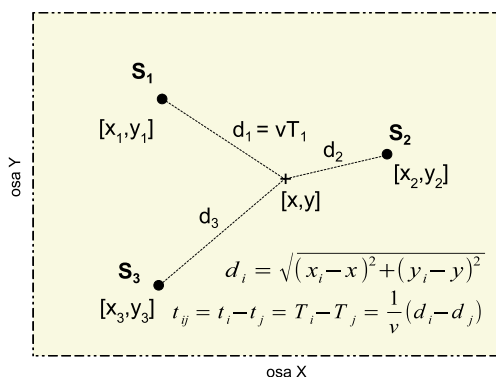
1. Úvod

Pro zajištění věrohodných výsledků lokalizace zdrojů akustické emise (AE) ve specifických částech konstrukce je nutné vhodně volit konfiguraci senzorů. Obráceně je třeba brát v úvahu jen emisní události lokalizované do „stabilních“ oblastí plynoucích z konkrétního rozmístění měničů.

V případě kompletování více než tří emisních hitů do jedné události je běžným lokalizačním postupem výpočet polohy zdroje na základě informace ze snímačů, ke kterým dorazily elastické vlny nejdříve. Pro určité konfigurace snímačů mohou být ale takto vybrány senzory, které nezaručují nejmenší lokalizační chybu amohdy ani jednoznačnost lokalizačního algoritmu. Dobře známý triangulační algoritmus nedává jednoznačné řešení v oblastech „stínu za snímači“. Mimoto lze také nalézt sektory, kde je závislost výsledku na změně časových diferencí (často zatížených velkou experimentální chybou) příliš vysoká. Je tedy žádoucí nalézt jinou kombinaci snímačů ke zkompotované události (pokud existuje), vzhledem k níž není lokalizovaný zdroj v kritické oblasti. Možnosti řešení této problematiky jsou rozebírány v tomto článku.

2. Míra změny časových diferencí

Pro dalších úvahy a výpočty zavedeme následující značení - viz obr. 1 a rovnice (1)-(3), kde v je rychlost elastické vlny, d_i vzdálenost zdroje k i -tému senzoru a t_i čas příchodu vlny k i -tému senzoru:



Obr. 1 Základní schéma pro lokalizaci zdrojů AE.

Fig. 1 Basic scheme for AE source location.

Cílem navrhované analýzy je posoudit potencionální citlivost výsledné lokalizace na změnu časových diferencí (neboli chybu určení začátků detekovaných signálů) v daném bodě zdroje o souřadnicích $[x, y]$. Nabízí se hodnocení parciálních derivací

vícerozměrné funkce udávající souřadnice zdroje (obecně i ve 3D) podle časových diferencí. Za problematické pak mohou být považovány oblasti, ve kterých jsou absolutní hodnoty těchto derivace příliš vysoké.

Obecně je derivování odpovídajících vztahů ale značně problematické a umožnilo by hodnocení kritických oblastí pouze v prostoru časových diferencí, nikoli v prostoru souřadnic zdrojů. Na problém je tedy vhodnější nahlížet obráceně. Je poměrně snadné ze souřadnic daného bodu zdroje $[z, y]$ vypočítat vzdálenosti k jednotlivým snímačům a z nich pak odvozovat odpovídající časové diference. Potom lze zjišťovat, v okolí kterých bodů lokálně dochází k výraznější změně časových diferencí, což znamená lepší stabilitu lokalizace s rostoucí chybou určení začátků signálů. Jako míru změny časových diferencí lze uvažovat sumu absolutních hodnot parciálních derivací odpovídajících rozdílů časů příchodů v lokalizačním algoritmu podle souřadnic zdroje. Pro 2D případ lokalizace na základě dvou vybraných časových diferencí t_{ij} a t_{ik} dostaneme jako míru veličinu M_{ijk} :

$$M_{ijk}(x, y) \approx \left| \frac{\partial t_{ij}}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial t_{ij}}{\partial y} \right| + \left| \frac{\partial t_{ik}}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial t_{ik}}{\partial y} \right| \quad (1)$$

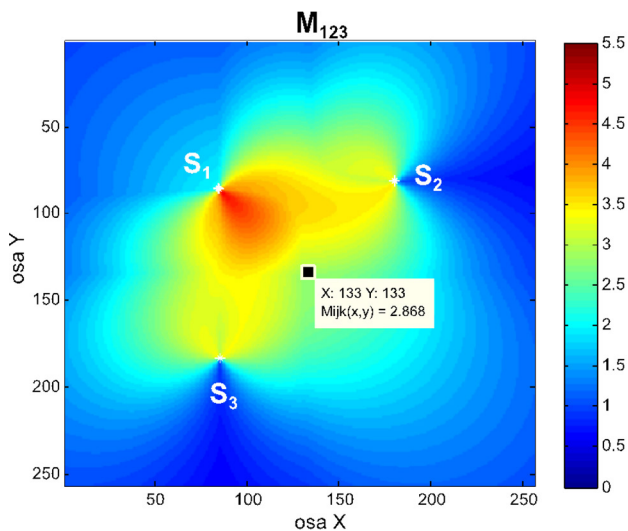
Příčemž

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial x} = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial d_i}{\partial x} - \frac{\partial d_j}{\partial x} \right); \quad \frac{\partial d_i}{\partial x} = \frac{-(x_i - x)}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}} = \frac{x - x_i}{d_i}; \quad \frac{\partial d_i}{\partial y} = \frac{y - y_i}{d_i} \quad (2)$$

Kombinací rovnic (1) a (2) lze míru M_{ijk} uvažovat ve tvaru

$$M_{ijk}(x, y) \approx \left| \frac{x - x_i}{d_i} - \frac{x - x_j}{d_j} \right| + \left| \frac{y - y_i}{d_i} - \frac{y - y_j}{d_j} \right| + \left| \frac{x - x_i}{d_i} - \frac{x - x_k}{d_k} \right| + \left| \frac{y - y_i}{d_i} - \frac{y - y_k}{d_k} \right| \quad (3)$$

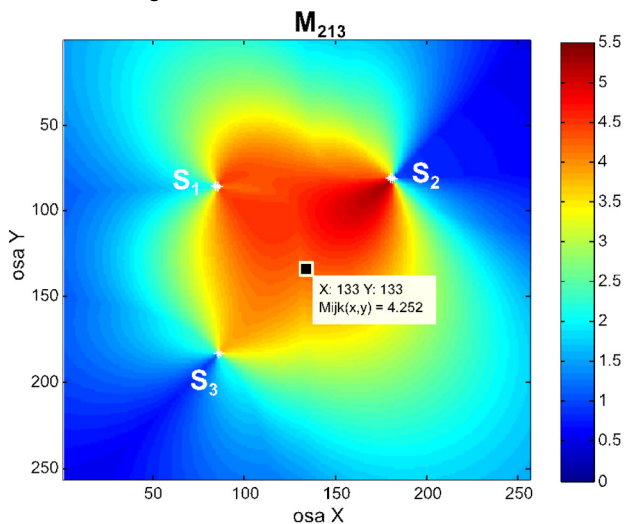
Takto definovaná míra posuzuje vhodnost dané kombinace snímačů i, j, k pro správnou lokalizaci zdroje o souřadnicích $[x, y]$. Lze ji jednoduše a rychle vyčíslit pomocí souřadnic uvažovaných snímačů a předem spočtených vzdáleností zdroje od senzorů. Důležitá je okolnost, že tato míra je symetrická vzhledem ke druhému a třetímu indexu (tj. j, k) a významně závisí na prvním indexu i , tedy „společném“ snímači, vzhledem ke kterému se počítají obě časové diference.



Obr. 2 Ilustrace míry citlivosti lokalizace na chybu určení časů příchodů - verze M_{123} .

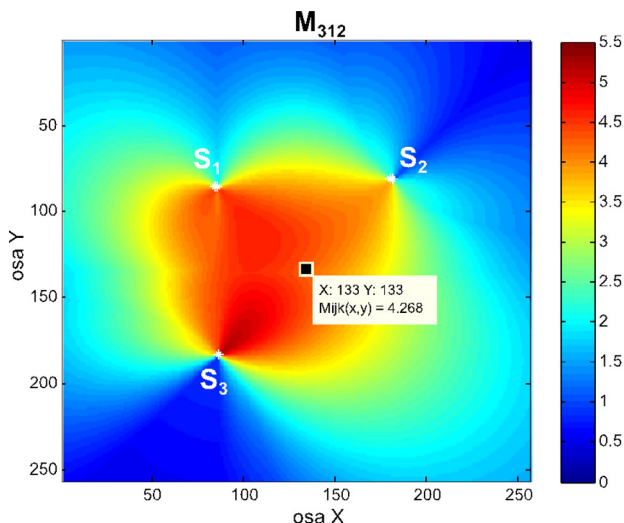
Fig. 2 Illustration of location sensitivity to arrival time estimate error - version M_{123} .

Při použití různých kombinací dvou časových diferencí v rámci pevně zvolených tří snímačů lze tedy očekávat odlišné výsledky lokalizace. Tento fakt ilustrují obrázky obr. 2, 3 a 4 s běžnou konfigurací tří senzorů S_1 , S_2 , S_3 .



Obr. 3 Ilustrace míry citlivosti lokalizace na chybu určení časů příchodů - verze M_{213} .

Fig. 3 Illustration of location sensitivity to arrival time estimate error - version M_{213} .



Obr. 4 Ilustrace míry citlivosti lokalizace na chybu určení časů příchodů - verze M_{312} .

Fig. 4 Illustration of location sensitivity to arrival time estimate error - version M_{312} .

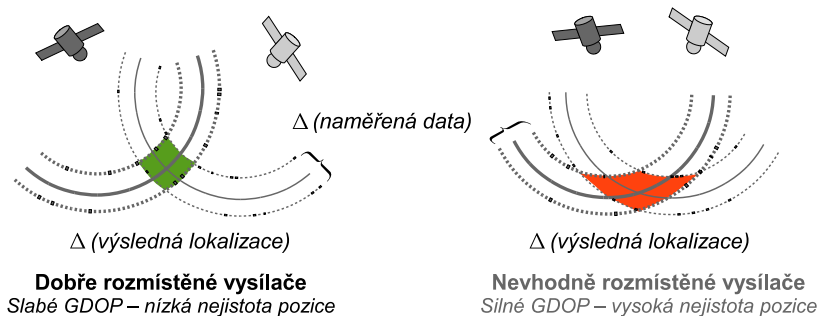
Z obrázků obr. 2 až 4 je patrné, že např. emisní zdroj o souřadnicích [133,133] je vhodné lokalizovat pomocí dvojic časových diferencí t_{21} a t_{23} nebo t_{31} a t_{32} . Použijeme-li diference t_{12} a t_{13} , lze očekávat o 50% horší chybu vlivem strmější lokální závislosti časových diferencí na změnu souřadnic zdroje, což ukazuje srovnání hodnot M_{213} , M_{312} a M_{123} . Tímto způsobem je možné porovnávat očekávané výsledky lokalizace také v rámci různých skupin snímačů, a volit vždy takovou skupinu senzorů, která vykazuje vyšší hodnotu příslušné míry M pro lokalizovaný zdroj. Poněkud překvapivou závislost výsledné citlivosti lokalizace na výběru dvojice časových diferencí lze vysvětlit ostřejším úhlem mezi spojnicemi snímačů a tudíž menší jistotou nalezení průsečíku hyperbol při zvolené metodě lokalizace.

3. Snížení přesnosti vlivem geometrie (GDOP)

Problém nestability lokalizace zdroje plynoucí z geometrie rozmístění snímačů má svou analogii např. v oblasti satelitní navigace. I když se v tomto případě jedná o více vysílačů a jediný přijímač, jsou vzhledem ke znalosti času vysílání signálu hledány průsečíky kružnic a nikoli hyperbol, ale na vysvětlení můžeme nahlížet obdobně (viz obr. 5). Zavádí se zde parametr zvaný „snížení přesnosti vlivem geometrie“ (GDOP - geometrical dilution of precision) [1, 2], který vyjadřuje, jak chyba měření ovlivňuje odhad lokalizace. Jestliže malá změna naměřených dat (např. časové diference)

nezpůsobí velkou změnu výsledné lokalizace, pak řešení problému logicky není citlivé vůči chybám měření - určení začátku signálu.

Analogie s GPS lokalizací



$$GDOP = \frac{\Delta(\text{výsledná lokalizace})}{\Delta(\text{naměřená data})}$$

Obr. 5 Ilustrace problému snížení přesnosti vlivem geometrie.

Fig. 5 Geometrical dilution of precision problem illustration.

Hodnota GDOP v případě lokalizace emisních zdrojů analogicky závisí pouze na rozmístění snímačů a pozici zdroje. V oblastech s vysokými parametry GDOP nelze očekávat stabilní lokalizaci. Bývají to především části tělesa mimo plochu vymezenou polohami snímačů.

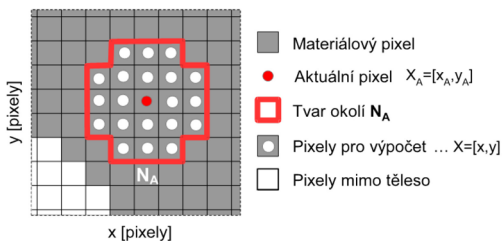
4. Citlivostní mapa

Problémem parametru GDOP může být numerická nestabilita v oblastech kritických pro lokalizaci, kde při změně souřadnic zdroje dochází jen k nepatrné změně příslušných časových diferencí a může zde nastat dělení malými čísly. Pokud ale chceme takové oblasti vyšetřovat, je vhodnější zavést parametr citlivosti lokalizace SM jako zobecnění míry M_{ijk} (převrácená hodnota GDOP) pro případy obecných (nespojitych, či anizotropních) diskrétně definovaných těles. V obr. 6 je rozepsána obecná formulace této míry pro případ čtyř senzorů. Pro každý „pixel“ X_A představující materiál diskretizovaného tělesa a jeho okolí N_A zavedeme míru $SM(X_A)$. Schéma v pravé části obrázku znázorňuje vybraný detail tělesa s možným tvarem výpočetního okolí N_A . Vzdálenosti pixelů k -tému snímači (značeny jsou d_i) jsou spočteny algoritmem pro hledání nejkratších cest [3].

$$SM(X_A) = \underset{X \in N_A}{\text{mean}} \left(\frac{\|D - D_A\|}{\|X - X_A\|} \right)$$

$$D = [d_2 - d_1, d_3 - d_1, d_4 - d_1] \text{ pro } X$$

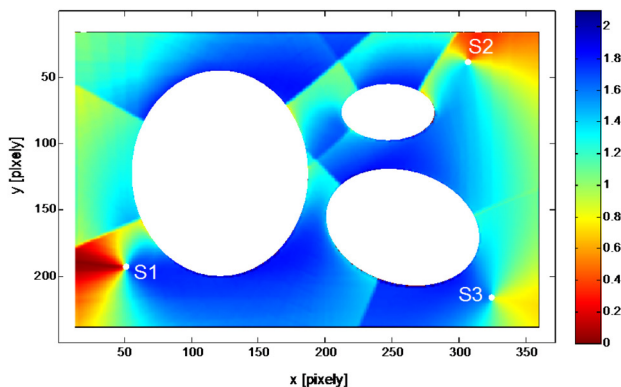
$$D_A = [d_2 - d_1, d_3 - d_1, d_4 - d_1] \text{ pro } X_A$$



Obr. 6 Definice citlivostního parametru SM .

Fig. 6 Definition of sensitivity parameter SM .

Hodnoty parametru SM pro všechny „pixely“ materiálu tělesa vytvářejí dohromady tzv. citlivostní mapu. Vysoké hodnoty na této mapě vyjadřují možnost dobré přesnosti lokalizace, zatímco v oblastech s malými hodnotami (způsobenými vyšším rozptylem souřadnic zdrojů ve srovnání s rozptylem časových diferencí) lze očekávat horší přesnost lokalizace. Následující obr. 7 uvádí příklad konfigurace tří snímačů na izotropní desce se třemi otvory. Jsou zde patrné problematické oblasti „akustických stínů“ za snímači a hranice s náhlými změnami citlivosti vlivem složité topologie prostoru časových diferencí.



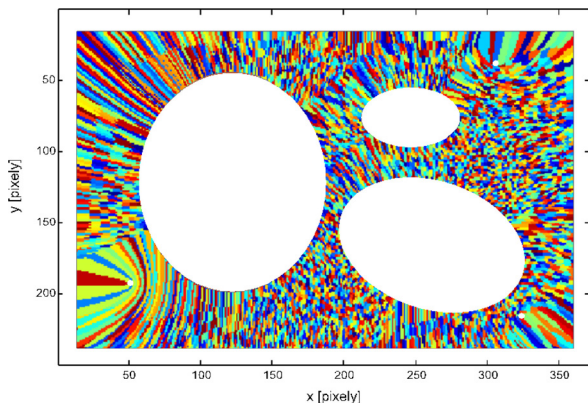
Obr. 7 Citlivostní mapa pro 2D nespojitou desku se třemi senzory.

Fig. 7 Sensitivity map for 2D incoherent plate with 3 sensors.

5. Podobnost časových diferencí

Důležitou informací z hlediska posuzování možností lokalizace jsou rovněž změny časových diferencí vzhledem k poloze zdroje. Topologie prostoru časových diferencí může být velmi komplikovaná, jak dokládá obr. 8, kde každá barva zvyrazňuje oblast

zdrojů s téměř shodnými časovými diferencemi. Podlouhlé oblasti v tzv. podobnostní mapě charakterizují zóny s omezenými možnostmi lokalizace.

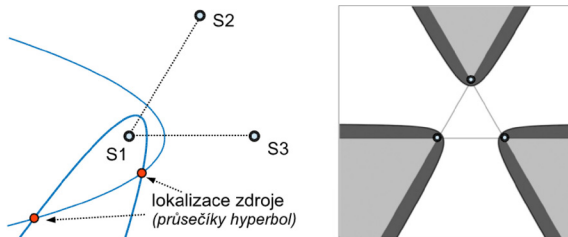


Obr. 8 Podobnostní mapa pro 2D nespojitou desku se třemi senzory.

Fig. 8 Similarity map for 2D incoherent plate with 3 sensors.

6. Mapa nejednoznačností

Na obr. 9 je uveden příklad možných dvou průsečíků hyperbol při 2D lokalizaci zdroje s využitím dvou časových diferencí. Tímto způsobem vznikají jisté oblasti nejednoznačnosti [4]: v pravé části obr. 9 je ilustrována situace, kdy pro každý zdroj v tmavě šedé části plochy lze najít příslušný zdroj ze sousední světle šedé, mající stejné časové diference a naopak.

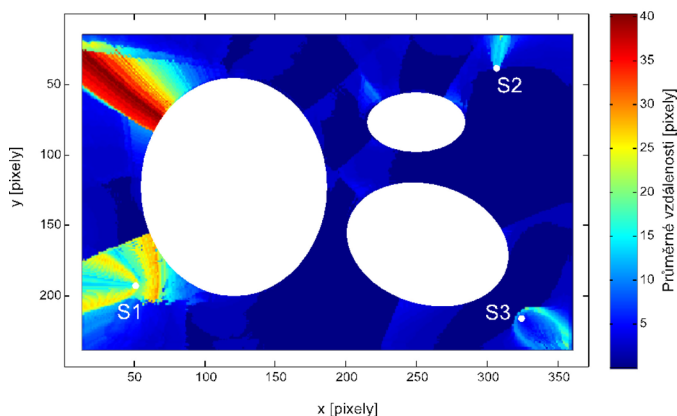


Obr. 9 Nejednoznačnost 2-D lokalizace emisních zdrojů.

Fig. 9 Ambiguity of 2-D AE sources location.

Nejednoznačnost polohy zdroje je obecně způsobena nedostatečným počtem snímačů a při návrhu aparatury AE je nutné brát v úvahu reálné možnosti konkrétního rozmístění snímačů na daném tělese. Z těchto důvodů je třeba mít k dispozici kromě citlivostní a podobnostní mapy také další zobrazovací nástroj, tzv.

schéma nejednoznačností. To ukazuje pro každý „materiálový pixel“, zda existují jiné polohy zdroje s obdobnými časovými diferenciemi. Pokud ano, udává průměrnou vzdálenost k nim (viz obr. 10).



Obr. 10 Nejednoznačnost 2-D lokalizace emisních zdrojů.

Fig. 10 Ambiguity map for 2D incoherent plate with 3 sensors.

7. Závěry

Algoritmus pro hledání nejkratších cest v diskrétně zadáných tělesech umožňuje mapovat problematické oblasti z hlediska možností lokalizace emisních zdrojů. Pro konkrétní konfigurace snímačů na daných tělesech je možné analyzovat její citlivost na chyby měření, lokálně posuzovat podobnosti časových diferencií se změnami polohy zdroje a detekovat oblasti, kde kvůli nejednoznačnostem lokalizovat nelze.

Poděkování

Práce vznikla v rámci grantového projektu GAČR č. 17-22615S a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998.

Literatura

- [1] R. Zekavat and R. M. Buehrer, 'Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances', Vol. 27. John Wiley & Sons, 2011
- [2] Y. B. Ar-Shalom, X. R. Li and T. Kirubarajan, 'Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software', John Wiley & Sons, 2004.

- [3] M. Chlada and Z. Převorovský, 'Shortest Ways Finding in Discrete Bodies', Proc. of NDT in Progress 2015. Prague, Czech Society for Nondestructive Testing, ISBN 978-80- 214-5262-6, pp. 69-74.
- [4] Blaháček M., 'Time Differences Uncertainty Influence on Acoustic Emission Source Location Accuracy', Proc. of NDT in Progress 2007. Prague, Czech Society for Nondestructive Testing, ISBN 978-80- 214-3505-6, pp. 15-22.



OPTIMALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ NA ZÁKLADĚ SIMULACE PROUDĚNÍ

OPTIMIZATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING DEVICES BASED ON FLOW SIMULATION

German MARKARJANC

ATG - Advanced Technology Group spol. s r.o.

Toužimská 771, CZ - 199 02 Praha 9 - Letňany

e-mail: markarjanc@atg.cz

Abstrakt

V oblasti proudění vzduchu a vody v systémech pro nedestruktivní zkoušení bylo potřeba řešit problém správného návrhu zařízení a ověření jeho vlastností před tím, než bude realizováno. Ve spolupráci s francouzskou univerzitou École Des Mines De Nantes byl vybrán CFD systém pro simulaci proudění tekutin a prováděny simulace.

Ve zvoleném software bylo simulováno proudění vzduchu v sušících pecí a chladicích boxech pro penetrační linky z důvodů optimálního rozložení proudění a teplot vzduchu. Pro ultrazvukové systémy bylo simulováno proudění uvnitř squirterů s ultrazvukovou sondou. V obou případech simulace vedly k vhodnějším návrhům systémů a úspoře budoucích finančních nákladů.

Abstract

In case of systems for non-destructive testing using airflow and waterflow it was necessary to solve problem how to properly design equipment and check their properties before creating it. There was selected CFD simulation system for fluid flow and there were made a lot of simulations with cooperation with French university École Des Mines De Nantes.

There were created airflow simulations for drying and cooling boxes to achieve optimal distribution of flow and temperature in case penetration lines. Similar type of simulations was created for waterflow inside squirter housing equipped ultrasonic probe in case of ultrasonic testing.

Both types of simulation were created in selected software. In both cases, the simulation led to more suitable equipment design and financial costs savings.



SYSTEM ŘÍZENÍ, IDENTIFIKACE A PROTOKOLOVÁNÍ ZKOUŠENÝCH DÍLŮ NA PENETRAČNÍCH LINKÁCH CONTROL SYSTEM, IDENTIFICATION AND REPORTING OF TESTED PARTS ON PENETRATION LINES

German MARKARJANC

ATG - Advanced Technology Group spol. s r.o.
Toužimská 771, CZ - 199 02 Praha 9 - Letňany
e-mail: markarjanc@atg.cz

Abstrakt

Na základě rozšiřujících se požadavků našich zákazníků na dohled nad technologií, byl zvolen systém dispečerského řízení a sběru dat - SCADA. Systémy tohoto typu jsou používány v širokém rozsahu zařízení od malých linek po rozsáhlé celky v celé řadě průmyslových odvětví.

Základním požadavkem byl sběr dat o technologickém procesu a jeho přiřazení zkoušeným dílům na penetračních linkách, generování protokolů a celkový přehled o lince. Firma ATG provedla vývoj tohoto systému vlastními prostředky a koncipovala ho jako standard pro penetrační linky.

V současnosti tento koncept firma dále rozvíjí a aplikuje ho i do dalších oblastí defektoskopie.

Abstract

Based on rising requirements of our customers for technology control, we made decision to create system of supervisory control and data acquisition, which is known as SCADA. These systems are usually used in wide range of industry equipment beginning small lines up to industrial plants.

The fundamental requirements were technology process data acquisition, assigning measured data to tested parts, generating reports and technology control of penetration lines. ATG company made the development of the system using own sources and design it as standard concept for penetration lines.

Currently, the company improves this concept and uses it in other branches of non-destructive testing.



LOKALIZACE ZDROJŮ SPOJITÉ AKUSTICKÉ EMISE POMOCÍ ČASOVÉ REVERZACE SIGNÁLŮ

LOCALIZATION OF CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION SOURCES USING TIME REVERSAL PROCEDURE

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ*, Josef KROFTA*, Jan KOBER*, Milan CHLADA*

*Ústav termomechaniky AV ČR, Praha 8, Dolejškova 5
Contact e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

V příspěvku je navržena nová metoda lokalizace akustické emise (AE) využívající proceduru časové reverzace signálů (TR – Time Reversal) s jedním snímačem pro lokalizaci pulzní AE na šumovém pozadí z jiných zdrojů, resp. se dvěma snímači pro lokalizaci zdrojů spojitě AE (úniků média). TR procedura je zde poprvé aplikována na dlouhé signály s charakterem náhodného šumu. Metoda byla ověřována pomocí simulovaných zdrojů AE na ocelové desce a částech potrubí a výsledky potvrdily její robustnost. Určitou nevýhodou je nezbytnost podrobného skenování předem vymezené oblasti v okolí pravděpodobného výskytu zdroje, kterou je však možné eliminovat např. pomocí rozsáhlejších numerických simulací na počítačovém modelu konstrukce. Přesnost lokalizace kvazibodového zdroje (okolo 1 mm) je lepší než vlnová délka či apertura snímačů.

Klíčová slova: pulzní a spojitá AE na šumovém pozadí, lokalizace zdrojů AE, časová reverzace signálů (TR).

Abstract

A new solution with the help of Time Reversal (TR) signal processing approach is suggested in this paper. It allows planar location of burst AE sources under high background noise using only one transducer, and continuous AE sources with two transducers, both under high background noise from other sources. TR procedure was in this approach applied to long random noise signals for the first time. Suggested method was verified by means of experimentally simulated AE sources on a steel plate and tube. Source location results certified high robustness of suggested approach. Certain disadvantage of the new method is requirement of detailed scanning of region around a presumed source. Scanning may be eliminated if we use numerical simulations with TR signals put into a computer model of the

structure. Localization accuracy of suggested procedure (approx. 1 mm) is better than the wavelength and transducers aperture.

Keywords: burst and continuous AE on , leakage location, time reversal acoustics.

1. Úvod

Procedura časové reverzace (TR) akustických a ultrazvukových signálů se stává efektivním nástrojem řešení velmi komplikovaných problémů v NDT. Umožňuje prostoro-časovou fokusaci elastických vln a tím také relativně snadnou lokalizaci a částečnou rekonstrukci jak pulzních, tak i spojitých zdrojů akustické emise (AE) i za přítomnosti vysokého šumového pozadí. Přesnější lokalizace spojitě AE, způsobené např. úniky plyných či kapalných médií z tlakových potrubí a nádob je často velkým problémem, zejména v případech proudících médií či v tenkostěnných tělesech s výraznou vlnovou disperzí, útlumem, či měnící se rychlostí šíření vln (svary, příruba, odbočky apod.). Dosud používaná řešení v takových případech většinou vyžadují použít větší počty správně rozmístěných snímačů nebo velmi sofistikované metody filtrace a zpracování emisních signálů.

Klasické procedury lokalizace pulzních zdrojů AE jsou většinou založeny na časových diferencích příchodu signálů ze dvou a více snímačů (TDOA – Time Difference of Arrivals), což dává uspokojivé výsledky v relativně jednoduchých případech, kdy známe rychlost bezdisperzního šíření elastických vln v konstrukci, a za předpokladu že použijeme spolehlivý algoritmus určování začátků příchodu vln, jako jsou např. AIC (Akaike Information Criterion) [1] či expertní detekce [2] apod. V případě silně zašuměných signálů AE mohou algoritmy lokalizace na základě TDOA zcela selhat. Pro tyto případy byly navrženy odlišné přístupy založené např. na frekvenční analýze a filtraci, extrakci charakteristických rysů signálu, umělých neuronových sítích (ANN), vzájemných korelačních funkcích (VKF) apod., viz např. [3, 4, 5, 6].

2. Lokalizace zdrojů AE pomocí procedury časové reverzace (TR)

Lokalizace zdrojů kvazi-spojité náhodných signálů podobných náhodnému šumu představuje ještě mnohem komplikovanější problém než lokalizace pulzních zdrojů v disperzním prostředí či se signály utopenými v okolním šumu. Signály spojitě AE jsou detekovány např. při únicích plyných či kapalných médií z potrubí a nádob, při plastické deformaci kovů, tření, korozi apod. [7]. V těchto situacích mohou být polohy zdrojů odhadnuty na základě útlumu energie signálů ze snímačů různě vzdálených od zdroje [8, 9] případně ručním či robotickým přemísťováním snímače (kupř. mikrofonu) a hledáním místa nejsilnějšího signálu. Často se také používá VKF signálů z pole rozmístěných snímačů, kdy z VKF určené časové zpoždění mezi dvěma signály nahrazuje TDOA. Tato metoda bývá doplněna např. o oktávové

filtrace, podobnosti frekvenčních spekter, histogramy rozložení šumu, prahové detekce náhodných fluktuací apod. [10, 11]. Používají se přitom i speciální patentované přístroje a metody zpracování signálů spolu s vhodným rozmístěním pole snímačů. Autoři [12, 13] navrhli pro tyto situace tzv. „Inteligentní lokátor“, založený na regresních ANN s učením na prototypových sítích. V patentu [14] jsme pro lokalizaci spojitě AE navrhli použít t.zv „Polohové profily“, které jsou nezávislé na útlumu, velikosti a materiálu konstrukce, ale pro učení ANN vyžadují amplitudovou kalibraci na virtuálním modelu. Přehled metod detekce a lokalizace úniků uvádějí autoři [15].

Před několika lety jsme experimentálně rozpracovali nový koncept velmi přesné lokalizace a dekonvoluce emisních zdrojů v libovolně složitých konstrukcích na základě časové reverzace (TR) signálů [16, 17]. TR experiment se skládá ze dvou postupných kroků: 1. Přímé šíření ultrazvukových vln ze zdroje a záznam signálů odezvy jedním nebo více snímači a 2. Zpětné vysílání zaznamenaných, časově obrácených signálů buď ze snímačů invertovaných na vysílače, nebo recipročně z místa původního zdroje. TR operace potlačuje šum pocházející odjinud než z původního zdroje a umožňuje částečnou nebo úplnou rekonstrukci původní zdrojové funkce v místě zdroje díky časo-prostorové reciprocitě operátoru TR, neboť odpovídající vlnová rovnice je invariantní vůči TR operaci [18].

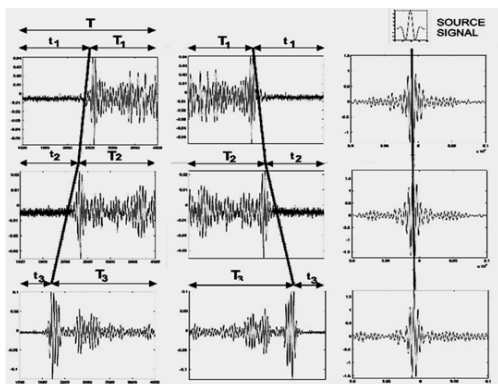
AE signál $u(r, t)$ zaznamenaný snímačem v místě r vzdáleném od místa zdroje r_0 lze při přímém šíření uvažovat jako konvoluci zdrojové funkce $s(r_0, t_0)$ s Greenovou funkcí G (přenosová funkce) mezi zdrojem a přijímačem:

$$u(r, t) = G(r, r_0; t, t_0) * s(r_0, t_0). \quad (1)$$

Ve vztahu (1) je pro tento případ zanedbána další konvoluce s přenosovou funkcí přijímače a zpětného vysílače. TR operaci lze jednoduše uvažovat jako transformaci $t \rightarrow T - t$, kde T je délka TR signálu. Rekonstruovaná zdrojová funkce $w(t)$ je úměrná původní funkci zdroje [19]:

$$w(t) = G(t) * u(T - t) = G(t) * G(T - t) * s(T - t) \approx s(T - t), \quad (2)$$

kde jsme předpokládali aproximaci $G(t) * G(T - t) \approx \delta(t)$, kde $\delta(t)$ je Diracova delta-funkce, neboť oba směry šíření signálu jsou ekvivalentní. Skutečnost, že výsledný signál $w(t)$ reprezentuje časově převrácenou rekonstrukci původní zdrojové funkce v místě zdroje a fokusačním čase T je důležitá pro lokalizaci zdroje a jeho následnou analýzu. TR operaci lze tedy použít jako velmi robustní proceduru lokalizace zdroje i v případě silného šumu, pocházejícího z jiných zdrojů. Princip TR lokalizace zdroje je ilustrován na obr. 1 [16]. Signál ze zdroje je detekován třemi snímači, umístěnými v různých vzdálenostech od zdroje, v časech t_1, t_2, t_3 a po TR operaci je zpětně vysílán se zpožděními T_1, T_2, T_3 . Jelikož $T_1 + t_1 = T$, $T_2 + t_2 = T$ a $T_3 + t_3 = T$, všechny signály dorazí do místa zdroje synchronně se zpožděním T a jakákoliv odchylka od přesné polohy detekce v místě zdroje, nebo změna sledované konstrukce způsobí porušení synchronizace [19, 20].

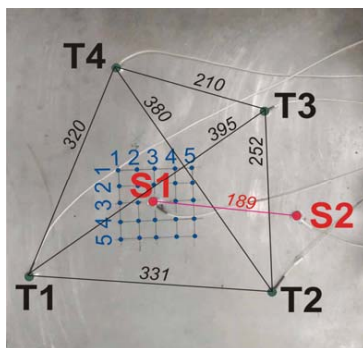


Obr. 1: Rekonstrukce a synchronizace signálů AE ze tří snímačů po časové reverzaci.

Fig. 1: Reconstruction and synchronization of signals from three sensors after TR.

3. Experimentální ověřování TR lokalizace zdrojů AE na ocelové desce

Obr. 1 ilustruje TR lokalizaci v jednodušším případě pulzní AE, kdy jsou synchronizovaná maxima TR rekonstrukce signálu zřetelně detekovatelná. V tomto případě postačí k plošné lokalizaci zdroje s přesností na cca 1 mm pouze jeden snímač. Složitější situace nastává u zdrojů spojitě AE jako je např. šum při úniku, neboť rekonstruovaný TR signál zdroje má opět charakter náhodného šumu bez výrazného maxima. Tato situace dosud nebyla v literatuře zmíněna a jde tedy o první pokus použít TR proceduru i zde, přičemž je zřejmé, že k lokalizaci zdroje spojitě AE nelze použít jediný snímač. Experimentální ověřování lokalizace jak pulzních tak spojitých zdrojů AE pomocí procedury TR probíhalo na ocelové desce o rozměrech 500x500x45 mm, která je zobrazena na fotografii v obr. 2. Na desce byly rozmístěny čtyři relativně širokopásmové piezoelektrické snímače AE typu DAKEL IDK 09 o průměru 9 mm, označené spolu se vzdálenostmi mezi sebou na obr. 2 jako T1 až T4. Snímače byly na desku přilepeny kyano-akrylátovým lepidlem. V obrázku jsou také vyznačeny dvě polohy piezoelektrických měničů stejného typu S1 a S2, které sloužily k vysílání předem ovzorkovaných ultrazvukových signálů jako umělé zdroje AE.



Obr. 2: Ocelová zkušební deska se čtyřmi snímači AE T1 – T4 a dvěma měniči S1 a S2, vysílajícími signály jako umělé zdroje AE.

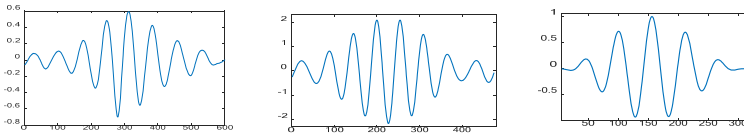
Fig. 2: Testing steel plate with four AE transducers T1 to T4 and two transducers S1 and S2 transmitting signals representing artificial AE sources.

Měníčem S1 byly v desce generovány vlny ze dvou typů budících signálů:

a) Krátké sinusové pulzy, tvarem a délkou odpovídající signálu rekonstruovaného Pen-testu na dále zmíněné trubce (dále jen Pen-test). TR rekonstrukce zaznamenaného signálu Pen-testu na trubce a jeho simulovaná zdrojová funkce jsou zobrazeny v obr. 3.

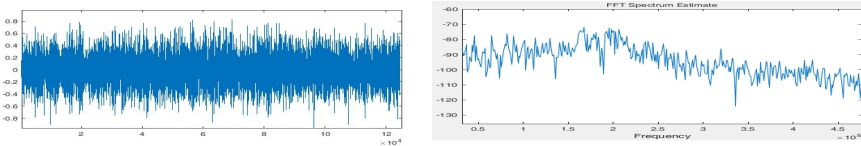
b) Spojité signály $n(t)$ typu náhodného šumu o délce 13 ms, ovzorkované při úniku vzduchu o tlaku 6 bar z otvoru 0,8 mm na zkušební trubce o průměru 160 mm a tloušťce stěny 4,5 mm. Tyto signály, vysílané pomocí generátoru libovolných signálů (AWG), který je součástí kombinovaného USB osciloskopu Tie-Pie typ HS5, jsou dále označovány jako „únikový šum“ a jeho průběh spolu s frekvenčním spektrem jsou vyneseny v obr. 4.

Měníč S2 sloužil k vysílání signálu simulovaného úniku z druhého AWG (druhý USB osciloskop HS5) současně se signálem typu a) generovaným měničem S1. Cílem současného použití dvou typů simulovaných zdrojů AE bylo ověřit možnost detekce a lokalizace pulzního zdroje typu „trhlina“ (Pen-test), jehož signál je utopen v okolním náhodném šumu typu „únik“ či „proudění plynu“ (signál simulovaného úniku) v testované konstrukci. Tato úloha bývá mimořádně obtížná a např. autoři [13] se pokoušeli ji vyřešit pomocí metody tzv. „separace zdrojů naslepo“ (Blind source separation).



Obr. 3: Zaznamenaný signál Pen-testu po TR rekonstrukci (vlevo), TR rekonstrukce simulovaného signálu Pen-testu (uprostřed) a zdrojová funkce simulovaného Pen-testu (vpravo).

Fig. 3: Recorded real Pen-test signal after TR reconstruction (left), TR reconstruction of simulated Pen-test (middle), and source function of simulated Pen-test (right).



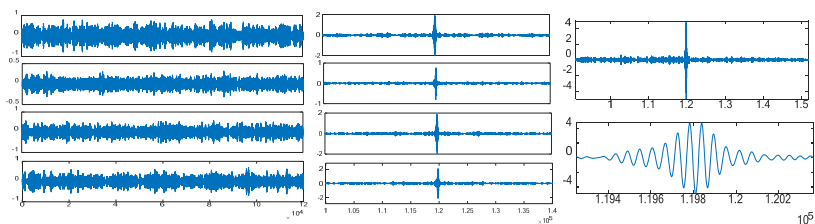
Obr. 4: Signál simulovaného úniku (vlevo) a jeho frekvenční spektrum (vpravo).

Fig. 4: Signal of simulated leakage noise (left) and its frequency spectrum (right).

4. Výsledky lokalizačních experimentů a jejich diskuse

Lokalizace kvazibodového zdroje pulzního signálu pomocí TR dává vždy výborné výsledky s přesností lepší než vlnová délka či apertura snímače a to nezávisle na geometrii tělesa, disperzi apod. [17]. Testy lokalizace pulzního zdroje (simulovaný Pen-test v místě S1), jehož signál je u všech čtyř snímačů T1-T4 hluboko pod úrovní únikového šumu ze zdroje v místě S2, prokázaly uvedené závěry až do poměru signál/šum (S/N) -40 dB. Výsledky rekonstrukce pulzního signálu v místě zdroje S1 pro odstup od okolního šumu S/N = -14 jsou ilustrovány v obr. 5. V obrázku jsou vedle smíšených signálů (pulz + šum), detekovaných snímači T1–T4, zobrazeny synchronizované TR rekonstrukce pulzu v místě zdroje od jednotlivých snímačů a také jejich součet, který rekonstrukci a tedy i schopnost lokalizace dále zlepší. Zobrazen je také detail rekonstruovaného zdrojového signálu. Z rekonstrukce vyplývá, že pomocí TR procedury došlo ke zlepšení odstupů pulzního signálu od šumu v každém kanálu z S/N = -14 dB na +17 dB, což představuje celkové zlepšení o +31 dB. Při použití součtu TR signálů od všech čtyř snímačů je zlepšení ještě o +3 dB lepší. Z obr. 5 je také patrné, že k plošné lokalizaci pulzního zdroje stačí v tomto případě pouze jediný snímač. Nevýhodou tohoto způsobu detekce a lokalizace zdroje je ovšem nezbytnost skenovat snímačem celou plochu s krokem okolo 25 mm při vysílání časově převrácených signálů z původních snímačů, neboť k rekonstrukci dochází jen v malém okolí původního zdroje. Toto skenování lze uskutečnit např. laserovým interferometrem se skenovací hlavicí, ale omezující je požadavek relativně plochého povrchu. Jinou variantou je využití reciproké TR, kde plocha je skenována budícím bezdotykovým měničem, a rekonstruované signály jsou

sledovány původními snímači. Zcela novým přístupem, který v současné době rozpracováváme, je „skenování“ na počítačovém modelu konstrukce, buzeném TR signály z reálného měření.

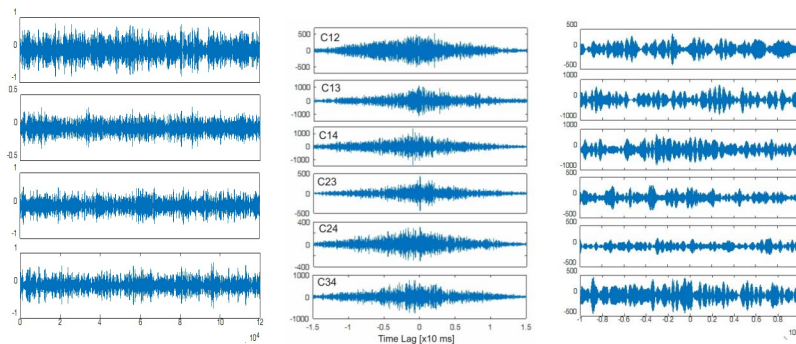


Obr. 5: a) TR smíšených signálů pulzu a šumu při $S/N = -14$ dB: Vlevo jsou přímé signály zaznamenané snímači T1-T4, uprostřed jsou jejich TR rekonstrukce v místě zdroje pulzu S1 a vpravo je součtový TR signál ze všech snímačů s detailem rekonstrukce ve středové části.

Fig. 5: TR of mixed signals under $S/N = -14$ dB condition. Direct signals recorded by T1-T4 are plotted left, their TR reconstructions are in the middle, and sum of reconstructions from all channels with zoomed central part is right.

Jak bylo zmíněno výše, TR rekonstrukce náhodných signálů ze zdroje únikového šumu jsou opět náhodné signály, u nichž nelze v místě zdroje rozeznat rekonstruovanou část a odlišit ji tak od přímých či nerekonstruovaných signálů únikového šumu, a tedy ani lokalizovat jejich zdroj. V tomto případě lze u jednodušších konstrukcí pouze odhadnout polohu zdroje na základě útlumu energie či změny frekvenční charakteristiky se vzdáleností od zdroje. Zapotřebí jsou k tomu minimálně 3 snímače rozmístěné okolo možného zdroje. Další možností je použít vzájemné korelace (VKF) mezi signály z více snímačů k určení časových posunů maxim VKF mezi snímači. Tato možnost se však ukazuje jako diskutabilní, neboť drobné fluktuační únikového šumu mohou mít za následek více maxim VKF, což může vést k falešným lokalizacím. To pro náš případ dokumentuje obr. 6, kde jsou vzájemně korelovány přímé signály ze všech čtyř snímačů, tj. 6 dvojic vzájemných korelací (C12, C13, C14, C23, C24 a C34).

Na základě TR se však nabízí jiná možnost, kterou jsme využili v našich experimentech, a sice vzájemně korelovat alespoň dva TR signály pro určení polohy zdroje. V místě zdroje bude VKF maximální a časový posun („lag“) maxima díky TR synchronizaci prakticky nulový či v důsledku změn signálu při šíření vlny na větší vzdálenost alespoň minimální ze všech možných při obdobném skenování povrchu jako v předchozím případě. O vlastnostech TR procedury pro případ delších signálů náhodného šumu jsme v literatuře dosud nenalezli žádné odkazy.



Obr. 6: Vlevo jsou přímé signály únikového šumu ze zdroje v místě S1 detekované snímači T1-T4 a uprostřed je 6 kombinací jejich vzájemných korelací C12 až C34. Vpravo jsou zvětšené středy okolo maxim VKF, na nichž není patrné žádné absolutní maximum, z něhož by bylo možné určit vzájemné časové posuvy mezi signály.

Fig. 6: Direct signals from noise source at S1 detected by four transducers T1-T4 (left), six cross-correlations between all two-signal combinations C12, C13...C34 (middle), and their zoomed centres around zero lag (right) exhibiting no absolute maximum to determine time shifts between the signals.

Vzájemná korelační funkce $w(t)$ mezi dvěma signály $u(t)$ a $v(t)$ je obecně definována vztahem:

$$w(t) = u(t) \star v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u^*(\tau)v(\tau + t)d\tau, \quad (3)$$

kde u^* znamená komplexně sdružený signál. Pro diskrétní signály $u(n)$ a $v(n)$ lze VKF obecně vyjádřit sumou, kde sčítací index m uvažujeme jen přes délku předpokládané korelace:

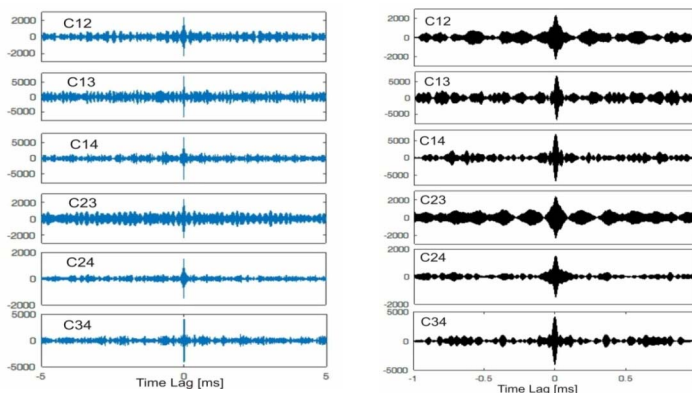
$$w(n) = u(n) \star v(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} u^*(m)v(n + m). \quad (4)$$

VKF na rozdíl od konvoluce není komutativní a asociativní, ale můžeme ji výhodně počítat pomocí konvoluce (např. násobením FFT spekter) s využitím vztahu:

$$u(t) \star v(t) = u^*(-t) * v(t). \quad (5)$$

kde $u^*(-t)$ je komplexně sdružený, časově převrácený signál a znaménko $*$ mezi oběma signály značí konvoluci. Maximum VKF (nebo lépe koeficient korelace) vyjadřuje míru podobnosti mezi oběma signály a indikuje jejich vzájemné časové zpoždění (Lag). Pro dva identické signály je Lag = 0.

Skutečnost, že TR náhodných únikových signálů z různých snímačů, ani jejich součty nevykazují maximum v místě zdroje, jako tomu bylo u signálů z pulzního zdroje, jsme ověřovali v 25 bodech okolo zdroje S1, vyznačených na desce v obr. 2. Maxima TR rekonstrukcí byla v okolních bodech srovnatelná, nebo i větší než maximum ve zdroji. Proto jsme pro lokalizaci zdroje únikového signálu zvolili VKF jako míru podobnosti alespoň dvou TR rekonstrukcí. Získané výsledky dobře ilustruje obr. 7, kde jsou vyneseny všechny kombinace VKF rekonstrukcí signálů v místě zdroje ze čtyř snímačů.



Obr. 7: Vzájemné korelační funkce C12 až C34 mezi všemi páry TR rekonstrukcí signálů v místě zdroje. Vpravo jsou zvětšená maxima ve středu VKF, na nichž jsou patrné prakticky nulové časové posuvy mezi různými rekonstrukcemi.

Fig. 7: Cross-correlations (CCF) of all TR signal pairs (C12..C34) detected at the source point. At right are zoomed CCF details around zero lags.

Z obr. 7 je zřejmá přesná synchronizace maxim vzájemné korelace TR rekonstrukcí signálu v místě zdroje s prakticky nulovými časovými zpožděními ($Lag \cong 0$). Přesnou polohu zdroje lze tedy určit na základě absolutního maxima VKF mezi dvěma TR rekonstrukcemi signálů ze dvou libovolně zvolených snímačů a z jejich minimálního časového posuvu. Opět je tedy zapotřebí podrobnější skenování povrchu okolo předem odhadnuté polohy zdroje metodami zmíněnými v předchozím odstavci. K hrubému odhadu a tedy zmenšení skenované plochy lze použít např. kritérium maximální energie únikového signálu, vycházející ze závislosti střední amplitudy resp. RMS signálu na vzdálenosti od zdroje, která je ve většině případů blízká exponenciální. Výsledky skenování na ploše ocelové desky 100x100 mm v okolí zdroje (25 bodů v síti vyznačené na obr. 2) ukazují tabulky Tab. 1 resp. Tab. 2, v nichž jsou maxima resp. zpoždění VKF časově reverzních signálů ze dvou snímačů (T1 a T4 resp. T3 a T4).

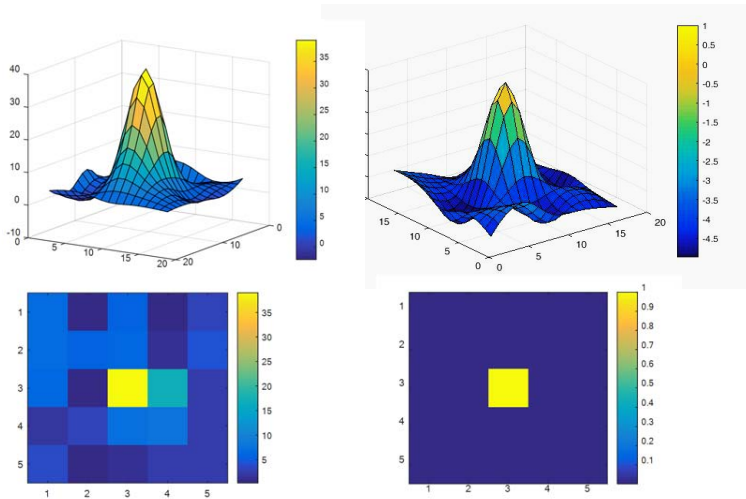
Tab. 1: Maxima VKF C14 mezi TR signály ze snímačů T1 a T4 ve 25 bodech sítě z obr. 2.

C14	1	2	3	4	5
1	564	2196	2059	1934	2063
2	1837	2079	2050	1886	1767
3	1871	3354	6935	2800	3233
4	2360	2776	2006	2817	2605
5	1557	2031	1880	2627	2411

Tab. 2: Časová zpoždění L34 [$\times 0,1 \mu\text{s}$] mezi TR signály ze snímačů T3 a T4 ve 25 bodech sítě z obr. 2

L34	1	2	3	4	5
1	18495	1246	12549	-18153	36233
2	-5367	7039	13753	6192	-25971
3	12603	27792	0	-23002	13907
4	-3058	17470	1063	12419	22331
5	-2349	8859	31094	-6203	29195

Z Tab. 1 je vidět, že maximální VKF C14 TR signálů mezi snímači T1 a T4 je uprostřed v místě zdroje (bod 3-3) a v okolních bodech jsou hodnoty mnohem nižší. Podobně v Tab. 2 je minimální (nulový) časový posun (Lag, v jednotkách $0,1 \mu\text{s}$) mezi TR signály ze snímačů T3 a T4 opět ve středu tabulky, tedy přesně v místě zdroje. Údaje z obou tabulek lépe vyniknou na grafickém znázornění dat v 3D grafech resp. jejich rovinných projekcích na obr. 8. V levé části jsou ve 3D resp. plošné projekci mapovány hodnoty koeficientů vzájemné korelace C14 mezi TR signály ze snímačů T1 a T4 vynesené v procentech (maximální shoda TR signálů je 100%). V pravé části jsou podobně mapovány záporné logaritmy převrácených absolutních hodnot zpoždění mezi TR signály ze snímačů T3 a T4, tj. $-\log(1/\text{abs } L34)$ normované na maximum rovné 1 (pro výpočet logaritmu byla nahrazena nulová hodnota zpoždění v místě zdroje jedničkou). 3D grafy jsou proloženy kubickou interpolací 2. Řádu. U všech 6 kombinací VKF byla nalezena ostrá maxima v místě zdroje, kde střední hodnota všech koeficientů korelace byla cca 30%, což pro lokalizaci představuje odlišení polohy zdroje o +20 dB oproti ostatním bodům v okolí. Logaritmus převrácené absolutní hodnoty zpoždění v místě zdroje převyšuje hodnoty v okolí o +28 dB. Maximální hodnota zpoždění v místě zdroje byla u L13 = $3\mu\text{s}$.



Obr. 8: Grafické znázornění přepočtených dat z tabulek Tab. 1 (vlevo) a 2 (vpravo).

Fig. 8: Graphical interpretation of cross-calculated data from Tab. 1 (left) and 2 (right).

5. Závěry

Procedura lokalizace pulzních i spojitých zdrojů akustické emise (AE), využívající časovou reverzaci signálů (TR), byla testována pomocí simulovaných emisních zdrojů na rozměrné ocelové desce se čtyřmi připevněnými piezoelektrickými snímači a dvěma budiči stejného typu. Ve srovnání s jinými technikami lokalizace emisních zdrojů může tato procedura dávat mnohem přesnější výsledky i na velmi komplikovaných konstrukcích s proměnlivou rychlostí šíření elastických vln a disperzním chováním a také za podmínek okolního šumu, převyšujícího detekovaný emisní signál. Přesnost lokalizace kvazibodových zdrojů je okolo 1 mm, což je méně než vlnová délka či apertura použitých snímačů.

Jako zdroj pulzních signálů byl použit piezoelektrický měnič vysílající krátký sinusový signál, tvarovaný obdobně jako zdroj Pen-testu. Přitom byl druhým měničem generován na jiném místě desky signál šumu, zaregistrovaného při úniku tlakového vzduchu otvorem v kalibrační trubce. Amplituda šumového signálu byla volena tak, aby převyšovala amplitudu pulzního signálu až o +40 dB. Přesto se pomocí TR podařilo signál náhodného šumu výrazně potlačit a jediným snímačem na desce úspěšně lokalizovat pulzní zdroj.

V dalších experimentech byl jako umělý zdroj spojitě AE použit delší náhodný signál získaný při úniku tlakového vzduchu z trubky, generovaný piezo-měničem na desce. K lokalizaci tohoto „úniku“ byla opět použita TR procedura se dvěma snímanými

signály AE. Zdroj „úniku“ byl přesně lokalizován na základě vzájemné korelace mezi TR rekonstrukcemi obou snímaných signálů. Jako měřítko podobnosti signálů bylo použito maximum vzájemné korelační funkce (resp. korelační koeficient) a minimum časového zpoždění mezi dvěma TR rekonstrukcemi zaznamenaných signálů.

Nevýhodou TR lokalizační procedury je nutnost opětovně zaznamenávat (skenovat) vzájemné korelace mezi zpětně vysílanými TR signály v okolí předpokládaného zdroje, nebo naopak použít vysílací měnič k buzení TR signálů v okolí zdroje a sledovat vzájemné korelace signálů detekovaných původními snímači (tzv. reciproká TR). V současné době zkoumáme možnost nahradit skenování na reálném tělese počítačovými simulacemi na modelu tělesa buzeného reálně snímanými TR signály (přenos signálů z tělesa na model) [19]. Podmínky tohoto přenosu signálů byly již dříve diskutovány v pracích [20, 21]. K simulacím jsou zapotřebí poměrně výkonné počítače, ale ty je možné nahradit např. paralelními výpočty na grafických kartách.

Poděkování

Tento výzkum je součástí projektu č. 17-22615S podporovaného Grantovou Agenturou České Republiky.

6. Odkazy na literaturu

- [1] Grosse Ch. U., Ohtsu M. (eds): Acoustic Emission Testing. Basic for Research - Application in Civil Engineering, Springer-verlag, 2008.
- [2] Chlada M., Prevorovsky Z.: Expert AE Signal Arrival Detection. Int. J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 6 (3/4), 2011, 191-205; ISSN 0226- 1900.
- [3] Kundu T.: Acoustic source localization. Ultrasonics, Vol. 54, 2014, 25–38.
- [4] Blahacek M., Chlada M., Prevorovsky Z.: Acoustic Emission Source Location Based on Signal Features. Advanced Materials Research, Vol. 13-14, 2006, 77-82. www.scientific.net/AMR.13-14.77
- [5] Chlada M., Prevorovsky Z., Blahacek M.: Neural network AE source location apart from structure size and material. J. of Acoustic Emission, Vol. 28(1), 2010, 99-108.
- [6] Miller R. K., ed.: NDT Handbook Vol. 5: Acoustic Emission. ASNT 1987.
- [7] Ono K., Cho H., Takuma M.: The origin of continuous emissions. J. Acoustic Emission, Vol.23, 2005, 206-214.
- [8] ASTM E1211 / E1211M - 12: Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
- [9] ISO 18081 International Standard: Non-destructive testing - Acoustic emission testing (AT) - Leak detection by means of acoustic emission. First Edition 2016.

- [10] US patents No.: 4428236-1989; 4609994; 4858462; 8638226-2014.
- [11] Rastegaev I. A., Danyuk A. V., Vinogradov A. Yu., Merson D. L., Chugunov A. V: Location of Noise-Like Sources of Acoustic Emissions Using the Spectral Similarity Method. Russian J. of Nondestructive Testing, Vol. 49 (10), 2013, 553–561.
- [12] Kosel T., Grabec I.: Intelligent location of two simultaneously active acoustic emission sources. Part I and II. arXiv: 07040050v1, April 2007.
- [13] Kosel T., Grabec I., Mužič P.: Location of acoustic emission sources generated by air flow. Ultrasonics 38, 2000, 824-526.
- [14] Chlada M. Převorovský Z.: Způsob lokalizace zdrojů spojitě akustické emise v materiálových objektech. ÚPV ČR Patent č. 305461 B6, 26.8. 2015.
- [15] Murvay P. S., Silea I.: A survey on gas leak detection and localization techniques, J. Loss Prevention Process Ind., Vol. 25, 2012, 966–973.
- [16] Prevorovsky Z., Krofta J., Chlada M., Farova Z., Kus V.: Progressive Approaches to Localization and Identification of AE Sources. 30th European Conf. on AE Testing & 7th Internat. Conf. on AE, Granada, Spain, 2012, CD Proc., www.ndt.net/EWGAE-ICAE2012.
- [17] Prevorovsky Z., Krofta J., Chlada M., Kober J., Dos Santos S.: Time Reversal Signal Processing in Acoustic Emission. 11th European Conf. on Nondestructive Testing, Prague, 2014, ID=637, 33 pp., www.ndt.net/ECNDT_2014.
- [18] Fink M., Cassereau D., Derode A., et al. Time-reversed acoustics. Reports on Progress in Physycs, Vol. 63(12): 2000, 1933–1995; doi:10.1088/0034-4885/63/12/202.
- [19] Kober J., Dvorakova Z., Prevorovsky Z., Krofta J.: Time reversal transfer: Exploring the robustness of time reversed acoustics in media with geometry perturbations. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138 (1), 2015, EL 49- 53; Doi: 10.1121/1.4922623.
- [21] Prevorovsky Z., Kober J.: Some factors affecting time reversal signal reconstruction. Physics Procedia, Vol. 2015, 00776-2, S1875-3892 (15).doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.035.



HODNOCENÍ ZÁVAŽNOSTI DEFEKTŮ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ A TLAKOVÝCH NÁDOB

Václav SVOBODA¹, Lubomír GAJDOŠ², František ŽEMLIČKA¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

²ÚTAM AV ČR, v.v.i, Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9, Czech Republic
gajdos@itam.cas.cz

Abstrakt:

Příspěvek se zabývá hodnocením defektů (typu trhliny) zjištěných při nedestruktivních kontrolách tlakových nádob a potrubních systémů. Je diskutována skutečnost aplikovatelnosti kritéria LBB (Leak Before Break) ve vztahu k provozním podmínkám sledovaných systémů. Dále jsou navrženy obecné postupy pro stanovení rychlosti šíření existujících defektů s využitím lomově-mechanické analýzy. Jsou navržena schemata aplikace metody akustické emise jako monitorovacího diagnostického prostředku pro zajištění bezpečného provozu nádob a potrubí.

Klíčová slova: NDT testování, Rozvoj defektů

Abstract:

This article deals with defects (such as cracks) detected during Non-Destructive inspection of pressure vessels and piping systems. It discusses the fact of applicability of the criteria LBB (Leak Before Break) in relation to operating conditions of monitored systems. Furthermore, it includes general procedures for determining the speed of propagation of existing defects using the fracture-mechanical analysis. It proposes the use of acoustic emission method as a diagnostic tool for monitoring and the safe operation of vessels and pipelines.



HAZARD PICTOGRAMMS INTERPRETATION IN PENETRANT AND MAGNETIC PARTICLES INSPECTION. HOW TO DECREASE CHEMICAL IMPACT OF DETECTION MEDIA?

Yuriy YAREMENKO

MR CHEMIE GmbH, Germany
yaremenko@mr-chemie.de

Abstract

We, MR Chemie GmbH, continuously use benefits of own R&D Laboratory by customizing our existent solutions or developing new products according to customer needs. Following our philosophy to provide personnel and environment friendly test media, as core requirement for each new development, we engineer our new solutions taking into account different process conditions and safety regulations.

In this presentation, we would like to spotlight hazard pictograms, which typically label MPI and PT product. We help to interpret you meaning of hazard pictograms and give them gravity in sense of health risks levels.

Key words: *magnetic-particles inspection, personnel safety in scope of MPI and PT, hazard pictograms and their identification.*

Název **Defektoskopie 2017 / NDE for Safety 2017**
sborník příspěvků
Editor Luboš Pazdera, Pavel Mazal
Vydal Vysoké učení technické v Brně
ve spolupráci s Českou společností pro NDT, z.s.
Tisk Betis s.r.o. Praha
Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice
Vyšlo listopad 2017
Vydání první
Náklad 200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-5554-2



Česká společnost pro nedestruktivní testování
pořádá nejvýznamnější událost roku 2018 z oblasti
nedestruktivního zkoušení v České republice.



48. mezinárodní konferenci a výstavu NDT techniky

DEFEKTOSKOPIE 2018

NDE FOR SAFETY 2018

6. – 8. 11. 2018, Konferenční centrum City, Praha

Mezinárodní konference a výstava Defektoskopie 2018 / NDE for Safety 2018 bude zaměřena zejména na problematiku nedestruktivního zkoušení materiálů a konstrukcí ve všech oborech technické činnosti. Konference bude příležitostí k setkání všech, kteří se zajímají o výzkum, vývoj, praktické aplikace i vzdělávání a normalizaci v tomto oboru. Součástí konference bude veřejně přístupná výstava NDT techniky,

Základní termíny konference Defektoskopie 2018 / NDE for Safety 2018

- Zaslání abstraktů příspěvků 31. červenec 2018
- Platba sníženého vložného 15. září 2018
- Odeslání textů příspěvků 30. září 2018

Organizátoři hledají zájemce
o sponzorování konference.

Aktuální informace a přihlášky: www.cndt.cz



Czech Society for Non-destructive Testing
invites all NDT specialists to

48th International Conference and Exhibition of NDT technique

DEFEKTOSKOPIE 2018

NDE FOR SAFETY 2018

City Conference Center, Prague, Czech Republic, November 6 – 8, 2018

This event will be organized by Czech Society for NDT as an international annual meeting and exhibition. The conference is aimed at all topics of non-destructive testing and evaluation of materials and structures in all areas of technical activities. It is an opportunity to meet together all people interested in research, development, as well as in practice, standardization and application of NDT/NDE methods. Manufacturers and suppliers of NDT instruments and services are invited to present their products and innovations.



Preliminary Conference Time Schedule

- Deadline for abstracts submission July 31, 2018
- Limit date for payment of reduced fees September 15, 2018
- Deadline for papers delivery September 30, 2018

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

More info and registration: www.cndt.cz

ISBN 978-80-214-5554-2