

Česká společnost pro nedestruktivní testování
Czech Society for Nondestructive Testing



DEFEKTOSKOPIE 2016

NDE for Safety

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

46. mezinárodní konference
46th International Conference



8.–10. listopad 2016
November 8–10, 2016

Spa Luhacovice, Czech Republic



Česká společnost pro nedestruktivní testování, z.s.

pořádá pro všechny defektoskopické odborníky i zájemce
o tento obor nejvýznamnější událost roku 2017 z oblasti
nedestruktivního zkoušení v České republice.



47. mezinárodní konferenci a výstavu NDT techniky

DEFEKTOSKOPIE 2017

NDE FOR SAFETY 2017

kongresové centrum kino Svět, Chomutov 7.–9. 11. 2017

Mezinárodní konference a výstava Defektoskopie 2017 / NDE for Safety 2017 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.

Výstava bude zaměřena na prezentaci nejmodernějšího vybavení a služeb v oblasti nedestruktivního zkoušení materiálů a konstrukcí. Jednacími jazyky konference budou čeština, slovenština a angličtina.

Základní tematické okruhy konference

- Ultrazvukové metody
- Magnetické a indukční metody
- Prozařovací metody
- Akustická emise
- Povrchové a optické metody
- Infračervená termografie
- Tomografie
- Využití NDT metod ve zkušebnictví
- Detekce korozních procesů metodami NDT
- Detekce netěsnosti
- Předprovozní a provozní zkoušky, testy spolehlivosti a bezpečnost konstrukcí
- Inovace průmyslových aplikací NDT
- Netradiční aplikace metod NDT a NDE
- Aplikace NDE / NDT v oblastech: energetika, doprava, strojírenství, stavebnictví, chemický průmysl, atd.
- Vzdělávání, standardizace, certifikace a akreditace v oboru NDT



Místo konání

Město Chomutov leží na úpatí Krušných hor v severozápadních Čechách. Vzniklo na křižovatce starých obchodních cest spojujících Prahu s Lipskem a Cheb s Ústím nad Labem. Konference se bude konat v prostorách nového kulturně-spoločenského a sportovního areálu Kina Svět na Zadních Vinohradech vzdáleného jen několik kroků Kamencového jezera. Nachází se v něm mimo dvou kinosálů i jednací sál a výstavní prostory. Dále se v prostorách kina nachází příjemná kavárna.

Organizátoři hledají zájemce o sponzorování konference.

Kontaktní adresa:

Doc. Pavel Mazal
ČNDT, z.s.
Technická 2, 616 00 Brno

E-mail: cndt@cndt.cz
Telefon: (+420) 541 143 229
Více informací: www.cndt.cz

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



DEFEKTOSKOPIE 2016

NDE for SAFETY 2016

46th International Conference and NDT Exhibition
46. mezinárodní konference a výstava NDT techniky

PROCEEDINGS

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

November 8 to 10, 2016
8. až 10. listopad 2016

Luhačovice, Czech Republic

Edited by Luboš Pazdera and Pavel Mazal

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
- Doc. Marta Kořenská - VUT v Brně
- Ing. Monika Manychová – VUT v Brně
- Ing. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha
- Mgr. Ivo Kusák, – VUT v Brně
- Mgr. Libor Topolář – VUT v Brně

Editors: Luboš Pazdera and Pavel Mazal

Copyright © 2016
Czech Society for Nondestructive Testing
All rights reserved

Published by:

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

for

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

ISBN 978-80-214-5422-4

OBSAH / CONTENTS

Sławomir CZARNECKI, Jerzy HOŁA, Łukasz SADOWSKI, Gabriela SKOREŃSKA	1
AN ATTEMPT TO USE A 3D LASER SCANNER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF THE MORPHOLOGY OF SURFACES OF SUBSTRATES UNDER PLASTER	
Daniel DOHNALÍK, Radim KOCICH, Jan CRHA	9
PROBLEMATIKA DETEKCE SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE V PRŮBĚHU PLASTICKÉ DEFORMACE	
THE PROBLEMATICS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DETECTION DURING PLASTIC DEFORMATION	
Karel HÁJEK	17
SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE	
SPECTRAL ANALYSIS OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL	
Miroslav JÁNA, Houssam MAHMOUD, Pavel MAZAL, František VLAŠIC	27
STANOVENÍ KOEFICIENTU ODHALENÍ POŠKOZENÍ V PNEUMATICKÝCH VÁLCÍCH METODOU AKUSTICKÉ EMISE	
IDENTIFICATION OF DETECTION VALUES IN PNEUMATIC CYLINDERS BY ACOUSTIC EMISSION	
Štěpán JÍRA, Jaroslav FIALA	37
HYSTERESNÍ SMYČKA FEROMAGNETIK	
HYSTERESIS LOOP OF FERROMAGNETICS	
Bohuslav KOLÁŘ	53
KVALIFIKACE A CERTIFIKACE PERSONÁLU V DIGITÁLNÍ PRŮMYSLOVÉ RADIOGRAFII	
QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF THE PERSONAL IN DIGITAL INDUSTRIAL RADIOGRAPHY	
Bernard KOPEC	61
LORD RAYLEIGH – OTEC ULTRAZVUKOVÉ DEFEKTOSKOPIE	
LORD RAYLEIGH – FATHER ULTRASONIC TESTING	

Vendula KRATOCHVÍLOVÁ, František VLAŠIC, Pavel MAZAL	69
ÚNAVOVÉ PROCESY V SELECTIVE LASER MELTING A KONVENČNĚ VYRÁBĚNÝCH MATERIÁLECH FATIGUE PROCESSES OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL PRODUCED MATERIALS	
Tomáš MACÁN	79
NOVÉ MOŽNOSTI PHASED ARRAY ZOBRAZENÍ NEW POSSIBILITIES OF PHASED ARRAY IMAGING	
Bruno SILVA MARCIÓ, Mateus SANT'ANA, Rodolfo CÉSAR COSTA FLESCH	83
SIGNAL CONDITIONING FOR AN ULTRASOUND-BASED INSPECTION SYSTEM USING A CUSTOM-DEVELOPED CHARGE AMPLIFIER	
Pavel MAZAL, Luboš PAZDERA	95
AKTUÁLNÍ ROZVOJ A MOŽNOSTI APLIKACÍ METODY AE (VÝSLEDKY KONFERENCE EWGAE 2016 V PRAZE) CURRENT DEVELOPMENT AND APPLICATION OPTIONS OF AE METHOD (RESULTS OF CONFERENCE EWGAE 2016 IN PRAGUE)	
Libor NOHAL, Miroslav VACULKA	101
METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ VE VÝROBĚ A PROVOZU VALIVÝCH LOŽISEK NON-DESTRUCTIVE METHODS IN PRODUCTION AND OPERATION OF ROLLING BEARINGS	
Michal PODSTAWKA	105
POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY A SROVNÁNÍ JEJICH TECHNIK NA KOMPOZITNÍCH DÍLECH VRTULNÍKŮ UTILIZATION OF ULTRASONIC TESTING AND COMPARISON OF ITS TECHNIQUES ON COMPOSITE PARTS OF HELICOPTERS	
Břetislav SKRBEK	117
MĚŘENÍ TLOUŠTKY METODOU MAGNETICKÉ STOPY NA TENKÝCH STĚNÁCH OCELÍ A LITIN MEASURING THICKNESS METHOD OF MAGNETIC SPOT ON THE THIN SIDE THE STEEL AND THE CAST IRON	
Tomáš ZAVADIL	129
MEZILABORATORNÍ ZKOUŠENÍ ZPŮSOBILOSTI JAKO SOUČÁST KONTINUÁLNÍHO ZLEPŠOVÁNÍ DLE ISO 9001 INTERLABORATORY PROFICIENCY TESTING AS A PART OF CONTINUOUS IMPROVEMENT IN ACCORDANCE WITH ISO 9001	

Tomáš ZAVADIL	137
KVALITA V OBLASTI KVALIFIKACE A CERTIFIKACE NDT PERSONÁLU QUALITY IN QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF NDT PERSONNEL	
Petr ŽBÁNEK	145
SROVNÁNÍ NOREM EN ISO 11666 A ISO/DIS 19285	

ABSTRAKTY / ABSTRACT

Ondřej DOUBEK	155
ZEFEKTIVNĚNÍ ZKOUŠENÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH SVORNÍKŮ METODOU MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU V SOULADU S POŽADAVKY TPG A EN IS 9934-1 2015 EFFECTIVIZATION OF TESTING OF HIGH-STRENGTH BOLTS BY MAGNETIC PARTICLE TESTING IN ACCORDANCE WITH REQUIREMENTS OF TPG AND EN IS 9934-1 2015	
Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, Michal KOLEGA, Štěpán JÍRA, Petr LIŠKUTÍN	156
„STRUKTURNÍ MECHANISMUS ÚNAVY – STATISTICKÁ STUDIE“ „STRUCTURAL MECHANISM OF FATIGUE – A STATISTICAL STUDY“	
Bohuslav KOLÁŘ	157
DIGITÁLNÍ PRŮMYSLVÁ RADIOGRAFIE - UVEDENÍ TECHNIKY DO PROCESU KONTROL DIGITAL INDUSTRIAL RADIOGRAPHY - APPLICATION OF THE TECHNIQUE TO THE TESTING PROCESS	
Alexandr POPOV	158
ZÁSADNÍ CHYBY PŘI ZKOUŠENÍ POLOTOVARŮ A SVARŮ POMOCÍ DIGITÁLNÍCH ULTRAZVUKOVÝCH DEFEKTOSKOPŮ S POUŽITÍM AVG/DGS DIAGRAMŮ CRITICAL ERRORS IN TESTING OF SEMI-FINISHED PRODUCTS AND WELDS USING DIGITAL ULTRASONIC INSTRUMENTS BY USING AVG/DGS DIAGRAMS	
Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Daniel TOKAR, Jan KOBER, Josef KROFTA	159
ANIZOTROPIE PARAMETRŮ NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE V KOMPOZITECH ANISOTROPY OF NONLINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY PARAMETERS IN COMPOSITES	

Miroslav ROXER	160
MAGNETIZACE KONCŮ TRUBEK MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU METODOU MAGNETIZATION OF TUBE ENDS BY MEANS OF MAGNETIC PARTICLE METHOD	
Václav SVOBODA, František ŽEMLIČKA	161
HODNOCENÍ ZÁVAŽNOSTI DEFEKTŮ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ A TLAKOVÝCH NÁDOB EVALUATION OF RELEVANCE OF DEFECTS OF PIPELINES SYSTEMS AND PRESSURE	
Václav SVOBODA	162
ROLE AKUSTICKÉ EMISE VE SKUPINĚ NDT METOD A PRAKTICKÉ PŘÍKLADY JEJÍHO VYUŽITÍ V PRAXI THE ROLE OF ACOUSTIC EMISSION IN THE GROUP OF NDT METHODS AND SOME PRACTICAL EXAMPLES OF APPLICATION	
Michal ŠOFER, Josef NEUGEBAUER	163
VLIV TVARU GEOMETRIE DISKONTINUITY NA ODRAŽENOU RAYLEIGHOVU VLNU EFFECT OF THE SHAPE OF GEOMETRIC DISCONTINUITY ON NATURE OF RAYLEIGH WAVE BACK REFLECTION	
Yuriy YAREMENKO	164
MORE EFFECTIVE AND SAFER DETECTION MEDIA APPLICATION IN MAGNETIC PARTICLES INSPECTION	
Tomáš ZAVADIL	165
MOŽNOSTI DETEKCE TEČENÍ POMOCÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD OPTIONS OF DETECTION OF CREEP BY NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS	

INDEX AUTORŮ / AUTHORS INDEX

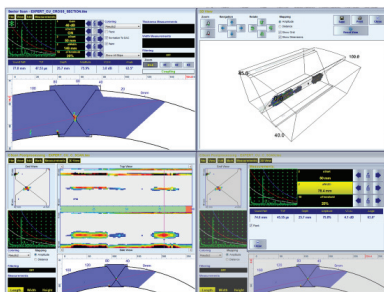
CRHA Jan	9	MAZAL Pavel	27, 69, 95, 156
CZARNECKI Sławomir	1	NEUGEBAUER Josef	163
DOHNALÍK Daniel	9	NOHÁL Libor	101
DOUBEK Ondřej	155	PAZDERA Luboš	95
FIALA Jaroslav	37, 156	PODSTAWKA Michal	105
FLESCH C. C. Rodolfo	83	POPOV Alexandr	158
HÁJEK Karel	17	PŘEVOROVSKÝ Zdeněk	159
HOŁA Jerzy	1	ROXER Miroslav	160
JÁNA Miroslav	27	SADOWSKI Łukasz	1
JÍRA Štěpán	37, 156	SANT'ANA Mateus	83
KOBER Jan	159	SKOREŇSKA Gabriela	1
KOCICH Radim	9	SKRBEK Břetislav	117
KOLÁŘ Bohuslav	53, 157	SVOBODA Václav.	161, 162
KOLEGA Michal	156	ŠOFER Michal	163
KOPEC Bernard	61	TOKAR Daniel	159
KRATOCHVÍLOVÁ Vendula	69	VACULKA Miroslav	101
KROFTA Josef	159	VLAŠIC František	27, 69
LIŠKUTÍN Petr	156	YAREMENKO Yuriy	164
MACÁN Tomáš	79	ZAVADIL Tomáš	129, 137, 165
MAHMOUD Houssam	27	ŽBÁNEK Petr	145
MARCIÓ S. Bruno	83	ŽEMLIČKA František	161

Ultrazuková technika

Ultrazukové přístroje
Ultrazukové sondy
Ultrazukové příslušenství
Ultrazukové kurzy
Kalibrace a servis

Typy ultrazukových přístrojů: ♦ phased array přístroje
♦ UT přístroje s TOFD
♦ konvenční UT přístroje

U každého typu nabízíme škálu přístrojů od jednoduchých až po špičkové.



- ♦ Nejmodernější phased array přístroje na trhu
 - ♦ Unikátní „True to Geometry Imaging“
 - ♦ 3D zobrazení vad
- ♦ Software pro vyhodnocení vad po ukončení kontroly



Ultrazukové kurzy:

UT1 – základní ultrazukový kurz pro začínající pracovníky nedestruktivního zkoušení ultrazukem

UT2 – ultrazukový kurz pro pracovníky nedestruktivního zkoušení ultrazukem s praxí a absolvovaným kurzem UT1

UT3 – ultrazukový kurz určený pro řídicí pracovníky v oblasti nedestruktivního zkoušení ultrazukem a lektory



OmniScan MX2 PA2

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

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

Snazší a rychlejší nastavení

Kratší cyklus zkoušení, vyhodnocení i reportování

Vhodné pro:

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

Scientific Solutions Division

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

Evropská 176/16, 160 41 Praha 6, tel.: +420 221 985 112

info-industrial@olympus.cz

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

Poznámky
Notes

PŘÍSPĚVKY / PAPERS

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

AN ATTEMPT TO USE A 3D LASER SCANNER FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF THE MORPHOLOGY OF SURFACES OF SUBSTRATES UNDER PLASTER

Sławomir CZARNECKI*, Jerzy HOŁA*, Łukasz SADOWSKI*, Gabriela SKOREŃSKA*

*Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
Contact e-mail: slawomir.czarnecki@pwr.edu.pl

Abstract

The paper presents the successful usage of a 3D laser scanner for the non-destructive evaluation of surface morphology of substrates under plasters which are made of concrete, cellular concrete, lime-sand brick and porous brick. The results were given in the form of 3D isometric views and also the mean values of height parameters that describe the morphology of the tested surfaces that were calculated on their basis. Analysis of the obtained results is included in the paper.

Keywords: substrates under plasters, surface morphology, 3D laser scanner,

1. Introduction

In construction practice the durability of plasters is largely determined by their appropriate pull-off adhesion to substrates. Substrates under plasters are made of different materials: ordinary concrete, cellular concrete, sand-lime brick, ordinary ceramics and also porous brick. Their examples are shown in Figure 1.

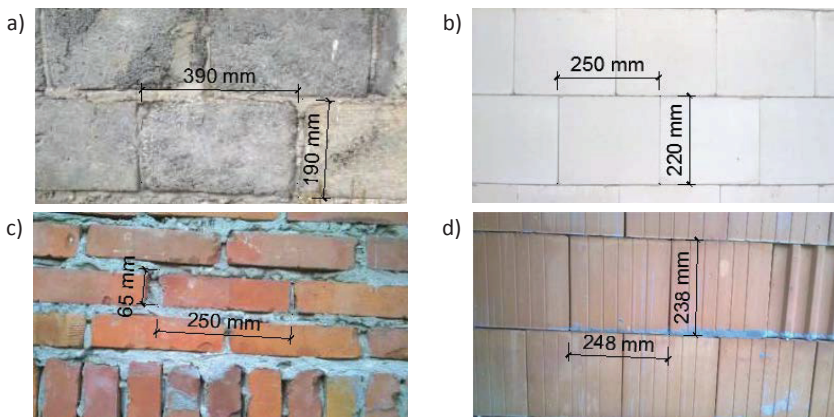


Fig. 1. View of exemplary substrates which are used under plasters and made of:

a) ordinary concrete b) cellular concrete c) ordinary brick, d) porous ceramics

The problem of insufficient pull-off adhesion between a newly made plaster and a substrate is often seen in practice. For example, Figure 2 shows the plaster falling away from the concrete substrate, which took place less than a year after the building was certified to be used. Apart from the aspects related to assembly defects or the effects of weather on plasters, a frequent cause of the detachment is the inappropriate selection of the type of plaster to the substrate or improper surface preparation.

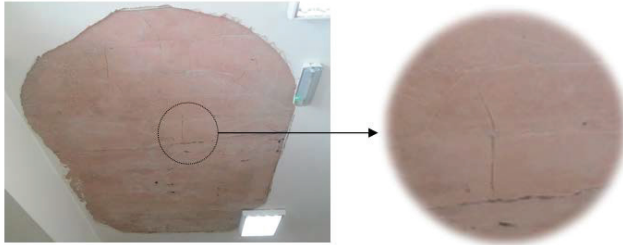


Fig. 2. Example of the ceiling plaster falling off from the concrete substrate in a new building

Substrate surface morphology, which can be described using 3D surface roughness parameters, has a significant impact on the value of pull-off adhesion between plaster and substrate [1-5]. Knowledge of these parameters may be useful in the selection of an appropriate material composition of the plaster for a selected substrate and this will provide maximum high values of the pull-off adhesion. The optimal grain composition of aggregate which is used to make plaster mortar should be adjusted to the roughness of the surface of the selected substrate. There are currently no studies regarding this issue in literature.

Taking the above into account, the use of a 3D laser scanner [6] for non-destructive evaluation of the surface morphology of the most commonly used substrates for plasters is presented in the article. The scanner has been successfully used to assess the morphology of concrete surfaces [7-11]. The main aim of the presented research is to verify which of the 3D roughness parameters can be specified when using the scanner on each of the substrates, and to also determine the range of the values of these parameters. It is important that tests carried out with the use of this scanner do not require the sampling of substrates and that they can be performed directly on site.

2. Results and their brief analysis

The tests involved the surfaces of substrates that are the most commonly used under plasters, namely, substrates made of ordinary concrete, cellular concrete, sand-lime brick and also porous brick. A measuring area with dimensions of 35 mm x 35 mm was selected on each tested surface and then tested with a 3D laser scanner. Exemplary optical views of tested surfaces are shown in Figure 3.

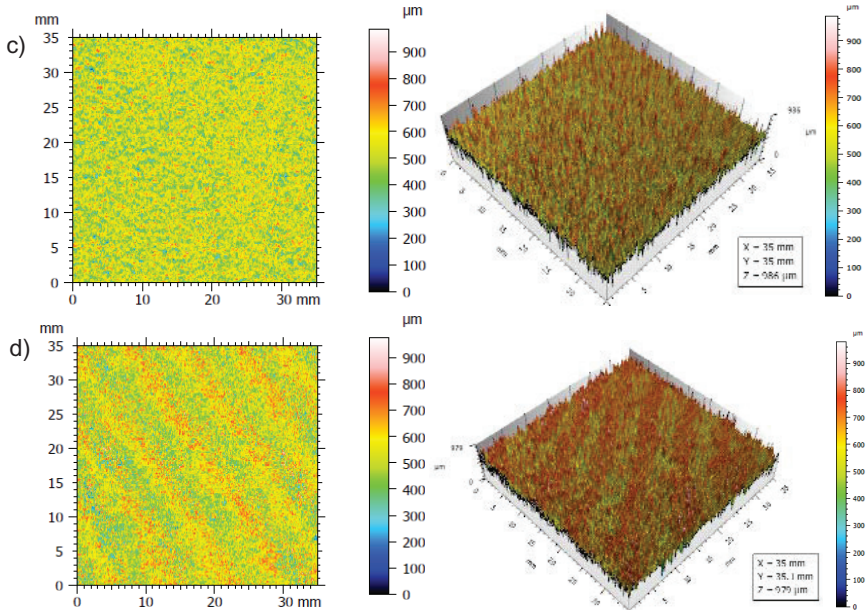
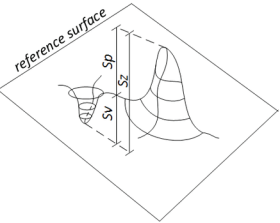


Fig. 4. Contour plots and 3D isometric views of the tested substrates: a) ordinary concrete b) cellular concrete c) sand-lime brick, d) porous brick

It can be concluded from Figure 4 that the amplitudes are the highest for the surfaces of the substrate made of cellular concrete and amount to over 1.4 mm. In turn, for the surface of the substrate made of ordinary concrete they amount to more than 1.1 mm, and are the lowest for the surfaces of substrates made of sand-lime and porous brick (less than 1 mm). In order to describe the surface morphology of the tested substrates, the following 3D amplitude roughness parameters were tested and analyzed: arithmetical mean height (S_a), the root mean square height (S_q), skewness (S_{sk}), kurtosis (S_{ku}), maximum height of peaks (S_p), maximum height of valleys (S_v) and the maximum height of the surface (S_z), as described in Table 1. These parameters were obtained by analyzing the 3D isometric views during tests.

Table 1. The analyzed parameters of height that describe the surface morphology of the tested substrates (own study based on [12])

Parameter	Form of dependency	
Root mean square height	$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A (Z(x,y))^2 dx dy}$	Sq and Sa are the parameters describing the characteristic spacing between surface elements: valleys and peaks (standard height deviation, mean value)
Arithmetical mean height	$Sa = \frac{1}{A} \iint_A Z(x,y) dx dy$	
Kurtosis	$Sku = \frac{1}{Sq^4} \frac{1}{A} \iint_A z^4(x,y) dx dy$	Sku describes the amount of scatter distribution in relation to the Gaussian distribution
Skewness	$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \frac{1}{A} \iint_A z^3(x,y) dx dy$	A negative result indicates that the surface consists of one peak and cavity and also small valleys. A positive result indicates that a surface consists of many peaks.
Maximum height of peaks	$Sp = \sup\{Z(x_i, y_j)\}$	
Maximum height of valleys	$Sv = \inf\{Z(x_i, x_j)\} $	
Maximum height of the surface	$Sz = Sp + Sv$	

Due to the fact that the height parameters have started to be successfully used to evaluate the surface morphology of elements made of concrete [11], an attempt to use them in the tests presented in this paper was undertaken.

Table 2. Values of roughness parameters which describe the surfaces of the tested substrates.

Surface of the tested substrate	Parameter symbol						
	Sq [μm]	Sa [μm]	Sku [-]	Sp [μm]	Sv [μm]	Sz [μm]	Ssk [-]
ordinary concrete	113	89.1	3.06	398	702	1100	-0.031
cellular concrete	129	99.9	3.81	582	907	1489	-0.386
sand-lime brick	100	76.8	3.85	463	524	987	-0.078
porous brick	119	94.2	2.92	456	553	979	-0.004

From the analysis of the obtained values of Sa and Sq parameters, it can be concluded that the surface of a substrate made of cellular concrete is characterized by the biggest bumpiness and the largest roughness in relation to the other tested areas ($Sa=99.9 \mu\text{m}$ and $Sq=129\mu\text{m}$). On the other hand, the most level and the least rough surface possesses substrate made of sand-lime brick, for which the values of Sa and Sq are about 25% lower than the values for the surface of the substrate made of cellular concrete, and amount respectively to $76.8 \mu\text{m}$ and $100 \mu\text{m}$. This conclusion is confirmed by the maximum values of the parameter that characterizes the height of a surface (Sz), which amount to the highest value equal to $1489 \mu\text{m}$ for the surface of a substrate made of cellular concrete, and the lowest equal to $987 \mu\text{m}$ and $979 \mu\text{m}$ for the surface of a substrate made of sand-lime and porous brick. Interestingly, the smallest maximum values of peaks with a parameter value of $Sp=398 \mu\text{m}$ were obtained for the surface of the substrate made of ordinary concrete and they are lower than the values for the surface of the substrate made of cellular concrete by more than 30%. On the other hand, the smallest valley of $Sv=524 \mu\text{m}$ can be observed for the surface of a substrate made of sand-lime brick. This value is more than 40% lower than the value for the surface of the substrate made of cellular concrete. The obtained results also show that the Sku parameter has a value of below 3 for the surface of the substrate made of porous brick, which could mean a low probability of the occurrence of defects on the tested surface and their regular distribution. However, the Ssk parameter has negative values for all of the surfaces, which means a slight dominance of valleys on the tested surface.

3. Summary

The article presents a successful attempt of using a 3D laser scanner for non-destructive evaluation of the surface morphology of substrates that are most commonly used under plasters. Test results for the surfaces of substrates made of ordinary concrete, sand-lime brick, cellular concrete and porous brick were presented in a comparative manner. The mean values of the height parameters describing the surface morphology of the tested substrates were the subject of the comparison.

It has been found that a substrate made of cellular concrete is characterized with the biggest valleys and roughness in relation to the surfaces of other substrates. On the other hand, the most level and least rough is the surface of the substrate made of sand-lime and porous brick. The presented results are an introduction to further studies.

Bibliography

1. Garbacz A., Courard L. and Bissonnette B., A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61.1, 73-84, 2013.
2. Mathia T., Pawlus P. and Wieczorowski M., Recent trends in surface metrology, *Wear*, 271, 494-508, 2011.
3. Sadowski, Ł., Mathia, T. G., Multi-scale metrology of concrete surface morphology: Fundamentals and specificity. *Construction and Building Materials*, 113, 613-621, 2016.
4. Santos P and Júlio E., Comparison of methods for texture assessment of concrete surfaces., *ACI Materials Journal*, 107 (5), 433-440, 2010.
5. Santos Pand Julio E., A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces, *Construction and Building Materials*, 38, 912-923, 2013.
6. Czarnecki S., Hoła J. and Sadowski Ł., A non-destructive method of investigating the morphology of concrete surfaces by means of newly designed 3D scanner, 11th European Conference on Non-destructive Testing, 6-10 October 2014, Prague, Czech Republic.
7. Hoła, J., Sadowski, Ł., Reiner, J., Stach, S., Usefulness of 3D surface roughness parameters for nondestructive evaluation of pull-off adhesion of concrete layers. *Construction and Building Materials*, 84, 111-120, 2015.
8. Sadowski, Ł., Mathia, T. G., The metrology of ground concrete surfaces morphology with 3D laser scanner. *Management and Production Engineering Review*, 6(2), 40-44, 2015.
9. Sadowski, Ł., Application of three-dimensional optical laser triangulation method for concrete surface morphology measurement. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 21, 692-700, 2014.
10. Czarnecki, S., Hoła, J., Sadowski, Ł., The Use of a 3D Scanner for Evaluating the Morphology of a Sandblasted Concrete Surface. In *Key Engineering Materials*, Vol. 662, 193-196. Trans Tech Publications, 2015.
11. Sadowski, Ł., Czarnecki, S., Hoła, J. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 3-13, 2016.
12. ISO 25178-2 Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, 2012.



PROBLEMATIKA DETEKCE SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE V PRŮBĚHU PLASTICKÉ DEFORMACE

THE PROBLEMATICS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DETECTION DURING PLASTIC DEFORMATION

Daniel DOHNALÍK*, Radim KOCICH*, Jan CRHA**

*Katedra tváření materiálů, VŠB TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 Ostrava Poruba,

** Dr.Martínka 1140/13, 700 30 Ostrava Hrabůvka

Contact e-mail: daniel.dohnalik@vsb.cz, radim.kocich@vsb.cz, jcrha@tiscali.cz

Abstrakt

Plastická deformace kovů je na hranici detekovatelnosti metodou akustické emise (dále AE). Např. homogenní plastická deformace u nízkouhlíkových ocelí, probíhající skluzovým mechanismem, je běžným experimentálním vybavením prakticky neindikovatelná. Zájem o studium uvolňování signálu AE během plastické deformace je proto oprávněný. Homogenní plastická deformace je zdrojem širokopásmového energeticky slabého signálu o charakteru bílého šumu. Tento typ signálu lze prakticky detekovat, v našich podmínkách, pouze běžnými snímači vibrací (akcelerometry) pracujícími na svém ostrém rezonančním kmitočtu v pásmu nad 50kHz. Nehomogenní charakter plastické deformace probíhá, např. v případě mechanismu dvojčatění, u hrubozrnných materiálů a při přítomnosti překážek na hranicích zrn. V těchto případech lze detekovat signál běžným přístrojovým vybavením. Základním problémem proto zůstává analýza zdrojů a především dodržování normalizovaných kalibračních postupů, které umožní vzájemné porovnání výsledků prací zabývajících se studiem plastické deformace kovů.

Klíčová slova: skluzový mechanismus, dvojčatění, sekundární fáze, akcelerometr, rezonanční snímač, bílý šum

Abstract

Plastic deformation of metals lies on borderline of detection by use of standard acoustic emission equipment. In some cases (low carbon steels), it's even impossible to detect the plastics deformation by use of conventional equipment. The interest in research in the above-mentioned field is therefore justified. Homogeneous plastic deformation is a source of broadband, energetically weak, signal with the origin in white noise. This type of signal can be practically detected only with use of conventional accelerometers, operating on its sharp resonant frequencies above 50kHz. The inhomogeneous character of the plastic deformation occurs in case of twinning mechanism, coarse-grained material and at the presence of obstacles at the grain boundaries. In these cases, the AE signal can be detected by a conventional AE equipment. The fundamental problem therefore is the analysis of AE sources with compliance of the standardized calibration procedures that allow the comparison of results of various research teams dealing with the study of plastic deformation of metals.

Key words: slip mechanism, twinning, secondary phase, accelerometer, resonant sensor, white noise

1. Úvod

Akustická emise (dále AE) byla objevena J. Kaiserem (1), který zaregistroval slyšitelný praskot při deformaci (ohybem) cínové tyčinky. Na počátku vzniku této metody to byla právě plastická deformace, kterou doprovázel širokopásmový signál o charakteru "bílého šumu". Plastická deformace tak zahájila aplikace metody AE v širokém rozsahu výzkumu, kontroly technologie a technické diagnostiky. Bohužel signál generovaný plastickou deformací má vysokofrekvenční charakter o nízké energetické úrovni se spojitým spektrem. Tento typ signálu vyžaduje vysokou citlivost snímání na frekvencích v pásmu na 50 kHz. Většina prací v oboru AE se zabývá zpracováním signálu, který je emitován během šíření a iniciace trhlin. Signál prudkých vzplanutí tzv. "burst" je dobře detekovatelný a zpracovatelný. Přesto i růst a iniciace vad jsou plastickou deformací výrazně ovlivňovány.

2. Rozbor problému

Všeobecně je AE vyvolána prudkou změnou pole napětí v tělese. Tato změna může být spojena s pohybem dislokací nebo dvojčatěním a dalšími procesy, jakými jsou např. iniciace a šíření trhlin, pohyb magnetických zón, tepelné dilatace, kontrakce, nebo změny v přiloženém napětí. Vznikem AE během plastické deformace se zabývá Gillis (2) ve své práci a rozebírá některé základní aspekty, které ovlivňují emisi v průběhu tohoto fyzikálního procesu. Je stále nutné mít na zřeteli, že nejen plastická deformace je zdrojem AE, ale že též byla emise pozorována při zatěžování materiálů nekrystalických, kde nelze s pohyby dislokací počítat. Lze proto usuzovat, že dislokační mechanismy nejsou jedinými zdroji emitovaných pulzů. Také experimentální vybavení je limitujícím faktorem celé řady prací. Tím lze vysvětlit řádově vysoké rozdíly v rychlosti uvolňovaných pulzů (hitů, příp. eventů) různými autory.

Vezmeme-li v úvahu materiál s výraznými plastickými vlastnostmi, pak lze považovat AE jako produkt dislokačních pohybů. Pohyby dislokací rozdělujeme zhruba do dvou kategorií a to na homogenní a nehomogenní. První typ, který vzniká při homogenní deformaci, je často využíván pro sledování mechanismů uvolňování elastických vln. Druhý typ pohybu dislokací se uskutečňuje při pohybu vad a vzniku nových poruch.

Pohyb Lüdersových pásů je procesem jehož výsledkem je homogenní deformace, přestože lokální pohyb jednotlivých pásů se uskutečňuje po skocích. Na druhé straně 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 předvídaní porušení materiálů a tím pro diagnostické účely.

Experimentální výsledky potvrzují, že detekovatelnost AE závisí kromě jiného též na způsobu dislokačního pohybu a tím též na experimentálním zkušebním zařízení. Při konstantní rychlosti deformace a stejném pohybu dislokací budou emitované elastické vlny (signál AE) produkovány stejnoměrně a prakticky nebudou pozorována žádná ostrá vzplanutí (typu burst). Naopak dojde-li k nějakým nespojitostem v rychlosti deformace z různých důvodů, objeví se elastické vlny napětí, jejichž frekvence a amplitudy budou záviset od charakteru pohybu. Ostrost pulzu bude záviset na prudkosti, jakou se dislokace rozběhnou.

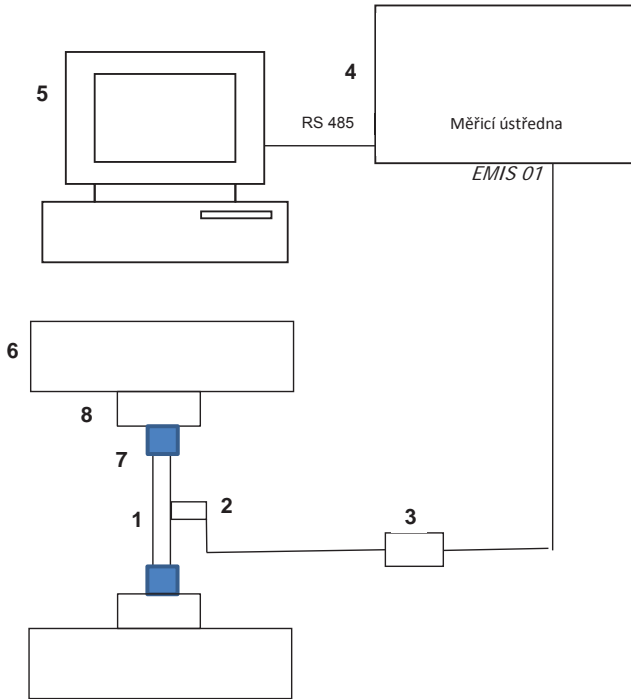
Experimenty Fischera a Lallyho (3) demonstrují aplikovatelnost předchozí analýzy na zkoušky z monokrystalů mědi, hořčíku atd..., při různých rychlostech deformace během jednoosého namáhání. Bylo pozorováno, že rychlost uvolňování pulzů (signálů AE, hitů, counts) pro každý materiál byla proporcionální k rychlosti plastické deformace. Pro detailnější objasnění vlivu rychlosti deformace na aktivitu AE je nutné nalézt vzájemnou relaci mezi makroskopickou a lokální rychlostí deformace. U monokrystalů probíhá proces deformace v následujících etapách. Nejdříve část z velmi pohyblivých dislokací vytváří skluzový pás. Ten proběhne přes celou zkoušku, ale má limitovaný axiální rozsah s lokální deformací do několika procent. Pásky jsou charakteristické velkou hustotou dislokací na rozdíl od okolního materiálu. Jejich snahou je rozšířit svou oblast v axiálním směru materiálu (zkoušky). Proces pokračuje tak dlouho až pásy pokryjí celou zkoušku. Hustota dislokací je rovnoměrná přes celý objem zkoušky a deformace je homogenní o velikosti několika procent. Na základě podobného mechanismu probíhá též deformace u středně pevných ocelí. Po naplnění krystalu růstem a iniciací deformačních pásů je makroskopické zkoumání značně komplikované. Hustota dislokací je totiž tak velká, že je znemožněno další sledování deformačních pásů dostupnými metodami.

Budeme-li předem uvedené poznatky aplikovat na polykrystalické materiály, zjistíme, že v každém zrnu polykrystalického materiálu bude deformace probíhat stejným způsobem, jak již bylo uvedeno pro monokrystal. Proto je pro kvantitativní zhodnocení zapotřebí znát počet zrn obsažených např. v průřezu zkoušky. Aktivita AE (rychlost uvolňování countů nebo hitů) při konstantní rychlosti deformace a konstantní velikosti zrna má být teoreticky úměrná velikosti vzorku. Při konstantní rychlosti deformace a konstantním objemu zkoušky aktivita AE vzrůstá se zmenšujícím se rozměrem zrna, současně však energie každého vzplanutí (hitu, countu) klesá, poněvadž menší objem zrna je zapojen do procesu plastické deformace. Přesné kvantitativní ověření těchto relací je obtížné ověřit z důvodu řady dalších vlivů, které aktivitu AE ovlivňují. Dunegan a Green (4) zjistili u jemnozrnného uranu hity AE o malé energetické úrovni, srovnáme-li je např. s energií hitů při deformaci uranu po litém stavu.

U všech testovaných materiálů byla při vzrůstající deformaci pozorována tendence směřující k poklesu aktivity AE (rychlosti uvolňování hitů nebo countů). Vzrůst aktivity byl však znovu zaznamenán před porušením.

Poměrně podstatný vliv na aktivitu AE má povrchová vrstva deformovaného tělesa. Tento vliv byl již diskutován v práci Dunegan a Tatra (5), kteří zjistili, že aktivita AE je zvyšována např. přítomností kysličníkové vrstvy na povrchu deformovaného tělesa. Pro ověření vlivu povrchové vrstvy byla na zkoušku před zatěžováním nanášena oxidická vrstva. Byla zjištěna závislost mezi tloušťkou oxidické vrstvy a celkovým počtem vzplanutí (hitů) do navržené hodnoty namáhání. Získané výsledky mohou být použity pro citlivé změření tloušťky této vrstvy. Zdroji signálu AE může být celá řada fyzikálně metalurgických procesů, deformačních procesů, dále svoji roli sehrává způsob namáhání a tím i geometrie tělesa. Vycházíme samozřejmě z předpokladu, že jsme již dokonale vyloučili mechanické a elektromagnetické rušivé vlivy.

3. Experimentální technika



Obr. 1-Experimental configuration

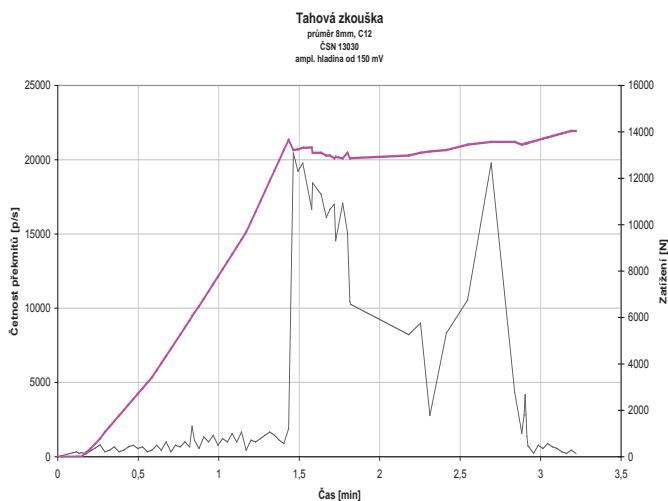
1-specimen, 2-AE sensor, 3-preamplifier, 4-DAQ unit (EMIS_01), 5-PC, 6-Testing machine (tensile test), 7-acoustic insulating block, 8-holder

Celková experimentální sestava je schematicky znázorněna na obr. 1. Snímač je AE (označ. 2) je mechanicky umístěn přímo na tahové zkoušce. Pro sledování homogenní plastické deformace u oceli ČSN 13 030 byl použit akcelerometr Brüel a Kjaer typ 4335, pracující na svém rezonančním kmitočtu. V případě sledování nehomogenní plastické deformace se používal klasický snímač E-4F pracující ve frekvenčním pásmu 50kHz až 400 kHz. Kvalita akustické vazby byla prověřována podle ASTM E976 pen testem. Výstup ze snímače (2) je přiveden do předzesilovače AE (označ. 3), kde je zesílen a impedančně upraven. Pro snímač Brüel a Kjaer typ 4335 je předzesilovač navržen jako selektivní zesilovač s pracovní frekvencí 65 kHz, pro snímač E-4F se používá běžný širokopásmový zesilovač EM_01 se zesílením 36 dB. Z předzesilovače je signál přiveden do systému EMIS_01 (označ. 4) který je zkonstruován jako čtyřkanálová jednotka. Kromě toho je možné zaznamenávat tímto systémem analogový signál. Analogový vstup pro záznam zatěžující síly byl přiveden z trhacího stroje Inova (označ. 6) do systému. Změřené údaje jsou přes RS 485 ukládány na HDD počítače (označ. 5) zde jsou k dispozici pro další zpracování po konverzi do textové formy v softwarovém prostředí Excel.

Zkouška je připevněna přes teflonové oddělovací bloky (označ. 7) do vstupních fixačních hlav (označ. 8) trhacího stroje Inova (6). Systém EMIS_01 (označ. 4) umožňuje ve spojení s PC (označ. 5) třídit překmity (county) do 7 amplitudových oken a tím provádět amplitudovou analýzy snímaného signálu.

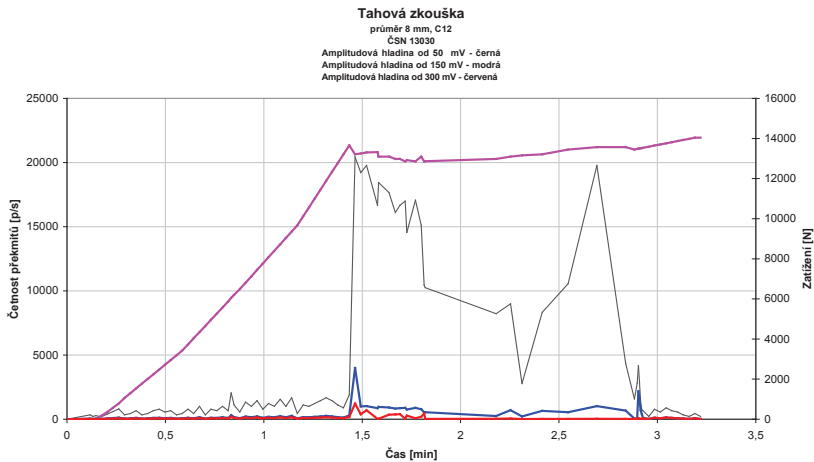
4. Naměřené výsledky a jejich diskuze

Na následujícím obrázku je uveden typický průběh tahové zkoušky se současným záznamem AE. Měření bylo provedeno akcelerometrem Brüel a Kjaer typ 4335 pracujícím na svém ostrém rezonančním kmitočtu tj. na 65 kHz. V tomto případě jsou monitorovány veškeré amplitudy přesahující hladinu 150 mV na konci celého zesílení měřicího řetězce na rezonanční frekvenci 65 kHz. To odpovídá při celkovém zesílení 84 dB úrovni signálu 20 dB_{AE} na výstupu ze snímače. Takto vysokou citlivost bylo možné dosáhnout díky úzkému frekvenčnímu pásmu, naladěním předzesilovače na vlastní rezonanci snímače a díky izolačním teflonovým blokům.



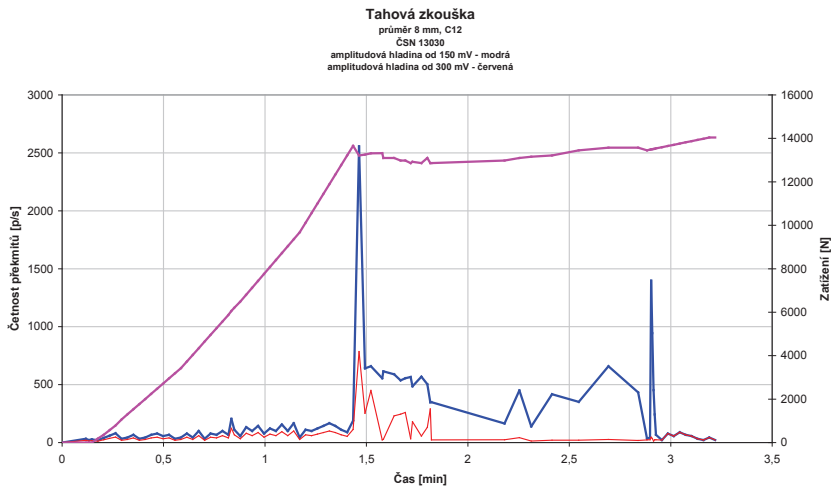
Obr. 2 - tensile test: load versus time, counts rate versus time (all counts above level 20 dB_{AE})

Po počátečním prudkém vzestupu četnost překmitů (countů) typického signálu pro skluzový mechanismus klesá. V celkových počtech se amplitudy charakteru prudkých vzplanutí neprojeví. Na následujícím obr. 3 jsou přidány průběhy signálu o vyšších amplitudách.



Obr. 3

Tensile test: load versus time, counts rate versus time (counts above 20 dB_{AE}, 26 dB_{AE}, 32 dB_{AE})

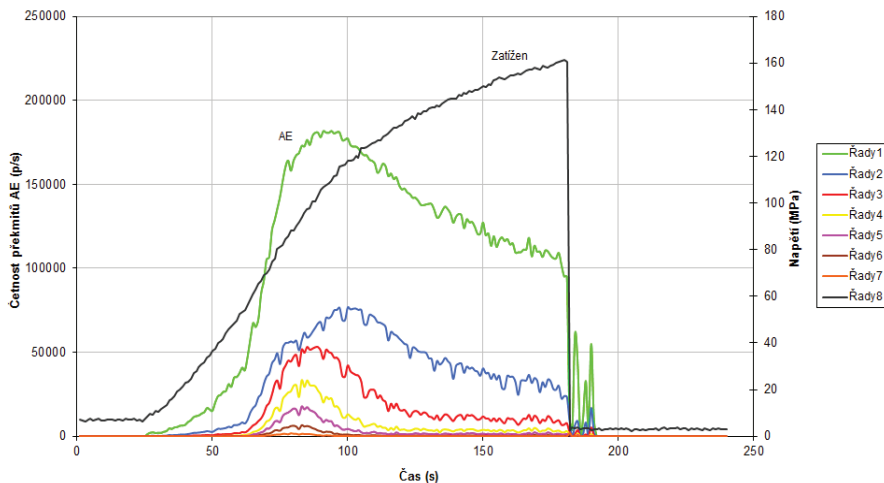


Obr. 4

Tensile test: load versus time, counts rate versus time (counts above 26 dB_{AE}, 32 dB_{AE})

Na obr. 4 jsou u této zkoušky je zvýrazněn změnou stupnice průběh signálu u vysokých energetických úrovních. U tohoto typu oceli s $R_e = 270$ MPa se realizuje plastická deformace skluzovým mechanismem.

Zkouška 4 (Mg), kanál 1
0,8mm/min, Ø 4mm, 20°C, 74 dB



Obr. 5

*Tensile test: tension ver. time, counts rate versus time
(counts above 30 dB_{AE}, 36 dB_{AE}, 42 dB_{AE}, 48 dB_{AE}, 54 dB_{AE}, 60 dB_{AE})*

Zcela jiná situace nastává při tahových zkouškách hořčíkových slitin. V tomto případě jsou emitovány překmity (counts) o podstatně vyšších energetických úrovních než v případě homogenní plastické deformace u nízkouhlíkových ocelí. Zdroji tohoto signálu je praskání křehké β fáze (6) případně se na této aktivitě může částečně podílet i mechanismus dvojčatění.

4. Závěr

Většina aplikací AE se soustřeďuje na detekci a zpracování signálu o charakteru prudkých vzplanutí (typ burst). Detekce tohoto typu signálu je detailně rozpracována a standardizována. S výše uvedeným signálem se setkáváme u iniciace a šíření trhlin u tlakových zkoušek a při kontrole technologických procesů. Řada fyzikálně metalurgických a deformačních procesů je však zdrojem spojitého signálu o nízké energetické úrovni pohybující se na hranici šumu pozadí. Při tlakových zkouškách a v průběhu technologických zkoušek se však pomocí nastavené vyhodnocovací hladiny, která je poměrně vysoko nad hladinou šumového pozadí, signál o nízké energii nevyhodnocuje. V článku je uveden postup založený na použití běžného akcelerometru a selektivního zesilovače, který pracuje na ostrém rezonančním kmitočtu akcelerometru. Byla potvrzena možnost snímání homogenní plastické deformace u tahových zkoušek nízkouhlíkových ocelí. Následný způsob vyhodnocování systémem EMIS_01 zaručuje i registraci prudkých vzplanutí a tím se

prakticky žádná informace neztrácí. Pro ilustraci je uveden průběh aktivity během tahové zkoušky hořčíkové slitiny, při které byl emitován signál s vysokou dynamikou amplitudového spektra. Výhodou registrace četností překmitů (counts) a jejich tříděním do amplitudových oken je získání kontroly nad celkovým průběhem experimentu. Je proto možné tímto postupem vyhodnocovat účinnost jednotlivých metod detekce a vyhodnocování.

Literatura

1. P .P. Gillis: Dislocation Motions and Acoustic Emissions, ASTM STP 505 (1972), p. 20
2. Fisher R. M., Lally J.S.: Canadian Journal of Physics CPJHA, Vol. 45, No 2. Part 3, Feb.1967, pp 1147-1159
3. H. L. Dunegan and A. T. Green: Factors Affecting Acousti Emission Response from Materials, Materials Research and Standards , MTSRA, March 1971
4. J. R. Frederick and D. K. Felbeck: Dislocation Motion as a Source of Acoustic Emission, ASTM STP 505 (1972), p. 129
5. H .L. Dunegan and C. A. Tatro: Acoustic Emission Effects during Mechanical Deformation, Measurement of Mechanical Properties, Part III (1971)
6. R. Kocich, M. Cagala, J. Crha, P. Kozelský: Charakter of Acoustic Emission signal generated during Plastic Deformation, 30th EWGAE Conference, University of Granada, 2012, poster



Spektrální analýza signálu akustické emise

SPECTRAL ANALYSIS OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL

Karel HÁJEK

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

Abstrakt

Je snahou získat ze signálu AE více informací, které by dokázaly zvýšit informační hodnotu naměřeného signálu pro účely NDT. Týká se to např. problémů lokalizace vznikajících defektů nebo informace i typech a rozměrech vznikajících defektů. Druhý z obou problémů je snahou řešit pomocí spektrální analýzy. Nicméně, prostá spektrální analýza naměřeného signálu je natolik zarušená a zkreslená kmitočtovými vlivy přenosu signálu od místa defektu přes testovaný objekt a senzor AE až do vstupu zesilovače, že lze ze spektra signálu vyčíst jen orientační informace o časové závislosti intenzity signálu. Pro získání přesnějších informací o rozměrech defektů je takováto spektrální analýza obtížně použitelná.

Proto je snahou příspěvkem ukázat cestu korekce kmitočtových závislostí přenosové cesty, pomocí které lze podstatně zvýšit citlivost této spektrální analýzy a tím i její použitelnost pro analýzu rozměrů defektů.

Klíčová slova: Akustická emise, spektrální analýza, přenosová cesta signálu

Abstract

Is an effort to get out of the AE signal more information that would be able to increase the informational value of the measured signal for NDT. This concerns e.g. localization problems of arising defects or getting information on the types and sizes of defects. Is an effort to solve the second problem using by spectral analysis. However, a simple spectral analysis of the measured signal is jammed and distorted by frequency influences the signal transmission from the defect through the test object and AE sensor to the amplifier input. Therefore only the time dependency of signal strength can be read approximately from spectrum. To obtain more accurate information about the size of defects is such spectral analysis almost useless.

Therefore, it is an effort to show the way by correcting the frequency dependence of the transmission path. This allows to significantly increase the sensitivity of the spectral analysis and hence its applicability to the analysis of the dimensions of the defects.

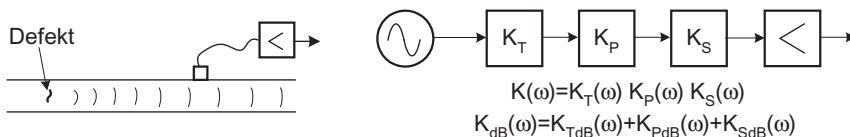
Key words: Acoustic emission, spectral analysis, transmission signal path

1. Úvod

Akustická emise je účinná preventivní metoda NDT pro získání informace, že dochází zvýšení nebezpečných deformací a počátečních stádií vzniku defektů. Je ale snahou ze signálu AE získat více informací. Důležitou otázkou je získání informací o místě vznikajícího defektu. Další základní snahou je získat informace o charakteru a rozměrech defektu. Protože je

známa určitá korelace mezi rozměry vznikajících prasklin a kmitočty akustických kmitů, vyvolaných těmito ději, objevují se snahy řešit tento problém spektrální analýzou. Z mnoha publikací v této oblasti lze uvést např. [1], [2] a [3]. Bohužel, v mnoha případech prostá spektrální analýza naměřeného signálu je natolik zarušená a zkreslená kmitočtovými vlivy přenosu signálu od místa defektu přes testovaný objekt a senzor AE až do vstupu zesilovače, že lze ze spektra vyčíst jen orientační informace o časové závislosti intenzity signálu anebo zůstanou některé projevy nedetekované.

Tento problém ilustruje obr. 1. Defekt typu vznikající praskliny je svým kmitáním zdrojem akustického signálu. Ten se šíří od místa defektu prostředím tělesa někdy i dosti komplikovanými cestami, navíc i vlnami různých módů, takže v místě přiloženého senzoru se všechny kmitočty skládají s různými intenzitami a fázemi v závislosti na kmitočtu těchto vln. Výsledkem je, že tato část cesty signálu je kmitočtově závislá s některými výraznými rezonancemi nebo naopak útlumy. Další specifickou fází šíření signálu je jeho přechod z testovaného tělesa do senzoru. Zde také dochází ke kmitočtové závislosti s obdobnými důvody jako při šíření v tělese, zde navíc hraje roli vliv přenosových vlastností kontaktních vrstev mezi tělesem a vlastním piezo měničem. A třetím důležitým článkem v přenosu signálu je samotný piezo měnič jako senzor AE. Ten se vyznačuje výraznými kmitočtovými rezonancemi souvisejícími s jeho rozměry a vlnovými délkami jednotlivých módů akustických vln. Je samozřejmě snahou tyto rezonance ztlumit konstrukcí měniče, ale toho nelze dosáhnout v plné míře. Po změně akustického signálu na elektrický již lze realizovat zbylou část cesty zpracování signálu poměrně kmitočtově nezávislou.



Obr. 1. Zjednodušený model šíření signálu AE z místa defektu do senzoru AE.

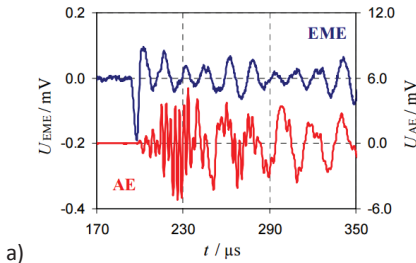
Fig. 1 A simplified model of the AE signal propagation of the defect in the sensor AE

Ve výsledku si můžeme nakreslit model přenosové cesty podle obr. 1. b) zjednodušeně jako součin dílčích přenosů či jakou součet těchto přenosů vyjádřených v logaritmické míře, tj. v dB. Příklad naměřené kmitočtové závislosti přenosu je uveden na obr. 5. Je zřejmé, že i pro blízké kmitočty mohou být rozdíly 10 až 20 dB (1:10) a v širším rozsahu až 70 dB (1:3000).

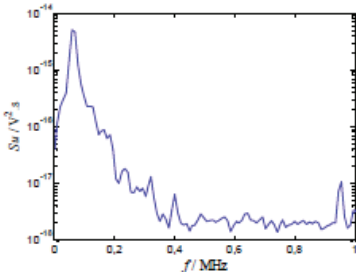
Kromě uvedených skutečností je potřebné brát dále v potaz úroveň signálu a odpovídající energie v poměru k celému měřenému úseku. Pokud by se nám podařilo spektrálně analyzovat krátký zachycený úsek, odpovídající jedné události, tak bude úroveň daného signálu v poměru k rušivému pozadí dostatečná a jsme schopni s nějakou přesností vypočítat kmitočty složek odpovídající danému ději, viz např. obr. 2. V reálu toto ale není běžně možné, takže obvykle počítáme spektrum za nějaký časový úsek. Tím se energie sledovaného signálu značně „zředí“ a poměr její úrovně bude nízký v porovnání s úrovní pozadí měření. A bude i nízký v poměru s rozdíly v kmitočtové závislosti přenosu, takže běžnou spektrální analýzou zaznamenaného signálu lze ze spektra vyčíst jen orientační informace o časové závislosti intenzity signálu. Pro získání přesnějších informací o rozměrech defektů je proto takováto spektrální analýza velmi omezená.

2. Možnosti kompenzace kmitočtové závislosti přenosové cesty AE signálu

Určitým podnětem k těmto úvahám byla práce [4], kde je srovnáván signál akustické emise a současně měřené elektromagnetické emise téže události, což je možné jen v nekovových látkách. Cílem této práce bylo usnadnit lokalizaci vzhledem k vysoké rychlosti šíření elektromagnetické emise. Ovšem záznamy a porovnání těchto dvou signálů ukazují, že základní signál elektromagnetické emise je poměrně harmonický a jeho kmitočet má jasný vztah k frekvenci kmitů stěn defektu a tím i k rozměrům defektu. Oproti tomu záznam téže události cestou akustické emise je značně složitější a uplatňují se tam výše rozebírané vlivy přenosové cesty akustické emise. Proto je vhodné korigovat tento vliv přenosové cesty, aby byl získán pokud možno samotný signál AE.



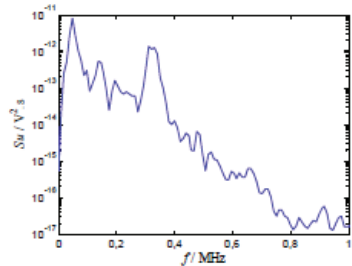
a)



b)

Obr. 2 Signál AE a EME:
a) časové průběhy,
b) spektrum EME,
c) spektrum AE, [4].

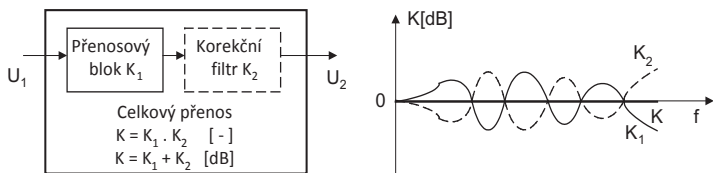
Fig. 2 Signal AE and EME:
a) time dependencies,
b) EME spectrum,
c) AE spectrum, [4].



c)

Princip kompenzace přenosové cesty je známý a používaný např. v elektroakustice. Je naznačen na obr. 3. Často je tak korigována např. kmitočtová závislost reproduktorů a akustické cesty v poslechové místnosti. Lze ji korigovat vřazením korekčního obvodu, který má v dB míře opačné závislosti než korigovaná závislost akustického přenosu. Kmitočtová závislost přenosu celého řetězce je pak dána součtem obou dB přenosů a je konstantní a nemá vliv na tvar a spektrum signálu.

Uvedená korekce se poměrně snadno realizuje, když dostatečně přesně změříme korigovanou kmitočtovou závislost akustické části přenosu. Ovšem to není jednoduše realizovatelné v případě snímání akustické emise, když se kromě mnoha dalších vlivů projeví mj. i to, cesta signálu AE částečně mění v závislosti na místě jeho zdroje, který může být pokaždé jinde. Je zřejmé, že přenosovou funkci v tomto případě nelze určit zcela přesně a musíme vyjít ze statistického chování signálu po delší dobu měření.

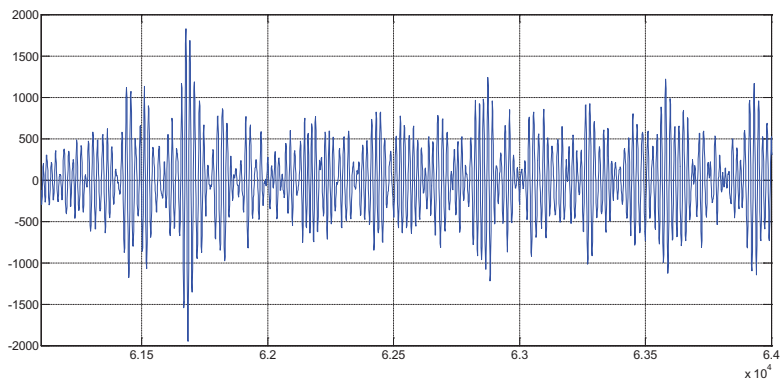


Obr. 3. Princip korekce kmitočtové přenosové charakteristiky systému.

Fig. 3 The principle of correction of frequency characteristics of the transmission system.

Přístup k vyhodnocování signálu je potřebné volit podle zhruba dvou možností. V prvním případě je signál složen z málo častých událostí, kdy dobu mezi nimi vyplňuje víceméně šum. V tom případě je vhodné vybrat ze signálu úseky s jednotlivými „událostmi“. Je pak ale otázkou, jestli a jak zachovat jakousi linearitu časové osy anebo se jen zabývat spektry jednotlivých událostí jako např. v [4].

V případě téměř kontinuálního sledu různě vysokých událostí, které se mohou i překrývat (viz příklad na obr. 4), není potřebné tuto „kompresi“ signálu používat, ale zde je zřejmě problematické se zabývat spektry jednotlivých událostí a bude nás spíše zajímat statistické vyhodnocení spektra AE.



Obr. 4 Příklad časového záznamu signálu AE s téměř kontinuálním sledem událostí.

Fig. 4 Time record example of AE signal with continuous sequence of events.

Dalším hlediskem a východiskem ke spektrální analýze AE signálu je časový horizont celého měření. Jednodušší je postup v případě, kdy můžeme sledovat testovaný objekt v nezavadném stavu. Pak je možné z takto změřeného signálu stanovit „referenční přenosovou kmitočtovou charakteristiku“. Při tom předpokládáme delší dobu záznamu a průměrujeme tím za tuto dobu různé okamžité krátkodobé děje.

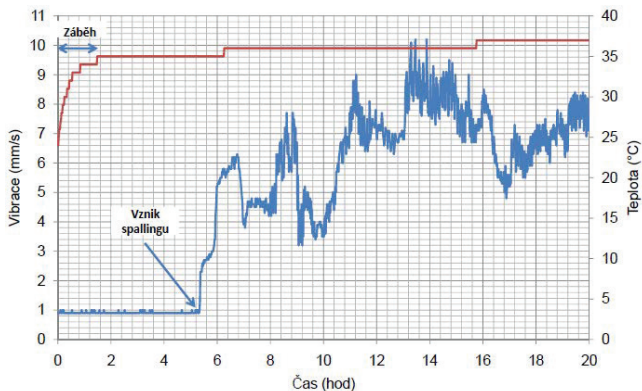
Následně nějaký další úsek změřeného signálu převedeme na plektrum a podělíme naší referenční funkcí nebo odečteme její hodnoty v logaritmické míře (v dB) a dostaneme odchylky od této referenční spektrální charakteristiky. V případě, že signál akustické emise v místě vzniku je stejně malý jako při prvním referenčním měření, dostaneme v podstatě

kmítočtově nezávislou jednotkovou funkci (v logaritmické míře 0 dB). V případě zvýšení akustické emise se nám projeví tento rozdíl jako odchylka od jedničky pro danou kmítočtovou složku a jsme ji schopni určit velice citlivě a přesně pro široký rozsah kmítočtů.

Můžeme zde přístupovat dvěma přístupy. Jednak můžeme zkoumat krátké časové úseky a srovnat je do časové závislosti spekter v tzv. spektrogramu. Při vhodné volbě úseku můžeme vidět ve spektru jednotlivé události. Při relativně velkém množství málo odlišných událostí tento přístup není příliš přínosný pro praktické použití. V tom případě je možné přistoupit k vyhodnocení spíše statistickým způsobem, kdy zvolíme podstatně delší úseky a vidíme, že v tomto časovém úseku nám významně stoupá počet událostí v nějakém kmítočtovém pásmu. Samozřejmě je pak možné sledovat i zde časový vývoj spektrálního složení v podstatně delším časovém úseku. Oba uvedené přístupy jsou ukázány v následujícím experimentálním měření.

3. Experimentální ověření uvedeného postupu

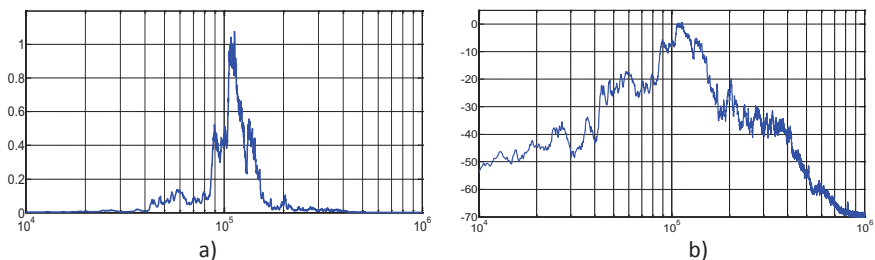
Pro ověření byl použit záznam signálu akustické emise sledování zátěžové zkoušky ložiska, který poskytl autor práce [5]. Záznam byl značně rozsáhlý (cca 30 GB), trval cca 20 hodin a zaznamenal celý průběh až do značného poškození ložiska. K němu byla přiložena časová závislost signálu vibrací a teploty ložiska, které částečně dokumentuje průběh rozvoje poškození.



Obr. 5 Časový záznam vibrací a teploty při zátěžové zkoušce ložiska [5].

Fig. 5 The time record of vibration and temperature at the bearing load test [5].

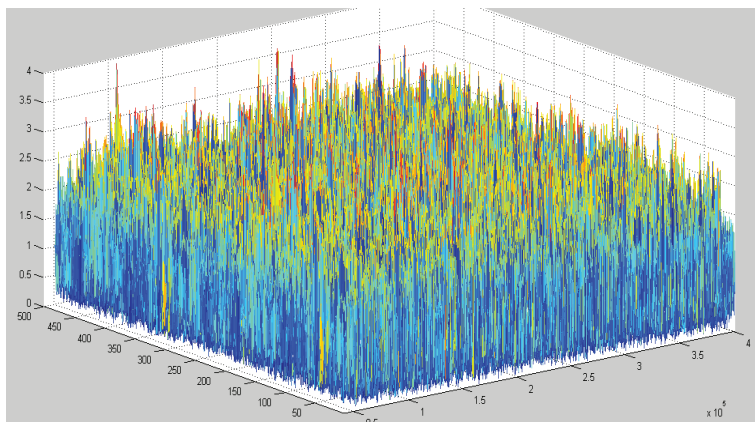
Vzhledem k velkému rozsahu dat byly vybrány jen určité úseky lineárně z celého záznamu. První úsek se signálem z relativně bezvadného ložiska z počátku záznamu byl brán jako referenční a s ním byly srovnávány ostatní úseky. Jeho průběh je uveden na obr. 6, a to jak lineární, tak v logaritmické ose.



Obr. 6 Vyhodnocená kmitočtová charakteristika jako průměrné spektrum signálu pro první úsek měření: a) lin. osa, b) log. osa v [dB].

Fig. 6 Evaluated frequency response as the average spectrum signal for the first section of the measurement: a) lin. axis, b) log. axis in [dB].

První přístup podrobné časově-spektrální analýzy, vedoucí ke spektrogramům je pro počátek měření (druhý úsek) a pokročilý stav (4. úsek) ukázán na obr. 7 a obr. 8.

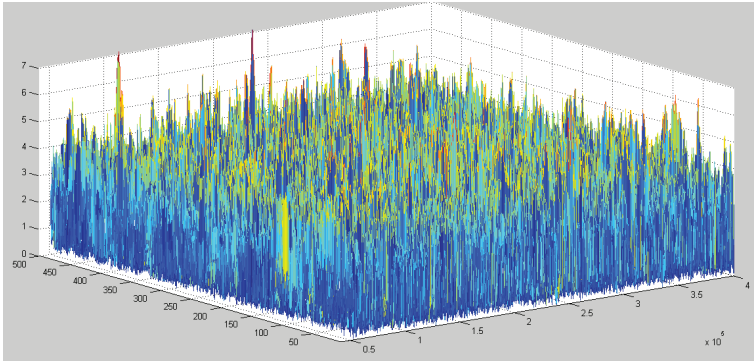


Obr. 7 Korigovaný spektrogram signálu pro druhý úsek měření.

Fig. 7 The corrected spectrogram of signal for the second measurement section.

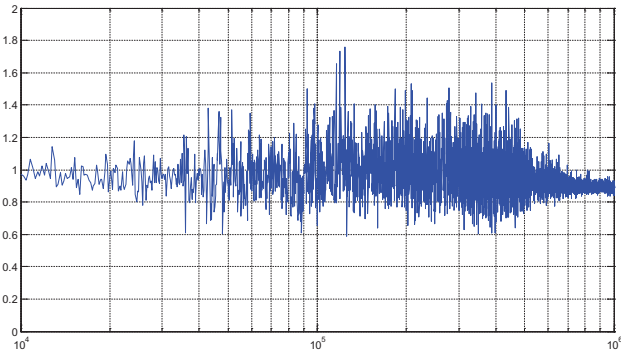
Jednak lze z obou spektrogramů usoudit, že jsou zde spektrálně zobrazeny jednotlivé události či jejich blízké shluky, ale jejich detailní vyhodnocování je zřejmě málo přínosné. Dále je z porovnání obou obrázků zřejmý očekávatelný nárůst amplitudy jednotlivých událostí v průběhu zkoušky.

Proto bylo přistoupeno k statistickému vyhodnocení průměrného spektra signálu za celé úseky. Výsledná korigovaná spektra jsou uvedena pro 2. až 5. úsek na obr. 9 - obr. 12. Z porovnání lze kromě postupného nárůstu úrovně pozorovat od třetího úseku zjevný nárůst složek s nízkými kmitočty pod 100 kHz, který lze zřejmě vyhodnotit jako zvětšování rozměrů vznikajících defektů. Pro vyhodnocení konkrétních kmitočtů dominantních složek by byla potřebná rozměrová analýza defektů, ale to není cílem tohoto článku.



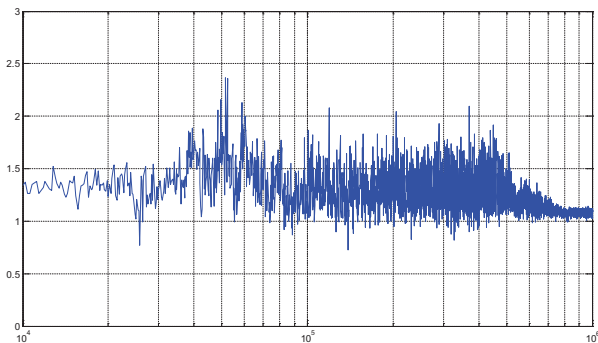
Obr. 8 Korigovaný spektrogram signálu pro čtvrtý úsek měření.

Fig. 8 The corrected spectrogram of signal for the fourth measurement section.



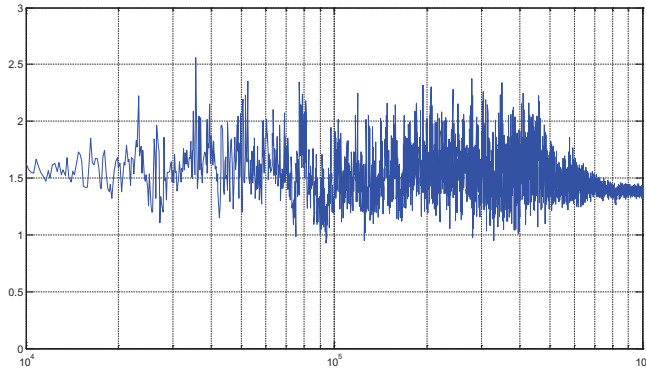
Obr. 9 Korigované průměrované spektrum signálu pro druhý úsek měření.

Fig. 9 Corrected averaged spectrum of the signal for the second measurement.

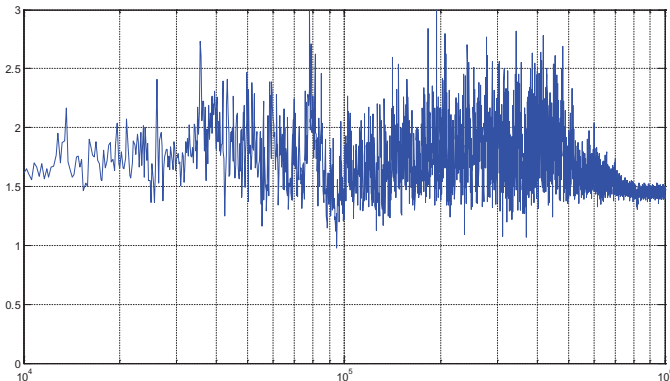


Obr. 10 Korigované průměrované spektrum signálu pro třetí úsek měření.

Fig. 10 Corrected averaged spectrum of the signal for the third measurement.



*Obr. 11 Korigované průměrované spektrum signálu pro čtvrtý úsek měření.
Fig. 11 Corrected averaged spectrum of the signal for the fourth measurement.*



*Obr. 12 Korigované průměrované spektrum signálu pro pátý úsek měření.
Fig. 12 Corrected averaged spectrum of the signal for the fifth measurement.*

4. Závěr

Článek ukázal možnosti zdokonalení spektrální analýzy AE signálu pro získání hodnot kmitočtů vznikajících defektů, což umožňuje odhad rozměrů defektů a hodnocení nárůstu počtů defektů s většími rozměry. Podstata nového přístupu spočívá v odhadu kmitočtové závislosti přenosové cesty a korekci vypočteného spektra AE signálu na tuto kmitočtovou závislost. To umožňuje podstatně zvýšit citlivost a použitelnost spektrální analýzy a to především pro kmitočtová pásma s menším přenosem než je maximum přenosu cesty AE signálu.

Formy postupu a použití získaných výsledků závisí na typu měření (krátkodobé nebo dlouhodobé, s řídkým či téměř kontinuálním výskytem událostí apod.). Výsledky lze pak hodnotit buď jako téměř kontinuální spektrogramy se zachycením jednotlivých událostí ve spektru, či jako průměrná spektra za určitý delší úsek času pro spíše statistické

vyhodnocení. Samozřejmě je vhodné volit optimální úseky analýzy, a to jak pro základní krátkodobá spektra spektrogramů, tak i pro dlouhodobější průměrování.

Postup by experimentálně ověřen na signálu AE ze zátěžového testu ložiska [5], který měl charakter spíše kontinuálního sledu událostí. Jako praktické se ukázalo zprůměrované určení spektra za delší dobu, které kromě očekávaného postupného nárůstu úrovně od určité doby ukázalo nárůst událostí pro nižší kmitočtové pásmo pod 100 kHz.

Lze uvažovat, že klasické hodnocení počtu událostí nekorigovaného AE signálu je částečně zdeformované tím, že jsou dominantně vyhodnocovány události se základními kmitočty v maximu přenosu a ne v celém kmitočtovém pásmu. Zajímavé by bylo např. porovnat časové průběhy počtu událostí klasického měření a měření ze signálu, získaného zpětnou FFT z korigovaného kmitočtového spektra, kde by se více projevil i události mimo kmitočtové pásmo maxima přenosu.

Literatura

- [1] A. MARFO, Z. Chen and J. Li: Acoustic emission analysis of fatigue crack growth in steel structures. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*. Vol. 4(7), pp. 239-249, July, 2013
- [2] Lixin Gao, Fenlou Zai, Shanbin Su, Huaqing Wang, Peng Chen, Limei Liu: Study and Application of Acoustic Emission Testing in Fault Diagnosis of Low-Speed Heavy-Duty Gears. *Sensors* 2011, 11, 599-611; doi:10.3390/s110100599
- [3] Palanco, S. Laserna, J: Spectral analysis of the acoustic emission of laser-produced plasmas. *APPLIED OPTICS* _ Vol. 42, No. 30 _ 20 October 2003
- [4] Trčka, T: Využití elektromagnetické a akustické emise pro diagnostiku moderních kompozitních materiálů. Disertační práce, VUT FEKT Brno, 2014. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=93499.
- [5] NOHÁL, L. Korelace změny signálu AE s rozvojem kontaktního poškození. Disertační práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2014. http://uk.fme.vutbr.cz/digitalni_knihovna/detail_dokumentu/2133/Korelace%20zm%44%9Bny%20sign%C3%A1lu%20AE%20s%20rozvojem%20kontaktn%C3%ADho%20po%C5%A1kozen%C3%AD



STANOVENÍ KOEFICIENTU ODHALENÍ POŠKOZENÍ V PNEUMATICKÝCH VÁLCÍCH METODOU AKUSTICKÉ EMISE IDENTIFICATION OF DETECTION VALUES IN PNEUMATIC CYLINDERS BY ACOUSTIC EMISSION

Miroslav JÁNA*, Houssam MAHMOUD, Pavel MAZAL**, František VLAŠIČ*****

* Poličské strojírny a.s., Polička, Czech Republic,
** Vysoké učení technické v Brně, Brno, Czech Republic,
*** ZD Rpety – DAKEL, Czech Republic
Contact e-mail: mjana@pos.cz, mazal@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Hlavním cílem článku je srovnání koeficientu odhalení D v případě nasazení akustické emise a ostatních nedestruktivních metod (vibrační metody, ultrazvuk a analýza hluku), jejichž výstupy v porovnání s akustickou emisí se ukázaly jako nedostatečné a méně citlivé. Naměřená data akustické emise na nepoškozených válcích byla zpracována a analyzována a poté na nich byly vytvořeny různé typy poškození. V rámci tohoto výzkumu byl vyvinut nový detekční parametr „DAE“, který hodnotí a klasifikuje úroveň odhalení poškození na základě zjištěných rozdílů mezi nepoškozenými a poškozenými válci. Tato studie navazuje na předchozí práce zaměřené na vývoj nového systému pro monitorování pneumatických komponent, který je podpořen grantem TAČR.

Klíčová slova: *technická diagnostika, pneumatický válec, poškození, akustická emise*

Abstract

The main aim of this paper is to compare the coefficient detection value D between acoustic emission and the other non-destructive testing methods such as vibration monitoring, ultrasound principle and noise analysis of the equipment. The capabilities of these methods are inadequate, less sensitive and less trustworthy comparing with acoustic emission in this area. The acoustic emission signals obtained from the undamaged cylinders were processed and analysed, after that the same cylinders were damaged with different type of defects. A new parameter "DAE", which was developed, evaluates and classifies the level of damage detection on the basis of the recorded differences between the undamaged and damaged cylinder. This study follows previous papers focused on the development of a new system for condition monitoring of pneumatic components supported by the Technology Agency of the Czech Republic.

Key words: *condition monitoring, pneumatic cylinder, damage, acoustic emission*

1. Úvod

Nedestruktivní zkoušení se používá k detekci, lokalizaci, měření, vyhodnocení vad a posouzení integrity [1]. Byly studovány různé NDT techniky, jako ultrazvuk, rentgen, dynamické metody, akustické emise (AE) a akusticko-ultrazvukové metody (AU). Každá NDT technika má své výhody i nevýhody, pokud jde o cenu, rychlost, přesnost a bezpečnost [2].

AE se používá k monitorování integrity a popisu chování materiálů, když podstoupí deformaci či lomu. Na rozdíl od ultrazvukové nebo radiografické techniky, AE nevyžaduje vnější energii, ale využívá elastické napěťové vlny uvolňované při mikrostrukturních změnách [3]. Snímač AE transformuje mechanickou deformaci na napětí v čase [4]. AE se používá k monitorování strojích součástí při výrobě, detekci a lokalizaci úniku a netěsností a pro hodnocení mechanických vlastností tlakových nádob [5].

Pneumatické části představují důležitou součást mnoha technických zařízení v dopravě, mechanickém, automobilovém průmyslu a energetice atd. [6]. Pneumatický pohon je zařízení, které přeměňuje energii ze zdroje stlačeného vzduchu do rotačního nebo lineárního pohybu. Servopohony zajišťují specifické úkoly, jako je upínání, sběr a umístění, plnění, vyjmutí a výměnu nástrojů [7]. Pokud rychlost pohybujících se objektů není kritická, pneumatické systémy jsou levné, čisté a snadno si udržují alternativu pro automatizaci [8].

AE se opírá o skutečnost, že unikající plyn nebo kapaliny přes malé porušení vytváří vysokofrekvenční zvukové vlny, které jsou přenášeny přes obálkový systém [9]. Vztah byl popsán mezi amplitudou signálu AE a rychlostí úniku plynu u ventilu ve frekvenční oblasti a měření hluku z plynového ventilu. AE prokázala vhodné použití pro monitorování pneumatických válců [10]. Výzkum vlivu míry netěsnosti byla provedena na efektivní hodnotě signálu AE pomocí snímačů AE při použití různých vnitřních tlaků [11].

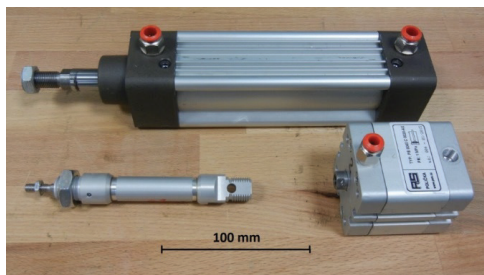
Nový parametr „D_{AE}“, byl odvozen z metod NDT a klasifikuje stupeň odhalení (poškození) na základě zjištěných diferencí výše zmíněných kritérií mezi nepoškozeným a poškozeným válcem. Stupnice odhalení ve škále 1 – 10, kde pro 1 je závada jistě odhalena a při 10 není možné závadu metodou AE odhalit, byla převzata z FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), která klasifikuje stupeň odhalení „D“ pro standardní (současné) kontrolní metody. Koeficient závažnosti „S“ hodnotí míru závažnosti vytvořené vady ve vztahu k zákazníkovi či k samotnému zařízení. Tento parametr je uveden ve dvou modifikacích, a to „S1“ pro samostatnou závadu bez dalších následků a „S2“ zohledňující nejhorší možné následky, které může závada indikovat [12].

2. Metodika měření

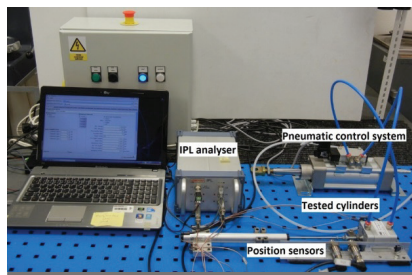
2.1. Sestava experimentálního zařízení

Cílem výzkumu bylo vytvořit metodiku diagnostiky poruch na konkrétních typech pneumatických válců. Byly testovány tři typy válců - PS, PB a RD (výrobce Poličské strojírny a.s.), viz obr. 1.

Pro testování chodu pístů byla sestavena experimentální stanice, která umožňuje detekci poškození válců během chodu. Měřicí řetězec stanice, sloužící pro analýzu poškození pístů, se skládá z tří či čtyř snímačů AE, lineárního polohového potenciometru a 4-kanálového analyzátoru IPL (výrobce ZD Rpety – DAKEL), obr. 1.



Obr. 1 Typy testovaných pneu válců
Fig. 1 Types of tested pneumatic cylinders

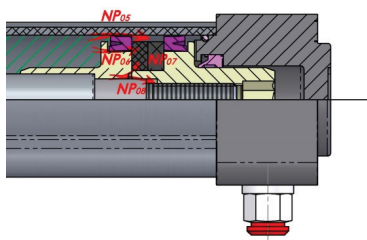


Obr. 2 Sestava měřicí aparatury
Fig. 2 Assembly of experimental equipment

2.2. Jiný typ umělých vad

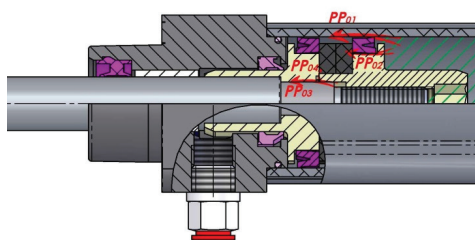
Netěsnost: způsobena zhoršením nebo ztrátou funkce těsnění, poškozením těsnící plochy na součásti nebo skrze součást.

- Netěsnosti v koncové poloze při tlaku nad pístem / zasunuté pístnici
- Netěsnosti v koncové poloze při tlaku pod pístem / vysunuté pístnici



Obr. 3 Netěsnosti nad pístem v koncové poloze

Fig. 3 Leaks above the piston in the end position

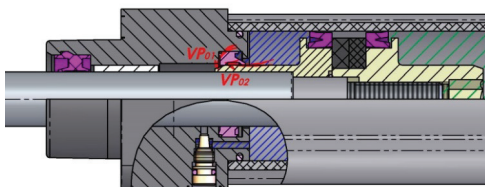


Obr. 4 Netěsnosti pod pístem v koncové poloze

Fig. 4 Leaks below the piston in the end position

Netěsnosti při pohybu

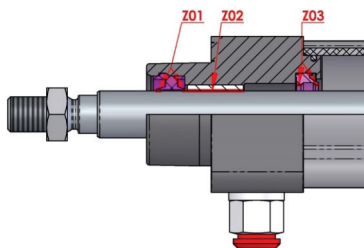
Při pohybu se může kromě výše uvedených netěsností projevit netěsnost manžety tlumení v okamžiku, kdy je tlumení v činnosti, tedy před dosažením koncové polohy.



Obr. 5 Netěsnosti tlumení při vysouvání pístnice
 Fig. 5 Dumping leak during rod ejection

Zadírání

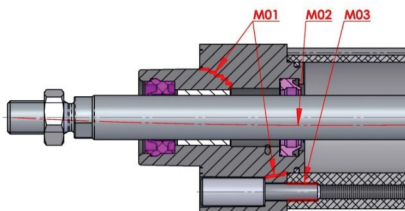
Při provozu může na kluzných plochách dojít ke zhoršení třecích podmínek. Následkem je zhoršení chodu válce (trhavý pohyb pístnice), snížení síly na pístnici při vysouvání i zasouvání, nežádoucí zvukové projevy, případně úplná ztráta funkce (zadření).



Obr. 6 Místa zadírání
 Fig. 6 Places of galling

Mechanické závady

Mezi mechanické závady můžeme zařadit poškození dílů větší silou, ztrátu předpětí závitových spojů s jejich následným uvolněním a poškození dílů vysokocyklovou únavou.

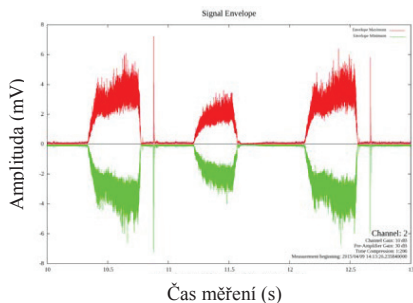


Obr. 7 Mechanické vady
 Fig. 7 Mechanical defects

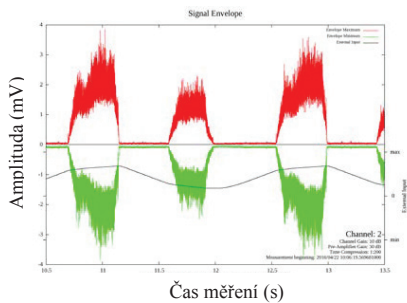
3. Výsledky

V níže uvedeném byly porovnávány AE charakteristiky válců nepoškozených a poškozených. Frekvenční rozsah signálu se pohyboval od 50 do 400 kHz. V souvislosti s typem poškození byly některé frekvenční složky signálu potlačeny a u několika typů poškození se objevily nové dominantní frekvence. Z grafů je zřejmé, že zaznamenané signály jsou výrazné jen v oblasti kolem horní a dolní úvratí pístu. Presentované analýzy frekvenčního spektra jsou silně závislé na typu poškození a počtu „najatých“ cyklů.

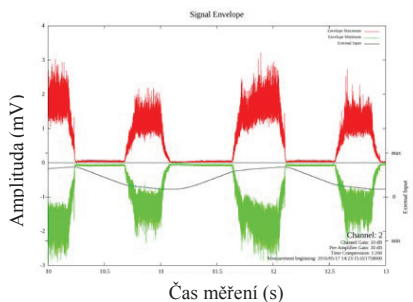
Na obr. 8 jsou zobrazeny obálky signálu válce č. 14 v různých provozních stavech. Konkrétně se jedná o záběhový stav (obr. 8a), stav po záběhu válce (obr. 8b,c) a obr. 8d reprezentuje poškozený stav (uvolněné 4 šrouby pod pístem). Všechny stavy byly porovnány a ze závěrů vyplývá, že tvar obálky signálu je v případech a,b,c velmi podobný. Poškozený válec se liší nejvíce. Amplituda válce v povýrobním stavu je vyšší, než u válců po záběhu, což je typické u pohyblivých součástí uvedených do provozu. U poškozeného válce je amplituda dvojnásobná. Po provedení opakovaných měření stejných válců (nepoškozený X poškozený) byla zjištěna velmi silná podobnost.



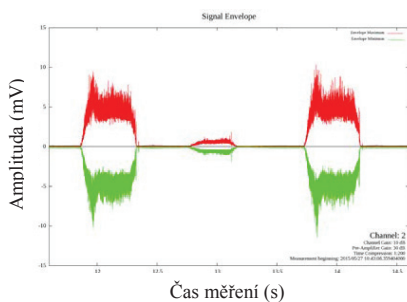
(a) povýrobní stav



(b) pozáběhový stav



(c) pozáběhový stav

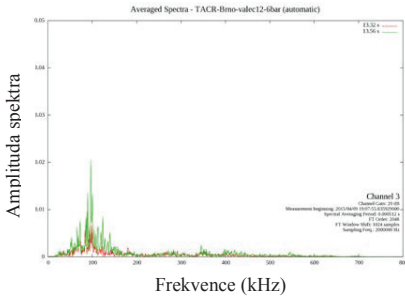


(d) poškozený válec

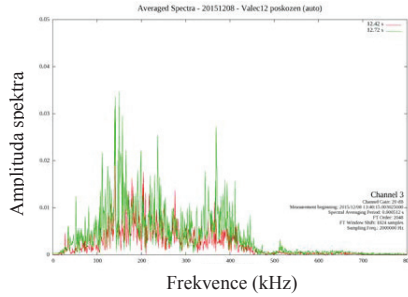
Obr. 8 Obálky signálu válce č. 14 v různých provozních stavech

Fig. 8 Signal envelope of cylinder No. 14 in different conditions

Obrázky č. 9 a 10 znázorňují frekvenční spektra signálu válců č. 4 a 12 v povýrobním stavu a ve stavu poškození. Amplituda spektra poškozených válců je vyšší a šířka pásma je výrazně odlišná než u válců bez poškození po výrobě.



(a) povýrobní stav

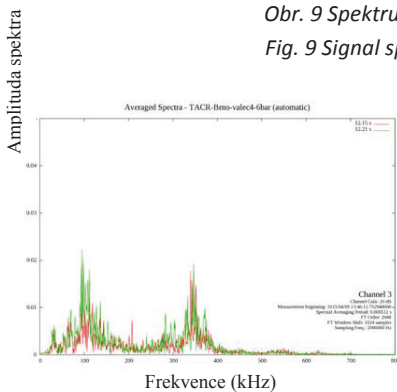


(b) poškozený

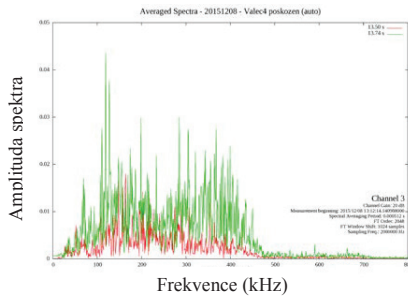
Obr. 9 Spektrum signálu na válci č. 12

Fig. 9 Signal spectrum of cylinder No. 12

12



(c) povýrobní stav



(d) poškozený

Obr. 10 Spektrum signálu na válci č. 4

Fig. 10 Signal spectrum of cylinder No. 4

Základní kritérium analyzovaného signálu je šířka frekvenčního pásma "BW", amplituda spektra "A" a výskyt nové (dominantní) frekvence v důsledku vzniklého poškození. Na základě těchto ukazatelů byl vyvinut nový koeficient odhalení poškození "DAE", který hodnotí a klasifikuje úroveň (závažnost) poškození na základě zjištěných diferencí mezi výše zmíněnými kritérii.

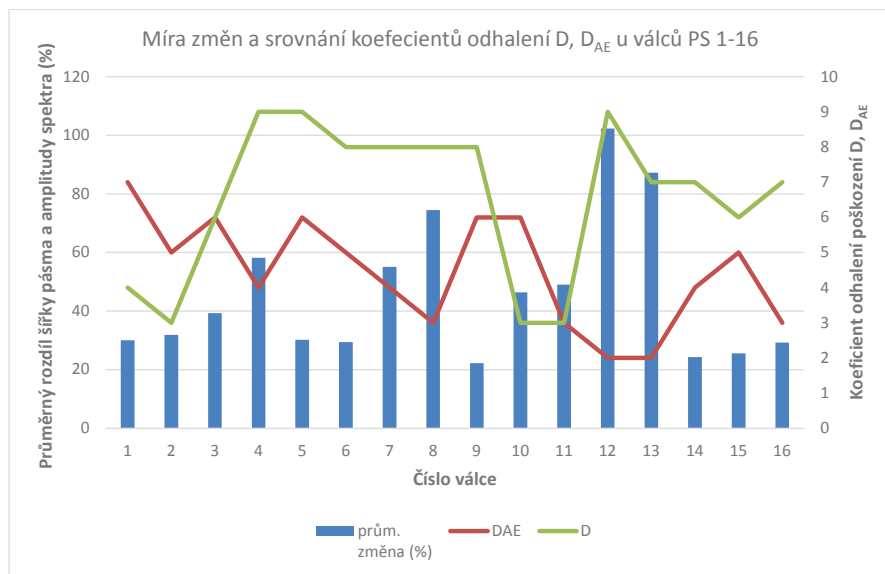
Ve frekvenčním spektru byly rozpoznány tři základní charakteristiky definované dominantní frekvencí šířky pásma - BW1 (A_{1max} na 100 kHz), BW2 (A_{2max} na 280 kHz) and B3 (A_{3max} na 360 kHz) a velikostí amplitudy spektra. Šířka pásma všech nepoškozených válců se pohybovala od 50 do 120 kHz (BW1), 270 do 310 kHz (BW2) a 340 do 370 kHz (BW3).

Tabulka 1 uvádí některé typy uměle vytvořených vad a míru změn v důsledku přítomnosti některého z typů vad válce and hodnotí změny výše zmíněných parametrů vč. navrženého faktoru D_{AE} . Nejvýraznější procentuální změny byly zaznamenány u válců č. 4, 12 a 14.

Tab. 1 Změny parametrů poškození „BW“, „A“ a koeficient odhalení „ D_{AE} “ válců PS

č. válce	typ vady	popis vady	změna BW (%)	změna amplitudy (%)	průměrná změna (%)	nové složky (kHz)	S1	S2	D	D_{AE}
4	PP 03	chybějící O-kr.	50	66	58	200	3	10	9	4
	(PP 04)						3	10	9	
12	NP 07	přestřížený O-kr.	72	133	102	180, 235, 390	3	10	9	2
	(NP 08)						3	10	9	
14	M 03	povolení 4 šroubů pod pístem	16	33	24	75, 120, 225, 390	3	10	7	4

Grafické znázornění nejdůležitějších parametrů tab. 1 je na obr. 11. Tento graf jasně ukazuje, že metoda AE poskytuje spolehlivou detekci poškození zejména tam, kde jsou současně používané metody nedostatečné.



Obr. 11 Změny a srovnání koeficientů odhalení u válců PS 1-16

Fig. 11 Rate changes caused by that damage coefficient and detection (D_{AE})

4. Závěr

Získané výsledky prokazují významnou citlivost signálu AE v této aplikační oblasti pneumatických systémů. Na základě analýzy množství dat byly vybrány vhodné akustické parametry signálu, které mohou být použity pro přesnější diagnostiku technického stavu pneumatických komponent použitých pro vývoj testování pneumatického zařízení.

Současné výsledky ukazují dobrou shodu a opakovatelnost. Aplikace akustické emise v této oblasti diagnostiky přináší vyšší kvalitu výsledků než v současné době používané metody. Ukazuje se, že diagnostika pneumatických válců se může stát novou oblastí aplikace metody akustické emise.

Bezvadný válec a válec s určitou vadou má při pracovním cyklu po vyhodnocení signálu AE (ať z průběhu obálky signálu nebo použitím spektrální analýzy) celkem jednoznačné charakteristiky, které válec a určitou vadu charakterizují. Závěry z těchto měření byly shrnuty do tabulky 1 a byl vyvinut koeficient odhalení D_{AE} , který určuje schopnost odhalení vady analýzou AE. Jako velmi kladný přínos lze brát fakt, že je koeficient odhalení D_{AE} nižší než D (větší pravděpodobnost odhalení vady) především u těch vad, které mají velký koeficient závažnosti S_2 (10) a velký koeficient odhalení D (7-9).

Nejzávažnější vady válců jsou takové, které mají velký stupeň závažnosti S_2 , jenž zohledňuje nejhorší možné následky vzhledem k zákazníkovi. Jako kritérium pro kritickou vadu je stanoven součin koeficientů $S_2 * D$ větší než 60.

Poděkování

Výsledky prezentované v tomto příspěvku souvisí s řešením projektu Technologické agentury České republiky číslo TA04011374 "Nový systém bezdemontážní diagnostiky pneumatických a hydraulických komponent", použité laboratorní vybavení bylo získáno v rámci projektu NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a jeho následující etapy podporované v rámci projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) financovaného z prostředků Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v programu „National Sustainability Programme I“ a práce byla také podporována v rámci projektu FSI-S-14-2329 „Vibroizolační systém užitečného nákladu kosmických nosičů“.

Literatura

- [1] LYMPERTOS, Efstratios M. a Evangelos S. DERMATAS. Acoustic emission source location in dispersive media. *Signal Processing*. 2007, 87(12), 3218-3225. DOI: 10.1016/j.sigpro.2007.05.010. ISSN01651684
- [2] KAWAMOTO, Sumire; WILLIAMS, Sam. Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Base Composites. Forest Products Research Institute, Ibaraki, Japan 1 R. Chemist Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin
- [3] Lixin Gao, Fenlou Zai, Shanbin Su, Huaqing Wang, Peng Chen And Limei Liu. Study And Application Of Acoustic Emission Testing In Fault Diagnosis Of Low-Speed Heavy-Duty Gears Sensors 2011, 11, 599-611; Doi:10.3390/S110100599

- [4] KAEWWAEWNOI, W, A.; PRATEEPASEN, P.; Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. Measurement. 2010, No. 43, p. 274-282.
- [5] R. K. Miller, E.v.K. Hill: Acoustic Emission Testing, NDT Handbook, Vol. 6, 3rd edition, ASNT, Columbus, 2005. ISBN 1-57117-106-1.
- [6] British-Pneumatic-Handbook, P NEUMATIC T ECHNOLOGY, [cit. 13. 6. 2016]
<http://www.adi-sales.com/docs/engineeringtools/British-Pneumatic-Handbook.pdf>
- [7] Tie Rod Design Pneumatic Cylinders, [cit. 16. 6. 2016]
http://www.comoso.com/uploads/products/downloads/Econoram_Pages_from_AU03_SB0900P_2NA.pdf
- [8] Local Parker Cylinder Distributor. Industrial Cylinder Products Hydraulic and Pneumatic Cylinders. Catalog: 0106-7 (01/11), [cit. 6. 7. 2016]
https://www.parker.com/literature/Industrial%20Cylinder/cylinder/cat/english/0106-7%20Industrial%20Cylinder%20Products/0106-7_2A-2AN-MA.pdf
- [9] PLOCK, A.A.; HSU, S.Y.S.: Leak Detection Using Acoustic Emission. Journal of Acoustic Emission. 1982, No. 4, p. 237-243.
- [10] LAODENO, Rem Nunez, Hideo NISHINO a Kenichi YOSHIDA. Characterization of AE Signals Generated by Gas Leak on Pipe with Artificial Defect at Different WallThickness. MATERIALS TRANSACTIONS. 2008, 49(10), 2341-2346.
 DOI: 10.2320/matertrans.MRA2008175.ISSN1347-5320.:
- [11] LEE, Sang-Guk, Jong-Hyuck PARK, YOOL, LEE a HONG. Evaluation of internal leak in valve using acoustic emission method. In: Experimental Mechanics in Nano and Biotechnology, Pts 1 and 2. Cheju Isl, SOUTH KOREA: Korea Adv Inst Sci & Technol; Asian Comm Expt Mech, 2006, s. 661-664. ISBN 0-87849-415-4. ISSN 1013-9826.
- [12] Miroslav Jána. Vady přímočarých pneumatiků PS. TA04011374 - Nový systém bezdemon-
 tážní diagnostiky pneumatických a hydraulických komponent. Polička 5. 5. 2015



HYSTERESNÍ SMYČKA FEROMAGNETIK HYSTERESIS LOOP OF FERROMAGNETICS

Štěpán JÍRA*, Jaroslav FIALA**

* Čermákova 46, Plzeň

** Západočeská univerzita v Plzni, Nové technologie – Výzkumné centrum

Abstrakt

Hysteresní smyčka představuje odezvu feromagnetika na cyklické změny vnějšího magnetického pole. Tato odezva je (při nepřilíživých velkých intenzitách vnějšího pole) vyvolána posunem Blochových stěn oddělujících sousední Weissovy domény spontánní magnetisace, z nichž je feromagnetikum poskládáno. Charakter této odezvy, tedy tvar hysteresní smyčky závisí (na potenciálovém profilu reakční trajektorie, čili) na odporu, který při svém pohybu Blochovy stěny musí překonávat. Ten odpor pak je dán strukturou feromagnetického materiálu, již měření hysteresní smyčky umožňuje tímto způsobem „sondovat, ohmatávat“. Ve svém příspěvku demonstrujeme na řadě příkladů z inženýrské praxe, jak a do jaké míry může být hysteresní smyčka ovlivněna různými technologickými procesy. A vysvětlujeme, jaké jsou mikrostrukturní mechanismy, jimiž se toto ovlivnění uskutečňuje. To, že hysteresní smyčka feromagnetického materiálu silně závisí na jeho struktuře, je příslibem možného využití magnetometrických měření při monitorování subtilních strukturních změn doprovázejících cyklické zatěžování ocelových dílců za účelem zpřesnění odhadu jejich aktuální zbytkové životnosti.

Klíčová slova: feromagnetismus, hysteresní smyčka, strukturní citlivost, dynamické zatěžování

Abstract

Hysteresis loop of a ferromagnetic represents its response to cyclic changes of the magnetic field to which it is subjected. This response (in case that the magnetic field is not too strong) is caused by motion of Bloch walls separating neighbouring spontaneously magnetized regions, the so-called Weiss domains, of which the body of the ferromagnetic is put together. The nature of this response, i.e. the form of the hysteresis loop, depends (on the potential profile of the reaction trajectory, i.e.) on the resistance that the Bloch walls must overcome in their motion. This resistance then is given by the structure of ferromagnetic material, which can be “groped” in this way when gauging the hysteresis loop. By a great number of examples from engineering practice we demonstrate how and to what degree the hysteresis loop may be influenced by various technological processes. And we explain what are the microstructural mechanisms by which this influence is effectuated. The remarkable structure-sensitivity of the hysteresis loop suggests that magnetometric measurement might prove competent as another technique for monitoring subtle structural changes brought about by dynamic loading in machine parts with the aim to make estimation of their residual service life more reliable.

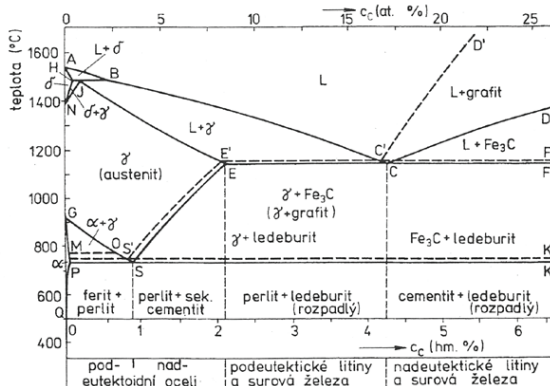
Key words: ferromagnetism, hysteresis loop, structure-sensitivity, dynamic loading

1. Úvod

Specifickým posláním defektoskopie je hledat a zkoumat defekty, vady. A protože skutečnosti tohoto světa jsou nestálé, časem se mění a leckteré změny bývají k horšímu, je pak smyslem a cílem směřování defektoskopie odhadnout zbytkovou živostnost předmětného dílce, tedy kdy se jeho defekty, vady stanou s jeho ustrojením a funkcí nadále neslučitelné. Tohoto svého plného smyslu dosahuje defektoskopie lépe, když hodnotí nejen strukturní vady jakožto definované odchylky od dohodnutých standardů, ale strukturu zkoušeného objektu jako celek, a to průběžně, během celé doby jeho exploatace. Leckteré z technik NDT takové absolutní sledování a hodnocení struktury dobře umožňují. Typickým příkladem jsou magnetometrická měření, např. koercimetrie v případech feromagnetických materiálů [1-4].

2. Feromagnetický stav

Síly, kterými na sebe působí atomy, ionty a molekuly v různých materiálech, jsou podmíněny rozložením elektrických nábojů, jejichž nositeli jsou elektrony a jádra atomů. Jedná se o síly elektrické a magnetické. Magnetická silová pole vznikají obecně pohybem elektrických nábojů. V případě elektronů se jedná o pohyb orbitální (kolem jádra) a spinový (kolem osy elektronu). Vložíme-li těleso z uvažovaného materiálu do vnějšího magnetického pole, pohyby elektronů, které vyvolávají jeho vnitřní magnetické pole, jsou tím ovlivněny. Dojde k interakci vnějšího a vnitřního magnetického pole. Mluvíme o magnetizaci (tělesa z) uvažovaného materiálu. Velký praktický význam má tento jev u feromagnetik, materiálů feromagnetických: jejich vnitřní magnetické pole se orientuje ve směru vnějšího magnetického pole, které je tím výrazně zesíleno [5, 6]. Instalací vnějšího magnetického pole se poruší rovnováha, která ve struktuře panovala před tou instalací. Což vyvolá ve smyslu Le Chatelierova – Braunova – Lenzova principu relaxační děj, směřující k rušení účinků té instalace. Děj spojený s prací vykonanou na úkor energie vnějšího magnetického pole. Proti silám, jejichž rovnováhou vznikla struktura, kterou měl materiál uvažovaného tělesa před tím, než se to těleso octlo ve vnějším magnetickém poli. T. j. proti Brownově energii tepelného pohybu, jenž jakýkoli pořádek (nejen orientaci vnitřního magnetického pole vůči směru vnějšího magnetického pole) bourá a proti silám meziatomovým. A to je právě to, co umožňuje strukturu feromagnetického materiálu na základě jeho odezvy na vnější magnetické pole (jeho odporu, který klade změnám vnějšího magnetického pole) hodnotit [7]. A protože tyto odezva (tedy magnetizace) feromagnetika je silná, je hodnocení struktury feromagnetických materiálů tímto způsobem velmi citlivé. Ne všechny látky jsou feromagnetické. Právě naopak: to, že nějaká látka je feromagnetická, je výjimkou, nikoli pravidlem. Shodou okolností však jeví feromagnetismus železo, materiál, jehož se vyrábí vesmět za rok – s výjimkou cementu – vůbec nejvíce (loni 1,6 miliard tun). A feromagnetické jsou i mnohé jeho slitiny, byť ne všechny: přísadou niklu nebo manganu – od určitého procentního obsahu – železo feromagnetismus ztrácí. Ale i čisté železo ztrácí feromagnetismus při teplotách vyšších než 760°C, kdy energie tepelného pohybu rozvrátí orientaci, tedy uspořádání vnitřního („molekulárního“) magnetického pole ve směru vnějšího („vřtšněného“, makroskopického) magnetického pole (obr. 1). Je tedy lépe hovořit o feromagnetickém stavu látky než o feromagnetických látkách. Stojí za povšimnutí, že feromagnetismus jeví také látky nekovové, například ferity [8], které mají velký technický význam jak při stavbě transformátorů, tak i jako permanentní magnety. K feritům patří též minerál magnetit Fe₃O₄, jehož magnetických vlastností si lidé všimli již ve starověku a jehož jméno se stalo základem pro označení všech magnetických jevů vůbec.

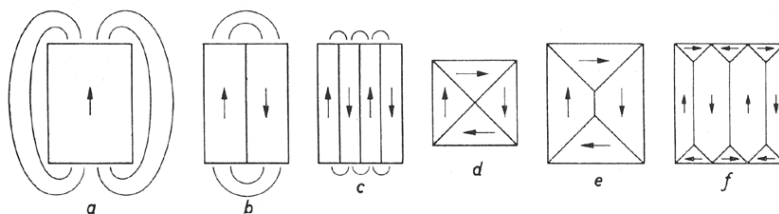


Obr. 1. Rovnovážný diagram Fe-C.
Fig. 1. Fe-C equilibrium diagram.

Spinové magnetické momenty, které vznikají otáčením elektronů (v obalech sousedních atomů) kolem jejich osy (osy spinového pohybu elektronů) na sebe vzájemně působí a účinkem této interakce se ve feromagnetiku (látce, která je ve feromagnetickém stavu) orientují paralelně. A to v závislosti na orientaci příslušného krystalitu s ohledem na jeho vnitřní stavbu (magnetická krystalová anisotropie [Dodatek A]), mechanická napětí a elastické vlastnosti (magnetická elastická anisotropie [Dodatek B]) [9]. Což se děje, i když se feromagnetikum nalézá mimo jakékoli vnější magnetické pole, takže mluvíme o spontánní magnetizaci účinkem vnitřního (tzv. molekulárního) magnetického pole. A to je pak vlastní příčinou toho, že reakce feromagnetika na jeho vložení do vnějšího magnetického pole je tak silná. Účinkem molekulárního magnetického pole je totiž feromagnetikum ještě před vnesením do vnějšího magnetického pole orientováno „per partes“ v blocích (tzv. Weissových magnetických doménách), v rámci kterých se „stihlo uplatnit“ orientující účinek vnitřního molekulárního magnetického pole. Jako když tuhne tavenina: zpravidla nevznikne (pokud pro to nejsou vytvořeny zvláštní podmínky) monokrystal, ale polykrystalický agregát, jenž je výsledkem společného účinku – a konkurence – (mono)krystalických domén – při jejich nukleaci a růstu z („triangulaci claimů na katastru“) dosud neztuhlé taveniny. A jako je polykrystalický agregát navenek (pseudo-) izotropní, neboť jednotlivé krystality vyrostly z různých orientovaných zárodků, tak je i feromagnetikum v „původním“ či také „panenském“ stavu (tedy dříve než bylo vnořeno do jakéhokoli magnetického pole) navenek (z makroskopického hlediska) nemagnetické, neboť magnetické momenty jednotlivých Weissových domén mají (podle místa v krystalitu kde vznikly a následně rostly) různou orientaci. Magnetizace feromagnetika vnějším magnetickým polem se pak děje procesem, při kterém se Weissovy domény, vzniklé v jeho panenském stavu účinkem vnitřního molekulárního magnetického pole, uplatní jako „prefabrikáty“. Což je procedura energeticky mnohem méně náročná než kdyby bylo vnějším magnetickým polem nutno orientovat spinový moment každého jednotlivého atomu zvlášť [10].

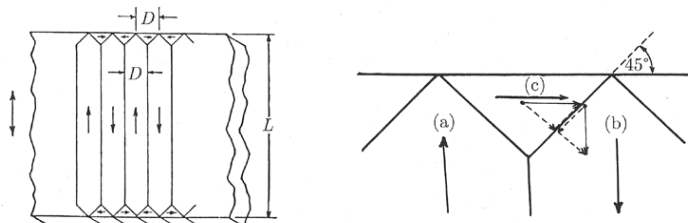
Při vzniku, růstu a proměnách magnetické doménové struktury krystalitů feromagnetika se vedle jejich magnetické krystalové a magnetoelastické anisotropie uplatňuje též geometrie (anisotropie) „mesoskopického“ magnetického (magnetostatického) pole jednotlivých Weissových domén. Weissova doména je (malým) magnetem, jehož moment je superposicí magnetických spinových momentů všech atomů, které tu doménu tvoří. (Je tedy větší než „mikroskopický“ [molekulární]

moment spinový a menší než „makroskopický“ magnetický moment tělesa tvořeného uvažovaným feromagnetikem.) Energie magnetostatického pole, buzeného Weissovou doménou, je tím větší, čím větší je magnetický tok uzavírající se jejím vnějším okolím. Z tohoto hlediska je tedy výhodnější, aby krystalit nebyl tvořen jedinou Weissovou doménou (obr. 2a), ale rozpadl se na velký počet opačně orientovaných domén (obr. 2b,c). To však na druhé straně zvyšuje energii krystalitu: jednak proto, že opačně orientované domény se odpuzují, jednak proto, že se tak zvětší celková plocha tzv. Blochových stěn, které tvoří mezibloková rozhraní a jsou nadány energií, jež je jejich ploše úměrná (u železa asi $0,001 \text{ J/m}^2$). Výsledná velikost Weissových domén je proto dána rovnováhou mezi rozhranovou energií Blochových stěn, energií magnetostatickou a (tzv. výměnnou) energií vzájemného působení spinových momentů, jímž jest vyvolána spontánní magnetizace. Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje tuto bilanci, je pak energie magnetoelastická [Dodatek B].



Obr. 2. Vznik doménové struktury.
Fig. 2. Formation of the domain structure.

Kromě velikosti Weissových domén ovlivňuje magnetickou energii krystalitu také jejich geometrické uspořádání. Jsou-li deskovité (tyčovitě) vertikální domény v konfiguraci znázorněné na obr. 2 d, e, f doplňovány doménami uzávěrovými, jejichž moment je horizontální, tedy k momentu vertikálních domén kolmý, pak se na stěně mezi uzávěrovou a vertikální doménou tangenciální složky magnetostatického pole vyruší a normálové složky na sebe spojitě naváží. Neobjeví se tedy volné póly (zřídla a nory indukčních silokřivek) a magnetostatické pole vymizí (obr. 3). Na druhé straně se však přitom zvětšuje celková plocha a tedy i energie Blochových meziatomových rozhraní.

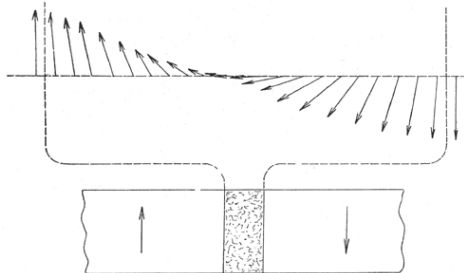


Obr. 3. Vertikální deskovité Weissovy domény v kombinaci s trojhrannými prismatickými doménami uzávěrovými.

Fig. 3. Vertically oriented tabular Weiss domains combined with triangular prism closure domains.

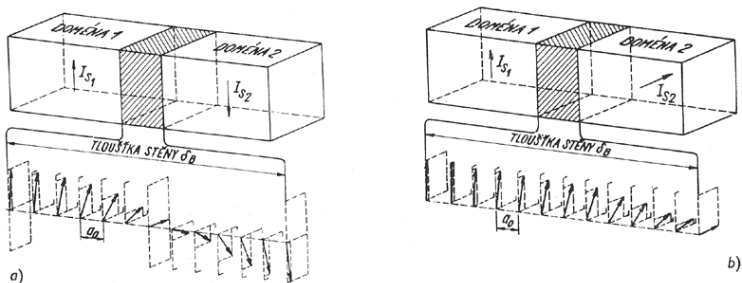
V rámci Blochovy stěny se uskutečňuje postupný přechod od orientace magnetických momentů jedné Weissovy domény k orientaci domény sousední (obr. 4). A to je s hlediska výměnné energie vzájemného působení spinových momentů méně náročné, než kdyby (obecně odlišná) spontánní magnetizace domén oddělovaných Blochovou stěnou na sebe navazovala bezprostředně (na obr. 5

jsou znázorněny dva případy, kdy úhel mezi magnetickými momenty sousedních domén je 180° a 90° . Z tohoto hlediska by tedy bylo výhodné, aby tloušťka Blochovy stěny byla co největší. Vzhledem k magnetické krystalové anisotropii je však zřejmé, že energie magnetických spinových momentů uvnitř Blochovy stěny musí být větší než energie magnetických momentů Weissových domén tou Blochovou stěnou oddělovaných (spojovaných), neboť těm přísluší, jakožto směřům spontánní magnetisace, energie nejmenší. Takže ty Blochovy stěny by měly být z tohoto důvodu co nejužší, aby objem prostoru, který zaujímají, byl co nejmenší. Ze sváru těch protichůdných aspektů pak vychází, že Blochova stěna je typicky koloidní $2\frac{1}{2}$ rozměrný útvar o tloušťce mezi 10 a 100 nanometry (u železa cca 40 nm) [11, 12].



Obr. 4. Schema Blochovy stěny.

Fig. 4. Schematic representation of a Bloch wall.



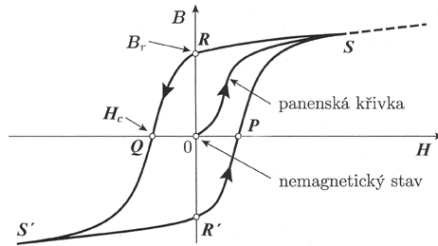
Obr. 5. Orientace spinů ve 180° Blochově stěně (a) a v 90° Blochově stěně (b).

Fig. 5. Spin directions in a 180° Bloch wall (a) and in a 90° Bloch wall (b).

Feromagnetikum má tedy magnetickou strukturu tvořenou Weissovými doménami a definovanou Blochovými stěnami. Strukturalizace doménového pole feromagnetika je výsledkem mnoha vlivů: vzájemného působení spinových momentů sousedních atomů (vyjádřeného tzv. výměnnou energií), rozložení atomů v jednotlivých krystalitech feromagnetika, tj. jeho krystalovou strukturou (včetně různých odchylek od struktury ideální) a distribuce (textury) krystalitů ve struktuře feromagnetika jakožto polykrystalického agregátu, energie magnetostatické a magnetoelastické. Tyto vlivy se místo od místa ve feromagnetiku uplatňují různou měrou a proto je jeho doménová struktura heterogenní. Různorodost doménové struktury feromagnetika se významně uplatňuje při jeho magnetizaci, tedy při procesech, jež jsou vyvolány vnesením feromagnetika do vnějšího magnetického pole [13, 14].

3. Magnetizační děj

Jsou-li Weissovy domény orientovány ve feromagnetickém tělese takovým způsobem, že vektorový součet jejich magnetických momentů je roven nule, je feromagnetikum odmagnetováno a říkáme, že je v panenském stavu. Začneme-li pak na něj působit vnějším magnetickým polem, bude s jeho intenzitou H indukce feromagnetika B zprvu podél tzv. panenské křivky rychle růst (obr. 6), ale v oblasti S dochází k nasycení. To znamená, že všechny Weissovy domény se již zorientovaly do směru vnějšího pole. Jestliže potom intenzitu vnějšího pole H zmenšujeme, indukce feromagnetika B neklesá po křivce SO , ale po křivce SR . Když dosáhneme hodnotu $H = 0$, je látka ještě stále zmagnetizována, udržuje si určitou nenulovou (remanentní či zbytkovou) hodnotu indukce B_r . K tomu, aby se magnetická

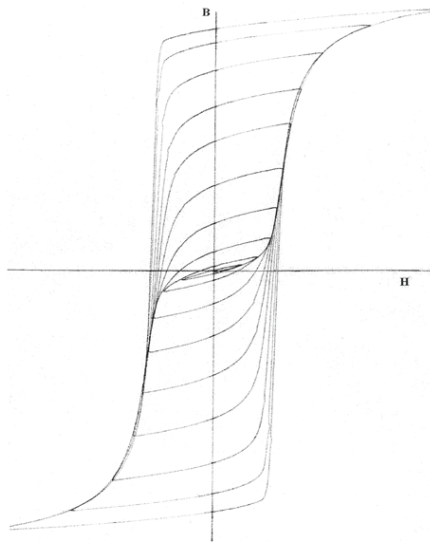


Obr. 6. Hysteresní smyčka feromagnetika.

Fig. 6. The hysteresis loop of a ferromagnetic material.

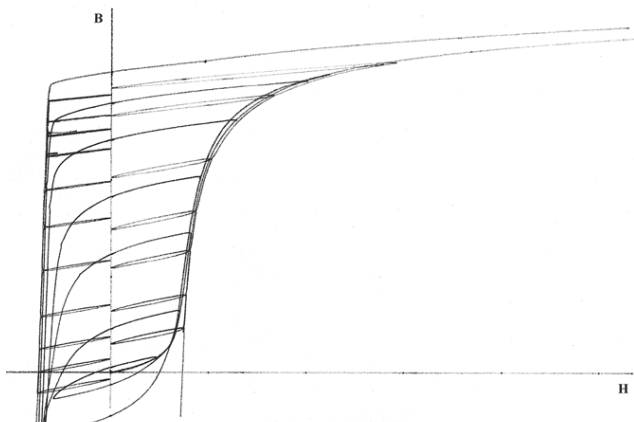
indukce feromagnetika opět vynulovala, musí se použít pole obráceného směru o intenzitě H_c , které říkáme koerzitivní síla. Když následně zvyšujeme H do velkých záporných hodnot a pak opět do velkých kladných hodnot, mění se indukce feromagnetika B podél křivky $SRQS'R'PS$ označované

jako hysteresní smyčka (indukční diagram). Význačným rysem magnetické hysterese jest, že k jedné hodnotě intenzity magnetického pole nepřísluší jediná hodnota indukce (jako tomu je u panenské křivky), ale hodnot nekonečně mnoho. Viz soubor hysteresních smyček zaregistrovaných ve střídavém magnetickém poli symetricky cyklujícím v intervalu $(-H, +H)$ s postupně se zvětšující amplitudou H (obr. 7) a případně ještě dalším poli, cyklujícím v intervalech $(0, +H)$ a $(-H, 0)$, viz obr. 8.



Obr. 7. Soubor hysteresních smyček měřených ve střídavém magnetickém poli symetricky cyklujícím v oboru $(-H, +H)$ s postupně se zvětšující amplitudou H .

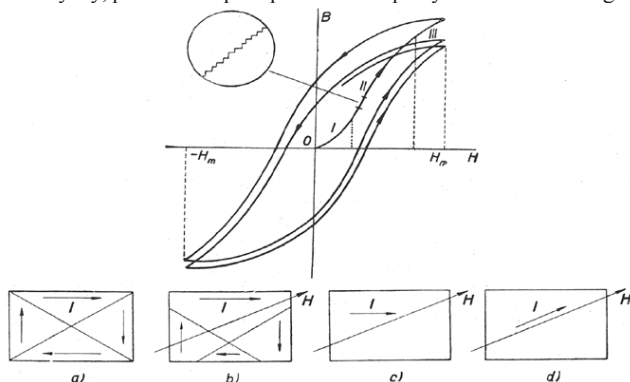
Fig. 7. Examination of the state of magnetization of a solid as a function of a magnetic field alternating in the range of $(-H, +H)$ with successively growing amplitude H .



Obr. 8. Soubor hysteresečních smyček měřených ve střídavém magnetickém poli intenzity H_1 superponovaném dalším střídavým magnetickým polem H_2 o menší amplitudě, které cykluje v oboru $(0, +H_1)$ resp. $(-H_1, 0)$.

Fig. 8. Magnetization of a solid in an alternating field H_1 , superposed by another field H_2 , of smaller amplitude, alternating in the range of $(0, +H_1)$ or $(-H_1, 0)$, respectively.

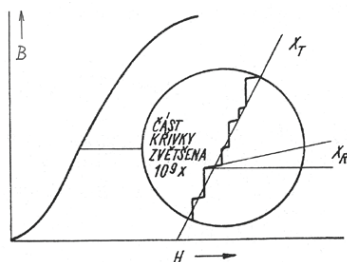
Z toho vyplývá, že magnetický stav feromagnetika není hodnotou intenzity vnějšího magnetického pole jednoznačně určen, nýbrž záleží na tom, v jakém magnetickém stavu bylo feromagnetikum předtím (přesněji, jakými magnetickými stavy procházelo feromagnetikum předtím). Skutečnost, že odmagnetování látky probíhá po jiné křivce než její magnetování, že se zpožďuje za poklesem intenzity vnějšího magnetického pole, svědčí o tom, že energie, vložená do feromagnetika při jeho magnetizaci, se při demagnetizaci zcela nerecuperuje. Část magnetizační energie se v průběhu hysteresečního cyklu ztrácí a mění se v teplo. Měrou takto disipované energie je plocha hystereseční smyčky, příčinou disipace pak mikroskopický mechanismus magnetizace.



Obr. 9. Vývoj doménové struktury v průběhu magnetizace. Směr magnetizace jednotlivých Weissových domén je označen šipkami, směr vnějšího magnetického pole písmenem H .

Fig. 9. Development of the domain structure during magnetization. Directions of the magnetic moments of individual Weiss domains are indicated by arrows, the direction of the outside magnetic field is denoted by letter H .

Magnetizace a demagnetizace feromagnetika se totiž dějí přeměnami jeho doménové struktury, a to hlavně posuvem Blochových rozhraní mezi Weissovými doménami a stáčením vektoru jejich spontánní magnetizace. Při malých intenzitách vnějšího pole budou domény, orientované výhodně vzhledem ke směru pole, zvětšovat svůj objem na úkor domén orientovaných nevýhodně posuvem Blochových rozhraní, která oddělují sousední domény (obr. 9b), až při dosažení určité intenzity pole bude celé feromagnetikum tvořit jedinou doménu (obr. 9c). A roste-li pak intenzita magnetického pole dále, počne se spontánní magnetizace postupně stáčet do směru vnějšího pole (obr. 9d), což je proces energeticky náročnější než posuv Blochových stěn.



Obr. 10. Barkhausenovy skoky na magnetizační křivce.
Fig. 10. Barkhausen jumps on the magnetization curve.

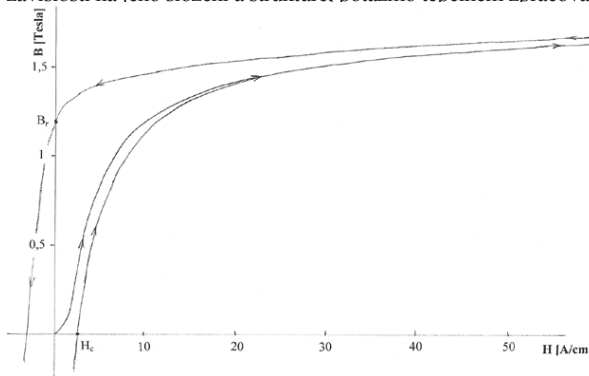
Pohyb mezidoménových rozhraní brzdí tzv. dispersní magnetická pole, buzená v okolí rozličných mikroheterogenit atomové struktury feromagnetika (substitučních či intersticiálních atomů, vakancí, dislokací, vrstevných poruch či hranic více či méně cizorodých resp./a koherentních částic a zm, necelistvostí různé etiologie a s nimi spojených vratných i nevratných deformací a pnutí). Účinkem dispersních magnetických polí se část kinetické energie usměrněného pohybu, kterou Weissovy domény získaly z vnějšího magnetického pole, přeměňuje na neuspořádaný tepelný pohyb zúčastněných atomů – čímž se jako magnetická složka z energetické bilance vytrácí. Základním předpokladem pro hysterese feromagnetik jsou tedy jejich (magneticky aktivní) defekty atomové struktury, které mohou sloužit jako (více či méně časné) pasti Blochových rozhraní. Diskrétní rozložení těchto pastí, mezi nimiž se Blochova stěna přesouvá beze změny intenzity vnějšího magnetického pole, demonstruje Barkhausenův jev (obr. 10) [15, 16]. Pripomíná to skluzový pohyb dislokací v tuhém tělese za působení vnějších mechanických sil, popisovaný Hallovým – Petchovým vztahem

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

pro mez kluzu σ , Peierlsovu – Nabarrovu sílu σ_0 , brzdící posuv dislokací uvnitř mosaikového bloku, kde jsou potenciálové jámy mělké a součinitel k úměrný napětí, které je potřebné pro to, aby se dislokace vymanila z hluboké potenciálové jámy na rozhraní dvou mosaikových bloků o rozměru d . S tím, že mosaikové bloky jsou fixní a dislokace, čarová diskontinuita atomové struktury, je při svém skluzu protíná, zatímco styčné Weissovy domény magnetické domény se v průběhu magnetizace mění, a to tak, že se přitom jejich rozhraní, Blochova plošná diskontinuita magnetické struktury, „propasírovává“ skrze fixní potenciálové jámy difusního magnetického pole, buzeného nejružnějšími poruchami atomové struktury [17]. Množství pokusů i teoretických prací potvrdilo, že zvláště citlivá je na defekty atomové struktury hodnota H_c (obr. 6), té charakteristiky hysterese smyčky feromagnetika, kterou nazýváme koercitivní síla. Bylo např. zjištěno, že koercitivní síla feromagnetika je úměrná druhé odmocnině z jeho hustoty dislokací.

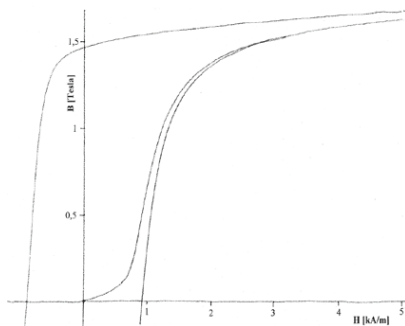
4. Strukturní citlivost

Tvar hysterese smyčky feromagnetika (obr. 11) je tedy určován interakcí jeho magnetické struktury (pole Weissových domén) a struktury atomové. Přitom velkou úlohu hrají zejména strukturální defekty, tj. nejrůznější odchylky atomové struktury od uspořádání ideálního, které podrobně charakterizují stav feromagnetického materiálu a umožňují citlivě monitorovat strukturální přeměny, jež se v tom materiálu dějí při jeho výrobě a exploataci [18]. Následující příklady ilustrují, jak velice se mění tvar hysterese smyčky resp. panenské magnetizační křivky prvotní magnetizace feromagnetika v závislosti na jeho složení a struktuře, potažmo tepelném zpracování.



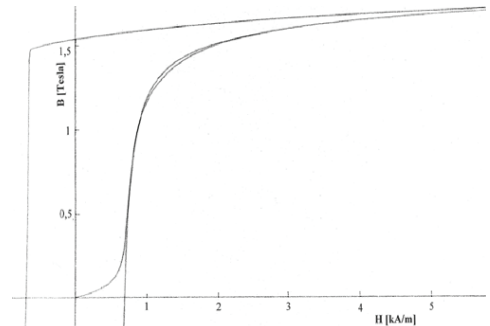
Obr. 11. Hysterese smyčka nelegované oceli na odlitky ČSN 422643.5, normalizačně žíhaná a popuštěná, v I. a II. kvadrantu.

Fig. 11. Part of the hysteresis loop for normalized and annealed ČSN 422643.5 plain carbon cast steel, in the 1st and 2nd quadrant.



Obr. 12. Hysterese smyčka oceli ČSN 16431 v kaleném stavu.

Fig. 12. Hysteresis loop of hardened ČSN 16431 high-grade steel.

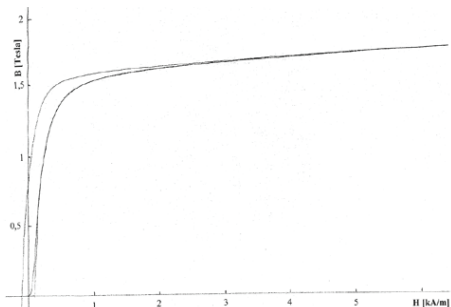


Obr. 13. Hysterese smyčka oceli ČSN 16431 v zušlechtěném stavu.

Fig. 13. Hysteresis loop of heat treated ČSN 16431 high-grade steel.

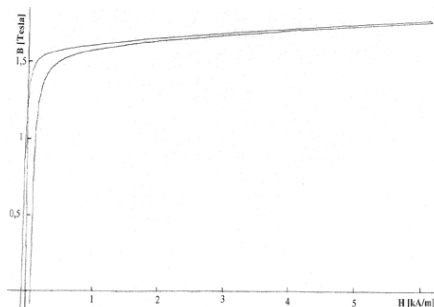
Tak např. obrázky 12 a 13 ukazují, jak se lišily hysterese smyčky oceli ČSN 16431, z níž byl zhotoven rotor velkého elektrického generátoru, když ocel byla ve stavu kaleném a ve stavu zušlechtěném. Obrázky 14 a 15 pak představují hysterese smyčky materiálu AREMA. To je velmi čistá měkká ocel, obsahující jen asi 0,1% příměsí (z toho méně než 0,02% uhlíku), která

vykazuje velmi nízkou koercitivní sílu při poměrně vysoké úrovni nasycené magnetisace (magnetického momentu jednotkového objemu feromagnetika). Aby se však těchto žádoucích magnetických vlastností skutečně dosáhlo, musí se při výrobě AREMY úzkostlivě dodržovat předepsané technologické postupy. Což právě je na těch dvou obrázcích vidět: obr. 14 je hysterese smyčka AREMY při nedodržení předepsaného režimu žihání a obr. 15 hysterese smyčka ideálně vyžihané AREMY. Na obr. 16 je pak znázorněno, jak se liší hysterese smyčky chromové oceli, obsahující 0,1%C a 28%Cr, když je tepelně zpracována různými způsoby podle popisu tohoto obrázku.



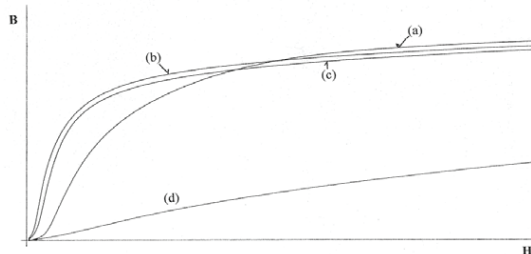
Obr. 14. Hysterese smyčka neideálně žihané oceli AREMA.

Fig. 14. Hysteresis loop for irregularly annealed AREMA steel.



Obr. 15. Hysterese smyčka ideálně vyžihané oceli AREMA.

Fig. 15. Hysteresis loop for regularly annealed AREMA steel.

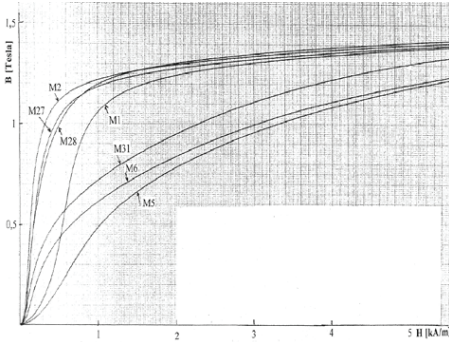


Obr. 16. Závislost křivky původní indukce na tepelném zpracování oceli, obsahující 0,1%C a 28% Cr: (a) 1050°C/30'pec; (b) 1200°C/30'pec; (c) 1250°C/30'pec; (d) 1200°C/30'voda do 650°C/pec do 400°C/voda.

Fig. 16. Influence of heat treatment on initial magnetization curve for a 28%Cr steel containing 0,1%C: (a) 1050°C/30 min/furnace; (b) 1200°C/30 min/furnace; (c) 1250°C/30 min/furnace; (d) 1200°C/30 min/water to 650°C/furnace to 400°C/water.

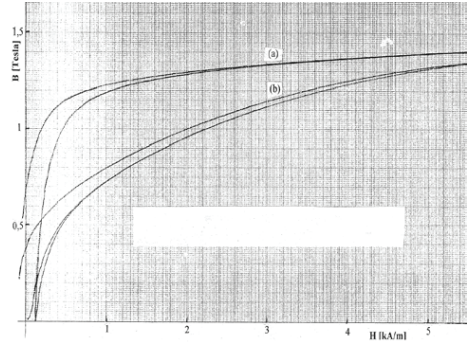
Další obrázky 17, 18, 19 a 20 se vztahují k oceli 015CH17M2B používané v energetice. Představují křivky počáteční (panenské) indukce této oceli při různém tepelném zpracování a demonstrují závislost její hysterese smyčky na výdrži při austenitizační teplotě a na rychlosti ochlazování.

Na následujících dvou obrázcích 21 a 22 je vidět jak se změní hysterese smyčka oceli AREMA vlivem elastické deformace, další obrázek 23 pak dokládá jak silná je závislost hysterese smyčky chromniklové austenitické oceli na obsahu δ -feritu.



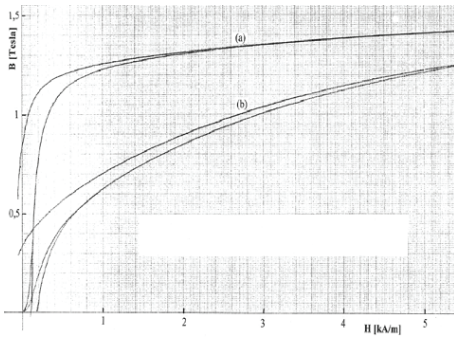
Obr. 17. Křivky původní indukce oceli 015CH17M2B po různém tepelném zpracování: M1 – 800°C/5 hod/vzduch; M5 – 800°C/5 hod/voda; M2 – 900°C/5 hod/vzduch; M6 – 900°C/5 hod/voda; M27 – 1000°C/1 hod/vzduch; M31 – 1000°C/1 hod/voda; M28 – 1100°C/1 hod/vzduch.

Fig. 17. Initial magnetization curves for steel 015CH17M2B after various heat treatments: M1 – 800°C/5 h/air; M5 – 800°C/5 h/water; M2 – 900°C/5 h/air; M6 – 900°C/5 h/water; M27 – 1000°C/1 h/air; M31 – 1000°C/1 h/water; M28 – 1100°C/1 h/air.



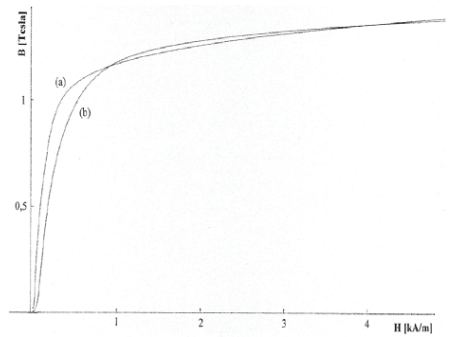
Obr. 18. Vliv rychlosti ochlazení z austenitizační teploty na tvar hysterese smyčky oceli 015CH17M2B: (a) 1000°C/1 hod/vzduch; (b) 1000°C/1 hod/voda.

Fig. 18. Effect of the rate of cooling from austenitizing temperature on shape of the hysteresis loop for steel 015CH17M2B: (a) 1000°C/1 h/air; (b) 1000°C/1 h/water.



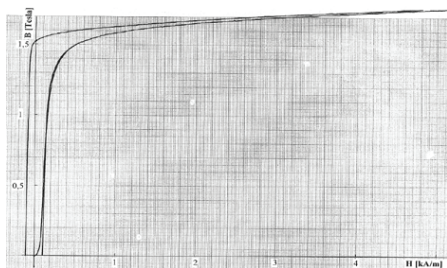
Obr. 19. Závislost hysterese smyčky oceli 015CH17M2B na ochlazovacím prostředí: (a) 900°C/5 hod/vzduch; (b) 900°C/5 hod/voda.

Fig. 19. Dependence of the hysteresis loop for steel 015CH17M2B on cooling media: (a) 900°C/5 h/air; (b) 900°C/5 h/water.



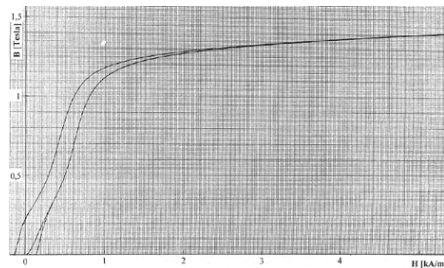
Obr. 20. Vliv výdrže při normalizační teplotě na panenskou magnetizační křivku oceli 015CH17M2B: (a) 1100°C/5 hod/vzduch; (b) 1100°C/1 hod/vzduch.

Fig. 20. Influence of the time of holding at the normalizing temperature on initial magnetization curve for steel 015CH17M2B: (a) 1100°C/5 h/air; (b) 1100°C/1 h/air.



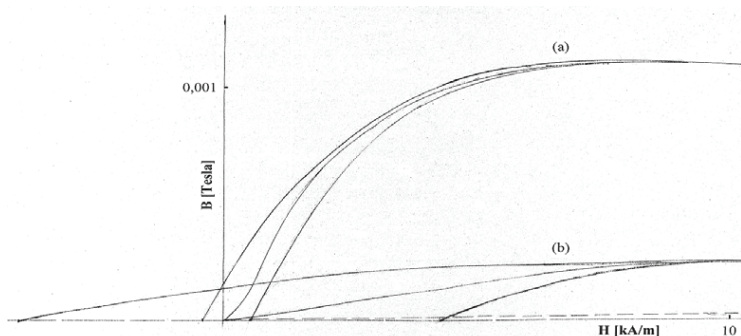
Obr. 21. Hysteresní smyčka AREMY – etalonový vzorek.

Fig. 21. Hysteresis loop for AREMA steel – standard sample.



Obr. 22. Hysteresní smyčka vzorku z oceli AREMA pružně smáčknutého ve svěráku.

Fig. 22. Hysteresis loop for a sample of AREMA steel elastically gripped in a vice.



Obr. 23. Magnetizační křivky železa α ve směrech [100], [110] a [111].

Fig. 23. Magnetization curves for Fe- α in the directions [100], [110] and [111].

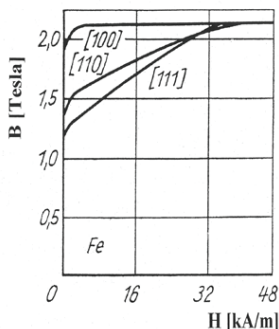
5. Závěr

Notre vie est faite de mort. Nous sommes sépulcres [19]. Cílem směřování relaxačního procesu, „životní dráhy“ předmětného systému, je jeho rovnovážný mezní stav. A různé způsoby testování, monitorování aktuálního, tedy nerovnovážného stavu systému (ať už nedestruktivní nebo destruktivní) jsou hledáním více nebo méně přesné odpovědi na otázku jak daleko od svého mezního stavu sledovaný systém jest, jak dlouhou cestu na svém „pochodu (k) smrti“ už urazil. V tomto příspěvku pak jsme přinesli zprávu o tom, že citlivým indikátorem zbytkové životnosti strojních dílců, pokud jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu, by mohl být tvar jejich (magnetické) hysteresní smyčky.

6. Dodatek A: Magnetická krystalová anisotropie

Krystaly jsou anizotropní, mají v různých směrech (vzhledem k poloze krystalových os) obecně různé vlastnosti. To se týká i magnetických vlastností feromagnetik. Jmenovitě magnetizační křivky $B = B(H)$ vyjadřující závislost magnetické indukce ve feromagnetiku B na intenzitě vnějšího magnetického pole H, resp. vztah $M = M(H)$ mezi intenzitou vnějšího magnetického pole H

a magnetizací feromagnetika M , tj. Ampérovým magnetickým momentem jeho objemové jednotky ($B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M \doteq \mu_0 \cdot M$, neboť $M = [\mu_r - 1] \cdot H$ a $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$, kde μ_0 je permeabilita vakua, čili indukční konstanta a poměrná permeabilita feromagnetik je $\mu_r \gg 1$) vycházejí při magnetování (mono)krystalu železa α v různých krystalografických směrech nejprve společně a prudce stoupají, při dalším zvyšování intenzity vnějšího magnetického pole H se však rozcházejí a postupně sytí (obr. 24). Magnetuje-li se krystal $Fe-\alpha$ ve směru jeho osy $[100]$, nastává syčení již při poměrně velmi nízké hodnotě intenzity magnetického pole H , zatímco v případech, že je směr vnějšího magnetického pole rovnoběžný s krystalografickým směrem $[110]$ nebo $[111]$, dosahuje se nasycení až při mnohem větších hodnotách $[20, 21]$. A to je jedno z hledisek, která určují směr spontánní magnetizace (molekulárního magnetického pole) v jednotlivých Weissových doménách.



Obr. 24. Magnetizační křivky železa α ve směrech $[100]$, $[110]$ a $[111]$.

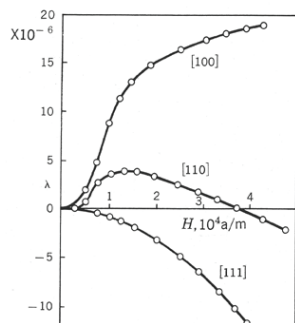
Fig. 24. Magnetization curves for $Fe-\alpha$ in the directions $[100]$, $[110]$ and $[111]$.

7. Dodatek B: Magnetická elastická anisotropie

Vnější rozměry a tvar feromagnetického krystalu se při magnetování mění; říká se tomu magnetostrikce. Délkové magnetostrikční změny jsou v různých směrech feromagnetického monokrystalu různé, a protože jsou vratné, mluvíme o magnetické elastické anisotropii.

Závislost relativního prodloužení (zkrácení) $\frac{\Delta l}{l}$ (tzv. koeficientu magnetostrikce, který

zpravidla označujeme jako λ) pro krystal $Fe-\alpha$ ve směrech $[100]$, $[110]$ a $[111]$ na intenzitě vnějšího magnetického pole H je znázorněna na obr. 25. Změna rozměru feromagnetického krystalu účinkem magnetického pole spotřebovuje část jeho energie a skutečnost, že v každém krystalografickém směru je takto spotřebovaná energie magnetického pole různá, je další příčinou toho, že orientace spontánní magnetizace (molekulárního magnetického pole) je v jednotlivých Weissových doménách odlišná. Velké změny magnetostrikčního koeficientu v závislosti na intenzitě magnetického pole, které působí na tu kterou doménu, jsou pak důležitým faktorem, jenž ovlivňuje dynamiku metamorfóz magnetické doménové struktury polykrystalického feromagnetika při jeho magnetizaci.



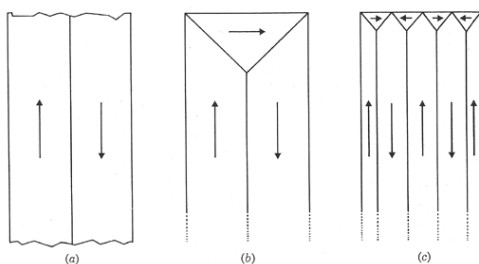
Obr. 25. Magnetostrikční konstanta λ železa α pro směry $[100]$,

$[110]$ a $[111]$ jako funkce vnějšího magnetického pole H .

Fig. 25. Magnetostrictive constant λ for crystal directions $[100]$, $[110]$ and $[111]$ in $Fe-\alpha$ as a function of outside magnetic field H .

S tím, že vedle vnějšího magnetického pole působí na každou jednu Weissovu doménu také ještě účinky tzv. inverzního magnetostrikčního neboli piezomagnetického jevu. Ten spočívá ve změně magnetických vlastností vyvolané mechanickým napětím, ať už působí na feromagnetické těleso z vnějšku nebo se jedná o pnutí doprovázející různé procesy, které probíhají v jeho vnitřní atomové struktuře (např. koherentní rozpad tuhého roztoku, interakce dislokací nebo martenzitická transformace). Anebo jako odezvy materiálu na vnitřní pnutí vyvolané ve smyslu Le Chatelierova – Braunova – Lenzova principu (přímým) magnetostrikčním jevem [10, 15, 20, 21].

Magnetostrikce též určuje – spolu s plošnou hustotou energie Blochových stěn a objemovou hustotou magnetostatické energie – konfiguraci doménové struktury. Obr. 26 to ilustruje pro případ vertikálních deskových domén Fe- α zmagnetovaných antiparalelně v krystalografickém směru 100 . V horizontálním směru by tedy došlo magnetostrikcí k rozměrové kontrakci domén, která se ovšem na jejich rozhraní vykompenzuje. Uzávěrové domény jsou zmagnetovány (sice v krystalograficky ekvivalentním směru, avšak) horizontálně, takže se magnetostrikcí zúží ve vertikálním směru, čímž se posuv rozhraní mezi deskovými a uzávěrovými doménami a následně též elastická mezidoménová energie konfigurace zvětší. Což lze potlačit zmenšením celkového objemu uzávěrových domén, tedy zúžením vertikálních deskových domén, čímž se sice zmenší magnetostatická energie, ale zato zvětší mezidoménová energie feromagnetika [9].



Obr. 26. Vliv magnetostrikčních jevů na konfiguraci domén: v doménové struktuře (a) negeneruje magnetostrikce žádnou elastickou energii; ve struktuře (b) budí magnetostrikce elastickou energii v důsledku inkorporace závěrové domény; redukcí objemu závěrových domén lze sice ve struktuře (c) elastickou energii vyvozanou magnetostrikcí zmenšit, ovšem na úkor nárůstu mezidoménové energie Blochových stěn.

Fig. 26. Influence of magnetostrictive effects upon domain configuration: the domain structure of (a) has no elastic energy as a result of magnetostriction; (b) the introduction of a domain of closure results in the introduction of considerable elastic energy; (c) elastic energy can be reduced in total amount by reducing the volume of closure domain, but with an increase in domain-wall energy.

Literatura

- [1] J. Rez: Magnetické a elektromagnetické strukturoskopické metody. In: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, B. Kopec a kolektiv, Česká společnost pro nedestruktivní testování. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2008.
- [2] B. Skrbek: Pokroky v oblasti nedestruktivního zkoušení, Vydavatelství Technické Univerzity v Liberci, Liberec 2014.
- [3] B. Mišek, L. Ptáček: Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1973.
- [4] A. P. Degterev, V. V. Klyuev, V. E. Scherbinin, V. F. Muzhitsky, E. S. Gorkunov: Magnetic testing methods and means. In: Nondestructive Testing and Diagnostics Handbook, V. V. Klyuev, G. Zusman (eds.), Russian Society for Nondestructive Testing and Technical Diagnostics, Moscow, Russia and Metric Instrument Co., Houston, Texas, USA 2004.
- [5] B. Sedlák, I. Štoll: Elektřina a magnetismus, Academia a vydavatelství Karolinum, Praha. 1993.
- [6] V. Petřílka, S. Šafrata: Elektřina a magnetismus, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1056.
- [7] J. Fiala: Strukturální rozhraní a hysterese jevy při cyklickém zatěžování. In: Proceedings of NDE for Safety/Defektoskopie 2015, L. Pazdera, M. Kofenská, P. Mazal (eds.), Brno University of Technology, Brno 2015, 15 – 27.
- [8] S. Krupička: Fyzika feritů a příbuzných magnetických kysličníků, Academia, Praha 1969.
- [9] Ch. A. Wert, P. M. Thomson: Physics of Solids, McGraw-Hill Book Company, New York 1964.
- [10] J. Brož: Moderní problémy feromagnetismu, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1962.
- [11] Ch. Kittel: Úvod do fyziky pevných látek, Academia, Praha 1985.
- [12] A. J. Dekker: Fyzika pevných látek, Academia, Praha 1966.
- [13] I. Kraus, J. Fiala: Elementární fyzika pevných látek, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2016.
- [14] E. V. Babkin, I. Kraus, G. Gosmanova: Osnovy fyziky kondensirovannogo sostojanija vėščestva, Sibirskij gosudarstvennyj universitėt imeni akademika M. F. Rešetněva, Krasnojarsk 2007.
- [15] G. E. R. Schulze: Metallphysik, Akademie-Verlag, Berlin 1967.
- [16] U. Dehlinger: Theoretische Metallkunde, Springer-Verlag, Berlin 1968.
- [17] J. Fiala, I. Kraus: Povrchy a rozhraní, Česká technika – naklad. ČVUT, Praha 2016.
- [18] F. Pišek, L. Jeníček, P. Ryš: Nauka o materiálu I/2, Academia, Praha 1968.
- [19] V. Hugo: Les travailleurs de la mer, 1866.
- [20] P. Paufler: Physikalische Kristallographie, Akademie-Verlag, Berlin 1986.
- [21] J. F. Nye: Physical Properties of Crystals, Clarendon Press, Oxford 1964.



KVALIFIKACE A CERTIFIKACE PERSONÁLU V DIGITÁLNÍ PRŮMYSLOVÉ RADIOGRAFII

QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF THE PERSONAL IN DIGITAL INDUSTRIAL RADIOGRAPHY

Bohuslav KOLÁŘ

ATG s.r.o.

Contact e-mail: kolar@atg.cz

Abstrakt:

Prvním cílem article je představit základní požadavky pro kvalifikaci a certifikaci NDT personálu v okruhu Digitální průmyslové radiografie a obecně ve speciálních NDT technikách. Budou diskutovány požadavky dle kvalifikačních standardů ISO 9712, NAS 410 a SNT-TC-1A a také budou definovány některé doplňující zákaznické požadavky zejména v letectví a v ASME Code. Bude také upozorněno na nedostatky některých kvalifikačních standardů, které se speciálními technikami buď vůbec nezabývají, nebo zabývají pouze okrajově. Druhým cílem je prezentování přístupu ATG ke kvalifikaci ve speciálních technikách zejména řešení případů, kdy kvalifikační standard speciální techniky neuvažuje nebo uvažuje jen částečně a je nutné, aby si požadavky zaměstnavatel definoval sám.

Klíčová slova: Digitální průmyslová radiografie, kvalifikace, Techniky digitální průmyslové radiografie.

Abstract:

The first aim of the paper is to introduce the basic requirement for qualification and certification of the NDT personal in the field of Digital industrial radiography and generally in the special NDT techniques. The requirements in accordance with ISO 9712, NAS 410 and SNAT-TC-1A will be discuss and in addition the basic additional customers' requirements in aerospace industry and additional requirements of ASME Code will be discuss also. Paper should highlight some of the insufficiency of the qualification standards, which do not recognize special techniques at all or do recognize it just practically. The second aim of the paper is to introduce the approach of ATG to qualification and certification in special technique especially when there are no requirements in the qualification standard for it and the employer shall define these requirements alone.

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

Úvod

Digitální průmyslová radiografie je v dnešní době rychle se rozvíjející obor v oblasti nedestruktivního zkoušení, který má do budoucna celoplošně nahradit radiografii filmovou. Ačkoli je tato technologie v rámci České republiky zatím takřka „v plenkách“ a není příliš rozšířená, je třeba se na ni dívat jako na budoucnost, která nebude plně automatická, tzn., nestačí, když operátor vypne a zapne přístroj. DIR klade specifické požadavky na znalosti a praxi operátorů, kteří s ní pracují. Tyto znalosti jsou esenciální pro správné a ekonomické využití digitální průmyslové radiografie.

DIR není chápána jako samostatná metoda, jde o techniku v Radiografické metodě, z tohoto důvodu zde není možné ke kvalifikaci jako k normální kvalifikaci v rámci metod a technik už zavedených. V některých případech je třeba nastavit kvalifikační proces specificky s ohledem na požadavky zákazníka a používané vybavení. To klade velké požadavky zejména na přípravu celého kvalifikačního procesu a také na lektora.

Tento článek na začátku definuje digitální průmyslovou radiografii a její techniky. Definice a rozdělení technik vychází z mezinárodně používaných pravidel, která u nás nejsou zatím pevně zavedena. Článek dále shrnuje požadavky na kvalifikaci personálu dle základních mezinárodních standardů ISO 9712, NAS 410 a SNTC-TC-1A. Na konci je uveden příklad, jak je kvalifikační proces nastaven v ATG s.r.o, tak aby bylo zajištěno, že personál, který projde kvalifikací, byl schopen samostatně a odborně provést kontrolu.

1.1 Definice Digitální průmyslové radiografie

Nejprve je třeba definovat, co znamená pojem digitální průmyslová radiografie (DIR) a jak se rozlišují jednotlivé techniky. Digitální průmyslová radiografie je jakákoli technika radiografie, 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.

1.2 Techniky DIR

V DIR rozlišujeme pět základních technik Radioskopie (RS), Počítačová tomografie (CT), Digitalizace filmových negativů (DIGI), Počítačová radiografie (CR), Digitální radiografie (DR). Všechny techniky vytváří srovnatelné digitální zobrazení s určitými vlastnostmi, ale liší ve způsobu vytvoření digitálního snímku. Z tohoto důvodu je nutné také odlišně přistupovat ke kvalifikaci v jednotlivých technikách.

Kvalifikace v DIR

V této části článku se budu nejprve zabývat požadavky na kvalifikaci a certifikaci v případě obecně používaných mezinárodních standardů ISO 9712, NAS 410 / EN 4173, SNT-TC-1A. Je třeba podotknout, že jakýkoli zákazník nebo zaměstnavatel si může klást doplňující požadavky nad rámec těchto standardů, ty ale v tomto článku nejsou reflektovány.

Jakákoli technika v rámci Digitální průmyslové radiografie vyžaduje specifické znalosti a schopnosti operátorů, ať už v oblasti znalosti obecných principů používání konkrétní technice, tak znalosti legislativy (specifikací a norem používaných v technice). Stejně tak každá technika vyžaduje i znalosti s obecné radiografie, z tohoto důvodu je DIR certifikačním a kvalifikačním standardem brána vždy jako technika v metodě RT a není v této době chápána jako samostatná metoda. Z toho vyplývá, že personál, který má být certifikovaný v DIR, musí projít dodatečným školením, které bude obsahovat všechny potřebné informace, a měl by složit i dodatečnou zkoušku, jak z teoretického učiva a užívání norem, tak zkoušku praktickou.

Aby byl uchazeč certifikován v příslušné technice, je nutné, aby splnil minimálně pět základních požadavků: musí mít minimálně základní vzdělání, dostatečnou kvalifikaci (musí projít školením), musí složit zkoušku, musí mít dostatečnou praxi v oboru a musí být zdravotně způsobilý pro výkon práce (oční způsobilost).

1.2.1 ISO 9712

ISO 9712 se v této době nezmiňuje o DIR ani v rámci metody a ani technik, neurčuje žádný počet hodin školení, praxe ani neurčuje, jestli operátoři musí projít zkouškou. Z toho vyplývá, že pokud je operátor certifikovaný v metodě RT v odpovídajícím stupni má oprávnění pracovat v DIR.

Co se týče ISO norem, zmínka o certifikaci a kvalifikaci personálů se nachází v normě ČSN EN ISO 17636 - 2 para 6.9 : *Zkušební personál provádějící nedestruktivní šetření ve smyslu této části ISO 17636 musí být kvalifikován podle ISO 9712 nebo obdobně na příslušnou úroveň v aktuálním průmyslovém odvětví. Personál musí být schopen prokázat, že podstoupil dodatečné školení, a že je kvalifikován v oboru digitální průmyslové radiografie.*

Ač tento výňatek z normy nabádá k tomu, že školení zde zmíněné nemusí mít žádnou strukturu a může být zaměřeno se zaškolením při práci od výrobce systému, je nutno se podívat na výklad slova kvalifikace dle ČSN EN ISO 9712 : *prokázání fyzických schopností, znalostí, dovedností, zaškolení a praxe požadovaných pro řádné provádění NDT úkolů.* Z toho vyplývá, že ač není definováno jak toto školení má být dlouhé, nebo jestli má být zakončeno zkouškou, musí mít takovou strukturu, aby tyto věci byly zajištěny.

1.2.2 NAS 410 / EN 4179

NAS 410 /EN 4179 je standard, který na rozdíl od ISO 9712 Digitální průmyslovou radiografii zohledňuje ve smyslu, že metoda Radiografie je zde rozdělena na dvě části - techniku filmovou a techniku nefilmovou. Nefilmová technika potom zahrnuje jakoukoli techniku, která vytváří digitální záznam.

S ohledem na rozdělení technik tak, jak bylo definováno na začátku tohoto článku, by konkrétní technika, která je ve společnosti používána, měla být popsána v podnikové Written Practice. Aby operátor byl certifikovaný v dané metodě, musí kromě zdravotní způsobilosti splnit další tři podmínky: školení, zkoušku a musí mít požadovanou praxi.

NAS 410 / EN 4179 stanovuje poměrně přesná pravidla, jak má být školení strukturováno. Ve smyslu tohoto standardu je možné získat certifikaci v technice filmové nebo v technice nefilmové, přičemž musí být splněno minimálně 40 hodin školení pro L1, 40 hodin školení pro L2 (přímý přístup na L2 je tedy 80 hodin), pro L3 není počet hodin školení specifikován. Jestliže má operátor certifikaci ve filmové technice a doplňuje si techniku nefilmovou, musí absolvovat dodatečné školení pro L1 20 hodin pro L2 20 hodin (přímý přístup na L2 je tedy 40 hodin). Certifikace v obou technikách zároveň vyžaduje školení, které odpovídá součtu hodin obou technik pro L1 60 hodin pro L2 60 hodin (přímý přístup na L2 je tedy 120 hodin), pro L3 není školení specifikováno.

Školení vždy musí obsahovat témata, která jsou relevantní k dané technice a dané aplikaci u zaměstnavatele, musí vždy obsahovat teoretickou, specifickou a praktickou část. Vše musí být popsáno v sylabu (a případně programu) školení, který je většinou přímo součástí Written Practice ve formě příloh.

Zkoušky pro certifikaci ve stupni L1 a L2 jsou rozděleny na dvě části teoretickou a praktickou. Teoretická část musí obsahovat min. 40 otázek všeobecných a 30 otázek specifických pro danou metodu a stupeň. Není zde žádné navýšení počtu otázek, co se týče techniky, ale je nutné, aby test obsahoval otázky, které jsou vhodné pro techniky používané ve společnosti. Jestliže si operátor rozšiřuje certifikace o techniku nefilmovou, je logickým krokem splnění dodatečného testu. V rámci praktické zkoušky L1 a L2 musí operátor vyzkoušet minimálně dva vzorky a k jednomu napsat návodku. Vzorky musí odpovídat technikám, pro které je operátor certifikovaný. Jestliže se bude jednat o techniku filmovou nebo nefilmovou budou oba vzorky vyzkoušeny jednou technikou, jestliže se jedná o kombinaci technik, musí být jeden vzorek vyzkoušen technikou filmovou a jeden nefilmovou.

Zkouška pro L3 obsahuje v teoretické části stejný počet otázek jako pro L2, ale otázky musí obtížností odpovídat L3. Operátor navíc musí prokázat znalost ostatních NDT metod (většinou formou otázek implementovaných v testu). Praktická zkouška L3, počítáme-li předchozí

certifikaci L2, se realizuje formou vytvoření písemné procedury. Zde při kombinaci obou technik je jedno, pro jakou techniku bude procedura napsána.

Minimální požadovaná praxe činí pro metodu RT pro techniku filmovou nebo nefilmovou 200 hodin pro L1, 600 hodin pro L2 (pro přímý přístup na L2 800 hodin). Pro kombinaci technik je to 220 hodin pro L1, 720 hodin pro L2 (přímý přístup pro L2 je 1000 hodin). Jestliže si operátor rozšiřuje techniku filmovou o techniku nefilmovou je nutno doložit 20 hodin praxe v dané technice pro L1 a 200 hodin pro L2. Navíc je zde popsán případ pro certifikaci L2 v technice filmové a nefilmové při přechodu z L1 techniky filmové, operátor musí mít 800 hodin praxe v obou technikách.

Nevýhoda tohoto systému je nezhlednění jednotlivých technik DIR. Každá technika má svoje specifika, která by měla být probraná v rámci školení. Jestliže budeme uvažovat nejčastější případ, a to rozšíření filmové techniky L2 na nefilmovou a společnost bude využívat dvě a více technik digitální průmyslové radiografie, je 40 hodin školení nedostačující. Samozřejmě, že standard definuje jen minimální požadavky na kvalifikaci a tento nedostatek může být vyřešen navýšením požadovaného počtu hodin školení ve Written Practice.

1.2.3 SNT-TC-1A

Tento standard je svým přístupem velice podobný NAS 410 / EN 4179 s tím rozdílem, že metodu RT nedělí na filmovou a nefilmovou techniku, ale definuje v ní čtyři základní techniky Radiografické zkoušení (filmová radiografie), Počítačová radiografie (CR), Počítačová tomografie (CT) a Digitální radiografie (DR). Toto dělení nezohledňuje techniku Digitalizace filmových negativů, která ovšem může být specifikována ve Written Practice.

Pro každou techniku v radiografické metodě určuje standard rozsah hodin školení na 40 hodin školení pro L1, 40 hodin školení pro L2 a pro L3 počet hodin školení nedefinuje. Jestliže si operátor chce rozšířit metodu o další techniku, např. operátor je kvalifikován ve filmové radiografii L2 a doplňuje si kvalifikaci o radiografii digitální L2, tak se SNT-TC-1A vyjadřuje tak, že by mělo dojít k doplňujícímu školení v rozsahu 24 hodin pro daný stupeň (z toho 16 hodin může být seznámení se zařízením - obvykle provádí dodavatel zařízení). Tento přechod musí být definován ve Written Practice a o konečném rozsahu hodin doplňujícího školení rozhoduje Responsible NDT L3.

Zkouška se stejně jako u předchozího systému dělí na teoretickou a praktickou. Pro techniku na zkoušku L1 a L2 musí být splněno minimum 40 všeobecných a 20 specifických otázek. Při rozšíření technik v jedné metodě, tzn. v případě, když operátor, který je certifikovaný ve filmové radiografii, rozšiřuje certifikaci na nefilmovou, mohou být některé otázky, které jsou společné pro tuto metodu, uznány pro obě techniky a o počtu doplňujících otázek rozhoduje Responsible NDT L3 a měly by být specifikovány v podnikové Written Practise.

Co se týče zkoušky L3 musí, jako jednu z podmínek, splnit zkoušku Basic, která není ovlivněna tím, pro jakou techniku či metodu bude L3 certifikován. Dále je teoretická zkouška rozdělena na zkoušku z metody. Ta má tři části - 30 otázek vztahující se k základům metody, 15 otázek na aplikaci techniky a procedury a 20 otázek vztahující se k interpretaci standardů vztahující se k metodě. Specifická část má 20 otázek vztahující se k standardům vybavení a technice používané společností. Zkouška je obecně pro metodu, ale jestliže bereme v úvahu, že se má týkat specifík zákazníka a je v ní zahrnuto více technik, tak v testu musí být jak otázky vztahující se požadovaným technikám, tak k metodě.

SNT-TC-1A také specifikuje minimální počet hodin práce, které musí kandidát splnit před tím, než bude certifikován, a to pro L1 210 hodin v technice a 400 hodin v NDT, pro L2 630 hodin v technice a 1200 hodin v NDT.

Praktické znalosti musí kandidát pro stupeň L1 a L2 prokázat vyzkoušením alespoň jednoho zkušebního vzorku, který určí NDT L3. Vzorky by měly odpovídat technice a přístrojům používaných ve společnosti, tzn., když je ve společnosti používáno více, jak jedna technika radiografie, měl by být vyzkoušen odpovídající počet vzorků.

1.2.3.1 Doplňující požadavky ASME BPV Code

SNT-TC-1A se velice často využívá pro certifikaci a kvalifikaci personálu, který pracuje dle ASME BPV Code. Tento dokument v poslední revizi definoval dodatečné požadavky pro kvalifikaci a certifikaci ve speciálních technikách, jako je Digitální průmyslová radiografie.

Nově musí být během praktické zkoušky vyzkoušeno minimálně 5 vzorků. Minimální počet otázek pro techniku, které musí být splněny je 40 pro všeobecný test a 30 pro specifický test pro stupeň L1 a L2.

Dokument také definuje minimální počet hodin školení na 40 hodin Pro L1 a 40 hodin pro L2 (přímý přístup na L2 je 80 hodin). Minimální požadovaná praxe v technice je pro L1 210 hodin a pro L2 je 630 hodin v NDT 400 hodin pro L1 a 1200 hodin pro L2. Jestliže bereme v úvahu rozšíření z techniky filmové o další techniku, musí kandidát splnit minimální požadavek 24 hodin pro L1 a 40 hodin pro L2. Navíc k těmto požadavkům by měli operátoři projít zaškolením na ovládnání přístrojů a softwaru v rozsahu 16 hodin.

1.3 Přístup ATG s.r.o.

V praxi vždy musí být splněny minimální požadavky standardů tak, jak jsou popsány výše, ale je třeba také zdůraznit to, že každá technika vyžaduje určitou míru znalostí, ať už všeobecných, specifických či praktických. Digitální průmyslová radiografie je rozsáhlý obor, a když operátor požaduje kvalifikaci ve více jak jedné technice, minimální rozsahy školení nemusí být dostačující.

ATG upřednostňuje to, že každý uchazeč o certifikaci v Digitální průmyslové radiografii musí být před zahájením kvalifikačního procesu certifikovaný ve filmové radiografii. Tento požadavek je odůvodněn tím, že filmová radiografie je stále používána v drtivé většině případů a její neznalost značně omezuje budoucí profesní růst operátora. Ovšem, když zákazník požaduje školením jenom v digitální radiografii a má to relevantně zavedené v podnikové Written Practice, jsme ochotni od tohoto požadavku ustoupit. Ustoupení od požadavku se týká pouze norem NAS 410 / EN 4179 a SNT-TC-1A, ISO 9712 neuznává takovýto přístup (kvalifikace ve filmové radiografii je zde nutná).

Pro kvalifikaci v některé z technik DIR je tedy nutné projít doplňujícím školením. Jestliže je kvalifikována pouze jedna z technik DIR, základní rozsah školení je 20 hodin pro L1, 40 hodin pro L2. Jestliže je školení realizováno pro více technik, tak se pro každou techniku školení navyší o 8 hodin pro L1 a 16 hodin pro L2. S výjimkou, kdy je jako další technika kvalifikována digitalizace filmových negativů, kde se školení navyšuje o 4 hodin pro L1 a 8 hodin pro L2.

Například, když chce být operátor certifikovaný v technice DR a DIGI musí minimálně splnit 24 hodin pro L1 a 48 hodin pro L2. Když bude chtít být operátor certifikovaný v DR, CR a CT musí splnit minimálně splnit 56 hodin pro L1 a 88 hod pro L2.

Zkouška probíhá formou doplňkových testů, které mají v základu pro jednu techniku jak všeobecný, tak specifický test 20 otázek a poté pro každou další techniku vzrůstá počet otázek o pět pro každý test. Navíc kandidát musí projít praktickou zkouškou, která se skládá z vyzkoušení minimálně jednoho vzorku pro každou techniku. Například jestliže si operátor bude rozšiřovat kvalifikaci o techniku DR a DIGI, bude muset projít testy o 25 otázkách - jak všeobecný, tak specifický - a vyzkoušet dva zkušební vzorky, každý v jedné technice.

Jestliže se jedná o kurz, který je pro společnost, která pracuje dle ASME BPV Code a požaduje kvalifikace ve více jak jedné technice DIR, je počet hodin školení a rozsah zkoušky přizpůsoben požadavkům tohoto předpisu.

Školení a zkouška pro L3 probíhá specificky po domluvě se zákazníkem tak, aby byly respektovány požadavky normy a požadavky zákazníka.

Tento systém kvalifikace zaručuje to, že minimální podmínky všech třech základních kvalifikačních a certifikačních systémů ISO 9712, NAS 410 a SNT-TC-1A jsou splněny, v některých případech i navyšeny. Jak školení, tak zkoušky jsou podloženy školícími a zkušebními materiály, jako jsou programy školení, naučné materiály, cvičné a testové otázky nebo zkušební vzorky.

1.4 Závěr

Kvalifikace v Digitální průmyslové radiografii musí proběhnout vždy v souladu s aktuálními certifikačními a kvalifikačními standardy a s ohledem na techniku, která je v praxi používána. Jestliže je minimální počet hodin školení dle standardu nedostačující, musí být navýšen, proto, aby nedošlo k situaci, kdy na pracovišti nebude dostatečně kvalifikovaný personál pro provedení zkoušek v souladu s požadavky aktuálních norem, zákazníka nebo se zavedenou praxí.

Kvalifikace musí být podložena relevantními školicími materiály a musí být provedena kvalifikovaným personálem. Systém kvalifikace, tak jak je popsán v článku zaručuje to, že personál po absolvování této kvalifikace je schopný samostatně a odborně práce v oboru Digitální průmyslové radiografie.



LORD RAYLEIGH – OTEC ULTRAZVUKOVÉ DEFEKTOSKOPIE LORD RAYLEIGH – FATHER ULTRASONIC TESTING

Bernard KOPEC

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

Abstrakt

John William Strutt, 3. baron Rayleigh (1842 – 1919) svoji teorii rozptylu, kterou publikoval v roce 1871, matematickými pracemi věnujícími se Besselovým funkcím a především svoji prací „The THEORY OF SOUND“, jejíž první díl byl vydán nakladatelstvím MacMillan and co. v Londýně v roce 1877 a druhý díl v následujícím roce, objasnil a systematicky uspořádal základy fyziky šíření ultrazvukových vln. Příspěvek se zabývá nevšedním životem tohoto velkého klasika vědy od mladých let, přes objevy, kterými elegantně formuloval řadu fyzikálních zákonů až po obdržení Nobelovy ceny. Průřezem jeho působení v Cavendish laboratoru a některými málo známými skutečnostmi jeho života mimo oblast vědy, chce příspěvek dokázat, že lord Rayleigh byl skromný muž velkého ducha.

Klíčová slova: lord Rayleigh, ultrazvuk, ultrazvuková vlna, Rayleighův rozptyl, teorie zvuku

Abstract

John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh (1842-1919), his theory of scattering, published in 1871, mathematical works dedicated to Bessel functions and especially his work "The Theory of Sound", the first volume was published by MacMillan and co. in London in 1877 and the second part the following year, he explained, systematically arranged basic physics of ultrasound waves. Contribution deals with the extraordinary life of this great classic science from a young age, through discoveries, which elegantly formulated a number of physical laws, after receiving the Nobel Prize. Cross-section of his work in the Cavendish laboratory and some little known facts of his life outside the realm of science, he wants to prove the contribution that Lord Rayleigh was a modest man of great spirit.

Key words: Lord Rayleigh, ultrasound, ultrasound wave, Rayleigh scattering, theory of sound

Otec Johna Williama Strutta byl druhým baronem Rayleighem z Terlingu, Withamu, v kraji Essex. Rodina se dříve jen málo zajímala o vědu, neboť se většinou jednalo o vlastníky půdy. Jedinou výjimkou byl vzdálený příbuzný Robert Doyle.

Šlechtický titul Rayleigh získal Strutt ve 30 letech. Jako chlapec Rayleigh trpěl chatrným zdravím a jeho vzdělávání na školách v Etonu a Harrowu bylo přerušeno. Rayleigh musel opustit obě školy po krátkém studiu ze zdravotních důvodů. Později strávil ve Warnerově internátní škole 4 roky, které ho připravily na univerzitu a tehdy se již u něho začínaly

projevovat matematické schopnosti. Během těchto čtyř let měl soukromého učitele, ale celkově jen málo naznačovalo, že by u něho byly jiné než průměrné matematické schopnosti.

Vysokou školu studoval na universitě v Cambridge. Jeho učitel v Cambridge byl Edward Routh, který byl sám vynikající v aplikované matematice, především v dynamice. Není tak žádných pochybností o kvalitě průpravy v matematických technikách, které Rayleigh získal od Routha, což byl důležitý faktor v jeho význačné vědecké kariéře. Doba strávená na universitě byla pro něho víc než jen matematika, Rayleigh se poučil od Routha, jak se s nevhodnějšími matematickými metodami pustit se do každého problému.

Během vysokoškolského studia na něho měl vliv dále Lucasian. Lucasian byl tehdy profesorem matematiky. Dále Stokes inspiroval Rayleighyho svými přednáškami, které spojily teorii a praxi a po novu prováděl mnoho fyzikálních experimentů přímo během přednášek. Rayleigh sám později mluvil o tom, jak důležitou roli Stokes hrál v jeho vědeckém vývoji.

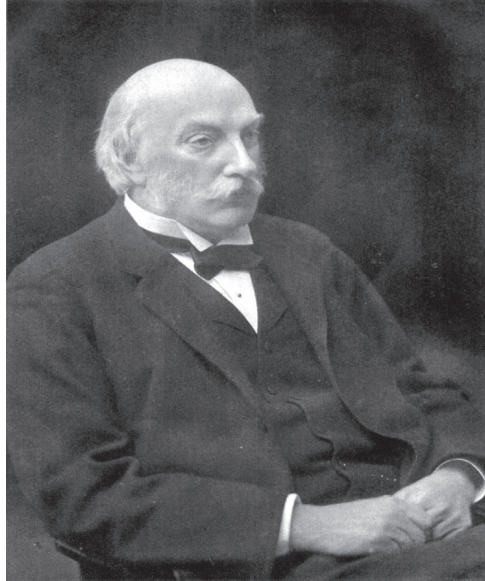
Jestliže Rayleigh byl průměrný školní žák, na vysoké byl vysoce nadprůměrný. Získal stipendium jako student astronomie v roce 1864, pak udělal v roce 1865 v Tripos zkoušky. Rayleigh byl nyní konfrontován s obtížným rozhodnutím. Pro někoho na jeho místo bylo nutné vědět, že pokud by toužil po titulu a stal se třetím baronem Rayleighem, pokračování ve vědecké kariéře by nebylo opravdu přijatelné a jistě to různí členové jeho rodiny cítili přesně takto. Do této doby byl Rayleigh odhodlaný věnovat svůj život vědě a tak mu žádné sociální závazky nesměly stát v cestě.

Rayleigh byl inspirován Maxwellovou teorií elektromagnetického pole v roce 1865. Jiný vědec, jehož práce do hloubky studoval, byl Helmholtz, zvláště Helmholtzův akustický rezonátor z roku 1860.

Bylo obvyklé pro mladé britské muže jeho sociálního postavení, že se vydávali v tomto věku na cestu po Evropě. Rayleigh se překvapivě vydal na cestu do Spojených států. Výhoda Rayleighovo privilegovaného společenského postavení spočívala v tom, že si nepotřeboval svojí akademickou pozici vydělávat na živobytí. Když se vrátil ze Spojených států, koupil si vybavení na vědecké experimenty, které prováděl na rodinném sídle v Terlingu. Dělal experimenty na galvanometru a představil jeho výsledky na britském asociálním setkání v Norwichi v roce 1868.

Rayleigh svoji teorie rozptylu publikoval v r. 1871. Její součástí bylo první správné vysvětlení, proč je obloha modrá. Ve stejném roce se oženil s Evelyn Balfour, sestrou Arthura Jamese Balfoura, který byl lídrem konzervativní strany a pozdějším předsedou vlády Velké Británie. V době, kdy byl Rayleigh studentem v Cambridge, se přes Arthura Jamese Balfoura poznal s Evelyn. Krátce po svatbě měl Rayleigh revmatické horečky, které málem předčasně ukončily jeho vědeckou činnost. Byla mu doporučena cesta do Egypta a on jí opravdu se svou ženou vykonal. Plavili se po Nilu od podzimu 1872 do jara 1873 a pak se vrátili do Anglie.

Během tohoto výletu se Rayleigh nejen uzdravil, ale byla to také velmi zisková cesta z vědeckého hlediska. Je pozoruhodné, že Rayleigh začal psát hlavní text teorie zvuku právě na výletě. Po pěti letech od začátku bádání tento velký klasik uveřejnil své práce.



Obr. 1 Lord Rayleigh

První z prací o zvuku – mechanismy vibrací – byla vydána v roce 1877 [1], zatímco druhá – akustické šíření vln – byla vydána následující rok [2]. V této knize pod názvem „**The Theory of Sound**“ lord Rayleigh vytvořil fyzikální základy ultrazvukové defektoskopie, které se dodnes objevují ve všech významných učebnicích zabývajících se nedestruktivním zkoušením materiálů a výrobků [3].

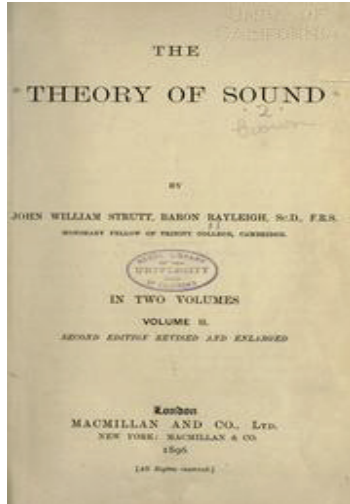
Jeho jméno nese 11 fyzikálních jevů, z nichž v ultrazvukové defektoskopii se používá Rayleighův rozptyl, Rayleighovy vlny.

Rayleighův rozptyl - složka útlumu ultrazvuku, využívána k hodnocení struktury.

Rayleigh svoji teorii rozptylu publikoval v roce 1871. Vyšel z předpokladu, že světlo rozptylují přímo molekuly vzduchu a vypočítal, že intenzita rozptýleného světla závisí na jeho vlnové délce. Součástí této teorie je vysvětlení, proč je obloha modrá. Modré světlo má nejkratší vlnovou délku. Původní Rayleighova myšlenka byla ověřena experimenty na kovech Masonem a McSkiminem. Další výzkumy prokázaly vliv rozptylu v polykrystalických materiálech a upřesnily závislosti na struktuře kovů, především oceli [4,5]. Je-li délka vlny mnohem menší než střední velikost zrna, nastává Rayleighův rozptyl. Ztráty útlumu ultrazvuku v oblasti Rayleighova rozptylu jsou úměrné třetí mocnině střední velikosti zrna. Hodnocení struktury oceli v této oblasti je efektivní a je využíváno především k efektivnímu hodnocení feriticko-perlitické struktury [6,7].

Rayleighova vlna - povrchová vlna.

Rovněž tato vlna, která nese název pro lordu Rayleighovi, hraje dnes významnou úlohu při zkoušení ultrazvukem i při analýze seismických jevů. Na povrchu a těsně pod ním asi do hloubky jedné vlnové délky se může šířit povrchové (Rayleighovo) vlnění, při kterém částice kmitají v rovině kolmé na směr šíření vlny, ale nezachovávají stále stejný směr kmitání – opisují v této rovině elipsu. Amplituda povrchové vlny s hloubkou klesá. Její rychlost je 0,8 až 0,9 krát menší než rychlost příčné vlny.



Obr. 2 Jedno z prvních vydání The Theory of Sound

Krátce poté, co se vrátil ze svého výletu po Nilu, Rayleighův otec zemřel a Strutt jako jeho následník se stal třetím baronem Rayleighem. Pokračoval ve své práci v Terlingu. V laboratoři, kterou si dal postavit, učinil zajímavé objevy. Je nutné zdůraznit, že to nebylo proto, že bohatý Rayleigh byl schopný mít lepší vybavení než někdo jiný jinde. Naopak, on získal působivé experimentální výsledky s levným vybavením. Rayleigh vždy šetřil a potřeboval obyčejné vybavení. Také v té době po roce 1870 byly v Anglii hospodářské problémy, v jejichž důsledku byl jeho příjem daleko menší než jindy.

Od roku 1879 do roku 1884 byl Rayleigh druhým Cavendishovým profesorem experimentální fyziky v Cambridge. Laboratoř byla otevřena pět let dříve a Maxwell byl prvním Cavendishovým profesorem. Rayleigh chtěl být Maxwellovým následníkem.

Během svých vysokoškolských studií trpěl Rayleigh nedostatkem experimentální fyziky a o to více se to nyní Rayleigh snažil změnit. Věnoval tomu velkou energii a vyvinul laboratorní kursy o teple, elektřině a magnetismu, optice a akustice.

Jeden z důležitých kroků experimentální práce, kterou prováděl jako Cavendishův profesor, byla standardizace jednotky odporu - ohm. Maxwell a Chrystal uskutečnili své experimenty

v Cambridge dříve s aparaturou, kterou dostal k dispozici i Rayleigh. Staré vybavení nedovolilo potřebnou přesnost pro správné výsledky, které potřeboval a tak si Rayleigh pořídil aparaturu novou.

V roce 1884 Rayleigh se vzdal svého místa v Cambridge a vrátil se k výzkumu domů do Terlingu. Jeho finanční postavení se zlepšilo a on miloval vědecký výzkum, ovšem bez časově náročné administrativy na univerzitě. Mnoho kolegů z univerzity se ho pokusilo přemluvit k pokračování profesorské dráhy, ale Rayleigh věděl přesně, co chce od života. On neměl jen osamělou vědeckou existenci v Terlingu, neboť začal často navštěvovat Londýn, kde měl mnoho povinností v učených a vědeckých společnostech.

Rayleigh se stal členem Královské společnosti v roce 1873. Dostal královské vyznamenání od společnosti v roce 1882 a stal se tajemníkem společnosti v roce 1885 a dostal Copleyho medaili v roce 1899. Rayleigh byl prezidentem Londýnské matematické společnosti v letech 1876-78 a byla mu udělena De Morganova medaile v roce 1890. Byl též ve spojení s královským dvorem. V roce 1908 se stal kancléřem Cambridžské univerzity.

Z ostatních aktivit, které zasluží zmínku, je ocenění jeho pomoci při zakládání národní fyzikální laboratoře v Teddingtonu v Middlesexu v roce 1900. Byl též vědeckým poradcem ve sdružení anglických námořníků. Propojený s politickou scénou přes svou manželku byl hodně zapojený do poradenských rolí, např. ve výboru pro aeronautiku.

Tyto aktivity jasně dokazují, že nepostrádal kontakt s partnerskými vědci a také odpovědně spolupracoval s mnohými špičkovými vědci. Nyní se zmíníme o některých jeho vědeckých dílech. Kompletní seznam Rayleighovy publikací je 446 a pokrývají neuvěřitelný rozsah témat v aplikované matematice a fyzice.

Fraunhoferova oblast ultrazvukového pole

Mezi matematické publikace patří ty, které se věnují Besselovým funkcím, vztahu mezi Laplaceovými funkcemi a Besselovými funkcemi a Legendreova funkce. Ve vzdálenosti od zdroje ultrazvuku větší než je délka blízkého pole uplatňují se interference elementárních vln méně výrazně, až konečně v dostatečně velké vzdálenosti se neuplatní vůbec. Oblast, v níž se skládají elementární vlny se stejnou fází, se nazývá vzdálené pole (Fraunhoferova oblast). Lord Rayleigh zjistil, že akustický tlak mimo osu kruhového měniče klesá rovnoměrně se vzdáleností od osy. V polárních souřadnicích popsal akustický tlak Besselovou funkci prvního druhu.

Akustická impedance

Tlak vznikající při šíření ultrazvukové vlny nazýváme akustickým tlakem. Jeho hodnota je úměrná akustické rychlosti. Konstantou úměrnosti je tzv. akustická impedance, jedna z nejdůležitějších parametrů zkoušení ultrazvukem. V některých publikacích je tento parametr nazýván **Rayl** na paměť lorda Rayleighyho.

Kromě obvyklých témat aplikované matematiky a fyziky, psal Rayleigh i o neobvyklých tématech jako Hmyzy a barva květin (1874), Na nepravidelném letu tenisového míče (1877), Stoupání ptáků (1883), Plavbový let albatrosa (1889), nebo Problém galerie šeptání (1910).

Popsal aplikaci vlnové teorie světla; ukázal, že rozlišovací schopnost mřížky je určena úplným množstvím linek v mřížce násobené pořadím spektra, a ne blízkostí linek.

Rayleighovo však nejvíce proslavil jeho objev argonu, inertního plynu v roce 1895, práce, která mu vynesla Nobelovu cenu za fyziku v roce 1904. Při příležitosti převzetí Nobelovy ceny, vysvětlil Rayleigh, jak udělal svůj slavný objev:

"Hustota plynů zaujala značnou část mé pozornosti již před 20 lety... Zaměřil jsem svou pozornost na dusík, dělal jsem sérii experimentů... Vzduch bublal přes kapalnou amoniak, prošel trubkou obsahující měď rozžhavenou do rudého žáru, kde vzdušný kyslík je pohlcen vodíkem ze čpavku, přemírá čpavku se následně odstranila s kyselinou sírovou... Udělal jsem takto sérii souhlasných pozorování... Poté jsem ustoupil na více ortodoxní proceduru, která se obešla bez průchodu vzduchu přímo přes červenou rozžhavenou měď. K mému překvapení se výsledky těchto dvou metod se lišily o tisíc část - rozdíl malý, ale nebyl způsoben experimentálními chybami. Co tvořilo rozdíl mezi dvěma druhy dusíku? ... nový plyn"

Rayleighův odhad byl samozřejmě správný a následně Rayleigh se značnými potížemi dokázal izolovat plyn. Protože plyn odmítal chemicky reagovat, byl nazván argonem od řeckého slova neaktivní.

Rayleigh kromě Nobelovy ceny získal třináct čestných hodností, pět cen vlády, a čestné členství v pěti učených společnostech.

Rayleigh byl skromný a velkorysý muž. Daroval výtěžek Nobelovy ceny univerzitě Cambridge za účelem postavení a rozšíření Cavendishových laboratoří.

Mezi další Rayleighovy zájmy patřil okultismus. Byl prezidentem společnosti pro okultní výzkum.

Lord Rayleigh byl vyznáním anglikánské církve. Ačkoliv nepsal o vztahu vědy a náboženství, zachovával si však svůj osobní zájem o duchovno. Když jeho vědecké práce měly vyjít ve sbírce v nakladatelství Cambridge University Press, Strutt chtěl zde zahrnout citát z Bible, což si však netroufl, jak později uvedl:

*"Když jsem vydával své vědecké práce, navrhl jsem motto z žalmu, **"Boží dílo je veliké, hledejme v něm tak, aby z toho měli všichni radost"**. " Sekretářka nakladatelství se mi však k návrhu omlouvala s tím, že čtenář by si mohl myslet, že „Já jsem Bůh"*

Avšak stále trval na svém přání a citát byl vytisknut v pětisvazkové sbírce jeho vědecké práce.

V dopise jednomu členu rodiny napsal také o svém odmítání materialismu a o Ježíši Kristu mluvil jako o morálním učiteli:

"Nikdy jsem nepovažoval materialistický pohled na věc za možný a spoléhal jsem se na sílu za tím, kterou vidíme a na život, v který můžeme minimálně doufat, abychom byli jeho součástí. Kromě toho si myslím, že Kristus a opravdu duchem obdarovaní lidé vidí dále a opravdověji než já, a mým přáním je jít v jejich stopách, co nejvíce to jde." (1910)

Literatura

- [1] Lord Rayleigh: The Theory of Sound, vol. I (London: Macmillan, 1877, 1894) (alternative link: Bibliothèque Nationale de France OR (Cambridge: University Press, reissued 2011, ISBN 978-1-108-03220-9)
- [2] Lord Rayleigh: The Theory of Sound, vol.II (London: Macmillan, 1878, 1896) (alternative link: Bibliothèque Nationale de France) OR (Cambridge: University Press, reissued 2011, ISBN 978-1-108-03221-6)
- [3] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H. : Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Verlag Berlin 1986, 5.Auflage
- [4] Kopec, B.: Ultrasonic inspection of grain size in the materials for railway wheel sets. ULTRASONICS, November 1975, Volume 13, Number 6, str. 264 –274,vyd. IPC Science and Technology Press Ltd., Guildford, Anglie
- [5] Kopec, B.: Effect of interlamellar spacing of pearlite on the attenuation of ultrasound. NDT INTERNATIONAL, February 1979, Volume 12, Number 1, str. 8-11, vyd IPC Science and Technology Press Ltd., Guildford, Anglie
- [6] Kopec, B.: Attenuation of ultrasound as a phenomenon depending of fatigue limit in the structure of railway axles. Conference ULTRASONICS INTERNATIONAL 81, Conference Proceedings, 30. 6. - 2. 7. 1981, Brighton, Anglie, str. 147-152,vyd. IPC Science and Technology Press Ltd., Guildford, Anglie, předneseno: 1. 7. 1981, Brighton, Metropole Convention Centre, Anglie
- [7] Kopec, B.: Effect of the Widmannstätten structure on attenuation of ultrasound. Conference ULTRASONICS INTERNATIONAL 85, Conference Proceedings, 2. - 4. 7. 1985, Londýn, Anglie, str. 265-268, vyd. Butterworth Scientific Ltd., Guildford, Anglie, předneseno: 4. 7. 1985, London, King's College, Anglie.



ÚNAVOVÉ PROCESY V SELECTIVE LASER MELTING A KONVENČNĚ VYRÁBĚNÝCH MATERIÁLECH

FATIGUE PROCESSES OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL PRODUCED MATERIALS

Vendula KRATOCHVÍLOVÁ*, František VLAŠIČ*, Pavel MAZAL*

*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2,
616 00 Brno

Contact e-mail: xkrato04@vutbr.cz

Abstrakt

Technologie Selective Laser Melting (SLM) se řadí mezi moderní technologie 3D tisku, kterým je dnes věnována vysoká pozornost a ve spojení s užitím vysokopevnostních materiálů mají velký potenciál pro využití v různých průmyslových oblastech. SLM technologie umožňuje vyrábět tvarově složité součásti s relativně malým množstvím odpadového materiálu a bez nutnosti použití drahých forem či jader, avšak mechanické vlastnosti takto vyráběného materiálu jsou zatím horší, než u běžně vyráběných slitin.

Prezentovaná studie se zabývá srovnáním únavových vlastností SLM a konvenčně vyráběné slitiny AlCu2Mg1,5Ni (EN AW 2618A). Pro detailní analýzu únavového procesu je použita metoda akustické emise (AE) ve spojení s fraktografií.

Při únavovém namáhání těchto materiálů jsou pozorovány jejich rozdílné vlastnosti, což odráží také v odezvě AE. To je způsobeno značným množstvím vnitřních vad a nehomogenit v SLM materiálu.

Klíčová slova: Selective Laser Melting, akustická emise, 3D tisk, únavové namáhání materiálů

Abstract

Selective Laser Melting (SLM) technology belongs to additive manufacturing technologies. Nowadays, those are under intensive research and using high-strength and lightweight materials have great potential for future use in various fields of industry. SLM technology allows to produce complicated shaped parts without huge material waste or expensive moulds and cores. However the mechanical properties of these materials are currently worse than those of conventionally produced materials.

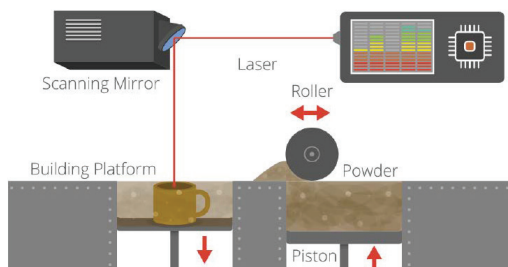
Presented study is aimed to compare fatigue behaviour of SLM and conventionally produced Al alloy AlCu2Mg1,5Ni (EN AW 2618A). Acoustic emission method (AE) and fractography is used for detail analysis of fatigue process.

There are significant differences between fatigue behaviour of SLM and conventional material, which is strongly reflected also in AE signals. It is caused by big amount of internal defects and inhomogenities in the SLM material.

Key words: Selective Laser Melting, acoustic emission, additive manufacturing, fatigue

1. Úvod

Technologie Rapid Prototyping (RP) neboli 3D tisku jsou v poslední době podrobeny intenzivnímu výzkumu, který je zaměřen především na takto vyráběné kovové materiály. Technologie Selective Laser Melting (SLM) je založena postupném tavení tenkých vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku [1]. To umožňuje výrobu dílců se složitým designem, které by jiným způsobem nebyly vyrobitelné, anebo by jejich výroba byla velmi náročná. Oproti konvenčním technologiím se snižuje spotřeba materiálu a není třeba požívat nákladné formy a jádra.



Obr. 1 Schéma výroby součásti technologií SLM [2]

Fig. 1 Scheme of SLM technology principle [2]

Vzhledem k tomu, že technologie SLM je stále ve fázi vývoje, dosahované mechanické vlastnosti takto vyráběných materiálů, především mez únavy, se zatím zcela nevyrovnaly těm konvenčním. Dosavadní práce byly zaměřeny především na výzkum titanových slitin a ocelí, hliníkové slitiny byly zatím opomíjeny. Studie [3] ukázala, že pro titanovou slitinu Ti-6Al-4V je možné dosáhnout lepší životnosti, než je běžná u litého materiálu v surovém stavu a životnosti srovnatelné s litým materiálem po tepelném zpracování. Pro nerezovou ocel SS 316L a 15-5PH je možné dosáhnout pouze o 20-25% nižší únavové životnosti než má konvenčně vyráběný materiál [4]. Špatné mechanické vlastnosti SLM materiálu jsou způsobeny značným výskytem vnitřních vad, kterým mohou být podobné, jak je známe z odlitků či při svařování – porosita, nedolitý materiál, nedostatek přidávaného materiálu, studené spoje a další, ale můžeme zde vidět také vady typické pro technologii SLM jako je například nedostatečně roztavený prášek [3,4,5].

Množství těchto vad může být sníženo vhodným nastavením výrobních parametrů, mezi které patří: rychlost skenování [6], výkon laseru [7], zrnitost a kvalita kovového prášku [8], strategie výroby [9], řádkování [10], tloušťka laserového paprsku a tloušťka vrstvy [11].

Metoda akustické emise (AE) patří mezi standardní metody nedestruktivního testování. Umožňuje detekovat, lokalizovat a vyhodnocovat defekty již v průběhu jejich vzniku, takže je vhodná pro sledování v únavových procesech [12]. Umožňuje nejen detekovat vznik únavové trhliny a její růst [13], ale také rozlišit jednotlivé fáze procesu únavy, předpovědět vznik trhliny [14] a identifikovat zdroje AE ve zkušební vzorku a přiřadit k nim mechanismus poškození [15].

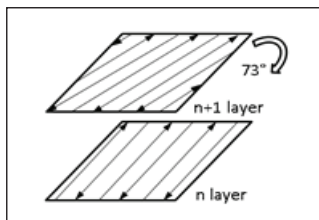
2. Materiál a metody

Testovaným materiálem byla hliníková slitina. Výsledky únavových zkoušek a data získaná akustickou emisí z SLM materiálu byla srovnána s referenčním konvenčně vyráběným (extrudovaným) materiálem AlCu2Mg1,5Ni před a po tepelném zpracování typu T6. Chemické složení prášku pro SLM a referenčního materiálu je srovnatelné (viz. Tabulka 1).

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

Prvek	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti
Referenční materiál	0,24	1,1	2,5	1,5	1,2	0,04
Prášek pro SLM	0,15	1,0	2,66	1,39	1,22	0,2

Vzorky z SLM materiálu byly vyráběny na stroji SLM 180 HL. Nejdříve byly na základě relativní hustoty stanoveny vhodné procesní parametry, které byly: výkon laseru 200 W, rychlost skenování 100 mm/s, řádkování 110 μm a průměr paprsku 82 μm . Strategie výroby byla tzv. meander – viz obr. 2 [16]. Nejnižší dosažené porozity se pohybovaly okolo 0,35 %.

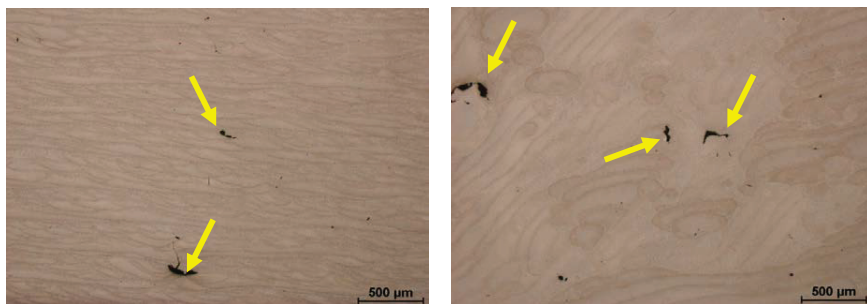


Obr. 2 Strategie výroby meander [16]

Fig. 2 Meander scanning strategy [16]

Celkem bylo vyrobeno 26 vzorků z referenčního materiálu, z nichž 13 bylo tepelně zpracováno (typ T6 – vytvrzování). Z SLM materiálu byly vyrobeny 3 sady vzorků po 4 kusech. 2 sady byly vyrobeny za použití nového prášku, ale lišily se rozložením vzorků na základní desce. Vzorky v první sadě (označené 2015) byly vyrobeny po jednom, vzorky v druhé sadě (označené 2016) byly vyrobeny zároveň. Třetí sada vzorků byla vyrobena z recyklovaného prášku.

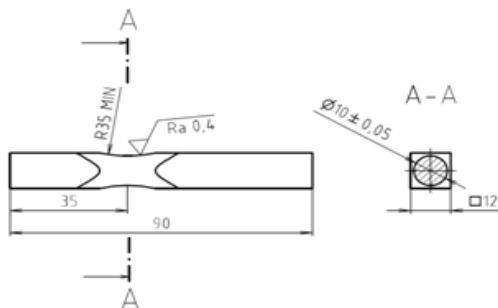
Na metalografických výbrusech SLM materiálu (obr. 3) jsou jasně viditelné hranice přidávaných vrstev, kolem kterých se nachází většina výrobních vad (označené červenými šipkami na obr. 3). Tento typ vad má špatný vliv na únavovou životnost SLM materiálu.



Obr. 3: Mikrostruktura SLM materiálu v podélném (vlevo) a příčném (vpravo) směru ke směru tisku
Fig. 3: Microstructure of SLM material in the longitudinal (left) and transverse (right) direction

Všechny vzorky byly obrobeny do tvaru, který je znázorněn na obrázku 4 a byly podrobeny zkoušce únavy za stejných podmínek, ale při různém napětí.

Zkoušky odolnosti proti únavě v ohybu byly realizovány na elektrozvonném pulsátoru RUMUL Cractronic typ 8204, probíhaly za pokojové teploty za použití symetrického zátěžného cyklu ($R = -1$) se sinusovým průběhem. Průměrná zatěžovací frekvence se pohybovala okolo 52 Hz.

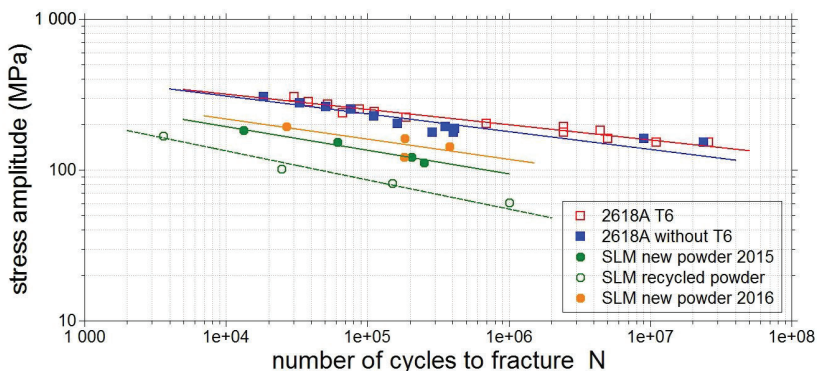


Obr. 4: Vzorek pro zkoušku únavy
Fig. 4: Fatigue testing specimen

Pro detekci signálu AE byla použita měřicí jednotka DAKEL-XEDO a systém IPL, byly použity dva piezoelektrické snímače DAKEL IDK-09 s 35 dB předzesilovačem. Senzory byly upevněny na obou koncích vzorku pomocí vteřinového lepidla Loctite, čímž se vytvořil dvoukanálový lineární lokalizační systém. Systém IPL byl využit pro kontinuální záznam dat ze všech příchozích signálů, vzorkování bylo 2 MHz. Tento systém pokrývá frekvenční pásmo cca 20 – 800 kHz s celkovým zesílením 80 dB. Detekční práh AE hitů byl aplikován při dalším zpracování dat.

3. Výsledky

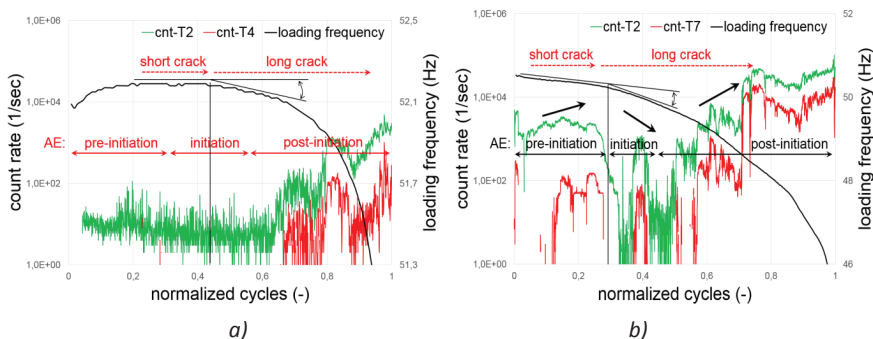
Výsledky všech zkoušek byly srovnávány pomocí standardní S-N křivek (Obr. 5). Materiál SLM měl o hodně horší odolnost proti únavě, než referenční (extrudovaný) materiál. Extrudovaný materiál po tepelném zpracování typu T6 vykazoval jen o málo lepší výsledky, než materiál bez tepelného zpracování. Výsledky zkoušek SLM materiálů ukázaly, že kvalita vyrobeného materiálu silně závisí nejen na procesních parametrech, ale také na kvalitě použitého prášku. Vzorky vyrobené z recyklovaného prášku měly výrazně horší životnost, než vzorky z prášku nového.



Obr. 5: S-N křivky extrudovaného a SLM materiálu
 Fig. 5: S-N diagrams of extruded and SLM materials

Měření AE bylo realizováno pouze pro některá testována napětí. Pro získání přehledu o aktivitě AE byl sledován počet countů a kumulativní počet událostí (Obr. 6). Nejprve byl měřen referenční materiál (Obr. 6a). Na začátku zatěžování (pre-iniciační fáze) byla pozorována vysoká aktivita AE způsobená změnami v mikrostruktuře materiálu, interakcí a pohybem dislokací a vytvářením perzistentních skluzových rovin. Tato fáze je následována nízkou a konstantní aktivitou AE, která zabírá asi 1/3 z celkové životnosti, zde se začínají šířit mikrotrhliny trhliny (iniciační fáze). V poslední fázi aktivita AE opět narůstá, zde se začínají šířit dlouhé trhliny (post-iniciační fáze).

Stejně 3 fáze únavy byly pozorovány také u SLM materiálu, ale aktivita AE se liší (Obr. 6b). Největší rozdíl je v četnosti countů a v délce a poměru jednotlivých fází. První dvě fáze (pre-iniciační a iniciační) zabírají asi polovinu z celkové životnosti vzorku, zvláště iniciační fáze je o hodně kratší, než bylo pozorováno u referenčního materiálu. Toto chování je pravděpodobně způsobeno velkým množstvím výrobních vad (póry a staženiny).

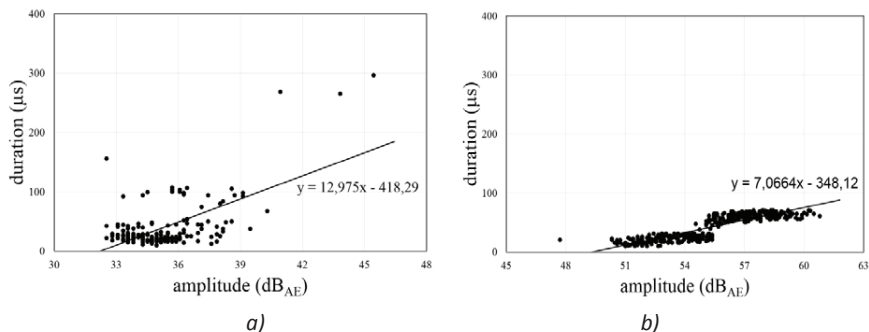


Obr. 6: AE count a zatěžovací frekvence vs. normalizovaný počet cyklů referenčního materiálu při amplitudě napětí 229 MPa (a), SLM materiálu při amplitudě napětí 122 MPa (b)

Fig. 6: AE counts and loading frequency vs. normalized fatigue cycles of reference material at stress amplitude level of 229 MPa (a), SLM at stress amplitude level of 122 MPa (b)

Výrazné rozdíly byly pozorovány také ve velikosti a délce amplitudy AE v různých fázích procesu únavy (srovnání iniciační fáze je znázorněno na obrázku 7). V pre-iniciační fázi bylo u referenčního materiálu pozorováno značné množství událostí s velkým rozptylem velikostí a dobou trvání amplitud. U SLM materiálu se velikost amplitudy v 1. fázi pohybovala mezi 45 a 48 dB_{AE}, a měla krátkou dobu trvání.

Signál AE v iniciační fázi referenčního materiálu je charakterizován nízkými amplitudami s krátkou dobou trvání, které vznikají při vytváření mikrotrhlin. Stejná fáze u SLM materiálu je charakterizována vysokými amplitudami s krátkou dobou trvání.

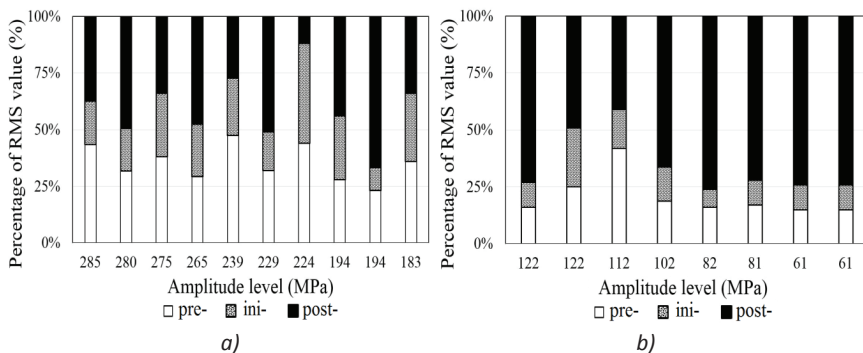


Obr. 7: Lineární regrese událostí AE v iniciační fázi referenční materiálu (a) a ve stejné fázi SLM materiálu (b)

Fig. 7: Linear regression of AE events in the initiation stage of AlCu2Mg 1,5 Ni (a) and same stage of SLM material (b)

Míra celkové energie signálu v různých stádiích únavového procesu je znázorněna na obrázku 8. U referenčního materiálu fáze iniciace trhliny (v obrázku jako „ini“) obvykle zabírá menšinu z uvažované životnosti, zatímco pre-iniciační fáze (v obrázku jako „pre-“) obvykle zabírá téměř celou životnost. Bohužel, tato studie se nezabývá vztahem mezi dobou trvání jednotlivých fází a amplitudou ohybu.

Přesvědčivější a konzistentnější výsledky byly získány u SLM materiálu. Zde je jasně zřejmá, bez ohledu na nehomogenitu struktury materiálu, fáze šíření trhliny (v obrázku jako „post-“) zabírá více než 2/3 životnosti ve všech sledovaných případech. Příčinou je časně šíření trhlin způsobené výrobními vadami a jejich růstem během cyklického zatěžování, tím pádem je pre-iniciační a iniciační fáze velmi krátká, jak je vidět také na obrázku 5b.

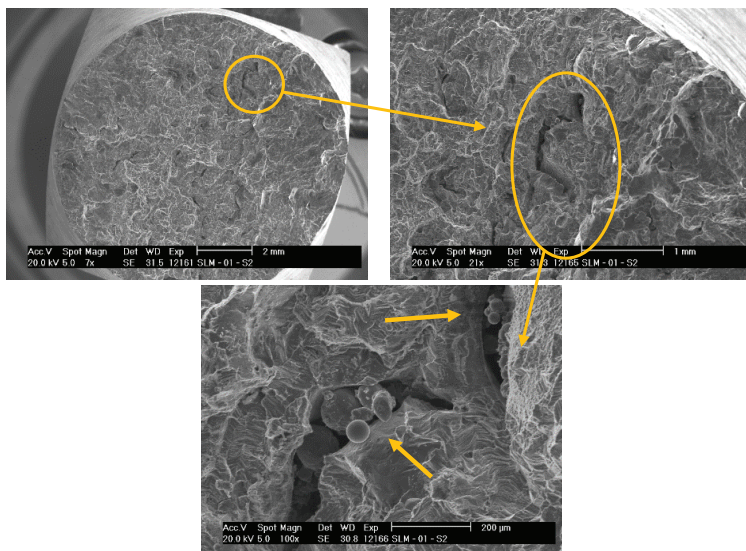


Obr. 8: Distribuce energie signálu v různých stádiích únavy (a) referenčního materiálu, (b) SLM materiálu

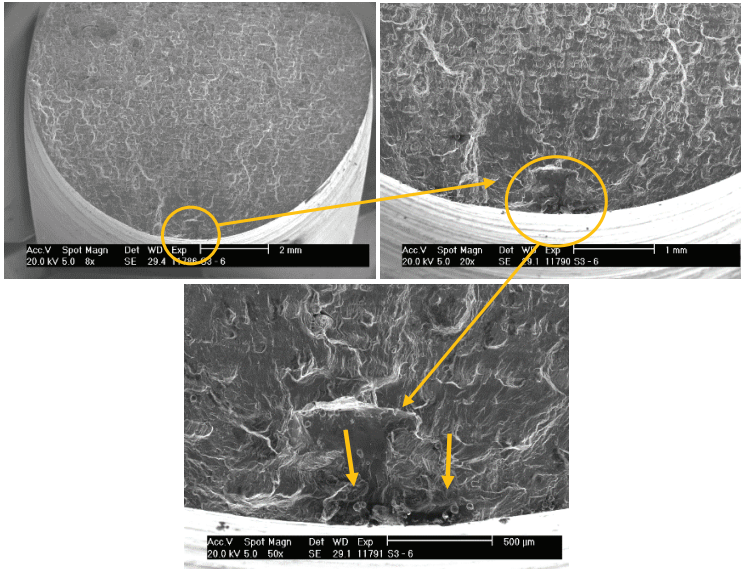
Fig. 8: Distribution of signal energy in different stages of fatigue (a) reference material, (b) SLM material

Měření únavy a AE bylo doplněno také fraktografickou analýzou (Obr. 9 – 11). Jsou zde jasně viditelné výrobní vady (v červeném kroužku na obr. 9), neroztavené práškové částice (označené žlutými šipkami) naznačují, že tato vada vznikla během výroby.

Červené kroužky na obrázcích 10 a 11 označují místa iniciace trhlin, které jsou lokalizovány ve výrobních vadách na povrchu vzorku. V dutinách jsou opět vidět neroztavené částice prášku, takže vady vznikly během výrobního procesu.



Obr. 9: Fraktografie SLM materiálu s označenou vadou
Fig. 9: The fractography of SLM material with marked defect



Obr. 10: Fractografie SLM materiálu s označeným místem iniciace trhliny, amplituda zatížení 122 MPa

Fig. 10: The fractographic of SLM material with marked crack origins, stress amplitude level 122 MPa

4. Závěry

V této studii byly prezentovány výsledky z testování odolnosti proti únavě extrudovaného materiálu z hliníkové slitiny AlCu2Mg1,5Ni a SLM materiálu s podobným chemickým složením. Tyto zkoušky byly doplněny měřením AE a fraktografickou analýzou. Výsledky měření obou materiálů byly porovnávány a bylo nalezeno nejen velké množství rozdílů, ale také některé společné jevy.

Všechny 3 výrobní dávky z SLM materiálu měly horší odolnost proti únavě než konvenčně vyráběný (extrudovaný) materiál. Signál AE ukázal, že u obou materiálů jsou zřetelné 3 fáze únavového procesu, pre-iniciační, iniciační a post-iniciační fáze. Poměr fází, amplituda AE a její trvání se u obou materiálů výrazně liší.

Fraktografická analýza vzorků z SLM materiálu ukázala, že místa iniciace trhliny jsou lokalizována v povrchových vadách, které vznikly během výroby tohoto materiálu. Procesní parametry SLM technologie pro výrobu cyklicky namáhaných součástí z hliníkové slitiny AlCu2Mg1,5N ještě nejsou optimalizovány a je potřeba je dále studovat.

V další studii budou vyzkoušeny další procesní parametry a také bude detailněji pozorován vliv dalších podmínek výroby (např. postavení vzorků na základní desce). Dále bude sledován vliv tepelného zpracování na kvalitu SLM materiálu.

5. Poděkování

Autoři práce by chtěli poděkovat České grantové agentuře (GAČR) za finanční podporu projektu č. GA15-23274S „Návrh pokročilých materiálů s využitím selective laser melting“. Práce byla také financována Fakultou strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně v rámci projektu FSI-S-14-2329 „Vibroizolační systém užitečného nákladu kosmických nosičů“.

Literatura

- [1] KRUTH, J-P., P. MERCELIS, J. VAN VAERENBERGH, L. FROYEN a M. ROMBOUITS. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2005, **11**(1), 26-36. DOI: 10.1108/13552540510573365. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540510573365>
- [2] 3D Printing Processes: The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry* [online]. 2013 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>
- [3] LIU, Qianchu, Joe ELAMBASSERIL, Shoujin SUN, Martin LEARY, Milan BRANDT a Peter Khan SHARP. The Effect of Manufacturing Defects on The Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated Using Selective Laser Melting. In: *11TH INTERNATIONAL FATIGUE CONGRESS, PTS 1 AND 2*. Melbourne, AUSTRALIA, 2014, s. 1519-1524. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.1524.
- [4] SPIERINGS, A. B., T. L. STARR a K. WEGENER. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2013, **19**(2), 88-94. DOI: 10.1108/13552541311302932. ISBN 10.1108/13552541311302932. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541311302932>
- [5] GONG, Haijun, Khalid RAFI, Hengfeng GU, G. D. JANAKI RAM, Thomas STARR a Brent STUCKER. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Materials and Design*. 2015, **86**, 545-554. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147. ISBN 10.1016/j.matdes.2015.07.147. ISSN 02641275. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515302161>
- [6] RAFI, H. Khalid, Thomas L. STARR a Brent E. STUCKER. 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, **69**(5-8), 1299-1309. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.147. ISBN 10.1007/s00170-013-5106-7. ISSN 026837687. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5106-7>
- [7] SONG, Bo, Shujuan DONG, Sihao DENG, Hanlin LIAO a Christian CODDET. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics and Laser Technology*. 2014, **53**(3), 451-460. DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.09.017. ISBN 10.1016/j.optlastec.2013.09.017. ISSN 0030-3992. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399213003423>

- [8] BOURELL, Dave, A. B. SPIERINGS, N. HERRES a G. LEVY. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2011, **17**(3), 195-202. DOI: 10.1108/13552541111124770. ISBN 10.1108/13552541111124770. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541111124770>
- [9] MERCELIS, Peter a Jean-Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, **12**(5), 254-265. DOI: 10.1108/13552540610707013. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540610707013>
- [10] VANDENBROUCKE, Ben a Jean-Pierre KRUTH. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2007, **13**(4), 196-203. DOI: 10.1108/13552540710776142. ISSN 1355-2546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540710776142>
- [11] ABD-ELGHANY, K. a D. L. BOURELL. Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2012, **18**(5), 420-428. DOI: 10.1108/13552541211250418. ISBN 10.1108/13552541211250418. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541211250418>
- [12] SHANYAVSKIY, Andrey a Mukharbiy BANOVA. Fatigue Cracking and Acoustic Emission Regularities in Metals: Crack Origination and Growth. *Key Engineering Materials*. 2013, **592**(5), 735-740. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.735. ISBN 10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.735. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.592-593.735>
- [13] DANIEL, IM, JJ LUO, CG SIFNIOTOPOULOS a HJ CHUN. *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. 1. New York: Plenum Press, 1997, s. 451-458. ISBN 0306455978.
- [14] HAN, Zhiyuan, Hongyun LUO, Chuankai SUN, Junrong LI, Mayorkinos PAPAELIAS a Claire DAVIS. Acoustic emission study of fatigue crack propagation in extruded AZ31 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2014, **597**, 270-278. DOI: 10.1016/j.msea.2013.12.083. ISBN 10.1016/j.msea.2013.12.083. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509313014664>
- [15] NOHÁL, L, F HORT, J DVOŘÁČEK a P MAZAL. An experimental investigation of rolling contact fatigue of steels using acoustic emission method. *INSIGHT*. 2013, **55**(12), 665-669. DOI: 10.1784/insi.2012.55.12.665. ISBN 10.1784/insi.2012.55.12.665. ISSN 1354-2575. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>
- [16] KOUKAL, O., D. KOUTNÝ, D. PALOUŠEK, R. VRÁNA, T. ZIKMUND a L. PANTĚLJEV. Research about the Influence of Process Parameters of Selective Laser Melting on Material EN AW 2618. In: *Euro PM2015 Proceedings*. Reims, France, 2015, s. 6. ISBN 978-1-899072-47-7.



NOVÉ MOŽNOSTI PHASED ARRAY ZOBRAZENÍ NEW POSSIBILITIES OF PHASED ARRAY IMAGING

Tomáš Macán

Testima, spol. s r.o.

Contact e-mail: macan@testima.cz

Abstrakt

V příspěvku je prezentována nová možnost zobrazení vad ultrazvukovou metodou posed array – true to geometry imaging. True to geometry imaging počítá s reálnými rozměry zkoušeného svaru a zobrazuje vady v modelu svaru v místech, kde opravdu jsou. Nedochází tak k zobrazování jedné vady dvakrát a nezobrazují se indikace od geometrie svaru.

Klíčová slova: *ultrazvuk, phased array, sektorový scan, zobrazení vad, true to geometry imaging*

Abstract

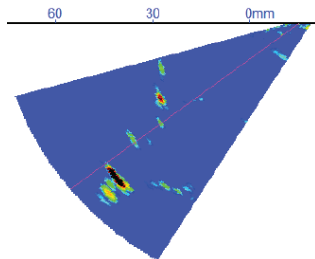
In contribution is presented new flaws paging possibility for ultrasonic inspection with posed array – true to geometry imaging. True to geometry paging works with real dimensions of tested weld and display flaws in weld model in areas where the flaws are really. One flaw is not displayed two times and the indication from weld geometry is not displayed too.

Keywords: *ultrasound, phased array, sector scan, flaws imaging, true to geometry imaging*

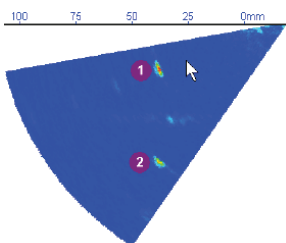
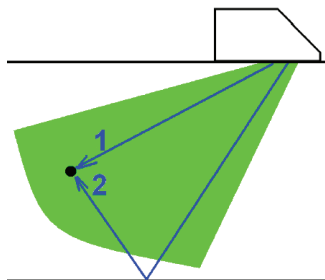
Od počátku je ultrazvuková metoda testování materiálu označována (hlavně kolegy rentgenáři) jako „duchařina“. A není se čemu divit. Při pohledu na rentgenový snímek většinou i lajk pozná, že jsou v daném předmětu vady. Hned na snímku vidí, kde vady jsou a jak jsou velké. Pokud ale někomu neznalému ukážete záznam ze zkoušení ultrazvukem, tak nepozná vůbec nic. Vidí jen nějaká echa na obrazovce, jednou to echo znamená vadu, podruhé ne, je to jen odraz od geometrie. Vůbec není poznat, kde vada je, a už vůbec ne, jak je vada velká. Takže se trochu hanlivému označení „duchařina“ nemůžeme vůbec divit.

Ultrazvuková metoda má však svoje nezastupitelné místo mezi nedestruktivními metodami testování materiálů. Je většinou levnější, umožňuje odhalit vady, které rentgenem detekovatelné nejsou, a hlavně není omezena bezpečnostními opatřeními jako rentgenová metoda. Proto se výrobci ultrazvukové techniky snaží vylepšit výsledky interpretace ultrazvukové kontroly a přiblížit se k výsledkům, které nám poskytne rentgenová kontrola.

Prvním krokem k lepší vizualizaci vad bylo použití phased array metody. Při této metodě se používá víceměničová sonda (8, 16, 32, 64 až 128 měničů). Použití více měničů umožňuje získat více informací o vadě a vadu vykreslit ne jenom jako klasické echo, ale jako barevný „flek“. Zobrazení vady je tedy názornější, ale stále neodstraňuje problém s polohou vady, indikacemi od geometrie, navíc vzniká problém, že jedna vada může být zobrazena dvakrát.



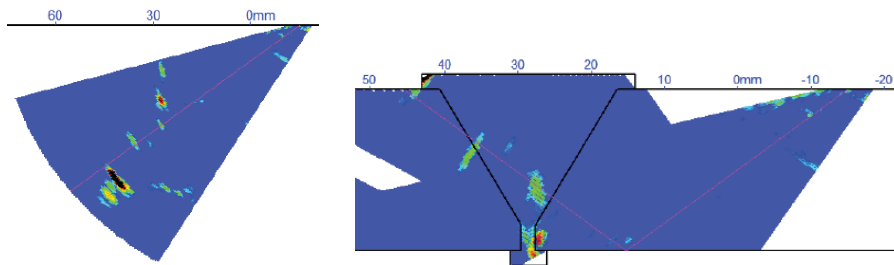
Obr. 1: Zobrazení vady phased array metodou
Pic. 1: Flaw imaging with phased array method



Díky použití velkého rozsahu úhlů při zkoušení může být jedna vada znázorněna dvakrát - napřímo a po odrazu.

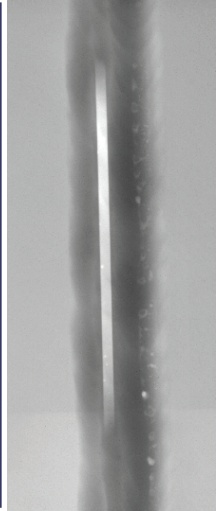
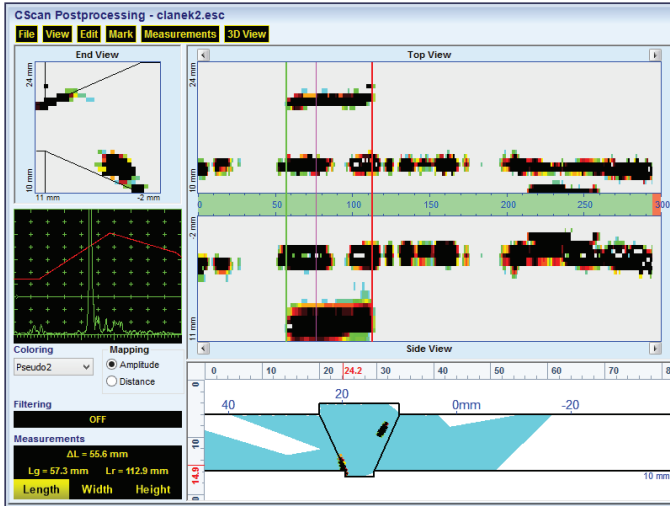
Obr. 2: Jedna vada může být zobrazena dvakrát
Pic. 2: One flaw can be displayed two times

Všechny tyto nedostatky phased array metody odstraňuje unikátní true to geometry imaging technologie (TTGI) použitá v přístrojích ISONIC od izraelské společnosti SONOTRON NDT (dodávány společností TESTIMA spol. s r.o.). TTGI počítá s geometrií svaru a vykresluje všechny indikace do předem nadefinované geometrie svaru. Tzn., že vady jsou zobrazeny v místě, kde skutečně jsou, indikace od geometrie jsou jasně viditelné jako indikace od geometrie a nedochází k zobrazení jedné vady dvakrát.

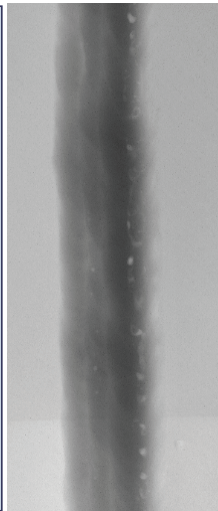
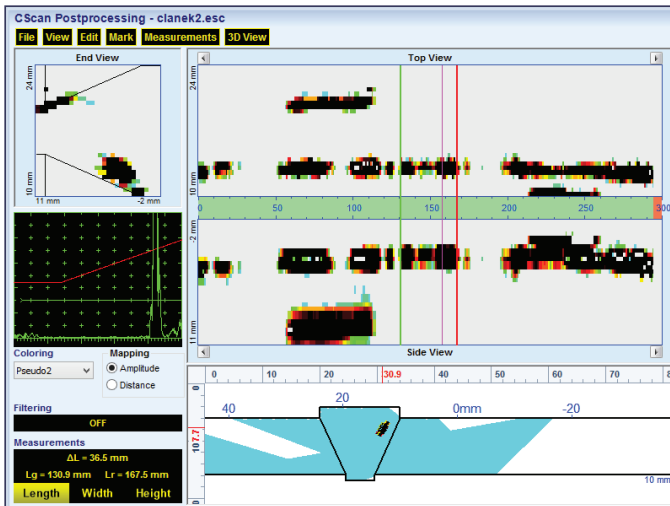


Obr. 3: Porovnání běžného sektorového skenu a TTGI (stejný svar)
Pic. 3: Comparison between common sector scan and TTGI (the same weld)

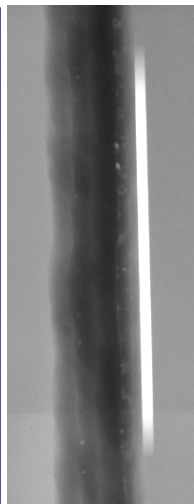
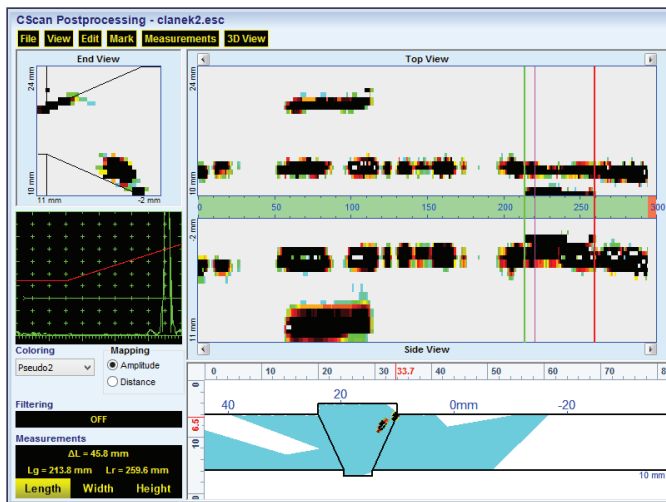
Porovnání phased array metody s použitím TTGI (přístroj ISONIC 32:32 + 5 MHz, 32 elementová sonda) a rentgenové kontroly bylo provedeno na tupém svaru dvou plechů o tloušťce 10 mm. Ve svaru bylo množství přirozených vad a dvě umělé vady ve formě drážky.



Obr. 4: Část svaru s drážkou na spodní straně
Pic. 4: Part of the weld with groove on bottom side

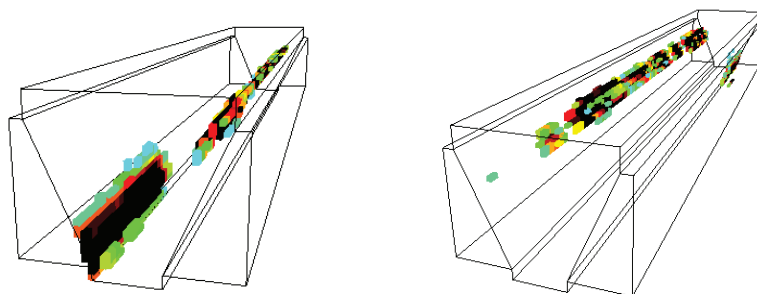


Obr. 5: Část svaru bez drážky
Pic. 5: Part of the weld without groove



Obr. 6: Část svaru s drážkou na horní straně
 Pic. 6: Part of the weld with groove on top side

Výsledky ultrazvukové zkoušky se shodují s výsledky rentgenové zkoušky. Díky použití TTGI technologie je interpretace snadná jako u rentgenového snímku, vady jsou znázorněny v místě, kde skutečně jsou, délku vady lze snadno odměřit, velikost vady odečíst z DAC křivky.



Obr. 7: 3D model svaru s vykreslením vad
 Pic. 7: 3D model of the weld with flaws imaging

Díky TTGI technologii jde však ultrazvuková metoda ještě za hranici běžného rentgenového snímku a umožňuje tvorbu 3D modelů svarů (nebo výřezu jejich části). S modelem je možno otáčet, přibližovat si ho a tím zcela jasně ukázat, kde se vady ve svaru vyskytují.



SIGNAL CONDITIONING FOR AN ULTRASOUND-BASED INSPECTION SYSTEM USING A CUSTOM-DEVELOPED CHARGE AMPLIFIER

Bruno SILVA MARCIÓ*, Mateus SANT'ANA, Rodolfo CÉSAR COSTA FLESCH*****

* PhD student, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil
e-mail: blr@labmetro.ufsc.br.

** Undergraduate student, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil
e-mail: mateussantana@grad.ufsc.br.

*** Doctor Professor, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Brazil
e-mail: rodolfo.flesch@ufsc.br.

Abstract

Many key characteristics of components can be evaluated by means of nondestructive tests, both for product acceptance in the manufacturing line and for preventive maintenance. Piezoelectric transducers are widely used for this type of inspection, as they are natural candidates for generating and measuring ultrasound waves. In order to overcome certain limitations, piezoelectric transducers are normally integrated to charge amplifiers, which convert the high-impedance electric charge output signal into a low-impedance voltage signal. Furthermore, the same charge amplifier can be used with different types of transducers or cables without modifying its performance. When analyzing several examples related to the development of charge amplifiers present in literature, as well as available commercial solutions, it might be observed that most of them are supposed to operate under a wide range of conditions and frequencies. In order to improve the results presented by general-purpose solutions, this paper proposed the development of a charge amplifier for a specific application with a piezoelectric transducer presenting a nominal frequency of 40 kHz, which is a typical frequency value for piezoelectric transducers operating in air. Thus, an optimized performance and lower cost can be achieved. Results of both numerical and experimental analysis are presented validating the proposed method. The developed charge amplifier achieved good performance, by presenting an appropriate gain and a flat frequency response within the required frequency bandwidth.

Key words: Charge Amplifier, Piezoelectric Transducer, Ultrasound-Based System, Signal Conditioning.

1. Introduction

Ultrasound-based inspection techniques are widely used for performing nondestructive tests in industry, especially in the quality control of manufacturing processes and preventive maintenance [1]. By means of this method, the presence of defects, the thickness of a workpiece or the properties from a raw material can be determined [2]. The basic principle of ultrasound method is based on emitting and receiving mechanical waves above 20 kHz, which are normally generated by piezoelectric transducers. A typical piezoelectric transducer comprises a crystal or ceramic made by piezoelectric material and two electrodes deposited on opposite sides, on which local cables are fixed to transmit an electrical signal to the material or the device response due to mechanical loading. The direct piezoelectric effect is shown when the crystal element is submitted to a mechanical deformation, for instance, due to ultrasonic waves, which will create an electric charge in the transducer output. The inverse

procedure may be performed by applying a voltage between the electrodes, which will deform the crystal element and result in the generation of ultrasonic waves [3,4].

A restriction for the use of a piezoelectric transducer refers to its high output impedance and the generation of low electric charges. In addition, general data acquisition systems measure voltages and the voltage output of a piezoelectric transducer varies depending upon the characteristics of the cables that are used to transmit its output signal, mainly the cable equivalent capacitance. In order to overcome these limitations, the mentioned transducers are normally integrated to signal conditioning circuits called charge amplifiers, which convert the high-impedance electric charge output signal into a low-impedance voltage signal. Furthermore, these devices can provide high input impedance to the transducer, while presenting low output impedance [5, 6]. The major advantage of using charge amplifiers in comparison to other types of signal conditioning devices refers to the generated output voltage, which is unaffected by the transducer and cable capacitances. Therefore, the same charge amplifier can be used with different types of transducers or cables, without modifying its performance [7].

Under this scope, several researches propose the design and the development of charge amplifiers to be applied with piezoelectric transducers. Li et al. (2014) present the design of a miniaturized high performance charge amplifier to application with polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric transducer. The authors performed the amplifier circuit modelling and, by means of software simulations and experimental tests, the theoretical study could be validated. In Cao et al. (2013), a high gain and low noise charge amplifier design was described to application with a MEMS micro accelerometer. In order to verify the theoretical analysis developed by the authors, simulations were performed and the obtained results showed the designed charge amplifier achieved the defined requirements. Hopkins et al. (2015) conducted a comparative noise analysis with the three typical operational amplifier circuit topologies used with piezoelectric transducers: single-ended charge amplifier; differential charge amplifier and voltage mode amplifier. With that purpose, the authors designed prototype circuits for the evaluated topologies and the theoretical analysis could be validated by experimental data.

Even though literature presents several examples of studies related to the development of charge amplifiers, most of them are supposed to operate under a wide range of conditions and frequencies. The same can be said about commercial off-the-shelf solutions. This paper proposes the development and experimental validation of a charge amplifier for a specific application with a piezoelectric transducer presenting a nominal frequency of 40 kHz. This case-specific development analyses how important parameters for the application, like an appropriate gain and a flat frequency response within the required frequency bandwidth, can be achieved in order to improve the results presented by general-purpose solutions.

In order to present the developed activities, the present study is organized in four sections. The modeling of a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier is described in Section 2. Afterward, simulation and experimental test results are presented in Section 3. Lastly, the conclusions regarding this work are shown in Section 4.

2. Modeling of a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier

Piezoelectric transducers are generally modeled using one of the following approaches: as a charge source with a capacitance and a resistance in parallel or as a voltage source with a parallel association of a capacitance and resistance in series [8]. Both models are presented in Fig.1.

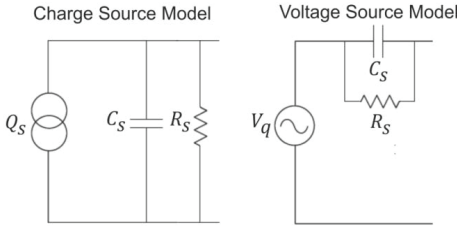


Figure 1 - Piezoelectric transducer models [8]

- Legend:
- Q_s electric charge generated by the piezoelectric transducer;
 - C_s output capacitance of the piezoelectric transducer;
 - R_s output resistance of the piezoelectric transducer;
 - V_q voltage proportional to the electric charge.

Regarding a typical charge amplifier, it consists of an operational amplifier integrated to a feedback capacitor and resistor, which form a closed-loop with the inverting input. The gain generated by the charge amplifier can be represented as a transfer function, on which the voltage output is related to the electric charge input. Figure 2 shows an equivalent circuit for a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier, from which it is possible to define a transfer function that characterizes the closed-loop behavior of the system [6].

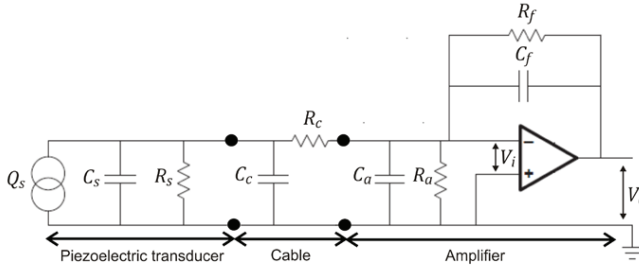


Figure 2 - Equivalent circuit for a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier [6]

- Legend:
- Q_s charge generated by the piezoelectric transducer;
 - C_s piezoelectric transducer output capacitance;
 - R_s piezoelectric transducer output resistance;
 - C_c cable capacitance;
 - R_c cable resistance;
 - C_a operational amplifier input capacitance;
 - R_a operational amplifier input resistance;
 - R_f feedback resistance;
 - C_f feedback capacitance;
 - V_i voltage input of the amplifier circuit;
 - V_o voltage output of the amplifier circuit.

As the piezoelectric transducer output resistance (R_s) and the operational amplifier input resistance (R_a) generally present high values, and combining the piezoelectric transducer output capacitance (C_s) with the cable capacitance (C_c), the circuit in Fig. 2 can be reduced to the one shown in Fig. 3.

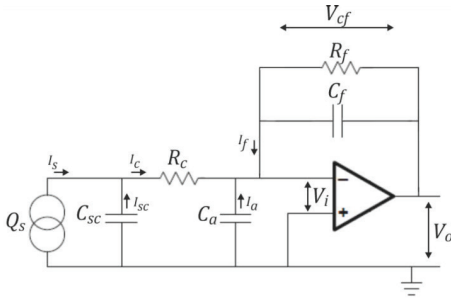


Figure 3 - Reduced equivalent circuit for a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier [6]

C_{sc} sum of the piezoelectric transducer output capacitance and the cable capacitance;

V_{cf} voltage across the feedback loop;

I_s piezoelectric transducer current;

Legend: I_{sc} current from C_{sc} ;

I_c current flowing through the cable;

I_a current from C_a capacitor;

I_f current in the feedback loop.

The amplifier input (V_i) and output (V_o) voltages can be related by equation (1)

$$V_o = -AV_i, \quad (1)$$

where A is the open-loop gain of the operational amplifier. By means of equation (2), the voltage across the feedback loop (V_{cf}) in Fig. 3 can be defined as:

$$V_{cf} = V_o - V_i = V_o - \frac{V_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right)V_o. \quad (2)$$

When considering an ideal amplifier, its bias current can be considered zero. Therefore, it might be affirmed that

$$I_s + I_{sc} = I_c \quad (3)$$

$$I_a + I_f + I_c = 0. \quad (4)$$

Furthermore, by combining equations (3) and (4), the following expression can be obtained:

$$I_s + I_{sc} = -I_a - I_f. \quad (5)$$

When defining these currents in terms of other circuit parameters, equations (6), (7), (8) and (9) can be obtained.

$$I_s = \frac{dQ_s}{dt} \quad (6)$$

$$I_{sc} = -C_{sc} \left(R_c \frac{dI_c}{dt} - \frac{1}{A} \frac{dV_o}{dt} \right) \quad (7)$$

$$I_a = -C_a \frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{A} C_a \frac{dV_o}{dt} \quad (8)$$

$$I_f = C_f \frac{dV_f}{dt} + \frac{V_f}{R_f} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_a \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right) \quad (9)$$

By replacing (6), (7), (8) and (9) in equation (5), the following relation can be defined:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_s}{dt} = & \left[-R_c C_{sc} C_f \left(1 + \frac{1}{A} \right) - R_c C_{sc} C_a \frac{1}{A} \right] \frac{d^2 V_o}{dt^2} + \\ & \left[-\frac{C_{sc} - C_a}{A} - C_f \left(1 + \frac{1}{A} \right) - \frac{R_c C_{sc}}{R_f} \left(1 + \frac{1}{A} \right) \right] \frac{dV_o}{dt} + \\ & \left[-\left(1 + \frac{1}{A} \right) \frac{1}{R_f} \right] V_o. \end{aligned} \quad (10)$$

When considering the operational amplifier open-loop gain (A) inversely proportional to the frequency, i. e., the open-loop gain decreases as the frequency increases, its dynamic behavior can be modeled as a transfer function given by equation (11).

$$A = \frac{A_\emptyset}{\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1} \quad (11)$$

where, A_\emptyset zero-frequency open-loop gain;
 f_A dynamic frequency from the open-loop gain.

Therefore, it is possible to define an expression which represents the charge amplifier closed-loop behavior in the frequency domain, as presented in equation (12).

$$\frac{V_o(s)}{Q_s(s)} = \frac{s}{K_2 s^2 + K_1 s + K_0} \quad (12)$$

where,

$$\begin{aligned} K_2 = & \left(-R_c C_{sc} C_a \left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right) \frac{1}{A_\emptyset} \right) - \left(R_c C_{sc} C_f \left(1 + \frac{\left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right)}{A_\emptyset} \right) \right); \\ K_1 = & \left(- \left(R_c C_{sc} \frac{1}{R_f} \left(1 + \frac{\left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right)}{A_\emptyset} \right) \right) \right) - \left(C_{sc} \left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right) \frac{1}{A_\emptyset} \right) - \\ & \left(C_a \left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right) \frac{1}{A_\emptyset} \right) - \left(C_f \left(1 + \frac{\left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right)}{A_\emptyset} \right) \right); \\ K_0 = & - \left(\left(1 + \frac{\left(\left(\frac{1}{2\pi f_A} \right) s + 1 \right)}{A_\emptyset} \right) \frac{1}{R_f} \right). \end{aligned}$$

When analyzing the frequency response from the transfer function represented by the equation (12), it might be observed that the low frequency response will present a high-pass filter dynamic, as there is an s in the numerator of the transfer function (a zero in the origin).

The cutoff frequency of the high-pass portion (f_{cl}) can be determined by the time constant from the feedback circuit, i. e., $\tau_f = R_f C_f$. The expression for f_{cl} is presented in equation (13).

$$f_{cl} = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \tag{13}$$

With regard to the high frequency response, the amplifier circuit will show a low-pass dynamic due to the presence of a resistive-capacitive filter between the piezoelectric transducer and the operational amplifier input. This low-pass filter comprises the cable resistance (R_c) in parallel with the piezoelectric transducer output capacitance and the cable capacitance combined (C_{sc}), in addition to the operational amplifier input capacitance (C_a) (see Fig. 3). The cutoff frequency of this low-pass filter (f_{ch}) can be defined as:

$$f_{ch} = \frac{1}{2\pi R_c (C_{sc} + C_a)} \tag{14}$$

When assuming high values for zero-frequency open-loop gain (A_0) and feedback resistance (R_f), in addition to low values for cable resistance (R_c), it is possible to verify that equation (12) can be reduced to the expression (15). Therefore, the mid-band gain generated by the charge amplifier might be controlled by means of the feedback capacitance (C_f).

$$\frac{V_o(s)}{Q_s(s)} = -\frac{1}{C_f} \tag{15}$$

Figure 4 presents the frequency response from the charge amplifier, according to the transfer function given by equation (12).

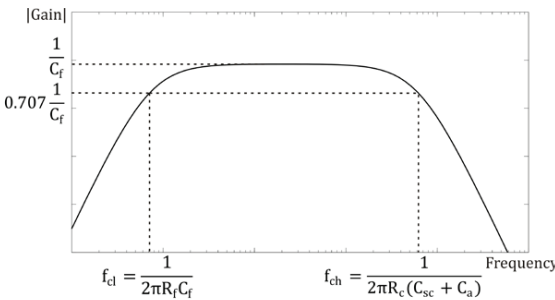


Figure 4 - Frequency response from the developed amplifier circuit model

3. Validation of the developed model

In Sect. 2, the frequency-domain model of a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier was presented. A further step involves the validation of the model developed by means of numerical simulations and experimental tests. With this purpose, the piezoelectric transducers to be used in the experimental tests must be chosen. In this regard, Murata MA40S4S [9] and Murata MA40S4R [10] have been selected due to their specific features, such as the nominal frequency of 40 kHz, which is a typical frequency value for piezoelectric transducers operating in air. The main characteristics of both transducers are presented in Table 1.

Table 1 – Characteristics of the selected piezoelectric transducers

Model	Function	Nominal frequency (kHz)	Sensitivity (dB – ref 1 V/mPa)	Capacitance (pF)
MA40S4S	Transmitter	40	-63	2550
MA40S4R	Receiver	40	-63	2550

Afterward, operational amplifiers commercially available were assessed according to the following characteristics: low input bias current, high open-loop gain and high gain-bandwidth product.

Ideally, no current flows into or out of the inverting and non-inverting terminals of an operational amplifier. However, in practice, low intensity currents – called bias currents – may flow in either direction of both terminals, which can create undesirable voltages when those flow through external impedances. Thus, in piezoelectric transducer applications, which generally create low output intensity signal, it becomes crucial to choose an operational amplifier model with lower values of input bias current [11].

Regarding the open-loop gain and gain-bandwidth product, these features indicate the maximum gain provided by the operational amplifier and the maximum gain that can be provided by the device for a given frequency, respectively. In piezoelectric transducer applications, which present low output intensity signal, operational amplifiers that provide high open-loop gain and reasonable flat frequency response, especially within the transducer operating frequency range, should be selected [12].

Hence, Texas Instrument OPA657 [13] operational amplifier was selected due to its relatively low input bias current, high open-loop gain and high gain-bandwidth product, as seen as follows:

- Input bias current: 40 pA
- Open-loop gain: 75 dB
- Gain-Bandwidth product: 1.6 GHz

3.1. Numerical evaluations

In the scope of this work, two numerical evaluations of the circuit were performed: (i) by using MATLAB [14] and implementing the model given by equations (12)-(15); (ii) by using a commercial circuit simulator (Multisim [15]) and the model presented in Fig. 2 with the actual models of the components. The main goal was to simulate several test conditions and define the frequency response from the amplifier circuit and the gain generated at the nominal frequency of the piezoelectric transducer.

As we were not able to implement a charge source with controlled conditions for experimental evaluation of the developed circuit, we decided to model the piezoelectric transducer as a voltage source with an impedance in series (Fig. 1) in order to allow the comparison of the experimental results with the numeric ones. Thus, the transfer function applied during this topic will relate the output voltage from the charge amplifier (V_o) to the output voltage from the transducer (V_i), as presented in equation (16). Parameters K_0 , K_1 and K_2 are the same from (12).

$$\frac{V_o(s)}{Q_s(s)} = C_{sc} \frac{s}{K_2 s^2 + K_1 s + K_0} \quad (16)$$

Figure 5 presents the amplifier circuit developed using Multisim software, according to an equivalent circuit for a charge amplifier connected to a piezoelectric transducer, which was modeled as a voltage source with a parallel association of a capacitance and resistance in series.

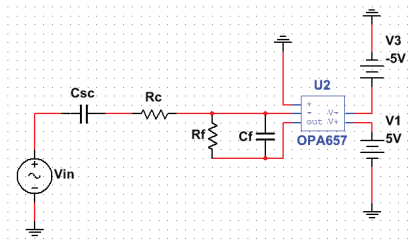


Figure 5 - Amplifier circuit developed in the Multisim software

Previous to the simulation procedures, it was required to determine the test conditions. For this purpose, the components present in the amplifier circuit were defined, such as the input and output capacitance from piezoelectric transducer, the cable capacitance and the feedback resistance and capacitance. In addition, the lower cutoff frequency, the upper cutoff frequency and the gain were calculated according to equations (13), (14) and (15), respectively. This information is presented in Table 2 for different pairs of feedback resistance and capacitance.

Table 2 - Components and parameters values for each test condition

Test	1	2	3
Output capacitance – Transducer (pF)	2550.00	2550.00	2550.00
Input capacitance – Op. amplifier (pF)	4.50	4.50	4.50
Cable resistance (Ω)	0.10	0.10	0.10
Feedback capacitance (pF)	470.00	47.00	4.70
Feedback resistance (M Ω)	0.47	4.70	47.00
Lower cutoff frequency – Calculated (Hz)	720.00	720.00	720.00
Upper cutoff freq. – Calculated (kHz)	612.00	612.00	612.00
Gain – Calculated (dB)	14.70	34.70	54.70

Subsequently, the numerical simulations were performed and the frequency response for each test condition was obtained. A comparison between the gain and the cutoff frequencies calculated and those obtained in the numerical simulations is shown in Table 3.

Table 3 - Gain and cutoff frequencies calculated and those obtained in the numerical simulations

Test	1	2	3
Lower cutoff frequency – Calculated (Hz)	720.00	720.00	720.00
Lower cutoff frequency – Matlab (Hz)	730.00	716.00	665.00
Lower cutoff frequency – Multisim (Hz)	719.50	702.00	550.00
Upper cutoff freq. – Calculated (kHz)	612.00	612.00	612.00
Upper cutoff frequency – Matlab (kHz)	615.00	617.00	595.00
Upper cutoff frequency – Multisim (kHz)	628.00	636.80	700.50
Gain – Calculated (dB)	14.70	34.70	54.70
Gain – Matlab (dB)	14.70	34.60	53.90
Gain – Multisim (dB)	14.64	34.38	52.20

According to Table 3, it is possible to verify that the parameters of interest indicated in tests 1 and 2 were very similar to those calculated and those simulated with MATLAB and Multisim software. However, when looking the results from the third test, it might be observed that the calculated cutoff frequencies showed slightly differences from the values obtained in both simulations. This situation happened due to the low value chosen for the feedback capacitance in the third test, which is of the same order of magnitude of other parameters that were not considered during the development of the amplifier circuit model.

3.2. Experimental tests

Experimental tests were performed aiming to compare the obtained results and, subsequently, validate the developed amplifier circuit models. Therefore, this amplifier circuit was built on ELVIS II+ [16], which comprises a signal acquisition module, breadboard, power and signal sources. An OPA 657 was mounted in a PCB with DIP ports, in order to be appropriately connected on ELVIS II+.

For the first part of the experimental test, the circuit presented in Fig. 5 was built and the sine-wave source provided by ELVIS II+ was used as the input of the amplifier circuit, in order to simulate a piezoelectric transducer. A value of $V_{pp} = 0.02\text{ V}$ was determined, where V_{pp} is the peak-to-peak voltage. To represent the piezoelectric transducer output capacitance, ceramic capacitors were used with values ranging from 100 pF to 2350 pF, which is the closest value available to the nominal capacitance of Murata MA40S4R. Afterward, the amplifier circuit output signal was acquired, which allowed to calculate the signal gain and compare it with the simulation results. Experimental results can be seen in Table 4, where the gain values are related to the expression in equation (16), i.e., from the source voltage to the voltage of the amplifier output.

Table 4 - Gain obtained in the first part of the experimental tests

C_{sc} (pF)	C_f (pF)	R_f (M Ω)	Gain – Matlab simulation (dB)	Gain – Multisim simulation (dB)	Gain – experimental tests (dB)
100.00	1.50	20.00	36.40	36.00	35.00
1000.00	68.00	4.70	23.30	23.26	23.50
1000.00	4.70	4.70	46.10	45.45	41.70
2350.00	68.00	4.70	30.70	30.60	31.99
2350.00	47.00	4.70	33.90	33.70	35.00
2350.00	4.70	4.70	53.90	51.61	44.55
2350.00	1.50	4.70	61.00	57.80	54.55

As shown in Table 4, the circuit gain increases as the value of C_f is decreased. This effect was already expected as, according to equation (16), the obtained gain is inversely proportional to the feedback capacitance (C_f). Furthermore, a difference between the gain obtained by the simulations and the experimental tests was observed, especially in cases on which the gain value was above 35.

Subsequently, a test bench was prepared using the transducers Murata MA40S4S and MA40S4R, in addition to a TRIO FG-270 signal generator as the input of the amplifier circuit. The procedure adopted to perform the tests was the use of MA40S4S as emitter and MA40S4R as receiver, generating signals to the amplifier circuit. Lastly, the amplified signal was acquired and processed.

Applying the same test conditions defined by the values presented in Table 2, the experimental tests were performed and the output signals from MA40S4R transducer and from amplifier circuit were measured. Thus, it was possible to evaluate the gain generated by the amplifier circuit in each test condition. Figures 6, 7 and 8 present a comparison between the frequency responses of the output signals from MA40S4R transducer and from the amplifier circuit, according to test conditions 1, 2 and 3, respectively. In addition, Table 5 shows a comparison between the calculated gain and those obtained by the simulations and the experiments.

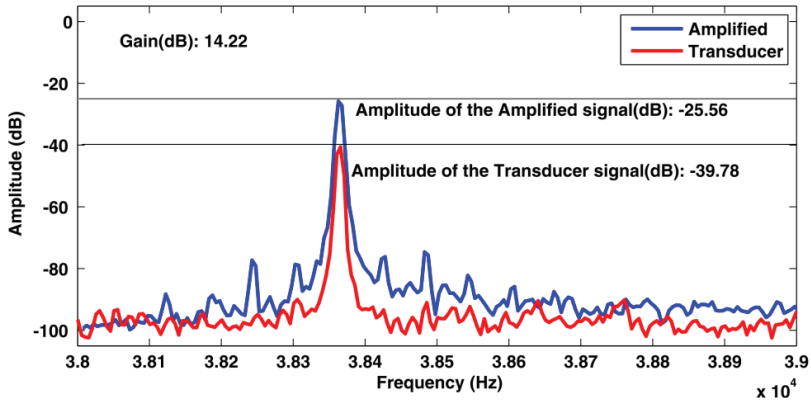


Figure 6 - Frequency response from the piezoelectric transducer and from amplifier circuit – Test 1

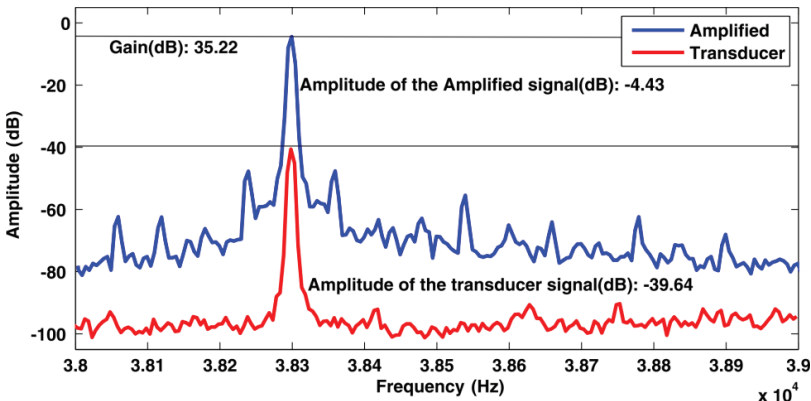


Figure 7 - Frequency response from the piezoelectric transducer and from amplifier circuit – Test 2

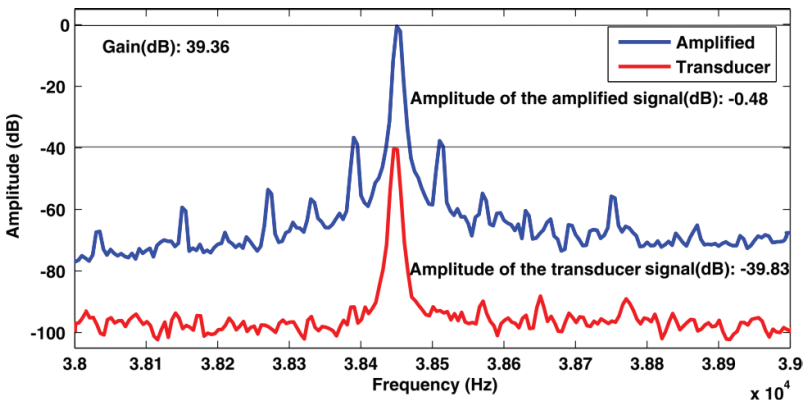


Figure 8 - Frequency response from the piezoelectric transducer and from amplifier circuit – Test 3

Table 5 - Gain obtained in the second part of the experimental tests

Test	1	2	3
Gain – Calculated (dB)	14.70	34.70	54.70
Gain – Matlab (dB)	14.70	34.60	53.90
Gain – Multisim (dB)	14.64	34.38	52.20
Gain – Experimental tests (dB)	14.22	35.22	39.36

According to Figs. 6, 7 and 8, and Table 5, it is possible to verify that the gain obtained in tests 1 and 2, at the nominal frequency of the piezoelectric transducer, i. e., close to 40 kHz, shows very similar values to both those calculated and those simulated. However, when looking the results from the third test, it might be observed that the gain at the nominal frequency of the piezoelectric transducer turns to be quite different from the values presented in the previous sections. Again, in the third configuration the feedback capacitor presents such a small capacitance that it is close to other capacitances that were neglected for developing the model. Thus, the developed model is not a good representation for this specific case, but as long as the feedback capacitance is kept between reasonable values, the model adheres significantly well to the experimental data.

4. Conclusion

This paper proposed the development and experimental validation of a charge amplifier for a specific application with a piezoelectric transducer presenting a nominal frequency of 40 kHz. Even though there are other examples of charge amplifiers in literature, as well as commercial solutions, this development is important, since the device was designed to operate under a limited range of conditions and narrow-bandwidth frequency, which comprises the nominal frequency of the piezoelectric transducer. Hence, the developed charge amplifier provides high gain within the required bandwidth and, simultaneously, avoids the influence of low frequency noises. It is important to note that the procedure adopted in this work could be used to develop charge amplifiers for other types of applications.

During the development of this work, a frequency-domain model of a piezoelectric transducer connected to a charge amplifier was presented. It has been shown that the mentioned model could be validated supported by numerical simulations and experimental tests. However, care should be taken when choosing which gain the charge amplifier will provide. As presented in Table 5, the theoretical and simulation results from the third test showed to be quite different from the gain obtained in the experimental tests. This variation happened due to the fact that the feedback capacitance value was at the same order of magnitude of other parameters, which were not considered in the amplifier circuit model. Thus, relatively low values of the feedback capacitance should be avoided, even reaching a lower gain by means of the amplifier circuit.

References

- [1] P. J. SHULL. **Nondestructive Evaluation: Theory, techniques and applications.** Marcel Dekker, Inc, 2011.
- [2] S. NESS and C. N. SHERLOCK. **Nondestructive Testing Handbook Volume 10: Overview.** 2 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1996.
- [3] J. FRADEN. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications.** Springer Science & Business Media, 2004.
- [4] A. A. VIVES. **Piezoelectric Transducers and Applications.** 2 ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [5] F. LEVINZON. **Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics.** Springer International Publishing, 2014.
- [6] BRÜEL & KJAER. **Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers: Theory and Application Handbook,** 1987.

- [7] J. SIROHI and I. CHOPRA. **Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 11, 2000.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. **Signal Conditioning Piezoelectric Sensors**. Application Report, 2000.
- [9] MURATA. **Ultrasonic sensors model MA40S4S**. Available on:
<http://www.murata.com/en-us/products/productdetail.aspx?cate=cgsubUltrasonicSensors&partno=MA40S4S>.
 Access on: 28/04/2016.
- [10] MURATA. **Ultrasonic sensors model MA40S4R**.
<http://www.murata.com/en-us/products/productdetail.aspx?cate=cgsubUltrasonicSensors&partno=MA40S4R>.
 Access on: 27/04/2016.
- [11] D. L. TERRELL. **Op Amps: Design, Application, and Troubleshooting**. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 1996.
- [12] W. G. JUNG. **Op Amp Applications Handbook**. Newnes, 2005.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. **Operational amplifier model OPA657**. Available on:
 < <http://www.ti.com/lit/ds/sbos197f/sbos197f.pdf> >. Access on: 08/05/2016.
- [14] MATHWORKS. **MATLAB: Overview**. Available on:
 < <http://www.mathworks.com/products/matlab/> >. Access on: 20/05/2016.
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é o Multisim**. Available on:
 < <http://www.ni.com/multisim/whatis> >. Access on: 21/05/2016.
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. **NI Elvis**. Available on:
 < <http://www.ni.com/ni-elvis> >. Access on: 26/05/2016.



AKTUÁLNÍ ROZVOJ A MOŽNOSTI APLIKACÍ METODY AE (VÝSLEDKY KONFERENCE EWGAE 2016 V PRAZE) CURRENT DEVELOPMENT AND APPLICATION OPTIONS OF AE METHOD (RESULTS OF EWGAE CONFERENCE 2016 IN PRAGUE)

Pavel Mazal, Luboš Pazdera

Vysoké učení technické v Brně
mazal@fme.vutbr.cz

Abstrakt

V září 2016 se v Praze konala 32. Evropská konference o akustické emisi EWGAE 2016. V příspěvku je podán základní přehled současného stavu rozvoje metody AE a zejména jsou uvedeny příklady praktických aplikací, které byly na této konferenci prezentovány autory z téměř 30 zemí.

Klíčová slova: akustická emise, zpracování signálu, praktické aplikace, kompozitní materiály.

Abstract

32nd European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE 2016 was held in Prague in September 2016. This paper provides a basic overview of the current state of development of AE method and in particular are commented the examples of practical applications which were presented at this conference by authors from 30 countries.

Keywords: acoustic emission, signal processing, applications, composite materials.

1. Úvod

Jedna z nejvýznamnějších letošních konferencí zaměřených na rozvoj a aplikace metody akustické emise – 32. konference EWGAE se konala v září 2016 v Praze. Konference EWGAE jsou organizovány každé dva roky Evropskou skupinou pro akustickou emisi (EWGAE), vždy ve spolupráci s vybranou národní společností pro NDT. Naše společnost organizovala toho setkání již podruhé. V roce 2002 (měsíc po katastrofálních záplavách) se Masarykova kolej v Praze stala místem konání 25. konference EWGAE. Přes uvedenou komplikaci se podařilo zorganizovat úspěšnou konferenci, což mělo kladný ohlas při posuzování naší nové nabídky na organizaci tohoto setkání.

V letošním roce se účastníci sešli v kongresovém centru hotelu Olympik Tristar. Přibližně 130 účastníků z 30 zemí vyslechlo 65 odborných příspěvků, z nichž většina byla prezentována v tištěném i elektronickém sborníku [1].

Tato tradiční setkání umožňují získat poměrně dobrý přehled o současném stavu a základních směrech vývoje metody akustické emise a příbuzných oborů. V letošním roce se jednoznačně dominantní stala oblast aplikací metody AE v oboru materiálového inženýrství a to především při sledování rozvoje poškození kompozitních materiálů. To je celkem

pochopitelné a dobře to odráží široké zavádění těchto materiálů do praxe - zejména při konstrukci letecké techniky. Početnou skupinu již tradičně samozřejmě představují příspěvky věnované praktickým aplikacím metody AE. Naopak jsme letos vyslechli relativně méně příspěvků zaměřených na rozvoj vlastní metody a zpracování signálu.

2. Rozvoj metody akustické emise

Pro zvýšení spolehlivosti detekce (alespoň rámcové) identifikace zdroje signálu je velmi významný rozvoj samotné metody snímání a zpracování signálu AE. Rozhodující roli hraje kvalita snímačů AE a jejich kontaktu s povrchem, případně problematika kalibrace snímačů. V této oblasti je možné vyzdvihnout příspěvky autorů *Augutis, Muravin a Vaštakas* [2], kteří se zaměřili na možnosti aplikace vlnovodů pro kalibraci senzorů AE a představili nový typ zařízení pro podobná měření.

Sergey Elizarov a kolektiv [3] přestavili nový typ AE systému DS ("Digital Sensor"), který v sobě spojuje centralizovaný systém zpracování dat a přenos primárního digitálního toku se zpracováním dat pořízených jednotkou. Podle názoru autorů prezentovaná technologie DS AE dat digitálního vysílání by mohla výrazně zvýšit spolehlivost a kvalitu testování AE bez významného zvýšení nákladů na systém AE. Navíc podle odhadu specialistů umožňuje tato technologie dosáhnout vynikající výkonové specifikace systému. Například digitalizace primárního signálu AE může být provedena při rychlostech až do 30 MHz a délka koaxiálních kabelů by mohla být rozšířena až na 250 m. Dalším krokem bude vytvoření integrovaného celku "digitálního senzoru". Tento krok umožní buď zvyšovat odolnost proti rušení, nebo snížit úroveň vlastního šumu zařízení a zjednoduší modifikaci systému pro prostředí s nebezpečím výbuchu.

Možnostmi detekce AE událostí v hlučném prostředí se zabývali kolegové z Tokijské univerzity *Kaita Ito a Manabu Enoki* [4]. V této studii byly použity dva typy procesorů pro paralelní výpočty, tj. CPU a GPGPU a byly porovnány v procesu redukce šumu ve frekvenční oblasti. Optimalizované použití heterogenních multijádrových procesorů ukázalo možnosti vysokého výkonu pro analýzu AE. Tato metoda prokazuje významnou výhodu pro sledování rozvoje defektů v hlučném prostředí, jako je např. sledování dynamiky procesů např. při žárovém nanášení povrchů na různé konstrukce.

Několik příspěvků bylo věnováno možnostem zpřesnění lokalizačních postupů defektů, např. příspěvky *Thomase Thenikla* [5] a *Zhidong Liua* [6].

3. Aplikační možnosti

3.1 Materiálové inženýrství

V letošním roce nejvíce obsazená sekce byla věnována kompozitním materiálům - především přístupům k analýze získaných dat, identifikaci a klasifikaci zdrojů [7, 8, 9, 10, 11]. Tyto a řada dalších příspěvků vnáší nové informace do hodnocení degradace mechanických vlastností jednotlivých typů těchto materiálů, ukazuje možnosti metody AE, zatím však chybí komplexněji pojatý pohled na danou problematiku v širším rozsahu kompozitních materiálů [12].

Stranou zájmu odborníků nezůstaly ani další materiály, zejména kovové na bázi Fe, příp. Mg a Al. Pozornost byla věnována především oblasti cyklického zatěžování. Současné znalosti projevů AE umožňují s vysokou pravděpodobností definovat změny charakteru poškození, tedy iniciaci, šíření a lom materiálu [13, 14]. Několik autorů také prezentovalo výsledky

měření změn signálu a jeho zpracování v průběhu martenzitické transformace probíhající v důsledku deformace ohybem [15], průběhu kalení oceli [16] apod.

Na rozdíl od minulých let bylo málo příspěvků zaměřeno na "tradiční" oblasti, jakými jsou např. svařování, lepení a hodnocení korozního poškození [17, 18, 19].

3.2 Monitoring technických konstrukcí

Velké pozornosti účastníků se těší informace o reálných zkouškách různých technických zařízení, zejména zásobníků, tlakových nádob, případně pneumatických komponent s možnostmi vzniku netěsností. Do této skupiny bylo možné letos zařadit příspěvky [20] - kontinuální sledování zásobníků, dále případové studie defektů na LPG zásobnících, případně šíření signálu AE na zásobnících v provozu [21 a 22]. Lokalizací úniků stlačených plynů pomocí robotů se věnoval příspěvek autorů *Thomase Guenthera a Andrese Krolla* [23] a na možnosti hodnocení funkce pneumatických válců se zaměřil *Mahmoud Houssam* [24].

V programu letošní konference se objevily i příspěvky seznamující účastníky se zkušenostmi při aplikaci akustické emise při kontinuálním sledování podpůrných konstrukcí větrných turbín [25], při zajištění bezpečného provozu přístavních jeřábů [26], případně zkušeností s vizualizací a lokalizací poškození jeřábů [27].

3.3 Stavebnictví

Metoda akustické emise se úspěšně začíná významnějším dílem využívat také v oblasti stavebnictví. Na konferenci bylo prezentováno relativně velké množství příspěvků z této oblasti. Velká část byla zaměřena na nejpoužívanější stavební materiál beton.

J. Maximino C. Ongpeng a kol.: "Monitoring Damage in Reinforced Concrete Structure Using Seesaw Effect Through Acoustic Emission Test Concrete Beams" – se zabývají lokalizací poruch při čtyřbodovém ohybu betonového vzorku s výztuží [28].

Takahiro Nishida a kol. se v příspěvku: "Evaluation of Internal Defects of Reinforced Concrete Columns by Means of AE Tomography" – se zabývají tomografií akustické emise. Výsledkem uvádějí, že defekty v betonu lze hodnotit pomocí elastický rozložení rychlosti získané jako výsledek tomografické akustické emise. [29]

Norihiko Ogura a kol.: "Internal Concrete Inspection and Evaluation Methods for Steel Plate-Bonded Slabs Utilizing Anchor Bolts" – se zabývají silničními mosty s ocelovou deskou. Autoři testují šíření elastických vln vznikajících buzením přes kotevní šrouby. [30]

Antoine Boniface a kol.: „Comparison of Localization Strategies of Damage in Concrete by Acoustic Emission“ – lokalizují vznik a šíření poruchy v betonového vzorku se zářezem při testu třibodovým ohybem pomocí metody akustické emise. K lokalizaci používají čas příchodu ke snímačům a adaptivní algoritmus. [31]

Saúl Crespo a kol.: „AE Defect Evaluation of the Upper Anchorage Elements of a Stayed Bridge“ – zabývají se detekcí a hodnocením vady kotevního prvku kabelu na mostu Rio Papaloapan, resp. simulací testů pro využití metody akustické emise na tuto konstrukci. Laboratorní podmínky simulovaly reálný experiment. [32]

Georgios Livitsanos a kol.: „Characterization of Fracture Mode in Masonry by Acoustic Emission“ – autoři testovali základní prvky zdiva – cihly, maltu a jejich rozhraní – při lomových zkouškách ohybem a tlakem pomocí metody akustické emise a ultrazvuku. [33]

Marek Nowak, Igor Lyasota, Ireneusz Baran: „The Test of Railway Steel Bridge with Defects Using Acoustic Emission Method“ – aplikovali metodu akustické emise na ocelový železniční most a na části konstrukce v laboratoři. Studium provedli na standardních vzorcích a korodovaných. [34]

Lubos Pazdera a kol.: “Acoustic Emission Method in Civil Engineering Applied to Monitoring Thermal Loading Concrete Specimens by a Three-Point Bending Test“ – použili metodu akustické emise ke sledování chování betonových vzorků, které byly před zatížením třibodovým ohybem degradovány teplotně. [35]

4. Situace v České republice

Účastníci z České republiky patří k tradičním účastníkům konferencí EWGAE. Přes počáteční obtíže, se organizátorům podařilo zajistit téměř deset příspěvků, což však vzhledem k místu konání a možnosti získání dotace ČNDT nebyl nijak převratný počet, nicméně i nadále jsme prokázali příslušnost k evropské špičce. Kolegové z ostatních zemí oceňovali stav normalizace oboru v České republice a samozřejmě i existenci vzdělávacího systému pro všechny úrovně AE specialistů.

5. Závěr

Z relativně velkého počtu příspěvků je zřejmé, že metoda akustické emise si upevňuje své místo v oblasti nedestruktivního testování. Její postupné začleňování z oblasti teoretického výzkumu přes laboratorní experimenty na homogenních kovových materiálech a reálných experimentech v oblasti tlakových kovových nádob do oblasti složitějších struktur a konstrukcí je zřetelná. Také po stránce normalizace je metoda AE nesporně na vzestupu a nezbývá než věřit, že i někteří zatvrzelí zastánci tradičních metod pochopí, že jim metoda akustické emise má co nabídnout.

Tato informace a některé příspěvky byly zpracovány v rámci řešení projektu No. FSI-S-14-2329 “Vibro-isolation system of cosmic carrier payload” of the Faculty of Mechanical Engineering, BUT in Brno.

Literatura

(je uvedena zjednodušeně - plná citace je uvedena pouze u položky 1 u ostatních položek je uvedena pouze první strana příspěvku. Ostatní údaje stejné jako 1).

1. Proceedings of 32nd European Conference on AE Testing - EWGAE 2016, September 2016, Praha, ed. CNDT, 550 p. ISBN 978-80-214-5385-2.
2. *Stasys Vyngantas Augutis, Boris Muravin, Edgaras Vaštakas: APPLICATION OF WAVEGUIDES FOR THE CALIBRATION OF ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCERS*, p. 7
3. *Sergey Elizarov, Alexander Alyakritsky, Pavel Trofimov, Alexey Bugankov: NEW HARDWARE FEATURES OF A-LINE 32D AE SYSTEMS*, p. 115.
4. *Kaita Ito, Manabu Enoki: HIGH SENSITIVITY DETECTION OF AE EVENTS IN NOISY ENVIRONMENT USING STREAM RECORDING AND PARALLEL COMPUTATION*, p. 217.
5. *Thomas Thenikl, Daniel Altmann, Hartmut Vallen: QUANTIFYING LOCATION ERRORS*, p. 495.
6. *Zhidong Liu, Hongqiang Liao, Yuan Liu: THE TIME SEQUENCE CHARACTERISTICS AND LOCATION METHOD OF AE SOURCE INDUCED BY DEBRIS CLOUD*, p. 279.
7. *Markus G. R. Saus: ACOUSTIC EMISSION SOURCE IDENTIFICATION IN LARGE SCALE FIBRE REINFORCED COMPOSITES*, p. 441.

8. *Yuto Hata, Yoshihiro Mizutani, Akira Todoroki, Yoshiro Suzuki*: DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CLASSIFYING CFRP FRACTURE MODES BY AE TESTING, p. 193.
9. *N. Fallahi, G. Nardoni, R. Palazzetti, A. Zucchelli*: PATTERN RECOGNITION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DURING THE MODE I FRACTURE MECHANISMS IN CARBON- EPOXY COMPOSITE IN CARBON EPOXY COMPOSITE, p. 151.
10. *Yoshihiro Mizutani, Takehiro Miki, Akira Todoroki, Yoshiro Suzuki*: DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CLASSIFYING CFRP FRACTURE MODES BY AE TESTING, p. 333.
11. *Andreas J. Brunner*: CORRELATION BETWEEN ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AND DELAMINATIONS IN CARBON FIBER-REINFORCED POLYMERMATRIX COMPOSITES: A NEW LOOK AT MODE I FRACTURE TEST DATA, p. 55.
12. *Boris Muravin, Tamara Gottesman*: ACOUSTIC EMISSION COMPARATIVE STUDY OF CARBON/EPOXY COMPOSITES UNDER LOAD, p. 343.
13. *Vendula KRATOCHVILOVA, Frantisek VLASIC, Pavel MAZAL*: STUDY OF FATIGUE PROCESSES OF SELECTIVE LASER MELTING AND CONVENTIONAL PRODUCED MATERIALS, p. 263.
14. *Tomoki Shiotani, Takahiro Nishida, Hisafumi Asaue, Takuya Maeshima*: QUANTIFICATION OF FATIGUE DAMAGE EVOLUTION IN RC SLABS DURING WHEEL LOADING TEST BY MEANS OF 3D AE TOMOGRAPHY, p. 461.
15. *Kenichi Yoshida, Hiroyuki Kinouchi, Takeshi Yasuda*: EXAMINATION OF DYNAMIC BEHAVIOR DUE TO AE METHOD OF MARTENSITIC TRANSFORMATION DURING BENDING DEFORMATION IN CU- AL-NI SHAPE MEMORY ALLOY SINGLE CRYSTAL, p. 535.
16. *Franc Ravnik, Janez Grum*: IDENTIFICATION OF MACHINE COMPONENTS CRACKING WITH SOUND EMISSION DURING STEEL QUENCHING, p. 419.
17. *Mohamad Ghazi Droubi, Nadimul Haque Faisal, Fraser Orr*: DEFECT ANALYSIS IN CARBON STEEL WELDED JOINTS USING ACOUSTIC EMISSION, p. 95.
18. *Luigi Calabrese, Massimiliano Galeano, Edoardo Proverbio, Domenico Di Pietro, Angelo Donato, Filippo Cappuccini*: ADVANCED SIGNAL ANALYSIS APPLIED TO DISCRIMINATE DIFFERENT CORROSION FORMS BY ACOUSTIC EMISSION DATAFORMS, p. 65.
19. *Peter Tscheliesnig, Andreas Jagenbrein, Gerald Lackner*: DETECTING CORROSION DURING INSPECTION AND MAINTENANCE OF INDUSTRIAL STRUCTURES USING ACOUSTIC EMISSION, p. 503.
20. *Vaclav Svoboda, Frantisek Zemlicka*: CONTINUOUS MONITORING OF STORAGE TANK BY ACOUSTIC EMISSION METHOD, p. 471.
21. *Arkady Kamyshev, Igor Razuvaev, Eugeny Suchkoy*: INVESTIGATIONS OF THE AE SIGNAL PROPAGATION IN THE VESSELS AND TANKS IN-OPERATION, p. 247.
22. *Gerald Lackner, Peter Tscheliesnig*: ACOUSTIC EMISSION TESTING ON LPG TANKS DEFECT DETECTION CASE STUDIES, p. 271.
23. *Thomas Guenther, Andreas Kroll*: LOCALIZATION OF COMPRESSED AIR LEAKS IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS USING SERVICE ROBOTS WITH ULTRASONIC MICROPHONES, p. 173.
24. *Houssam Mahmoud, Frantisek Vlasic, Pavel Mazal, Miroslav Jana*: DAMAGE IDENTIFICATION OF PNEUMATIC COMPONENTS BY ACOUSTIC EMISSION, p. 315.
25. *Catherine Hervé, Guillaume Perrin, Pierre Friedrich, Angela Angulo, Slim Soua, Antonis Porichis*: CONTINUOUS MONITORING OF THE STRUCTURAL CONDITION OF THE TOWER AND SUPPORTING STRUCTURE OF FLOATING AND STATIC OFFSHORE WIND TURBINES, text nebyl dodán ke zveřejnění.
26. *Alain Proust*: IN SERVICE ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF HARBOR CRANES IN ORDER TO PROGRAM MAINTENANCE OPERATIONS AND INSURE SAFETY MANAGEMENT, text nebyl dodán ke zveřejnění.
27. *Yu Jiang, Zhong Yang, Feiyun Xu, Bingsheng Xu, Antolino Gallego*: DAMAGE VISUALIZATION AND LOCATION IN METAL STRUCTURE FOR CRANE BY ACOUSTIC EMISSION TOMOGRAPHY, text nebyl dodán ke zveřejnění.
28. *J. Maximino C. Ongpeng a kol.*: MONITORING DAMAGE IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE USING SEESAW EFFECT THROUGH ACOUSTIC EMISSION TEST CONCRETE BEAMS, p. 383.

29. *Takahiro Nishida a kol.*: EVALUATION OF INTERNAL DEFECTS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY MEANS OF AE TOMOGRAPHY, p. 353.
30. *Norihiko Ogura a kol.*: INTERNAL CONCRETE INSPECTION AND EVALUATION METHODS FOR STEEL PLATE-BONDED SLABS UTILIZING ANCHOR BOLTS, page 373.
31. *Antoine Boniface a kol.*: COMPARISON OF LOCALIZATION STRATEGIES OF DAMAGE IN CONCRETE BY ACOUSTIC EMISSION, p. 45.
32. *Saúl Crespo a kol.*: AE DEFECT EVALUATION OF THE UPPER ANCHORAGE ELEMENTS OF A STAYED BRIDGE, p. 85.
33. *Georgios Livitsanos a kol.*: CHARACTERIZATION OF FRACTURE MODE IN MASONRY BY ACOUSTIC EMISSION, p. 287.
34. *Marek Nowak, Igor Lysota, Ireneusz Baran.*: TEST OF RAILWAY STEEL BRIDGE WITH DEFECTS USING ACOUSTIC EMISSION METHOD, p. 363.
35. *Lubos Pazdera a kol.*: AE METHOD IN CIVIL ENGINEERING APPLIED TO MONITORING THERMAL LOADING CONCRETE SPECIMENS BY A THREE-POINT BENDING TEST, p. 403.



METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ VE VÝROBĚ A PROVOZU VALIVÝCH LOŽISEK

NON-DESTRUCTIVE METHODS IN PRODUCTION AND OPERATION OF ROLLING BEARINGS

Libor NOHÁL *, Miroslav VACULKA **

* VUT v Brně, FSI, Ústav konstruování a ZKL – Výzkum a vývoj, a.s.

** VUT v Brně, FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Contact e-mail: libor.nohal@zkl.cz

Abstrakt

Valivá ložiska patří při ke klíčovým součástem strojů a zařízení a jejich selhání může mít katastrofální následky. Zejména v oblastech se zvýšenými požadavky na bezpečnost a spolehlivost, jako jsou např. železnice a větrné elektrárny. Již ve výrobě ložisek pro tyto aplikace jsou proto využívány různé metody nedestruktivního zkoušení pro eliminaci dílů s nepřipustnými defekty. Následně během jejich provozu je stav těchto ložisek monitorován v rámci prediktivní údržby. Tento článek prezentuje trendy ve využití NDT metod v průmyslové praxi při výrobě a následném provozování speciálních ložisek pro náročné aplikace.

Klíčová slova: NDT metody, valivá ložiska, monitorování stavu

Abstract

Rolling bearings are key parts of machinery and their failure could have catastrophic consequences, especially in areas with increased requirements for safety and reliability, such as railways and wind power. In the production of these bearings are used various non-destructive methods for the elimination of parts with unacceptable defects. This article presents trends in the use of NDT methods in industrial practice for the production and subsequent operation of special bearings for demanding applications.

Key words: NDT methods, rolling bearings, condition monitoring

1. Oblasti využití NDT metod při výrobě ložisek

Tak jako v jiných oblastech strojírenské výroby, i ve výrobě valivých ložisek je v současné době kladen velký důraz na cenu výsledného produktu. Od tohoto faktu se odvíjí i volba oblastí pro širší využití NDT metod během výroby. Jedná se zejména o speciální ložiska pro nápravy železničních vozidel a dále ložiska velkých rozměrů (velikost vnitřního průměru cca 500 mm a více) určená pro náročné aplikace – dělená ložiska, ložiska pro hlavní hřídele větrných elektráren.

2. Železniční nápravová ložiska – NDT

Nároky na technické parametry výrobků pro osobní a nákladní dopravu jsou vzhledem k bezpečnosti značné. Požadavky na materiály, proces výroby a NDT zkoušky nápravových železničních ložisek jsou definovány v technické normě EN 12080.

Normativně je definována nedestruktivní zkouška pro:

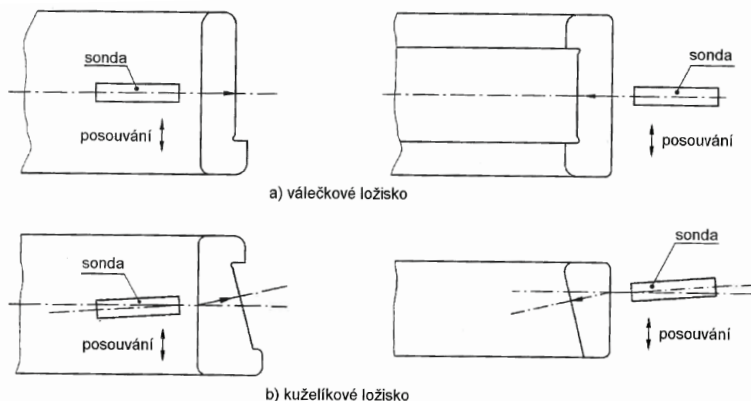
- A. Detekci vnitřních vad vnějšího a vnitřního kroužku (ultrazuková zkouška)
- B. Kontrolu povrchu valivých drah kroužků (magnetická prášková zkouška)
- C. Kontrolu valivých ploch valivých těles ložisek (vířivé proudy)

Ad A.

Pro detekci vnitřních vad jednotlivých kroužků se využívá ultrazvuku umožňující impulzovou odrazovou metodu. Vady materiálu kroužků jsou zjištěny na základě zobrazení echa:

- z útlumu koncového echa vlivem oběžné dráhy,
- z přítomnosti ech vad s útlumem koncového echa.

Pro zkoušky je nutné použít ultrazukovou sonda s minimální frekvencí 5 MHz. Samotné zkoušky probíhají v automatickém režimu v závislosti na typu ložiska, viz obr. 1. Citlivost je nastavována pomocí referenčních kroužků shodných se zkoušenými, které jsou opatřeny referenčními vadami ve formě otvorů v oběžné dráze [1]. U ložisek určených pro rychlost nad 200 km/h (tzv. 1. třída) je to otvor o průměru 0,5 mm a hloubce 0,5 mm. U ložisek pro nižší rychlost je to otvor o průměru 1 mm a hloubce 1 mm (2. třída).



Obr. 1 Příklady použití [1]

Fig. 1 Examples of applications [1]

3. Nedestruktivní zkoušení velkorozměrových ložisek

U velkorozměrových dělených ložisek je zapotřebí vzhledem k ovlivnění dělící roviny kroužků technologií dělení provést nedestruktivní kontrolu těchto ploch.

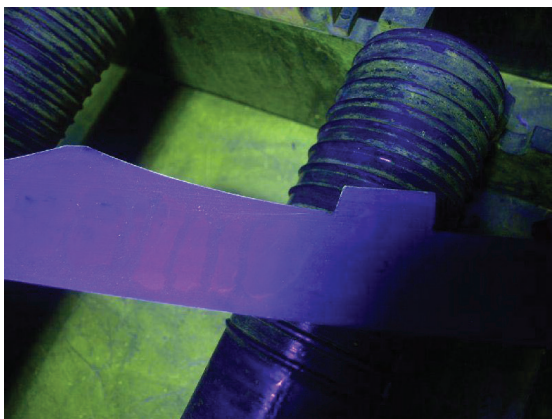
Během sériové produkce je ověřována kvalita ve sto procentech případů kapilární zkouškou, výsledek zkoušky z ověřování technologie viz obr. 2.



Obr. 2 Výsledek kapilární zkoušky

Fig. 2 Result of penetration test

Pro potřeby vývoje a optimalizace technologie výroby je využívána zejména magnetická prášková metoda, která dokáže lépe detekovat i menší defekty. Příklad výsledku takové zkoušky je na obr. 3 – detekovaná trhлина jako výsledek nevhodných technologických podmínek.



Obr. 3 Výsledek magnetické práškové metody

Fig. 3 Result of magnetic particle inspection

4. Shrnutí

Metody nedestruktivního zkoušení nachází uplatnění ve výrobě speciálních ložisek, které pracují v prostředí s vysokými nároky na bezpečnost (železniční doprava), nebo jejich selhání může způsobit vysoké ztráty (dělený ložiska důlních výtahů, ložiska hlavního hřídele větrné elektrárny).

Mezi konvenčně využívané metody, které jsou v některých případech i vyžadovány příslušnou technickou normou, patří: ultrazvuková zkouška, kapilární zkouška, magnetická prášková metoda a zkouška vířivými proudy. Tyto metody jsou certifikovány a i personál musí mít příslušnou kvalifikaci.

Kromě výše zmiňovaných metod je ve vývojové fázi produktu využívána i metoda akustické emise pro detekci aktivních trhlin, případně pro detekci vzniku kontaktní únavy (pittingu), zejména při porovnávacích zkouškách materiálu [2, 3].

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

Literatura

- [1] ČSN EN 12080. *Železniční aplikace – Nápravová ložiska – Valivá ložiska*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] NOHÁL, L.; HORT, F.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. An Experimental Investigation of Rolling Contact Fatigue of Steels Using Acoustic Emission Method. *INSIGHT*, 2013, roč. 55, č. 12, s. 665-669. ISSN: 1354- 2575.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2012.55.12.665>
- [3] NOHÁL, L. *Korelace změny signálu AE s rozvojem kontaktního poškození*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 102 s.
Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.



POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY A SROVNÁNÍ JEJICH TECHNIK NA KOMPOZITNÍCH DÍLECH VRTULNÍKŮ

Michal PODSTAWKA

ATG (Advanced Technology Group), Beranových 65, Praha 9, 199 02,

Tel.: +420 725 791 670,

E-mail: podstawka@atg.cz, Web: www.atg.cz

Abstrakt:

Cílem článku je představit problematiku spjatou s kontrolou kompozitních materiálů v letectví pomocí ultrazvukové metody. V článku je krátce popsán typ kompozitních materiálů použitých na dílech pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině u velkých vrtulníků, které pojmu až 19 pasažérů. Dále jsou zmíněny nejčastěji se vyskytující nečelistvosti v této konstrukci a schopnost tyto nečelistvosti nalézt ultrazvukovou metodou a jejich nejčastějších technik – průchodová, impulsně odrazová a technika Phased Array. Závěrečná část článku demonstruje volbu vhodné techniky a poukazuje na problematiku vyhodnocení nalezených indikací na reprezentativních vzorcích.

Abstract:

This article aims to introduce problematics with the inspection of composite materials in aviation using ultrasonic method. The article contains a short part with description of type of composite materials used for parts for the Emergency Floating System for large helicopters which can take up to 19 passengers. The following are the most frequently occurring discontinuities in this construction and the ability to find these discontinuities by ultrasonic method and the most used technique – Through Transmission, Puls – Echo and Phased Array. The final part of the article demonstrates how to select suitable ultrasonic technique and pointing out on problems of evaluation of indications on the representative samples.

1. Úvod

Nedestruktivní zkoušení dnes zaujímá přední postavení v prevenci bezpečnosti a zasahuje do všech odvětví průmyslu. Velmi důležitou roli sehrává v oblasti letectví, které je v současné době už nedílnou součástí. Tento článek se zaměří na použití nedestruktivní zkoušení v letectví, konkrétně na ultrazvuk a jeho nejčastěji používané techniky, a to průchodové, impulsně odrazové a Phased Array. Phased Array se obecně začíná velmi rozšiřovat a v letectví tomu není jinak. Pokud zmiňuji letectví, musím také poukázat na stále se zvyšující nároky na konstrukci letadel. Následkem je rozvíjející se použití kompozitních materiálů, které už pomalu vytlačují ty klasické kovové.

V dopravě, zvláště pak v letecké, je kladen největší důraz na bezpečnost. Ačkoliv je letecká doprava nejbezpečnější, existují stále velká rizika, která je zapotřebí eliminovat. Jednou z mnoha možností je právě použití nedestruktivní zkoušení (NDT). NDT se využívá na kontrolu dílů v různých fázích výroby, při údržbě letounu, nebo po poškození způsobené atmosférickými vlivy, případně lidskou chybou.

Velkou roli hrají použité materiály, které musí splňovat velmi přísná kritéria s ohledem na to, kde se materiály použijí. Na letounech a helikoptérech jsou jejich části různorodě namáhány, a tím také dochází k odlišným požadavkům na jejich vlastnosti. Vzhledem k nízké váze, velmi dobrým pevnostním a mechanickým vlastnostem se využívají kompozity.

2. Kompozity

Kompozity jsou materiály, které jsou složeny z více komponentů, jejichž hlavním úkolem je přenos síly, o což se stará výztuha, a rozvádění sil mezi výztuhami je realizováno pojivem (matricí). Kompozitní materiály mají výborné mechanické vlastnosti, pevnostní vlastnosti a tuhost (tedy odolnost proti ohybu, kroucení - torzi), vyznačují se nízkou hmotností a odolností vůči korozi. Nevýhodou je pak malá odolnost proti silám, na které nebyl daný prvek navržen.

V letectví se nejčastěji používají dlouhovláknové kompozity (poměr délky vlákna k jeho průměru je výrazně větší než 1000) s přesně stanovenými vlastnostmi jako orientací, počtem vrstev, přesně určeným poměrem pojiva vzhledem k podílu vlákna apod. Moderní high-tech konstrukce (civilní Boeing 787 Dreamliner) používá podíl kompozitních materiálů draku letadla až 50%. Existuje také mnoho druhů vláken, které jsou základním výztužným prvkem všech typů kompozitních materiálů. Nejpoužívanější jsou vlákna skleněná, aramidová a uhlíková.

V tomto článku budou popisovány konkrétní díly, které jsou vyrobeny z uhlíkových vláken, proto bude zaměření výhradně na ně.

2.1. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna patří k nejmodernějším a vyrábějí se postupnou pyrolýzou (rozkladem) tzv. prekurzoru (zdrojového materiálu) s následnou grafitizací za vysokých teplot. Volba teploty pro grafitizaci je závislá na vlastnostech, které od vláken požadujeme. Uhlíková vlákna se vyrábí z více prekurzorů, nejpoužívanější je však PAN (polyakrylnitrilové vlákno) a mezifázový černouhelný dehet, který se velmi podobá asfaltu. Takto vyráběná vlákna se vyznačují vysokou pevností, ale nižší tuhostí.

Zpracování vlákna, resp. uspořádání svazků vláken nazýváme tkaniny. Tkaniny jsou utkány podle různých vzorů a mají různou tvarovatelnost.

2.2. Matrice

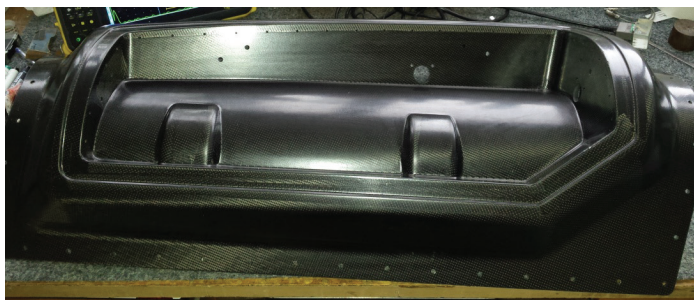
Matrice (pojivo, pryskyřice) jsou látky, které zajišťují mechanickou vazbu mezi vlákny. Jedná se hlavně o polypropylen, polykarbonát a polyamid (Nylon), nebo nenasycenou polyesterovou pryskyřici. Dále jsou pryskyřice epoxidové a fenolické.

2.3. Kompozitní díly pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině

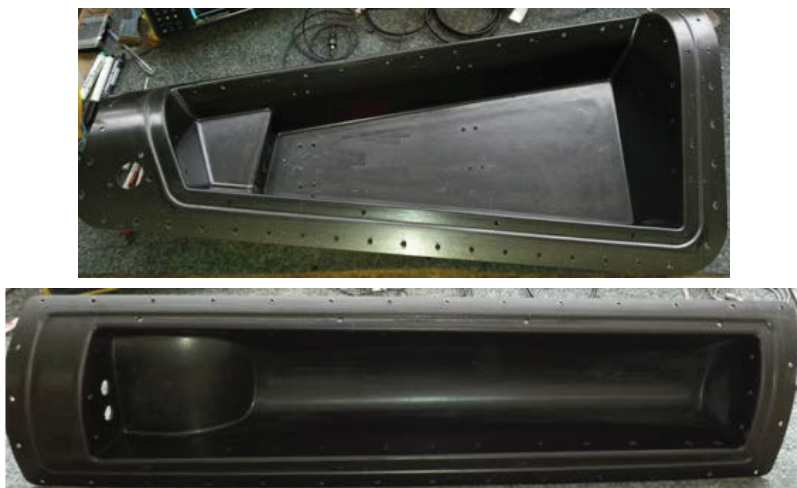
Výrobní technologie kompozitů je různá, od ručního kladení, vakuové impregnace, tažení, navíjení, nebo technologie pro předimpregnované materiály, tzv. prepregy – lisování a autoklávová technologie.

Díly, použité pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině u velkých vrtulníků, jsou vyráběny ručním kladením z prepregu. Výztuž je tvořena z uhlíkových vláken typu Toray T 300 ve formě tkaniny (vazba 5H satén) a její plošná hmotnost je 280 g/m². Hmotnostní podíl výztuže je 58%, pojiva 42%.

V závislosti na konkrétním typu vrtulníku obsahují díly sendvičové jádro (ne všechny), a to sendvičové jádro typu voština z Nomexového papíru s fenolickou pryskyřicí. Buňka voštiny má tvar šestiúhelníku, hustotou 48 g/m³.



Obr. 1 Díly pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině u velkých vrtulníků (bez voštiny)



Obr. 2 Díly pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině u velkých vrtulníků (s voštinou)

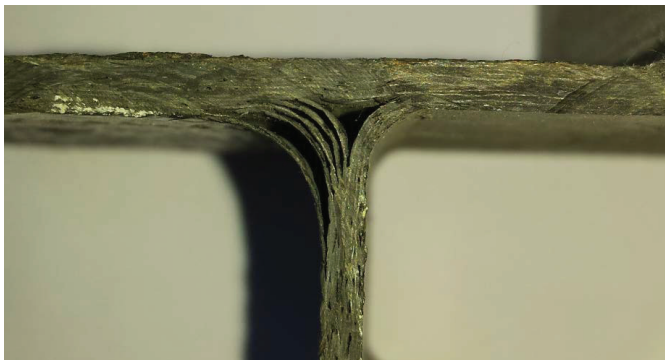
2.4. Vady kompozitních materiálů

Rozdělení vad kompozitů (Tab 1).

Typy vad	Místo vzniku
– výrobní vady	<ul style="list-style-type: none"> – při skladování – ve výrobě (laminací) – obrábění – manipulaci
– provozní vady	<ul style="list-style-type: none"> – mechanické namáhání – povětrnost – tepelné poškození

Tab. 1 Rozdělení vad kompozitních materiálů

Vad kompozitů je velké množství. V tomto článku se zaměřím především na dvě vady, které se nejčastěji vyskytují v kompozitech. Tou hlavní vadou, která je v některých případech nepřijatelná, jindy přípustná v daném rozsahu, je delaminace. Delaminace je nespojení dvou a více vrstev mezi sebou a může vzniknout při výrobě samotného kompozitu, při obrábění nebo neopatrné manipulaci s konečným výrobkem. Delaminace v rádiu kompozitu je na Obr. 3.



Obr. 3 Delaminace v rádiusu kompozitu

Dalším významnou vadou je porozita. Jedná se o "plynové bublinky", které se vytváří při ukládání vrstev. Nadměrná porozita může vést k poruchám soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami kompozitu. Proto je snaha zbavit se porozity a vzduchu odplyňováním každé vrstvy ve vakuu zvlášť. U prepregů se odplyňování provádí pro několik vrstev najednou, kde se provede zabalení do předepsaných vakuových vrstev a odsátí na předepsanou úroveň.



Obr. 4 Porozita v kompozitu

Zdroj: <<http://composites.usc.edu/projects/out-of-autoclave-processing-of-composite-prepregs.htm>>

Kritickými částmi kompozitů z hlediska tvorby vad jsou především oblasti rádiusů, kde je velký problém s přitlačením prepregů a v důsledku toho v těchto částech častěji vznikají vady. Delaminace způsobená vrtáním děr a obráběním celého dílu je také častým jevem. Způsobeno je to především tupými obráběcími nástroji. Objevují se však vady typu zapomenuté separační fólie, zapečení fólie mezi jednotlivé vrstvy laminátu apod. Kontroly těchto vad jsou na uhlíkových kompozitech realizovány pomocí ultrazvukové metody.

3. Ultrazvukové zkoušení

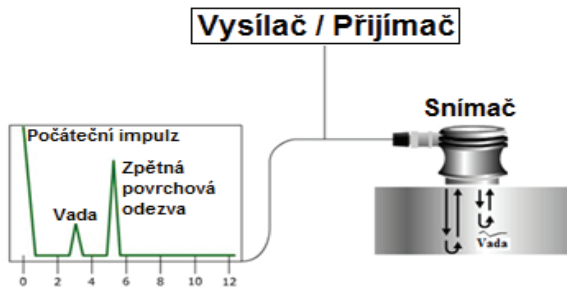
Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí nad 20 kHz, které se šíří v pružném prostředí. Zvuková energie má schopnost odrazet se, lámat, ohýbat a absorbovat. Pokud se využívají frekvence vyšší než 100 KHz, zvuková energie se šíří ve svazku. Pokud chceme zkoušet pomocí ultrazvuku, je nezbytné mít přístroj, který slouží pro vysílání, přijímání a zpracování ultrazvukových vln, a to společně se sondou, která musí být vhodně volená v závislosti na konkrétní aplikaci.

Zkoušení ultrazvukem pro použití na kompozitech rozdělujeme podle jejich nejčastějších technik na:

- impulsně odrazovou,
- průchodovou,
- Phased Array.

3.1. Impulsně odrazová technika

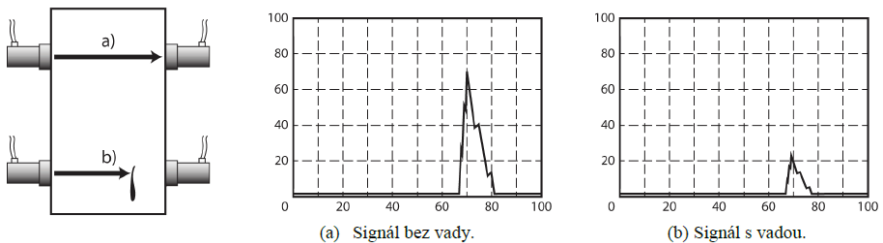
V dnešní době nejpoužívanější ultrazuková technika. Principiálně jde o měření odraženého akustického signálu od rozhraní dvou prostředí. Přístroj vybudí impuls o vysokém napětí, následkem čehož se v měniči sondy vybudí mechanické kmitání, které se šíří materiálem. U této techniky využíváme pouze jedné sondy, která slouží jako vysílač a zároveň jako přijímač. Sonda o určité frekvenci vybudí mechanické kmitání do materiálu, které se šíří součástí jako vlna. Vlny se na rozhraní odráží a dochází zpět k jejich přijetí. Takto přijatý signál se zobrazí na přístroji jako tzv. echo.



Obr. 5 Základní princip ultrazukového zkoušení pomocí impulsně odrazové techniky [2]

3.2. Průchodová technika

Rozdíl oproti impulsně odrazové technice je ten, že potřebujeme zvlášť sondu pro vysílání ultrazukových vln a zvlášť sondu pro její příjem. Ultrazuková vlna je tedy vysílána vysílací sondou a po průchodu objektem přijímána na druhé straně a vyhodnocena. Nachází-li se nehomogenita ve zkoušeném objektu, dojde k poklesu akustické energie, což se projeví na obrazovce přístroje jako pokles amplitudy echa.



Obr. 6 Průchodová technika [2]

- nutnost přístupu z obou stran ke zkoušené součásti,
- použití dvou sond a nutnost jejich sousosty,
- nelze přesně určit velikost nehomogenit (bez možnosti určení hloubky).

Tyto důvody přispívají k tomu, že se průchodová technika využívá pouze pro specifické potřeby, jako např. zkoušení velkých tlouštěk, materiálů s velkým útlumem zvuku, zkoušení materiálů o velmi malých tloušťkách.

3.3. Technika Phased Array

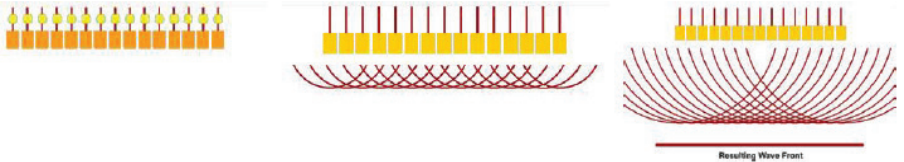
Konvenční ultrazvukové zkoušení využívá jednoměničové sondy (případně dvouměničové), kdežto Phased Array využívá celou skupinu měničů, tzv. *elementů*. Tyto elementy jsou od sebe izolovány a ovládány samostatně, což umožňuje tvarovat, naklánět a dle potřeby posouvat ultrazvukový svazek.

Elementy jsou vyráběny jako piezo-kompozitové měniče a jsou složeny z jednotlivých piezoelektrických tyčinek, které jsou zalité do epoxidové pryskyřice. Výhodou takových měničů je vysoká citlivost zkoušení, dobrý dosah a odstup signál/šum.

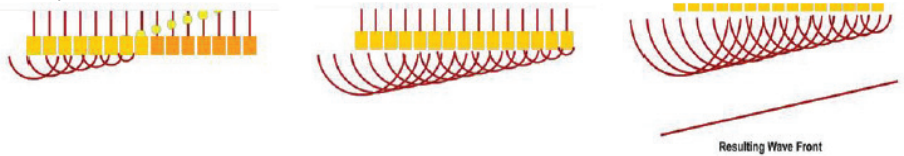
Phased Array systém je tedy založen na použití sond s 16 a více elementy a jsou připevněny na předsádky, které umožňují tvarovat ultrazvukový svazek do požadovaného tvaru. To je zajištěno tak, že jsou měniče spouštěny v sekvenci, ve které se vlnoplochy jednotlivých elementů sčítají a vytváří svazek šířící se materiálem v požadovaném tvaru a směru. Jedná se o tzv. *fázování*. Díky tomu je možné použít jednu sondu na více aplikací a sonda může fungovat jako přímá, úhlová (v celém rozsahu např. 35° - 70°), fokusovaná, atd.

Typy svazků:

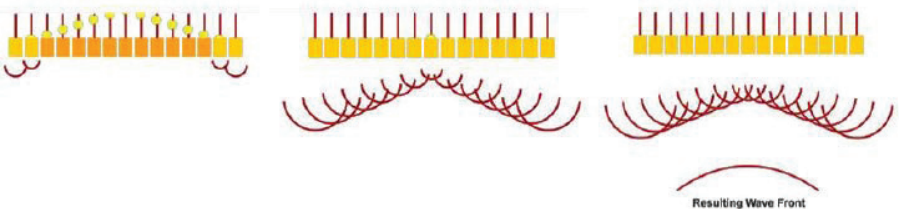
Lineární:



Úhlový:



Fokusovaný:



Obr. 7 Typy svazků Phased Array [1]

Výhody Phased Array oproti konvenčnímu ultrazukovému zkoušení:

- poměrně velká úspora času,
- jednou sondou lze zkoušet přímo, pod úhlem, fokusovat...,
- lepší vyhodnocení objemových vad,
- zaručuje téměř 100 % pokrytí zkoušené oblasti.

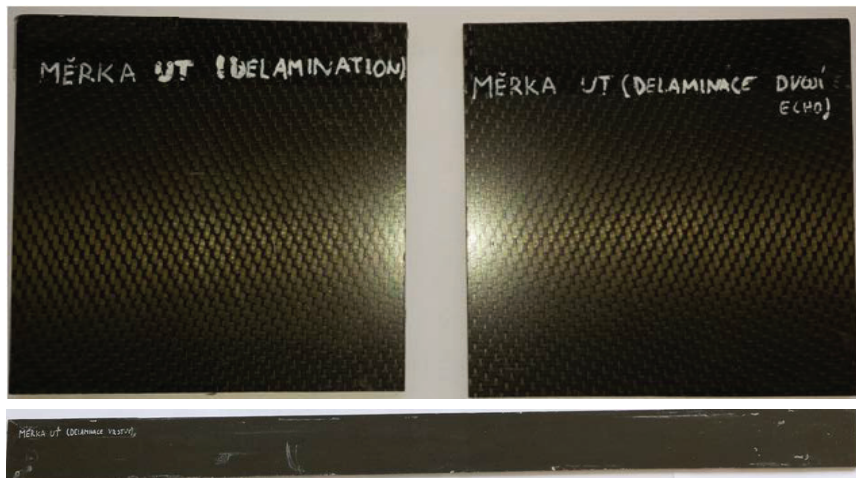
Nevýhody Phased Array oproti konvenčnímu ultrazukovému zkoušení:

- složitost techniky a nastavení parametrů,
- vyšší nároky na personál,
- méně výkonné signály,
- finančně velmi náročné.

4. Použití ultrazukové metody na kompozitech

Na kompozitech lze použít celou řadu ultrazukových technik. Tato kapitola bude směřována na reálné zkoušení za pomoci impulsně odrazové techniky a Phased Array. Tyto techniky jsou také použity pro zkoušení výše zmíněných dílů pro záchranný systém nouzového přistání na vodní hladině u velkých vrtulníků.

Měření bude demonstrováno na reprezentativních vzorcích vyrobených z totožných materiálů, ze kterých jsou vyráběny díly na vrtulník. Vady ve vzorcích (delaminace, porozita) jsou vyrobeny uměle, přičemž vykazují téměř stejné vlastnosti, jako vady reálné.

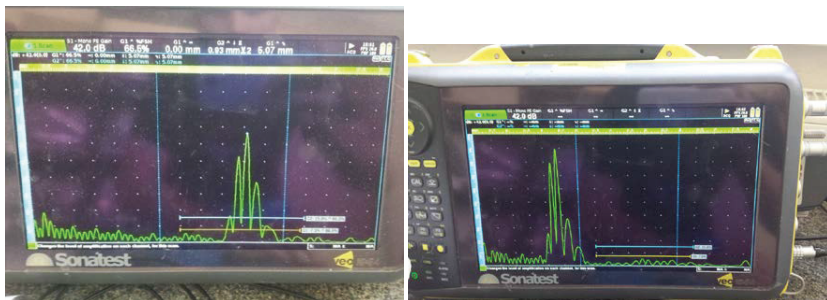


Obr. 8 Ultrazukové měřky s uměle vytvořenými vadami typu delaminace

4.1. Měření č. 1

Při tomto měření byl použit konvenční ultrazukové zkoušení se zobrazením s A-sken a sondou o frekvenci 5 MHz s předsádkou. Na obr. 9 (vlevo) lze vidět odraz ultrazukového svazku od zadní stěny vzorku. V případě, že se v součásti nachází delaminace v určité

vrstvě, ultrazukový svazek se odrazí dřívě, což se projeví na časové základně přístroje. Vznikne tedy vadové echo o vysoké amplitudě a zároveň dojde k poklesu koncového echa, Obr. 9 (vpravo).



Obr. 9 Odraz UT svazku od - zadní stěny (vlevo) a odraz od delaminace (vpravo)

4.2. Měření č. 2

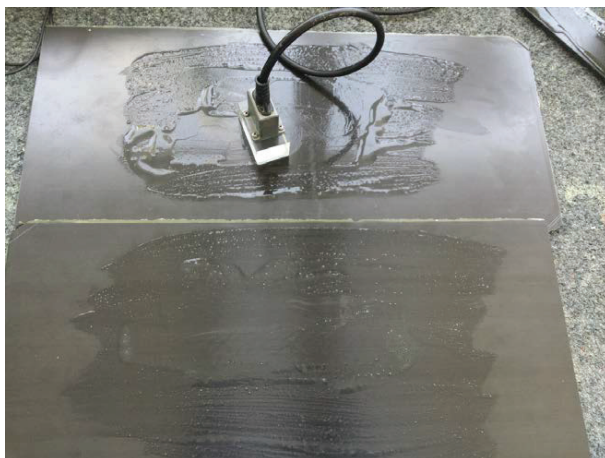
Pro toto měření byla použita technika Phased Array se zobrazením - komplexní B-sken (jedná se o zobrazení součásti v řezu). Použitá byla sonda Phased Array o frekvenci 5 MHz, 32 elementů. Na Obr. 10 lze vidět komplexní B-sken kompozitního vzorku s delaminací. Na displeji přístroje je patrné, že v místě s indikací se objevilo vadové echo, přičemž došlo ke ztrátě koncového echa, což je jasným důkazem o existenci delaminace, resp. neslepení vrstvy. V porovnání s konvenčním ultrazukovým zkoušením je Phased Array mnohem přehlednější a operátor díky tomuto zobrazení může snáze nalézt necelistvosti, zároveň lze všechna data nahrát a uložit, poté vyhodnotit pomocí softwaru v PC, kde si lze s velkou přesností tato data vyhodnotit.



Obr. 10 Měření kompozitního vzorku s delaminací pomocí Phased Array

4.3. Měření č. 3

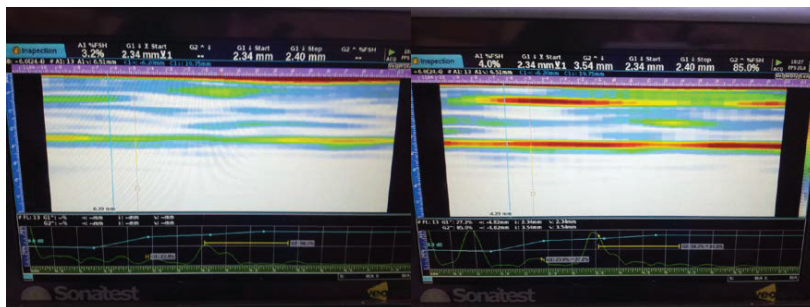
U tohoto měření je demonstrována problematika vyhodnocení porozity. K dispozici jsou dva vzorky, a to s 0,5 % porozitou a 10 % porozitou (Obr. 11).



Obr. 11 Vzorek s 0,5 % porozity (nahore) a s 10% porozity (dole)

Měření 0,5 % a 10 % porozity pomocí Phased Array:

Z obr. 12 (vlevo) je možno vidět, že 0,5% porozita není zcela výrazná a jde ji rozlišit od delaminace, viz Obr. 10. Oproti tomu 10% porozita (Obr. 12 vpravo) má výrazná echa a ve vyhodnocení může být snadno zaměněna za delaminaci. Delaminace má jiná kritéria hodnocení než porozita, proto je velmi důležité tyto indikace rozpoznat.

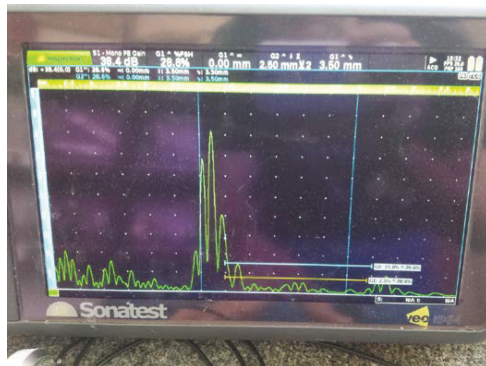


Obr. 12 Měření 0,5% porozity (vlevo) a 10% porozity (vpravo) pomocí Phased Array

Měření 0,5 % a 10 % porozity pomocí konvenční techniky:

Při měření 0,5 % porozity konvenčním ultrazukovým zkoušením se na A-skenu přístroje porozita prakticky neprojevila (Obr. 13). Koncové echo nepokleslo, před koncovým echem

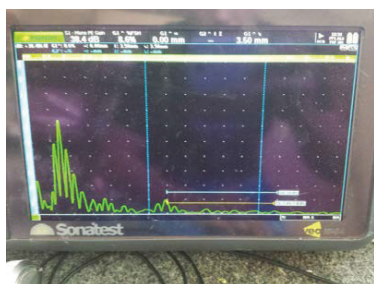
se objevil shluk ech o malé amplitudě, které však lze vyhodnotit jako strukturální šum a žádná výrazná vadová echo se neobjevila.



Obr. 13 Měření 0,5 % porozity konvenčním ultrazvukovým zkoušením

Na Obr. 14 lze vidět A-sken z měření 10 % porozity. Zde už je výrazná ztráta koncového echa a objevují se již vadová echo o velké amplitudě. Aby se tyto indikace od pórů nezaměnily s delaminací, je potřeba detailně sledovat dynamiku echa a zároveň mít dostatečné zkušenosti k vyhodnocení tohoto nálezu. U pórovitosti není možné naměřit výrazné protažení v jednom nebo více směrech na rozdíl od delaminace. Zde ale může nastat problém, že přípustnost delaminace bude stejná jako námi naměřený pór, který bude blízko povrchu a bude větší, než šířka svazku. V praxi je toto vyhodnocování velmi složité a závisí na úsudku a zkušenosti operátora.

Dále se hodnotí ztráta koncového echa. Pokud poklesne koncové echo pod stanovenou hranici, opět se stává součástí nepřijatelná. Tyto hranice jsou popsány v kritériích přípustnosti postupu, podle kterého se díly musí zkoušet.



Obr. 14 Měření 10 % porozity konvenčním ultrazvukovým zkoušením

4.4. Porovnání využitelnosti ultrazvukových technik na kompozitních dílech

Kompozitní díly jsou tvarově velmi složité a je potřeba volit vhodně techniky, aby byla zabezpečena kontrola celého dílu. Nejkritičtější oblasti jsou rádiusy, kde se často vyskytují delaminace a porozita.

Pro rádiusy je možné využít impulsně odrazovou techniku, kterou lze zjistit výše zmíněné vady s minimální úpravou plastového klínu (předsádky) sondy. Jako technika pro potvrzení sporných indikací se využívá průchodová technika v kombinaci s ultrazvukovou sondou s flexibilním měničem.

Rovné a tvarově nepříliš složité plochy a povrchy je nevhodnější kontrolovat technikou Phased Array. Phased Array sondy mají větší rozměry měniče a plastových klínů, a tím i větší pokrytí zkoušené plochy. Tato technika poskytuje velkou produktivitu zkoušení s možností záznamu.

Impulsně odrazová technika se používá především v oblastech rádiusů a okolo děr, kde není možné aplikovat techniku Phased Array z důvodu velké kontaktní plochy sondy. Toto je naopak výhoda při kontrole velkých ploch, kde díky tomu docílíme vyšší produktivity.

5. Závěr

Článek si kladl za cíl nastínit problematiku spjatou s nalezením a vyhodnocením indikací na kompozitních dílech určených pro záchranný systém nouzového přistání vrtulníků na vodní hladině.

Kompozity dnes nahrazují kovové materiály nejen v letectví, ale i v ostatních průmyslových odvětvích, jako např. v automobilovém průmyslu nebo medicíně. Tím jsou také kladeny větší nároky na přesnost výroby a následná kontrola na případné necelistvosti. Při kontrole kompozitních materiálů zaujímá ultrazvukové zkoušení přední postavení, jelikož se hledají především vnitřní (objemové) necelistvosti, nevhodnější je však pro nalezení plošných vad. Proto je snaha použít co nevhodnější techniku a zajistit tak co nejlepší kontrolu součástí.

Problematika nastíněná v kapitole 4 s nalezením, případně vyhodnocením necelistvosti je velmi náročná a vyžaduje odbornou způsobilost operátorů. Ti pak musí posoudit a rozhodnout o jaký typ necelistvosti se jedná a zda jsou indikace přípustné či nepřípustné. Proto tyto kontroly mohou provádět pouze řádně vyškolení a certifikovaní pracovníci.

Literatura

- [1] Žbánek, P. *Učební texty UT Phased Array (Skripta UT PA)*. Praha: ATG s.r.o., 2015, 72 s.
- [2] Žbánek, P., Blahušek, J., Matoušek, J., Zavadil, T. *Ultrazvuková metoda stupeň I, II*. Praha: ATG s.r.o., 2013, 216 s.



MĚŘENÍ TLOUŠŤKY METODOU MAGNETICKÉ STOPY NA TENKÝCH STĚNÁCH OCELÍ A LITIN

MEASURING THICKNESS METHOD OF MAGNETIC SPOT ON THE THIN SIDE THE STEEL AND THE CAST IRON

Břetislav SKRBEK,

Technical university of Liberec. Faculty of Mechanical Engineering, Studentská 2, Liberec 461 17,
bretislav.skrbek@tul.cz

Abstrakt

Práce se zabývá měřením přístroji DOMENA na tenkých stěnách ocelí a litin. Cílem je objasnit průběh závislosti zbytkové intenzity magnetického pole na klesající tloušťce měřeného materiálu a nalézt příslušný matematický model. Praktické využití.

Klíčová slova: magnetická metoda, tloušťka, ocel a litina.

Abstract

The work deals with the measuring apparatus DOMENA on the thin side the steel and the cast iron. The objective is explain process of dependence residual intensity on decreasing thickness measuring material and find the appropriate mathematical model. Practical utilization.

Key words: Magnetic method, thickness, steel and the cast iron

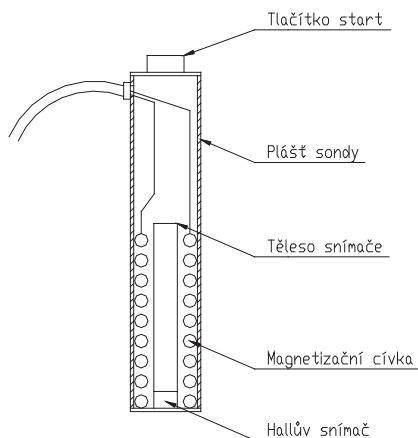
1. Úvod

Měření tlouštěk stěn (za přístupu jen kjednomu z povrchů stěny) lze nedestruktivně provádět řadou metod. Každá má svá aplikační specifika. Nejrozšířenější ultrazvukové zkoušení vymezuje norma EN 15317 Charakterizace a ověřování zkušebního zařízení pro měření tloušťky, EN 14127 Měření tloušťky ultrazvukem.

Metoda magnetické stopy se uplatňuje ve sféře nedestruktivní strukturoskopie [1] jako nástroj diagnostiky jakosti produkce ocelí a litin [4]. Stejnsměrné, statické metody měření nabízí české přístroje řady DOMENA (obr. 2). Tento příspěvek popisuje vedlejší využití metody magnetické stopy jako tloušťkoměru a defektoskopu. Ve specifických podmínkách má opodstatnění.

2. Princip metody magnetické stopy [1]

Ve feromagnetických materiálech, tedy i v konstrukčních ocelích a litinách, vždy existuje spontánní magnetické uspořádání atomárních magnetických momentů. Je tomu tak i v případě, kdy je celý vzorek v makroskopicky demagnetizovaném stavu a navenek tedy žádné magnetické účinky neprojevuje. Atomární momenty feromagnetických látek jsou vždy na krátkou vzdálenost – uvnitř magnetických domén – vzájemně paralelní, ale domény mají mikroskopické rozměry, sousední domény jsou zmagnetovány do různých směrů a makroskopicky se jejich působení kompenzuje nebo uzavírá. Působením vnějšího magnetického pole H_0 se situace změní.



Obr. 1. Nákras sondy o $\times 7$ d 22 mm akumulátorového přístroje s kondenzátorovou magnetizací DOMENA B3.

Fig. 1. Drawing probe about $\times 7$ d 22 mm accumulator apparatus with capacitor magnetization DOMENA B3.

Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón (stěn) a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky (zdroj Barkhausenova šumu). Po zániku vnějšího magnetického pole H_0 se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . Vratným změnám brání atomy feromagnetika vázané v molekulách (tuhý roztok Fe-Cu) a atomární napětí, mřížkové poruchy. Proto složky struktury, které obsahují karbid železitý, martenzit, četné dislokace a hranice zrn vykazují vysokou hodnotu remanentní polarizace I_r .

$$H_r = H_0 - N \times I_r / \mu \quad [A/m] \quad (1)$$

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

Na zkoušené místo výrobku působí impulsní magnetické pole o intenzitě H_0 . Tvar proudového impulsu vedený do příložené silové cívky (obr. 1), případně přesně definovaný jejich sled řídí tok parazitních vířivých proudů (mohou se vhodně využít k potlačení negativních vlivů N) a strukturně selektivní citlivost metody. Metody používané v Rusku a České republice se právě odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací. Snímačem H_r může být Hallova nebo Försterova sonda. Příspěvek jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku a jejich vzdálenosti od snímače.

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r .

Pro strukturoskopii se obvykle využívá k měřenému povrchu kolmá H_m složka H_r nebo gradient normální složky ∇H_m . Strukturoskopy se nastavují podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole H. Lineární kvantifikace strukturní složky (např. perlitu) nebo tvrdosti HB získaná regresní analýzou bývá vyhovující.

2.1. Výzkum vlivu geometrie a povrchu stěny

S rostoucí křivostí měřené plochy pod snímačem narůstá hodnota H_{rn} . Matematický model definuje tento nárůst zvlášť pro LLG a LKG.

Souvislé tenké feromagnetické vrstvy oddělené od odlitku mohou znehodnotit strukturoskopii. Vrstvy oxidů vznikající při tepelném zpracování do 650 stupňů celsia nepůsobí na litiích a ocelích rušivě („lze přes ně měřit tvrdost“). Nad teplotou A1 vznikající vrstvy rasantně zvyšují hodnoty H_m úměrně s výdrží i teplotou. Této tendence lze využít u nízkouhlíkatých ocelí (nemění strukturu) k měření tloušťky oxidů po vysokoteplotní expozici. Produkty chemických reakcí mezi formou a litiinou významně přispívají k zvýšení H_m – odlitky nutno před měřením tryskat.

Atmosférická koroze v oblasti Liberecka nepůsobí na litiinových vzorcích významný nárůst (do 5 %) H_m ani po půlroční expozici. Zato korozní zkouška podle postupu A dle ČSN 67 3094 na litiinových vzorcích dala vzniknout vrstvám, které již po 1-3 dnech významně zvýšily (nad 10 %) H_m .

Kvantifikace vlivů na metodu stanovuje meze využití, optimalizaci a korekce aplikací. Umožní vysvětlit, vyhnout se provozním selháním strukturoskopie magnetickou stopou (nebo jinak skvrnou).

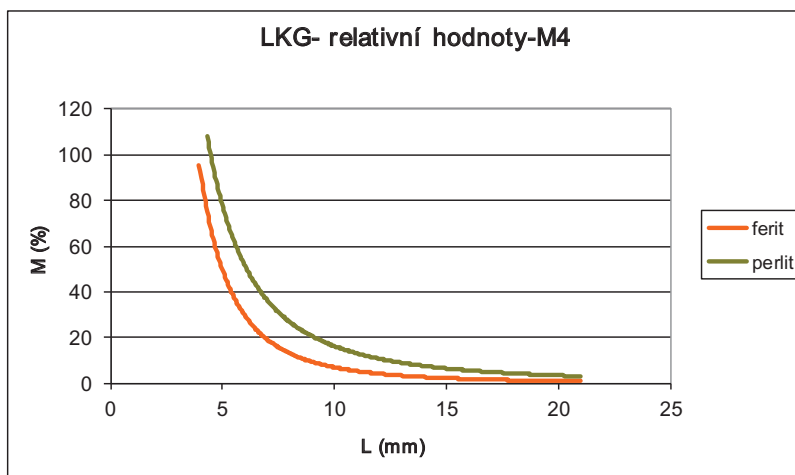
Jeden z nejdůležitějších vlivů - demagnetizačního tvarového činitele - tloušťky stěny L na intenzitu pole H_m nezávisí příliš na matici litiin (viz. graf. 1) a popisuje ho rovnice (2) ověřená v práci [2] pro rozsah 4 až 15 mm tl. stěn L

$$H_{ro} = H_m / (81 \times L^{-2,9} + 1) \quad [A/m] \quad (2)$$

H_{ro} ...hodnota neovlivněná tloušťkou (měřená na silné stěně).



Obr. 2. Strukturoskop DOMENA B3 při měření tvrdosti odlitku (takt 3s).
 Fig. 2. Structuroscope DOMENA B3 at metering hardness cast (time 3s)



Graf. 1. Závislost relativní změny H_m (%M) na tloušťce stěny 5 až 20 mm odlitku z litiny s kuličkovým grafitem (LKG) při střední magnetizaci M4.
 Graph.1. Relationship relative changes H_{rn} (%M) on thickness walling 5 as far as 20 mm ductile part of cast iron (GJS) at medium - sized magnetization M4.

Tvrдость tenkostěnných odlitků lze tak měřit s korekcí podle tloušťky stěny.

$$HB = H_{r0} \times A + B = B + A \times H_r / (81 \times L^{-2,9} + 1) \quad (3)$$

Měření na tenkostěnných odlitcích vykazuje nárůst chyby s klesající tloušťkou stěny. A, B...konstanty vypočítané pro konkrétní kontrolní úlohu a uložené do paměti DOMEN.

2.2. Magnetická remanence velmi tenkých stěn [3].

- a) Příprava vzorků pro simulaci tenkých stěn.

Všechny vzorky z litin a ocelí byly nejprve nařezány v laboratoři katedry na tloušťky 1 až 4 mm. Jelikož jsou tyto tloušťky z hlediska zadání nedostačující, bylo nutné ještě broušení tenkých vzorků a to až na tloušťky 0,1 mm technikou, která se využívá při přípravě vzorků pro transmisní elektronovou mikroskopii.

- b) Příprava vzorku pro simulaci podpovrchové dutiny.

Jeden vzorek o tloušťce 1,42 mm byl uprostřed provrtán \varnothing 3 mm a objemu dutin 10 mm² a vkládan do postupných hloubek pod povrch mezi ostatními neprovrtanými vzorky.

- c) Matematické modely.

Křivky změn intenzity pole H_{rn} vyjádřená hodnotou M na displeji DOMEN :

$$dM = \frac{a}{L^b}, \quad (4)$$

kde δM plyne ze vztahu:

$$\delta M = \frac{M_L - M_\infty}{M_\infty} \cdot 100 (\%), \quad (5)$$

kde M_∞ ...je hodnota magnetizace neovlivněná tloušťkou stěny, měřená na $L > 15$ mm. Grafy jsou doplněny o konstanty „a“ a „b“, které podle vztahů (4 a 5) charakterizují křivku závislosti pro konkrétní materiál. Dále je vždy uveden koeficient korelace „R“.

2.3. Výsledky měření tloušťky

Vzorky připraveny z 5 jakostí litin a oceli. V rámci tohoto příspěvku uvedeny numerické hodnoty a grafy po jednom představiteli litiny a oceli. Měřeno vždy 5× za slabé M2 a silné M7 magnetizace kondenzátorovými výboji přístroje DOMENA B3.

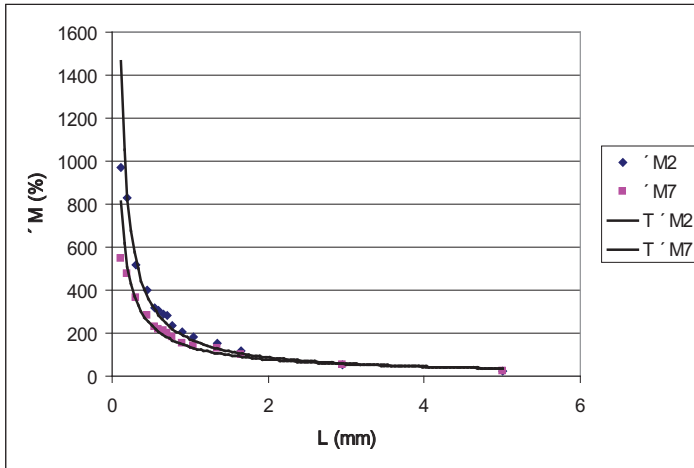
U všech měřených materiálů dochází v intervalu tlouštěk 0,1 mm až 4 mm k neustálému nárůstu hodnot H_{rn} (respektive relativních přírůstků až k 1500 %).

Tab. 1.

Litina ČSN 42 2425 A						
L (mm)	ØM2 A/m	sm.odch.	Hladina spol. 95%	ØM7 A/m	sm.odch.	Hladina spol. 95%
15	56,75	0,6215	1,544	51,89	0,4356	1,082
5	68,67	4,0067	9,9531	63,2	0,781	1,9402
2,95	86,3	2,4062	5,9774	79,32	0,6602	1,634
1,65	122,83	1,3769	3,4204	103,71	0,6415	1,5935
1,35	142,67	3,5119	8,724	116,67	0,5774	1,4342
1,05	157,77	2,2836	5,6727	125,66	3,1157	7,7398
0,9	171,82	1,3594	3,3769	131,57	2,987	7,42
0,77	188,64	1,4265	3,5436	145,44	2,3585	5,8588
0,7	214,47	2,2035	5,4739	154,54	2,6895	6,6811
0,66	218,35	3,0325	7,5331	159,59	1,7911	4,4494
0,6	226,06	3,8212	9,4925	164,67	0,5774	1,4342
0,55	233,11	1,1307	2,8088	170,59	1,864	4,6305
0,45	280,53	2,4088	5,9838	196,29	2,5529	6,3417
0,3	346,84	2,018	5,0129	240,21	1,9386	4,8156
0,2	521,03	5,2106	12,9439	296,71	3,5551	8,8315
0,11	598	2	4,9683	334,68	3,193	7,9319

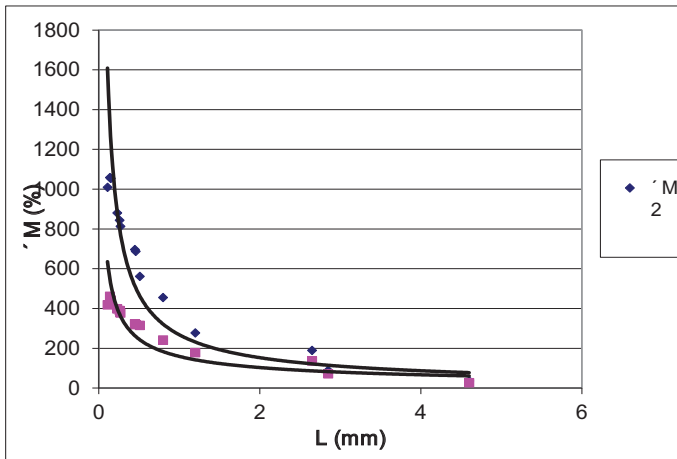
Tab. 2.

Ocel E500						
L (mm)	ØM2 A/m	Směr. odch. M2	Hladina spol. 95%	ØM7 A/m	Směr. odch. M7	Hladina spol. 95%
15	112,84	1,8679	4,6401	134,96	3,0066	7,4688
4,6	155	13,1149	32,5792	167,67	5,1316	12,7476
2,85	215,61	10,2501	25,4627	226,28	5,0037	12,4299
2,65	329,85	21,0678	52,3354	312,28	3,5795	8,8922
1,2	430,38	12,8921	32,0257	367,02	6,1199	15,2027
0,8	632,58	23,198	57,627	450,42	12,0554	29,9474
0,51	754,21	13,3196	33,0878	548,54	12,3929	30,7856
0,46	897,31	34,7813	86,4016	552,52	2,9605	7,3543
0,45	908	2,528	6,2798	558	2,4905	6,1868
0,27	1040,65	2,7948	6,9426	629,62	2,1063	5,2323
0,26	1076,33	3,7282	9,2612	645,8	1,3685	3,3995
0,23	1117,67	19,5486	48,5615	656,67	0,5689	1,4134
0,15	1316,22	15,1411	37,6126	715,45	10,8608	26,9797
0,14	1320,4	7,3304	18,2097	741,23	5,5192	13,7104
0,11	1264,29	15,2685	37,9291	684,21	6,0974	15,1469



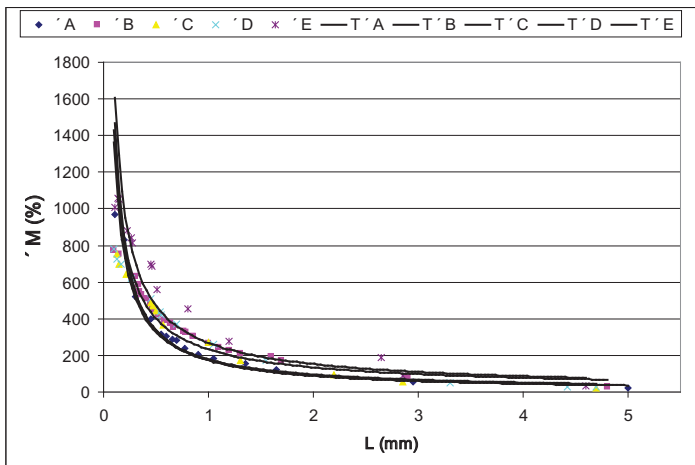
Graf č. 2 – Závislost relativních hodnot δM na L pro litinu A.
 Graph No. 2 – Relationship relative values aM on L for cast iron A.

Pro $\delta M2$: $a = 171,51$ $b = 0,9721$ $R = 0,9798$
 Pro $\delta M7$: $a = 135,31$ $b = 0,8131$ $R = 0,9734$

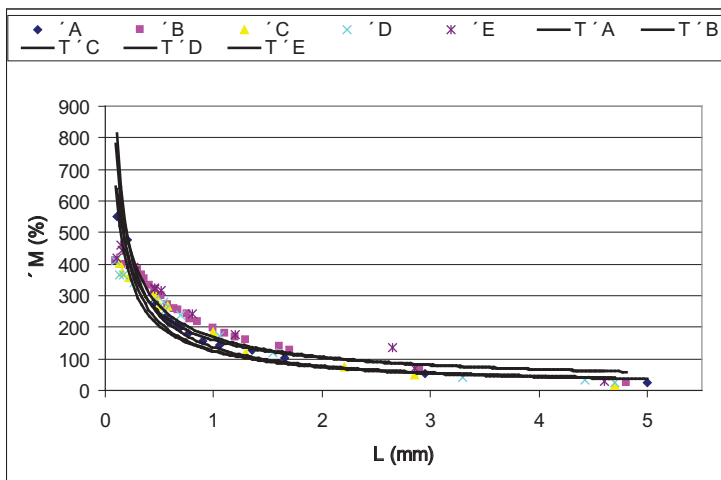


Graf č. 3 – Závislost relativních hodnot δM na L pro ocel E.
 Graph No. 3 – Relationship relative values aM on L for steel E.

Pro $\delta M2$: $a = 268,04$ $b = 0,8119$ $R = 0,9423$
 Pro $\delta M7$: $a = 159,19$ $b = 0,6274$ $R = 0,9151$



Graf č. 4 - Porovnání křivek dM 5 zkoušených litin a oceli při slabé magnetizaci M2.
 Graph No. 4 - Comparison waveform dM 5ti examinaltional cast iron and steels at weak magnetization M2.



Graf 5 - Porovnání křivek dM při silné magnetizaci M7.
 Graph No. 5 - Comparison waveform dM at strong magnetization M7.

Z uvedených grafických závislostí vyplývá, že u všech měřených materiálů dochází v intervalu tloušťek 0,1 mm až 4 mm k neustálému nárůstu hodnot magnetizace (respektive relativních přírůstků). U oceli E je poslední naměřená hodnota magnetizace pro $L = 0,11$ mm menší než

předposlední naměřená hodnota pro $L = 0,14$ mm. Tento pokles ovšem nelze potvrdit nebo vyvrátit další naměřenou hodnotou M pro $L < 0,11$ mm, neboť došlo k probroušení vzorku a to i při opakovaných pokusech.

To tedy znamená, že předpoklad vrcholu křivky ve vyšetřovaném intervalu tlouštěk nebyl potvrzen a nezbyvá než se domnívat, že k tomuto dochází při tloušťkách ještě menších, tedy u $L < 0,1$ mm. Z toho je zřejmé, že tento vrchol křivky bude velmi ostrý a dále bude následovat strmý pokles k nule.

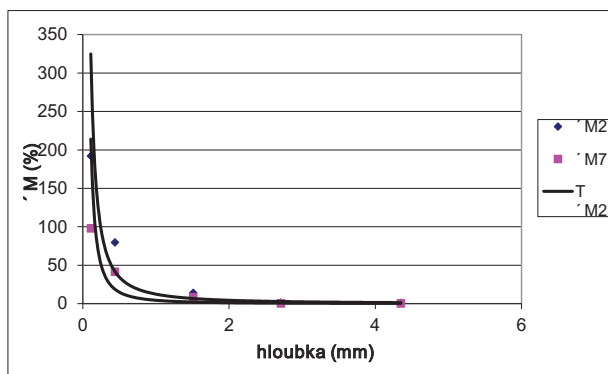
2.4. Defektoskopie dutiny pod povrchem

Efektu měření materiálu s podpovrchovou dutinou docíleno vkládáním provrtaného vzorku mezi ostatní z téhož materiálu, jež byly naskládány na sebe. Vzorky takto uspořádané představují simulaci podpovrchové dutiny v různé hloubce: 0,11; 0,44 mm; 1,07 mm; 1,2 mm; 1,64 mm a 2,84 mm.

Vzorky poskládané tak, aby simulovaly materiál s podpovrchovou dutinou v různé hloubce, byly měřeny vždy 3krát ze stejné strany a výsledná magnetizace pro každou hloubku dutiny pod povrchem byla získána aritmetickým průměrem z těchto tří naměřených hodnot.

Takto získané změny intenzity δM polí vzorků jsou vynesena do grafu č. 6.

Do 0,5 mm pod povrchem silně ovlivňuje podpovrchová dutina např. o \varnothing 3 mm x 1,42 mm hodnotu H_{rn} (o stovky %). Tytéž dutiny, které se vyskytují ve větší hloubce než 2,7 mm pod povrchem již H_{rn} neovlivňují. S rostoucím magnetizačním pulsem se tento vliv zmenšuje!



Graf č. 6 – Závislost relativních hodnot δM na hloubce dutiny pod povrchem pro ocel E.

Graph No.6 – Relationship relative values δM on depth cavity below the surface for steel E.

Pro δM_2 : $a = 12,378$ $b = 1,4804$ $R = 0,958$
 Pro δM_7 : $a = 4,421$ $b = 1,7578$ $R = 0,9313$

3. Závěr

Metodou magnetické stopy lze měřit tenké i velmi tenké stěny feromagnetik s uspokojivou reprodukovatelností pokud se nevýznamně odlišuje remanence feromagnetika tenké a silné stěny (před měřením nutno znát hodnotu A/m výchozí H_r , silné stěny M_∞). Vztahy (4 a 5) třeba upravit do prakticky použitelného tvaru

$$L = [a \times M_\infty / (M_L - M_\infty)]^{1/b} \quad (6)$$

Vztah (6) po dosažení konstant a a b a vložení do paměti přístrojů DOMENA umožní na displeji odečítat reálné hodnoty L stěn v mm. Tento magnetický způsob měření je efektivní na hrubých zakřivených površích odlitků, které nezaručují rovnoběžnost (nezbytné pro ultrazvuk) povrchů stěn. Hodnota L je integrální, tedy průměrná pro plochu pod snímačem. Výskyt podpovrchových dutin do hloubky 2mm v součtu rozměrů jednotek mm hodnotu L mohou významně snížit.

V technické praxi se uvedený způsob používá při přejímce tenkostěnných odlitků výfukových potrubí s dlouhým vyložení (obr. 3) z litiny s kuličkovým grafitem GJS-SiMo-40-6 dle ČSN 42 0962 EN 16124, která je legovaná 4,5% Si a 0,5% Mo pro vysokoteplotní aplikace výfukových traktů pístových spalovacích motorů. Vysoký obsah Si zaručuje plně feritickou strukturu matrice v silných přírubách i tenkých stěnách potrubí.

Článek byl částečně podpořen projektem OP VaVpl Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace CZ.1.05/2.1.00/01.0005 a projektem Rozvoj řešitelských týmů projektů VaV na Technické univerzitě v Liberci CZ.1.07/2.3.00/30.0024.



Obr. 3. Příklad odlitku výfukového potrubí o hmotnosti cca 15 kg se zaměřeným neshodným minimem L stěny.

Fig. 3. Instance cast exhaust system tube - about weight c. 15kg bent different minimum L walling.

Literatura

- [1] SKRBĚK, B. Metoda magnetické skvrny. Teze profesorské přednášky, prosinec 2008, Technická univerzita v Liberci, Vysokoškolský podnik Liberec, s. s r. o., ISBN 978-80-7372-428-3
- [2] Šedo, Igor. Vliv demagnetizačního činitele na hodnotu M remanentního magnetického pole feromagnetika. Bakalářská práce, KMT B092, Technická univerzita v Liberci.
- [3] Netáhlo, Pavel. Měření metodou magnetického bodového pólu na tenkých stěnách ocelí a litin. Diplomová práce KMT 196, Technická univerzita v Liberci.
- [4] HAMPL, J., VONDRÁK, V.: Vliv materiálových charakteristik na technologičnost konstrukce litinových odlitků. Technological Engineering, 2007, vol. IV, no 1, p. 74-76. ISSN 1336-5967.



**MEZILABORATORNÍ ZKOUŠENÍ ZPŮSOBILOSTI JAKO SOUČÁST
KONTINUÁLNÍHO ZLEPŠOVÁNÍ DLE ISO 9001**

**INTERLABORATORY PROFICIENCY TESTING AS A PART OF
CONTINUOUS IMPROVEMENT IN ACCORDANCE WITH ISO 9001**

Tomáš ZAVADIL

ATG s.r.o.

Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

Cílem článku je objasnit princip mezilaboratorního zkoušení a souvislost s modelem kontinuálního zlepšování dle ISO 9001. Diskutuje současně možnosti využití jak nezávislé (akreditované), tak i zaměstnavatelské formy zkoušení způsobilosti, jejich výhody a nevýhody a nastiňuje možné aplikace.

Klíčová slova: zkoušení způsobilosti, ISO 9001, ISO 17043, kontinuální zlepšování

Abstract

The goal of this article is to explain the basic principle of interlaboratory proficiency testing in relation with the continuous improvement principle acc. to ISO 9001. Options of utilization of independent (accredited) and employer version of the proficiency testing are discussed including the advantages and disadvantages of each of the models and possible applications.

Key words: proficiency testing, ISO 9001, ISO 17043, continuous improvement

1.1 Introduction

Proficiency testing (PT) acc. to ISO 17043 is usually looked at as a comparison of accredited NDT labs with a template approach and assessment of their proficiency to make NDT (ILAC – international laboratory accreditation cooperation). Lab accredited according to ISO/IEC 17025 needs to pass the proficiency testing annually to prove its ongoing competence in the field.

Proficiency testing acc. to ISO 17043 is, however, much more than only application for accredited NDT labs. First of all, participation of general (non-accredited) NDT labs that want to prove their competence to do NDT well (compare themselves with accredited labs for customers that doesn't require accreditation) is not only possible, but recommended. There may be a numerous reasons for participation that are described further in the document. The other option is even more sophisticated, as it uses the model of proficiency testing to create an employer proficiency testing derivative system that can be used to monitor the contractors, control their quality and hence force them to improve. For further information about this topic please see ATG's other previous article [1].

This article is going to speak about *how the proficiency testing can be helpful to non-accredited NDT labs, especially in terms of satisfying the requirement for continuous improvement acc. to ISO 9001.*

1.2 Concept of Proficiency Testing

The concept of the Proficiency Testing is based on comparison of a set of NDT labs against a template approach as well as each other. The competence verification is provided in the following levels:

- Pass/fail evaluation compared to a benchmark quality
- Performance (score or percentage) evaluation compared to the same benchmark quality
- Mutual comparison with a competition (participating labs)

It may be questionable how this can be so beneficial for a single lab. There is no requirement for all standard (non-accredited) labs in given market sector to participate and therefore the comparison may be misleading compared to accredited labs, which should all participate annually. To answer that, let's first take a look on how the Proficiency Testing process is done.

1.2.1 The Proficiency Testing process

At the beginning an NDT lab participating in a Proficiency Testing scheme (e.g. MT of welds) is assigned with a standard NDT task. This may be e.g. a carbon steel butt weld sample to be tested by yoke and suspension applied by a spray. All standard procedural requirements are provided (e.g. acceptance criteria). The participating lab's personnel are asked to make this task in their own lab on their own equipment in a specific time provided. After the task is done, participating NDT lab sends the sample back to the Proficiency Testing Provider (i.e. ATG) including the record of testing and evaluation of found defects (thus with a filled-in Test Report).

Proficiency Testing Provider stores the results, checks the sample for cleanliness and defects due to transportation or wrong handling in order to provide equal conditions to all participants. Afterwards he sends the sample to the next participating NDT lab in the same scheme¹. At the same scheme, always the same sample in a clean and undamaged condition is sent with a blank standard Test Report template to fill in. This is repeated till all the participants get this sample and test it².

After all the participating NDT labs test the sample, the proficiency testing provider shall evaluate the results. The following objectives of NDT testing process are evaluated:

- Application of the NDT method
- Equipment utilization
- Detection of indications
- Evaluation of indications
- Record assessment
- Qualification of the personnel³
- Meeting the deadline

The result is provided as a document with overall score of all participants, where names are being replaced by numbers. The score breakdown is designed to provide information about competence in each of the ask objectives enlisted above. Each participant is informed about the number assigned to him, but not the numbers assigned to others⁴. At the end of each document each participant gets a written evaluation of task's assessment with pinpointed crucial errors done in order to help the participant with designing corrective actions.

1.2.2 Expected outcomes

By participating in the ILPT an NDT lab is able to assess:

- Level of understanding of the NDT process
- Ability of the lab to do the testing process accordingly by satisfying the benchmark criteria
- Weak points of the testing process in the lab by assessing the partial score results
- Recommended adjustments of the testing to initiate improvement
- General information on where does the lab stand compared to the (international) competition both in global and in each of the objectives

These results may be a powerful tool in continuous improvement of an NDT lab if utilized correctly. But if the organization just takes the result as granted, the added value is diminished.

¹ Due to obligation of the provider to ensure the same conditions of the sample none of the participant sis being privileged and the order of participants therefore doesn't play any role.

² In order to provide the results in a reasonable time, the whole scheme is in ATG limited to 1 year cycle, in which all participants test the sample, provide reports and are evaluated. This is very important especially due to the fact that in longer schemes the participating lab's status may significantly change to both, better or worse, and after several years result would not be relevant. This is however an approach of some other Providers.

³ In accredited schemes this is objective is omitted on request of the Czech Institution for Accreditation.

⁴ Anonymity of participants ensures that each participant gets the information about how he stands against the competition working in the same field, but he cannot use the information for unfair competition intents.

1.3 Assessment of ISO 9001

The previous chapter explained how is the proficiency testing administered and what are the expected outcomes. But there are also other means how to assess the information. So, why the organization may want to participate in the proficiency testing? Why it is not enough to follow the procedures accordingly and be a diligent inspector? And why shouldn't they just hire a consultant from the field of NDT to help them out?

First of all, the abovementioned questions assume that the organization itself or a hired consulting body can do the job well at the first place. Second, it assumes that the organization being advised is able to assess the advice correctly and correctly put it in action. Unfortunately this is often not true. A lot of organizations are struggling with understanding the NDT process as a whole. Not all of the parts are clear to them and therefore they don't do them, or does but just only because it is required.

These organizations then tend to make repeated errors and may cause themselves a serious financial loss when their misalignment with standard approach is revealed. It is therefore very important to understand the role of the NDT process and all its parts.

ISO 9001 builds up on this premise and these days it is a standard benchmark of modern enterprise. The following paragraphs thus try to explain how ILPT may help to satisfy the ISO 9001 and also help the organization to improve.

1.3.1 ISO 9001 explained

ISO 9001 teaches us that basically everything except most elemental activities is a process or can be looked upon as being a process. *A process acc. to ISO 9000 is a set of interrelated or interacting activities that transforms inputs into outputs* [2]. It means that to execute the process correctly, it must be initiated by at least one starting activity (input), be followed correctly (thus it means in correct interrelation and order) all the way through, and finalized in a given time, cost and quality.

Very often companies don't understand the NDT process completely. It can be assumed that accredited Provider is competent to evaluate the assessment of NDT process correctly and is able to estimate whether the process drives to quality⁵. If this is transferred to the participant, the first outcome of participation in Proficiency Testing is *improvement of understanding the NDT process by identification of all its parts and understanding their roles*.

The core concept of ISO 9001 is a PDCA cycle (literally it is not directly enforced [3], but the whole concept of the ISO 9001 standard is all but this principle). PDCA is a process principally running all the user-defined sub-processes, thus even NDT process. PDCA cycle stands for plan-do-check-act and in a very simple principle it tells the basic requirements to make a process handled well.

According to PDCA, everything should be first planned with defined goals and objectives, which usually are at least time, cost and quality. Only after that the job is executed, which unfortunately some companies still take as the only part of doing things. The final product is assessed and checked by various means of quality verification for being in conformance with plan. If an error emerges, it is expected that an adequate countermeasure is taken in order to eliminate it in the next run of this process.

⁵ The accredited Proficiency Testing Providers are verified by an accreditation body to assess NDT testing process well by verification that all the activities and sub-processes of the NDT process are handled in correct order and are correctly documented. Accreditation process can never directly assess the quality itself, but can assess whether the process drives to quality. Because the job of the Proficiency Testing Provider is an evaluation of NDT process quality, accreditation is a good approach to verify its (Provider's) competence.

This cycle is a closed loop that runs around for eternity. In a professional language this cycle (loop) is the concept called the *continuous improvement process*. It demonstrates that everything done repeatedly can be continually and never-endingly improved⁶.

1.3.2 Continuous improvement process

Continuous improvement process (CIP) is a process of never-ending improvement based on *learning from experience*. It is based on three principles:

- *Feedback*: The core principle of CIP is the self-reflection of processes.
- *Efficiency*: The purpose of CIP is the identification, reduction, and elimination of suboptimal processes.
- *Evolution*: The emphasis of CIP is on incremental, continual steps rather than giant leaps.

The CIP utilizes the PDCA as the way how to assess these principles. By repeating the PDCA cycle it allows to the organization always move forward and establish that as a new internal standard of behavior in the given process⁷. Example illustration is below.

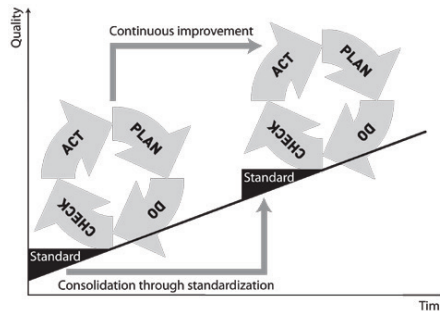


Exhibit 1: How correctly executed PDCA helps to the continuous improvement.

Feedback

Once the process is understood in the principle at the first place, it can be consequently optimized by continuous reduction or elimination of suboptimal parts. For that a self-reflection is a necessary presumption. Nobody who thinks he/she already knows everything the best can improve and eventually it will lose its place on Sun. The only way how to stay on the top is to take a look in the mirror sometimes.

The Proficiency Testing allows the participants to see themselves compared to a template approach and get a self-reflection based on independent observer on whether they do their job well or not. If yes, everything is all right. If not, it is a signal that it's time to do something with that before it will be too late.

⁶ The most famous application of the principle of infinite improvement cycle is *Kaizen*. *Kaizen* is one of the cornerstones of the *lean management* principles designed by Eiji Toyoda, who due to that managed to turn a local car producing company into the second biggest car producer in the World.

⁷ Establishing improvement as a new company standard on regular basis is a management principle called *consolidation through standardization*.

Efficiency

If an issue is found, countermeasures should be developed in order to reduce this issue or even eliminate it for the future being. Issues can enlist e.g. inappropriate qualification of the personnel, inadequate equipment, limited access to investment resources, or misleading quality management system in the NDT lab.

Countermeasure can be handled internally by the participating organization itself, or externally by a consultancy organization. The choice is on the participant, but it must follow general requirements of their customers and standards and internal specifications applied in the lab.

The provider is obliged to identify and localize relevant information about what were the crucial errors in order to help the participant with designing countermeasures. Outputs of the proficiency testing can be therefore easily handed to the organization responsible for finding solution.

Evolution

ISO 9001 recommends to assess improvement by evolution (continuous small improvements in order to fit to the system), not by revolution (extreme individual act of change). The reason for this approach is that with increasing extent of change the risk of negative impact is proportionally increased. If small changes are done, even negative impact is small and can be easily assessed in the next round of the PDCA cycle. If big changes are done, there may be no more space to correct the negative impact anymore.

Incremental improvement model by evolution is one of the reasons why accredited laboratories are required to participate annually and also why independent, non-accredited labs are advised to participate on regular basis as well (not necessarily annually) and continually monitor the ongoing competence and ongoing continuous improvement of the process itself. It is not recommended to take the proficiency testing as an ultimate countermeasure to all problems forever.

1.3.3 Implementation

The implementation of the Proficiency Testing as a continuous improvement process is very simple. At the beginning the company participates in the first scheme for one or more NDT testing methods. The participation is not demanding and therefore doesn't represent any burden for the organization. The result is used to set or adjust the standard quality of NDT services throughout the organization by interpolation to the remaining methods and industrial sectors (many things are solved similarly and many problems are a company-wide or lab-wide problem, not a problem of a particular method). At this point the main goal is to ensure complete understanding of the whole NDT process. But the implementation only starts at this point!

In the next step quality manual sets this situation as a new company quality standard and quantifies regular structure of its verification and continuous improvement. That should define at least:

- repetition frequency,
- handling of particular methods,
- handling of particular industrial sectors.

The created model is not limited by any requirement of any standard, as long as we are not considering accredited NDT labs. Therefore the model may look e.g. as follows:

- **Participation with all methods per e.g. 2 years**

This model is very similar to the model for accredited labs. It is complex and to some extent it may be more demanding considering the extent of countermeasures. On the other hand it can be utilized among others as a way how to prove to the customer that the quality of service of this organization in particular NDT method is adequate to those labs having accreditation⁸.

- **Participation with at least one method per year**

This method is more modest and less demanding, but still provides significant outcomes, because most of the potential issues found and the countermeasures proposed except the assessment of the particular method (first objective, see above) is a knowledge that is easily transferrable among methods and industrial sectors. This is suitable approach for continuous improvement program, but may find a reasonable application also in terms of demonstration of conformity.

The key point of the implementation of Proficiency Testing as the tool for continuous improvement is the regular participation, accompanied by self-reflection and application of effective corrective actions through evolution. The basic requirement is therefore diligence. It is necessary to execute what is planned, accept the issues found, learn from the experience and implement with no delay countermeasures to improve the process. That should be done as soon as possible, not before the upcoming audit.

The worst that can be done in this matter is to participate once and use the result as a marketing tool to justify high price of organization's services.

1.4 Conclusion

Proficiency testing by ISO 17043 is a new way how to verify competence of the NDT labs. It can be looked at as internal management tool to monitor ongoing competence and quality improvement of participating organizations. When designed and executed well, it can be an undemanding yet very effective continuous improvement tool that can be implemented to organizations of any size.

In the meantime the Proficiency Testing is provided only by very few accredited providers. In the Czech Republic the accredited Proficiency Testing Provider is ATG, Ltd.

1.5 Reference

- [1] ZAVADIL, Z - ZAVADIL, T – WEIFURT, J. Prokazování způsobilosti ve zvláštních procesech. NDT Bulletin 1/2016. ISSN 1213-3825.
- [2] ISO 9000:2015. Quality management systems - Fundamentals and vocabulary.
- [3] ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements.
- [4] ISO 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [5] ISO 17043:2010. Conformity assessment — General requirements for proficiency testing.

⁸ Increasing the frequency above the annual basis of accredited labs shall not make the lab looking better than the accredited one. The reason is that the repetition frequency is not the driver of the quality, it provides only ongoing competence assessment. The driver of the quality is the score, so in order to demonstrate higher quality than accredited labs, the score needs to be as high as possible, not just satisfy the benchmark.



KVALITA V OBLASTI KVALIFIKACE A CERTIFIKACE NDT PERSONÁLU **QUALITY IN QUALIFICATION AND CERTIFICATION OF NDT PERSONNEL**

Tomáš ZAVADIL

ATG s.r.o.

Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

Článek si klade za cíl vymezit základní faktory ovlivňující kvalitu kvalifikačního a certifikačního procesu a vztahuje je ke specifickým požadavkům zaměstnavatelské i nezávislé kvalifikace a certifikace. Jsou diskutována témata jako odborná způsobilost lektora, vybavenost střediska vhodným vybavením a vzorky a odborné školicí tiskové materiály. Článek také definuje hlavní úkoly jednotlivých částí tohoto procesu, tj. školení, zkoušky a certifikace a ověřování jejich dodržování podle ATG.

Klíčová slova: kvalifikační proces, certifikace, kvalita, odborná způsobilost, vybavenost

Abstract

The goal of this article is to provide key factors affecting the quality of qualification and certification process and it reflects these factors in relation to the specific requirements of both, employer and independent qualification and certification. The professional competence of the lecturer, center equipment including samples and printed documentation is discussed. The article also defines the objectives of each part of the process, i.e. training, examination and certification and verification of their fulfillment by ATG.

Key words: qualification process, certification, quality, competence, equipment

The quality of qualification and certification process of NDT personnel is a hot topic in recent years in the Czech Republic. This article is discussing the key question: what is the goal of qualification and certification process and what objectives are necessary to achieve to enlist among top quality qualification centers for NDT personnel. It explains that the employer, who is fully responsible for his personnel, expects from the qualification and certification process a person, that is ready for his work from technical point of view and therefore the qualification and certification process need to be driven such a way to satisfy this requirement.

The article is divided into two parts. This, first part shall discuss assessment of quality in general and objectives for training center to achieve it.

1.1 The goal for qualification centers to assess high quality

Many may declare, that the training center with the best quality should deliver the biggest ratio of the trainees successfully throughout the examination process. Others may oppose to this idea by telling that the real quality lies behind strict examination and therefore only tough and merciless examination center ensures high quality of the process itself. There are even those, saying that the quality lies behind the certification body and nobody else, because they are taking the responsibility by issuing the certificates.

Despite all of us probably fully understand the incentive behind each of the statement, educated observer shall definitely feel that such concepts are somehow wrong in their very principle. High success rate of a training center can be both the result of perfect teaching as well as mere teaching according to the examination content with no context with real applications behind. High fails rate of the examination center may mean the center is tough savior of quality or an organization with no real touch to reality of NDT inspection process, asking ridiculous questions that are not even close to the subject. And regarding to the certification body assurance: providing of certificate is based on satisfying list of criteria that are only indirectly under control of the certification body.

Now, when we deliberately destroyed all the old concepts many were pricing for the perfection of qualification and certification process, let's ask ourselves: What is the real goal for achieving top quality in the qualification and certification process? To answer that, we have to forget for a while what employer may want (save money and time, because it is his expense) and what the training and examination center wish (collect as much money as possible, because that makes them profitable) and ask ourselves what is ultimately wanted from an NDT inspector or operator that passes through the qualification and certification process in a high quality qualification and certification center.

No matter if you are the employer, outsourcing organization of NDT staff or the qualification process agency, or if you are using independent or employer qualification system, **the real goal for quality assessment is a conscious NDT inspector/operator, that is able to do his work correctly and responsibly, understanding his delegated power, roles, and responsibilities derived from them and behaving in accordance with all of that.**

From this statement it is easy to derive a primary goal for quality assessment for training, examination and certification body as well. Because what is the general concept of the qualification and certification process flow? **Training center represents the tutor, examination center the validator and certification body the guarantor.** It is just another interpretation of what the world managers call the PDCA cycle – plan (prepare a qualification concept), do (train), control (examine), act (certify/not certify). One without another or without correctly working other part is meaningless. It is even more visible in employer qualification system, where qualification concept needs to be created for each customer independently and always according to his real internal requirements and demands.

So if the precedent applies, the quality of the training center cannot be determined by the success rate, but **its training content relevance and ability to prepare the trainee to his real industrial practice as much as possible.** Similarly, the examination center quality assessment cannot be driven by the toughness of the examination itself, but by **ability to verify that the trainee successfully learned how to behave in industrial practice as intended.** And lastly, certification body quality

assessment is **to prove that all previous processes were according to given standards and regulations and that they are not result of a randomness, luck or protectionism.**

1.2 Objectives for the high quality training center

Now, when we have finally set our real goal for assessing high quality in the qualification and certification process of NDT personnel, it is time to take a look on each part of the process and the objectives to satisfy in order to fulfill this promise.

In order to prepare the trainee for his future industrial practice as much as possible, the training center needs to satisfy the following objectives:

- skilled lecturers,
- carefully designed courses,
- good training materials,
- variety of representative samples,
- wide range of standard equipment.

Lecturers

Too often an observer can find an opinion, that “every professor can teach NDT”, because “well, NDT is really not difficult physics”. But teaching NDT as the professional (not university) course has its requirements that majority of the professors cannot satisfy.

Lecturers are not just those with the biggest list of diplomas or Level 3 certificates, as some may be fooled to think (neither ISO 9712, nor SNT-TC-1A or their employer qualification systems equivalents require a Level 3 to be the lecturer, this is a voluntary decision of the responsible person, usually the certifying body in ISO 9712, or Responsible Level 3 in SNT-TC-1A or NAS410/EN4179).

The key traits of the good lecturer are following:

1. He/she must deeply understand the topic, not just know the physics behind,
2. He/she should have long-time real-life experience from his own industrial practice,
3. He/she must have good teaching skills to be able to transfer the knowledge to trainees,
4. He/she should have good people skills to assess the situation and drive the trainees into the problematics.

It must be understood that these traits are not mutually replaceable or interchangeable and must be all present to provide a top quality lecturer capable of delivering only the right content in the given limited time, such a way the trainee will understand it and be able to replicate it successfully in the future.

Courses structure

Course structure is a written general concept of each course. Its goal is to provide for each course a guideline for delivering of consistent quality among a large group of trainees and many training events even when provided by various lecturers.

The courses structure is usually represented by syllabuses and programs. They must be prepared carefully, because they demonstrate the organizations’ ability to teach the trainees in such matter that they will get all necessary knowledge to start their own future career after passing the whole qualification and certification process. The contents should enlist:

1. Relevant physics background,
2. Relevant norms, standards, specifications, manuals etc.,
3. Appropriate practice assessment.

Courses structure is very often omitted by training organizations and disregarded by the human resources department of the employer. Others just check the checkbox if the organization provided such a document but they don't read and think over the content. Trainees later may find themselves surprised that the content of the training is not relevant, with too difficult physics that doesn't reflect the knowledge necessary for industrial practice (some handbooks include e.g. partial differential equations), course contains inappropriate selection of standards (usually too few, that are rather read to the audience than interpreted how to utilize them) and completely failed practice that doesn't match with their needs (training of aerospace inspectors on gas pipelines samples).

Training materials

A good training handbook is a good start of a good training center. It doesn't ensure the quality of the center itself (the training center is not visited by the trainee to read the book by myself), but it provides the trainee with tangible result of the training that can be assessed whenever it is needed, even after the end of the training course.

Such a training handbook needs to be linked with the course and at its best, extend it by additional information, that may not fit in to the discussed topics, but improves the knowledge of the reader.

Do not be misguided though, that better means more complex and more precise equations for less important topics. Americans say that each equation in the handbook decreases its usability by half. Alas, despite definitely not truth, there is something on this idea – irrelevant or unimportant information should be omitted from the handbook and the space should be used for better and more careful explanation of topics discussed and direct links to practical use.

Handbooks also should be avoid of simply how to do stuff (set a device, evaluate the sample, ...) and instead it should discuss the topics in the 5W+1H principle (when and where should who do what how to whom), especially in the parts dedicated to practice.

Training samples

There are organizations that boldly qualify aerospace engineers on gas pipeline samples and call themselves a high quality qualification center. Luckily, it is not in our country as far as I know. But why this possibly happens? The reason is that some qualification centers take too big piece of cake for themselves and think that if they know how to qualify one (method, industrial sector, etc.) they can do all other.

Because the training should prepare the operator for his specific industrial practice, it should provide as much relevant industrial samples as possible. This means to have enough samples for each application: NDT method (MT, PT, UT, ..), technique (P-E, PA, TOFD, ...), industrial sector (welds, castings, forgings, tubes ...) with wide range of possible defects types in various sizes, shapes, and orientations so the trainee has enough opportunities to learn how to detect, evaluate and record defects of various nature.

From that it is obvious that to be a good qualification center is rather costly. It is not easy to find parts with defects, because many organizations, e.g. in aerospace, require complete traceability and return to manufacturer. It also needs to be taken into account that some samples are just not

suitable for training (not to mention examination). Samples with too many defects that are obviously a scrap, or samples with so small defects that they are extremely difficult to spot, are not good training samples because they don't give the trainee freedom of utilizing his knowledge and they are only used to satisfy the number criteria.

Production of a high quality sample may cost up to 1000EUR. Seeking for them for free is possible, but very time-consuming. Some organizations thus solve the lack of adequate samples by providing samples that are not relevant to the qualification system/method/technique/sector and they justify their approach by arguing the concept of inspection is still the same. This may be sometimes true, but in such case the organization should spend significant effort on explaining this to the trainee and ensuring he fully understands that it is really the same approach. From our experience, this usually not happen and trainees tend to utilize wrong concepts in wrong situations when they come for training.

Training equipment

All at all, the abovementioned objectives are all reachable by responsible approach and correct corporate governance that shall nurture the people skills and give the lecturers chance to work on themselves as well as on the product (means the training). This however doesn't apply for equipment.

Despite it is highly descriptive to use old analogue UT devices to demonstrate the utilization of the equipment, the training course should follow the real-world applications assessment. It is just not enough to qualify by dye penetrant sprays and say that such a trainee is ready to operate a huge FPI line. The training, if it should be really in terms of the best quality, must provide the trainee with standard equipment of various sorts (e.g. techniques etc.) to assess all the applications he is going to face in foreseeable future of his career. This is not just a statement, it is a requirement of the employer qualification systems as SNT-TC-1A and EN4179/NAS410.

Be equipped for several techniques (e.g. penetrant type A and D) and various scales of applications (e.g. small scale inspection or mass testing for automotive production facility) requires investment in the equipment that need to be paid off. Such equipment is usually not cheap and it shall be somehow reflected in the price of such training.

1.3 ATG approach

ATG next year celebrates 25 years on the NDT market and during such a long time it learned from its past to provide better experience for the customers. ATG doesn't merely focus to increase the success rate of its trainees, but ensure that a person that passes its courses shall have all the necessary knowledge to do his job correctly. The company made sacrifices for such an approach, because with high quality comes a higher price of the service, which some doesn't like to see.

ATG is proud on its team of skilled NDT inspectors, that equally split their activities among lecturing, consulting and inspection activities in order to always stay fully aware of industrial practice and trends and development of NDT, continually improving their experience. They are not just experts in their field, but people with good teaching skills understanding the needs of the situation.

The training courses follow detailed syllabuses that ensure the same high quality of training by various lecturers. These syllabuses can be assessed by the customer to verify that the course is suitable for him and it will provide him will all relevant information.

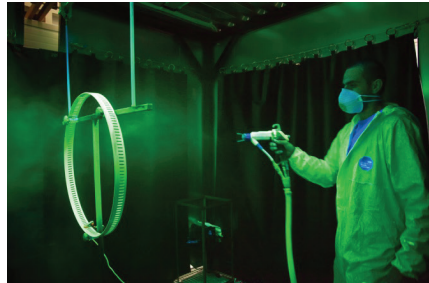
In recent years ATG spent significant effort to redesign their handbooks and other teaching materials in order to make them not just books to prepare for exams, but handbooks to use when unsure how to proceed while working on inspection site. The materials are completely internally-prepared, created by teams of our experts of each NDT method and carefully regularly reviewed in order to be fully updated and in the best shape all the time.

Among the list of training materials belong also carefully selected standards and specifications that represent well the assessment for each method. These documents ae not just read, but explained how to look at them, how to find relevant information inside and utilize it.



There more than 1100 samples in the ATG warehouse just for purpose of training, listing real parts from automotive, oil&gas, railways, aerospace and other industries. Production sectors are also handled accordingly as well as types of defects enlisted. Many of the samples are collected from our long-time partners and therefore are real samples from production or operation, not an artificial pieces created on order.

Equipment utilization is very important part of the training and ATG is using various equipment including industrial testing lines in the newly opened Special Process House to give the trainees chance to see and get practice on the most modern devices that are approved for testing for such customers as Rolls Royce, GE Aviation, SAPHRAN and others.



The training premises are passing significant changes this year to improve the experience of trainees from the course. We understand that a trainee sitting on the course needs some level of comfort so the participants can enjoy snacks during the day as well as wireless internet connection.

What is the most important, ATG deliver all this together, because the unity is more than the arithmetic sum of all parts.

1.4 Summary

The article's main goal was to explain the real values of quality in the NDT personnel qualification and certification. It quoted that quality is not just a mere ratio of success or fail and it is based on broad range of objectives that need to be satisfied simultaneously in order to achieve the requested quality.

It is always possible to measure the quotation/business proposal just by the lowest price, but with low price always ultimately comes low quality of service. The real quality does not come cheap, especially in the training process. Therefore, it is necessary to remember and understand that preparation of a good handbook takes hundreds of man/days, equipment require significant direct investment that may easily exceed millions of CZK and even collecting relevant samples may be a daunting task that many fail to fulfill. Collecting excellent lecturers, however, may turn to be something that cannot be even paid by the money, because a real expert will never be satisfied with providing just a mediocre job because of the budget limitations.

History taught us that saving money on qualification caused major financial loss on scrapped business cases that cannot be redeemed by any insurance company. After several recent affairs the list of such cases ballooned significantly in recent years even in the Czech Republic. Still there are those that select short-term benefit over long-time good and deliberately disregard the survival of the fittest. Alas, those who don't learn from the past are doomed to repeat it.



SROVNÁNÍ NOREM EN ISO 11666 A ISO/DIS 19285

Petr ŽBÁNEK

ATG s.r.o.

Abstrakt:

cílem práce je zhodnotit draft normy ISO 19285, která se zabývá kritérii přípustnosti pro svary kontrolované technikou Phased array, z hlediska použitelnosti v praxi. Text srovnává přístup normy ISO 11666, která je již dlouhou dobu používána v technické praxi pro hodnocení svarů pomocí konvenčního ultrazvuku, s přístupem normy ISO 19285 a jeho možnými problémy při využití v technické praxi.

Úvod – metodické normy

Technika phased array se v posledních několika letech začíná více používat v průmyslu. Pro kontrolu svarů ale normativní podklady za tímto trendem zatím poněkud zaostávaly a v jiných odvětvích, jako jsou odlitky a výkovky stále ještě zaostávají. Prvním předpisem, který vyšel v systému EN ISO pro kontrolu svarů, byla metodická norma EN ISO 13588. Tato norma je ekvivalentem normy EN ISO 17640, která se používá pro konvenční ultrazvuk. Definuje způsoby zkoušení, něco jako použité směry pro konvenční ultrazvuk, měrky a třídy zkoušení.

Na rozdíl od normy EN ISO 17640 nejsou v normě EN ISO 13588 stanovené rozdílné techniky nastavení citlivosti. Technika phased array využívá v podstatě pouze dvě techniky nastavení citlivosti, vzájemně zaměnitelné a to je technika DAC a TCG (existuje i systém DGS křivek pro Phased array, ale v průmyslu zatím není příliš rozšířen), přičemž technika DAC se pro Phased Array techniku příliš nehodí, jelikož zhoršuje čitelnost jiných zobrazení než A-skenů.






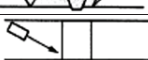
Třída zkoušení dle EN ISO 13588 je dána buď požadavkem zákazníka, nebo stupněm kvality svaru dle ISO 5817. Tabulka je v podstatě identická s normou EN ISO 17640.

Třída zkoušení	Stupeň kvality podle ISO 5817
A	C, D
B	B
C	Po dohodě
D	Zvláštní aplikace

Tab. 1 – Třídy zkoušení a jejich vazba na stupně kvality dle ISO 5817 dle ISO 13588.

Zkušební úrovně jsou v EN ISO 13588 pojaty poněkud jinak než v EN ISO 17640. Pro techniku phased array by nemělo velký smysl zkoušet svar několikrát pod různými úhly, protože toho je technika phased array schopná najednou, v jednom kroku. Proto se jednotlivé úrovně liší počtem stran, ze kterých je nutné zkoušet a použitou měrkou. Všechny měrky obsahují boční vývrty, jako ideální reflektory pro techniku PA, pro třídy zkoušení s vyšší přesností však měrky obsahují více reflektorů včetně povrchových drážek (tyto reflektory pak slouží k ověření přesnosti nastavení přístroje a ověření požadovaného pokrytí). Měrka pro třídu zkoušení B má oproti měrce pro třídu zkoušení A jeden boční vývrt navíc (může být alternativně nahrazen drážkou) a jednu povrchovou drážku. Měrka pro třídu zkoušení C má oproti měrce pro třídu zkoušení B více povrchových drážek.

Dále jsou zkušební úrovně definovány v tabulce 2. Tato tabulka zobrazuje základní nastavení phased array systémů a pro jednotlivé způsoby jsou ke zkušebním úrovním doplněny pokyny o počtu stran ze kterých je nutné svar zkoušet.

Mód	Třídy zkoušení			Příklady
	A	B	C	
	Referenční měrka			
	Měrka A	Měrka B	Měrka C	
Nastavení zkoušky				
Pevný úhel při pevné pozici sondy	Ze dvou stran	Není vhodné jako samostatná technika	Ze dvou stran	
Pevné úhly se zkoušením v rastru	Z jedné strany	Z jedné strany	Z jedné strany	
E-sken při pevné pozici sondy	Z jedné strany	Ze dvou stran se dvěma úhly	Ze dvou stran	
S-sken při pevné pozici sondy	Z jedné strany	Ze dvou stran nebo ze dvou pozic sondy	Ze dvou stran nebo ze dvou pozic sondy	
S-sken v rastru	Není doporučováno		Z jedné strany	
Nakloněný sken	Pokud je vyžadováno specifikací			
^a Pro třídu zkoušení C, musí být zkombinováno alespoň dvě nastavení z této tabulky ^b Pokud je vyžadováno detekovat i příčné necelistvosti, musí být použitý vhodný dodatečný test. Naklonění sondy nebo elektronické naklonění. ^c Rozdíl alespoň 10°				

Tab. 2 – Třídy zkoušení a postup nastavení zkoušky a použité referenční měrky.

Norma nijak nedefinuje, který z výše uvedených způsobů se má použít. Volba záleží na možnostech přístroje, polohovacího zařízení apod.

Norma EN ISO 13588 nespecifikuje ani rozměry a frekvence používaných sond. Volba těchto parametrů závisí na operátorovi a měla by se provést podle druhu materiálu, požadované citlivosti, rychlosti zkoušení a požadovaného rozlišení.

Hodnocení podle normy EN ISO 11666

Norma EN ISO 11666 je navržena pro kontrolu svarů konvenčním ultrazvukem a doposud se používala, a pravděpodobně ještě bude používat, jako norma pro kritéria i pro Phased array. Protože ale není původně určena pro phased array, je třeba používat jen některé části této normy, tedy vždy je vhodné napsat písemný postup, který vyloučí jakékoliv nevhodné použití kritérií.

Norma připouští dva způsoby hodnocení indikací:

- a) Hodnocení na základě délky indikace a maximální amplitudy echa indikace
- b) Hodnocení založené primárně na typu indikace (plošná/objemová). V případě, že je indikace hodnocená jako plošná, je automaticky nepřijatelná, bez ohledu na délku, v případě, že je indikace hodnocená jako objemová, hodnotí se podle amplitudy a délky.

Pro celkové hodnocení se používají 4 různé úrovně.

- 1) Referenční úroveň
- 2) Hodnotící úroveň
- 3) Registrační úroveň
- 4) Stupeň přípustnosti

Referenční úroveň je křivka získaná kalibrací. Norma umožňuje 4 způsoby jak citlivost nastavit.

- 1) DAC křivka na bočním vývrtnu průměru 3 mm (norma měrku – rozměry, materiál, počet vývrtnů apod. nijak zvlášť nespecifikuje)
- 2) Nastavení pomocí DGS diagramu na různé průměry FBH. Průměr FBH se řídí tloušťkou základního materiálu svaru, frekvencí sondy a teoreticky i stupněm přípustnosti. Prakticky však stupeň přípustnosti nehraje roli, protože pro oba stupně jsou průměry stejné.
- 3) DAC křivka na zářezu hloubky 1 mm a šířky 1 mm (i když šířka není pro UT důležitá)
- 4) Nastavení pro tandemovou techniku na vývrtnu s plochým dnem průměru 6 mm.

Tato křivka se dále v podstatě nevyužívá, pokud nebudeme počítat požadavek normy na zápis překročení/podkročení amplitudy echa přes/pod tuto hranici do protokolu.

Hodnotící úroveň je „kopie“ referenční hranice posunutá vždy o určitý počet dB níže. Používá se k rozlišení indikací, které jsou „nezajímavé“ (nehodnocené) od indikací, které tuto hranici překročí a musí být hodnoceny (nemusí souviset s přípustností).

Úroveň pro registraci udává, které indikace je nutné zaregistrovat, tedy zapsat do protokolu. S takovými indikacemi se ve vyhodnocování dále pracuje (pokud tuto hranici překročí), i když jsou hodnoceny jako přípustné.

Stupeň přípustnosti pak udává indikace, které, pokud přesáhnou amplitudou, jsou nepřijatelné.

Dál norma udává požadavky pro slučování indikací, tedy podmínky, kdy lze dvě indikace považovat za jedinou. Požadavky jsou pro osy X (ve směru osy svaru), Y (kolmo na osu svaru v rovině svaru) a Z (v hloubce). Slučují se indikace, které svojí amplitudou **překračují** registrační hranici a splňují kritéria pro sloučení, tedy jsou v dostatečné blízkosti jiné indikace.

Pokud jsou indikace sloučeny, pak musí být znovu vyhodnoceny podle prvního kritéria a pokud jsou i nadále přípustné, hodnotí se podle posledního kritéria a tím je takzvaná kumulativní (souhrnná délka) všech indikací přípustných, tedy indikací pod stupněm přípustnosti a **přes** registrační hranici.

Pozice jednotlivých úrovní se liší podle stupně přípustnosti. Stupně přípustnosti jsou v normě EN ISO 11666 dva a to AL2 a AL3. Stupeň 2 je přísnější než stupeň 3. Vlastní referenční hranice se se stupněm přípustnosti nemění pro žádnou techniku nastavení citlivosti.

Délka indikace se hodnotí většinou z poklesu vadového echa na úroveň pro hodnocení. Tedy indikace začíná v místě, kde maximální indikace echa dosahuje úrovně pro hodnocení a končí v místě, kde vadové echo na tuto úroveň spadne a už není možné získat vyšší echo než echo dosahující úrovně pro hodnocení.

Hodnocení indikací dle ISO/DIS 19285

Hodnocení dle ISO/DIS 19285 je dost podobné hodnocení dle EN ISO 11666 avšak, tuto normu nelze pro konvenční ultrazvuk dost dobře použít, protože některé části normy používají pokročilejší techniky UT, jako je samozřejmě phased array, ale i TOFD pro stanovení určitých parametrů indikace a toho není konvenční ultrazvuk schopný. V zásadě se liší hlavně počtem stupňů přípustnosti, které jsou v této normě tři (AL 1, AL 2 a AL 3). Stupeň 3 je, podobně jako v normě EN ISO 11666 nejméně přísný, stupeň 1 je nejpřísnější. Norma uvádí tabulku, která udává vztah stupňů přípustnosti s třídami zkoušení a kvalitou svaru dle ISO 5817.

Stupeň kvality dle ISO 5817	Třída zkoušení dle ISO 13588	Stupeň přípustnosti dle ISO 19285
C, D	A	3
B	B	2
Po dohodě	C	1
Speciální aplikace	D	Po dohodě

Tab. 3: Stupně přípustnosti pro ultrazvukové zkoušení technikou phased array

Tato tabulka částečně připomíná tabulku 1 z normy EN ISO 15626, ale úplně jí neodpovídá. Jde spíše o kombinaci norem EN ISO 11666 a EN ISO 15626 (Nedestruktivní zkoušení svarů – Technika měření doby průchodu difrakčních vln (TOFD) — Stupně přípustnosti). Tabulka je následující:

Stupeň kvality podle ČSN ISO 5817	Třída zkoušení podle ČSN ISO 10863	Stupeň přípustnosti
B (Přísný)	C	1
C (Střední)	nejméně B	2
D (Mírný)	nejméně A	3

Tab. 4: Stupně přípustnosti pro TOFD

Indikace se vyhodnocují dvěma způsoby

- Podle délky a výšky indikace (nejlépe měřit technikou TOFD) nebo použitím jiných signálů pro specifické vady, jako například hubený kořen apod.
- Podle délky a maximální amplitudy echa podobně jako v případě normy EN ISO 11666

Délka indikace se měří podle normy EN ISO 11666 (normy na sebe odkazují), tedy poklesem na hodnotící úroveň, nebo podle přání zákazníka, případně se vychází z dat TOFD dle normy EN ISO 15626.

Kritéria přípustnosti pro hodnocení na základě délky a výšky indikace jsou následující:

Stupeň AL1

	Maximální povolená délka (l_{max}) pokud $h < h_2$ nebo h_3			Maximální povolená výška (h_1) když $l > l_{max}$
		Vystupující na povrch	Podpovrchové	
Rozsah tloušťek	l_{max} [mm]	h_3 [mm]	h_2 [mm]	h_1 [mm]
$6 \text{ mm} < t \leq 15 \text{ mm}$	0,75 t	1,5	2	1
$15 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$	0,75 t	2	3	1
$50 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	40	2,5	4	2
$t > 100 \text{ mm}$	50	3	5	2

Pro stupeň AL 2 platí následující

	Maximální povolená délka (l_{max}) pokud $h < h_2$ nebo h_3			Maximální povolená výška (h_1) když $l > l_{max}$
		Vystupující na povrch	Podpovrchové	
Rozsah tloušťek	l_{max} [mm]	h_3 [mm]	h_2 [mm]	h_1 [mm]
$6 \text{ mm} < t \leq 15 \text{ mm}$	t	2	2	1
$15 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$	t	2	4	1
$50 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	50	3	5	2
$t > 100 \text{ mm}$	60	4	6	3

Pro stupeň AL 3 platí následující

	Maximální povolená délka (l_{max}) pokud $h < h_2$ nebo h_3			Maximální povolená výška (h_1) když $l > l_{max}$
		Vystupující na povrch	Podpovrchové	
Rozsah tloušťek	l_{max} [mm]	h_3 [mm]	h_2 [mm]	h_1 [mm]
$6 \text{ mm} < t \leq 15 \text{ mm}$	1,5 t (max. 20)	2	2	1
$15 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$	1,5 t (max. 60)	2,5	4,5	2
$50 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	60	4	6	3
$t > 100 \text{ mm}$	75	5	8	4

Tab 5. A/B/C Stupně přípustnosti pro stupeň AL1, AL2, AL3

Tyto tabulky odpovídají tabulkám 2, 3 a 4 normy EN ISO 15626.

Z uvedeného vyplývá, že technika TOFD je pro měření výšky indikace naprosto zásadní, protože hodnoty jako 1 mm – 5 mm jsou s vyhovující přesností technikou PA nebo dokonce pomocí konvenčního ultrazvuku měřitelné jen ve výjimečných případech, nebo dokonce neměřitelné (bez měřitelného rozměru).

Dále je vyhodnocována celková délka indikací (není stanoveno, zda se jedná o indikace registrované přípustné, indikace překračující úroveň pro hodnocení nebo dokonce nepřipustné).

Pro tloušťky $t \leq 50$ mm je na možné mít na délce 12t maximálně:

- Pro stupeň AL1: 3,5 t s maximální délkou 150 mm
- Pro stupeň AL2: 4,0 t s maximální délkou 200 mm (200 mm lze dosáhnout pouze pro $t = 50$ mm)
- Pro stupeň AL3: 4,5 t s maximální délkou 250 mm (což je zajímavé, protože pro $t = 50$ mm je $4,5 \times 50 = 225$ mm tedy méně než max. povolená hodnota)

Pro tloušťky $t > 50$ mm musí být maximální celková délka \leq než:

- Pro stupeň AL1: 10% celkové délky svaru, maximálně však 500 mm
- Pro stupeň AL2: 10% celkové délky svaru, maximálně však 600 mm
- Pro stupeň AL3: 10% celkové délky svaru, maximálně však 700 mm

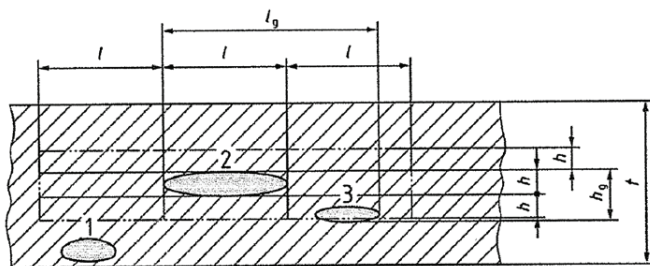
Seskupování indikací při hodnocení na základě délky a výšky indikace:

Norma řeší podmínky pro seskupení pouze ve směru x a z, tedy pouze v délce svaru a v jeho hloubce. Směr y není řešen, a tak lze teoreticky seskupit indikace umístěné na opačných stranách tepelně ovlivněné zóny. Takový přístup je vhodný pro techniku TOFD, protože ta v základní konfiguraci zkoušení Y souřadnici neposkytuje, nikoliv však pro Phased array, které takovou informaci bez problémů zobrazí.

Podmínky pro seskupení jsou následující:

- Seskupení ve směru x: vzdálenost mezi dvěma indikacemi je méně než délka delší ze dvou indikací
- Seskupení ve směru z: vzdálenost mezi dvěma indikacemi ve směru tloušťky je menší než výška vyšší indikace

Indikace hodnocené jako bodové se **neseskupují**.



obr. 1: Seskupení indikací hodnocených na základě délky a výšky

Bodové indikace

Bodové indikace nemají výrazný rozměr v žádném směru. Hodnotí se celkový počet takových indikací na jakémkoliv délce 150 mm a může být maximálně:

$$N = 1,2 \cdot t / \text{mm}$$

Kde:

t tloušťka svaru

Výsledek N se zaokrouhluje na nejbližší vyšší celé číslo.

Hodnocení na základě délky a maximální amplitudy indikace:

Kritéria jsou opsána z normy EN ISO 11666 a to doslova.

Tato část normy je zatím nepoužitelná, protože odkazuje na nastavení systému technikou 1 (boční vývrt) a 3 (pravouhlá drážka) bez jakékoliv návaznosti na předpis EN ISO 11666 kde jsou specifikované (minimálně ale přece) rozměry těchto reflektorů. V případě návaznosti na normu EN ISO 13588, při zadání třídy A a techniky 3 nastává problém. Technika požaduje nastavení na pravouhlé drážce, taková ale na měrce pro třídu A není.

Rovněž nastavení technikou 2 není splnitelné pro drtivou většinu PA přístrojů, jednoduše proto, že žádnou funkci DGS pro Phased Array neobsahují. Rovněž může dojít ke konfliktu, kdy bude zadána citlivost zkoušení ve stupni AL1, ale ten v této části normy ISO 19285 není vůbec definován. Jsou zde zatím jen stupně AL2 a AL3.

Naprosto zanedbatelným problémem tak zůstává, že se text odvolává na nastavení citlivosti dle tabulky A.2 a A.3 a takové tabulky v normě nejsou. S největší pravděpodobností jsou to tabulky 6 a 7. Stejně tak veškerá kritéria jsou shrnuta dle textu v tabulce A.1, taková ale opět v normě ISO 19285 není, jde pravděpodobně o tabulku 5. Ta ale obsahuje jen kritéria pro stupeň AL2 a AL3 a pro nastavení pomocí jakýchkoli záhadných technik 1, 2, 3 a 4 které sice známe z normy EN ISO 11666, ale zde v normě nejsou zmíněny a odkaz na normu EN ISO 11666 je pouze v referencích, ale v textu ne.

Dále je trochu problém s vyhodnocením příčných indikací, kde se norma odvolává na odstavec 9.1, ten ale mluví o vyhodnocení na základě délky a výšky indikace a tak jsou v části normy, která pojednává o hodnocení indikací na základě délky a amplitudy příčné indikace hodnoceny na základě délky a výšky indikace. Je tedy nutné použít techniku TOFD.

Spojování indikací a celková kumulativní délka indikací se hodnotí opět naprosto přesně podle EN ISO 11666, kde opět nastává problém se stupněm AL1, který zde není vůbec definován. Pokud není definován proto, že se u tohoto stupně kumulativní délka nehodnotí, pak o tom v normě není žádná zmínka. To znamená, že v tomto ohledu lze normu použít jen pro stupeň AL2 a AL3, a to pouze velmi opatrně.

Hodnocení kumulativní délky je totožné s hodnocením dle EN ISO 11666, tedy hodnotí se celková délka registrovaných indikací na určité délce, která závisí na tloušťce svaru.

Závěr:

Kritéria přípustnosti pro zkoušení svarů byla už delší dobu potřeba. Norma ISO 19285 je bohužel nešťastným začátkem ve snaze získat tato kritéria pro zkoušení technikou Phased Array a v současné podobě (ani jako draft) je norma prakticky jen velmi špatně použitelná, respektive je použitelná s maximální opatrností tzn., je třeba vybírat jen takové podmínky, které nejsou ve vzájemném konfliktu. Takový přístup ale pravděpodobně zákazníci neocení.

Norma v sobě vlastně spojuje požadavky norem EN ISO 11666 a EN ISO 15626, čímž vzniká podivný kočkopes a celkově norma budí dojem, že tvůrce na zadání zapomněl, a sepsal ji v autobusu cestou do práce.

V případě, že bude norma v této podobě uvedena do praxe, norma nebude sama o sobě jako celek v tomto stavu použitelná a zřejmě nezbude nic jiného, než pro každou aplikaci vytvořit speciální postup, který se bude snažit všemožným nástrahám vyhnout (např. vymezí, které části normy lze použít bez omezení a které je třeba řešit jiným způsobem a definuje jakým).

ABSTRAKTY
ABSTRACS



ZEFEKTIVNĚNÍ ZKOUŠENÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH SVORNÍKŮ METODOU MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU V SOULADU S POŽADAVKY TPG A EN IS 9934-1 2015

EFFECTIVIZATION OF TESTING OF HIGH-STRENGTH BOLTS BY MAGNETIC PARTICLE TESTING IN ACCORDANCE WITH REQUIREMENTS OF TPG AND EN IS 9934-1 2015

Ondřej DOUBEK

ATG s.r.o.

Contact e-mail: doubek@atg.cz

Abstrakt

Zefektivnění kontroly ve smyslu jejího zrychlení a zkvalitnění a současném snížením celkových provozních nákladů a dodržení požadované návratnosti investice byla jedna z dalších nedávných výzev, které úspěšně čelil vývojový a výrobní tým ATG. Základem dodaného řešení je optimální ergonomie celého pracoviště ROBOMAG 1200 AC/AC, které je založené na stacionárním horizontálním defektoskopu řady UNIMAG 1200 AC/AC s automatizací využívající mimo jiné robota. Více podrobností o systému ROBOMAG, včetně ekonomických a technických výhodách a celém vývoji projektu rádi poskytneme během naší přednášky.

Klíčová slova: magnetická metoda prášková, automatizace, efektivita kontroly, robot

Abstract

Testing efficiency improvement in extent of increase of speed and quality and decrease of operational expenses with constant return on investment was one of the recent challenges that ATG research and development team had to face. Basis of the solution was optimal ergonomoy of the whole ROBOMAG 1200 AC/AC workplace, which is based on stationary horizontal magnetizer UNIMAG 1200 AC/AC with automation enhanced by robotic applications. More details about the ROBOMAG system including economic and technical advantages and the whole development of the project shall be shown during the presentation.

Key words: magnetic particle testing, automation, testing effectivity, robot



„STRUKTURNÍ MECHANISMUS ÚNAVY – STATISTICKÁ STUDIE“ „STRUCTURAL MECHANISM OF FATIGUE – A STATISTICAL STUDY“

Jaroslav FIALA**, Pavel MAZAL*, Michal KOLEGA**, Štěpán JÍRA***, Petr LIŠKUTÍN*

*VUT v Brně, **ZČU v Plzni, ***Čermákova 46, Plzeň

Abstrakt

Cyklickým mechanickým zatěžováním tělesa dochází v důsledku dynamické rekrytalizace a návazného hromadění parakrystalických distorzí k rytmickým změnám jeho vnitřní struktury. V našem příspěvku referujeme o sledování těchto změn na souboru vzorků oceli 15CH2NMFA pomocí rentgenové difrakce a měřením koercitivní síly. Cílem této práce je najít způsob jak zpřesnit odhad zbytkové životnosti cyklicky zatěžovaných strojních dílců.

Klíčová slova: únava, rentgenová difrakce, koercitivní síla

Abstract

Cyclic mechanical loading of a body induces, due to dynamic recrystallization and ensuing accumulation of paracrystalline distortions, rhythmic changes of its internal structure. In the present contribution we report on our observation of these changes in a set of samples of steel 15CH2NMFA by means of x-ray diffraction and measurement of coercive force. The goal of this work is to find how to estimate residual service life of dynamically loaded machine parts more exactly.

Key words: fatigue, x-ray diffraction, coercive force



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 pravidla 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 referátu budou představeny jednotlivé aspekty, které mají na citlivost techniky vliv, a které se musí posuzovat z hlediska kvality techniky. Také budou prezentovány základní přístupy normy ČSN EN ISO 17636-2 a ASTM E 2033 respektive ASTM E 2698. Dále by měl článek 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 radiografie, speciální techniky NDT, ISO 17676-2, ASTM E 2698

Abstract

The aim of this article 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. Also the approach of ČSN EN ISO 17636-2 and ASTM 2033 respektive ASTM E 2698 will be compare. On the end the article 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 respektive aspects which are necessary to take in to the account when the systems are buying.

Key words: digital radiography, special NDT techniques, ISO 17676-2, ASTM E 2698



ZÁSADNÍ CHYBY PŘI ZKOUŠENÍ POLOTOVARŮ A SVARŮ POMOCÍ DIGITÁLNÍCH ULTRAZVUKOVÝCH DEFEKTOSKOPŮ S POUŽITÍM AVG/DGS DIAGRAMŮ

CRITICAL ERRORS IN TESTING OF SEMI-FINISHED PRODUCTS AND WELDS USING DIGITAL ULTRASONIC INSTRUMENTS BY USING AVG/DGS DIAGRAMS

Ing. Alexandr POPOV

PTS Josef Solnař, s.r.o.
popov@ptsndt.com

Abstrakt

V tomto článku jsou v úvodu popsány základní vlastnosti a odlišnosti analogových a digitálních UZ přístrojů. Jsou uvedeny základní principy používání vyhodnocovacích křivek AVG/DGS a DAC a jejich odlišnosti při používání v praxi.

V článku jsou zmíněny zásadní chyby při používání vyhodnocovacích křivek AVG/DGS, zejména zanedbávání útlumu UZ vln ve zkoušeném materiálu, což ve většině případů zkoušení šikmým UZ svazkem (úhlovými sondami) vede k významnému podhodnocení indikací diskontinuit.

Klíčová slova: *nedestruktivní zkoušení ultrazvukem; vyhodnocovací křivka; AVG; DGS; DAC; součinitel útlumu.*

Abstract

In the introduction of this article the basic characteristics and differences between analog and digital ultrasonic instruments are described. Basic principles of the use of AVG/DGS and DAC evaluation curves and their differences in practical application are listed.

The article summarizes critical mistakes when using AVG/DGS evaluation curves, especially the neglect of attenuation of ultrasound waves in the test material, which in most cases during testing using oblique US beam (angled probes) leads to significant underestimation of indications of discontinuities.

Key words: *non-destructive ultrasonic testing; evaluation curve; AVG; DGS; DAC; attenuation coefficient.*



ANIZOTROPIE PARAMETRŮ NELINEÁRNÍ ULTRAZVUKOVÉ SPEKTROSKOPIE V KOMPOZITECH ANISOTROPY OF NONLINEAR ULTRASONIC SPECTROSCOPY PARAMETERS IN COMPOSITES

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Daniel TOKAR, Jan KOBER, Josef KROFTA

Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Praha
e-mail: zp@it.cas.cz

Abstrakt

Metody nelineární spektroskopie elastických (ultrazvukových) vln (NEWS) se dnes jeví jako vysoce efektivní prostředek diagnostiky poškození materiálů a konstrukcí. Parametry lokální nelinearity mohou citlivě odhalit i relativně malé defekty v silně nehomogenních materiálech jako např. kompozity. Lokalizovat poškozené zóny podél dráhy šíření ultrazvukových vln bývá v důsledku anizotropie mechanických vlastností u kompozitních materiálů obtížné, neboť je nutné analyzovat přenos vln v různých směrech. Proto bylo vyvinuto zařízení se sondou s více piezoelektrickými měniči multiplexovanými v režimu vysílání a přijímání libovolných signálů. Sonda umožňuje měnit konfiguraci elementů z kruhové o průměru 50-300 mm na eliptickou apod. Pomocí kruhové sondy s fixní roztečí měničů byly na intaktních a poškozených deskách uhlíkových kompozitů zjišťovány směrové závislosti rychlosti šíření vln a v okolí defektů také nelineárních parametrů třemi metodami NEWS. Obdobné závislosti byly proměřovány také na lidské kožní tkáni in vivo. Systém se sondou s více elementy umožňuje velmi rychlé měření anizotropie lineárních i nelineárních charakteristik šíření ultrazvuku v různých materiálech i se zakřiveným povrchem.

Klíčová slova: kompozity, nelineární ultrazvuková spektroskopie, anizotropie šíření vln.

Abstract

Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) methods are today recognized as highly effective means for detection of damage in various materials and structures. Local nonlinearity parameters help sensitively reveal even small defects in strongly inhomogeneous materials like composites. Localization of defects along wave paths in composites is difficult due to their anisotropy of mechanical properties and wave transfer in various directions must be analyzed. A system using multi-directional ultrasonic array probe with multiplexed transmitting and receiving piezoelements was therefore designed. The probe allows its configuration changes from circular of 50-300 mm diameter till elliptic etc. Circular probe with fixed piezoelements spacing was used to determine directional diagrams of wave velocity and nonlinear parameters of three NEWS methods in both intact and damaged CFRP composites. Similar dependencies were studied also in human skin in vivo. The system with multi-element probe allows rapid detection of anisotropy of linear and nonlinear wave propagation characteristics in various materials also with curved surface.

Key words: CFRP, nonlinear elastic wave spectroscopy, wave propagation anisotropy.



MAGNETIZACE KONCŮ TRUBEK MAGNETICKOU PRÁŠKOVOU METODOU

MAGNETIZATION OF TUBE ENDS BY MEANS OF MAGNETIC PARTICLE METHOD

Miroslav ROXER

ATG s.r.o.

Contact e-mail: roxer@atg.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá přehledem používaných metod pro zkoušení konců trubek, poukazuje na limity těchto způsobů a předvádí další méně standardní techniky. Příspěvek dále srovnává numerické modely magnetizace s následnými fyzickými experimenty. Závěrem nastiňuje možné řešení pro zkoušení vnitřního povrchu, vnějšího povrchu a čel kombinovanou magnetizací v jednom zkušebním kroku.

Klíčová slova: magnetická prášková metoda, konce trubek, numerický model, reálný experiment

Abstract

The article deals with an overview of techniques used for testing the tubes ends. It points out the limits of these means and shows other less standard techniques. The article compares numerical models of magnetization followed by physical experiments. Finally it sketches possible solution for testing of outer surface, inner surface and foreheads by combined magnetization in one test step.

Key words: magnetic particle method, tubes ends, numerical model, physical experiment



HODNOCENÍ ZÁVAŽNOSTI DEFEKTŮ POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ A TLAKOVÝCH NÁDOB

EVALUATION OF RELEVANCE OF DEFECTS OF PIPELINES SYSTEMS AND PRESSURE

Václav SVOBODA¹, František ŽEMLIČKA¹

¹Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.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 schémata 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.

Keywords: NDT testing, Material defects



ROLE AKUSTICKÉ EMISE VE SKUPINĚ NDT METOD A PRAKTICKÉ PŘÍKLADY JEJÍHO VYUŽITÍ V PRAXI

THE ROLE OF ACOUSTIC EMISSION IN THE GROUP OF NDT METHODS AND SOME PRACTICAL EXAMPLES OF APPLICATION

Václav SVOBODA

Preditest, s.r.o., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic
svoboda@preditest.cz

Abstrakt:

Příspěvek obsahuje hodnocení metody akustické emise, jako dodatečné nedestruktivní zkušební metody pro zkoumání poškozujících procesů v různých materiálech konstrukcí. Obecné srovnání AE a jiných, široce-rozšířených NDT metod, jako je RTG, Ultrazvuk, Vířivé proudy, je popsán na fyzikálních principech. Současně s tím, jsou popsány výhody a omezení použití AE. Jednou z důležitých výhod je, že objevuje živé vady, které mohou růst ve strukturách materiálu během provozního zatížení. Z tohoto důvodu, AE může být použita pro monitorování takových procesů - k monitorování úniků, růstu trhlin - periodicky nebo nepřetržitě. Jedná se o objemovou metodu, tudíž celý objem materiálu může být kontrolován současně během stimulu zatížení. Na závěr je uvedeno několik příkladů praktického použití metody AE ve výzkumu a průmyslu.

Klíčová slova: Akustická emise, NDT testování, Poškození struktury, Hodnocení celistvosti konstrukce

Abstract:

Contribution contains the evaluation of Acoustic Emission method, as an additional non-destructive testing method for investigation of damaging processes in various materials of structures. General comparison of AE and other widely-spread NDT, like X-Ray, Ultrasonic, Eddy Current is described on physical principles. Paralell to this, the advantages and limitations of AE are mentioned. One of the serious advantage is discovering the life defects, which can grow in the structures under loading conditions. From this reason, AE can be used for monitoring of such processes -leak monitoring, crack growth rate – periodically or continuously. As a volumetric method, whole material volume can be inspected at the same time during the stimulus of loading. In conclusion, there are few examples of practical application of AE method in basic research and industry.

Keywords: Acoustic Emission, NDT testing, Structure damage, Structure integrity evaluation



**VLIV TVARU GEOMETRIE DISKONTINUITY
NA ODRAŽENOU RAYLEIGHOVU VLNU**
**EFFECT OF THE SHAPE OF GEOMETRIC DISCONTINUITY
ON NATURE OF RAYLEIGH WAVE BACK REFLECTION**

Michal ŠOFER¹, Josef NEUGEBAUER²

¹VŠB - Technical University of Ostrava, Department of Applied Mechanics, Czech Republic,

²PTS Josef Solnař s.r.o., Czech Republic

Contact e-mail: michal.sofer@vsb.cz

Abstrakt

Cílem práce je ukázat vliv konkrétního typu geometrické nespojitosti na chování odražené povrchové vlny. Experiment byl prováděn za použití běžného UZ přístroje (EPOCH 600) s 1 MHz sondou spolu s plexi klínem navrženým tak, aby se ve zkoušeném materiálu šířila povrchová vlna. K simulaci šíření povrchové vlny a jejího odrazu od různé geometrie nespojitosti včetně odhadu ztrát energie odraženého UZ svazku byl použit software COMSOL Multiphysics.

Klíčová slova: Rayleighovi vlny; ultrazvuk; geometrie diskontinuity; metoda konečných prvků

Abstract

The aim of our study is to show the influence of the shape of a particular type of the geometric discontinuity on the nature of Rayleigh wave back reflection. Experiments were carried out with aim of ultrasonic equipment from Olympus company, namely with Epoch 600 digital ultrasonic flaw detector and 1 MHz transducers with wedge in order to generate Rayleigh wave in used steel samples. COMSOL Multiphysics software has been used to simulate the propagation of Rayleigh wave on tested geometry as well as to estimate the losses of energy due to back reflection on tested geometric discontinuities.

Key words: Rayleigh wave; ultrasound; geometric discontinuity; finite element method



MORE EFFECTIVE AND SAFER DETECTION MEDIA APPLICATION IN MAGNETIC PARTICLES INSPECTION

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 magnetic particles inspection, we are proud to offer variety of fluorescent suspensions tailored to maximize contrast of indications depends on surface roughness and darkness conditions. We enhance the contrast of indications, as well as speed of their appearance and retention around discontinues for our black magnetic inks. Keen on increasing demands of acetone-free contrast paints for magnetic particles inspection, we introduced 2 alternatives to acetone-based contrast paints.

In current presentation, we would like to illustrate our recent achievements in design of new test media for magnetic particles inspection and to analyze how external lightning conditions contribute to fluorescent indications appearance on different examination surfaces.

Key words: *magnetic-particles inspection, contrast of magnetic inks indications, fluorescence of indications*



MOŽNOSTI DETEKCE TEČENÍ POMOCÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD OPTIONS OF DETECTION OF CREEP BY NONDESTRUCTIVE TESTING METHODS

Tomáš ZAVADIL

ATG s.r.o.

Contact e-mail: zavadilt@atg.cz

Abstrakt

Tečení je jeden z hlavních procesů degradace průmyslových zařízení působících v energetickém a petrochemickém průmyslu. Článek diskutuje možné aplikace nedestruktivních metod k detekci procesu tečení během jeho sekundárního stádia. V důsledku změny struktury materiálu oproti původnímu (nezatěžovanému) stavu během dlouhodobého tepelného zatěžování dochází k nežádoucímu dlouhodobému tepelnému zpracování při teplotách blízko A_{c1} , které vede k částečné překrystalizaci, detekovatelné např. příčnými ultrazvukovými vlnami.

Klíčová slova: ultrazvuková metoda, tečení, tepelné zpracování, příčné vlny

Abstract

Creep is one of the main degradation processes of industrial sites in power and petro-chemical industry. The article discusses possible applications of non-destructive methods to detect creep process in its secondary stage. As a result of microstructure change compared to its original structure, the tested part during long-time thermal load the is subject to unintended long-time heat treatment close to temperature A_{c1} , which causes partial microstructure change, detectable e.g. by shear ultrasonic waves.

Key words: ultrasonic testing, creep, heat treatment, shear waves

Název	NDE for Safety / Defektoskopie 2016 sborník příspěvků
Editor	Luboš Pazdera, Pavel Mazal
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT
Tisk	Betis s.r.o. Praha Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice
Vyšlo	listopad 2016
Vydání	první
Náklad	200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

ISBN 978-80-214-5422-4



Czech Society for Non-destructive Testing



invites all NDT specialists to

47th International Conference and Exhibition

DEFEKTOSKOPIE 2017

NDE FOR SAFETY 2017

Congress centre Chomutov, Czech Republic

November 7 – 9, 2017

This event will be organized by Czech Society for NDT as an international annual meeting and exhibition Defektoskopie 2017 / NDE for Safety 2017. 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. All interested persons are invited to participate at the conference, and to contribute by papers in both oral and poster sections. Manufacturers and suppliers of NDT instruments, software, literature and service providers are invited to present their products and innovations.

Main Conference Topics

- Ultrasonic methods
- Magnetic and inductive methods
- Radiography
- Acoustic emission
- Surface and optical methods
- Infrared thermography
- Tomography
- NDT in material and structure testing
- NDT corrosion damage monitoring
- Leak detection
- Functional and operational testing, reliability and safety assurance, NDE, SHM
- Application of NDE / NDT in the following areas: energy, transport, engineering, construction, chemical industry, etc.
- Non-standard applications
- Education, standardisation, certification and accreditation



Chomutov

Chomutov is placed at the foot of the Ore Mountains in north-west Bohemia in the vicinity of the German border. It was established on the crossroads of previous business routes connecting Prague with Leipzig and Cheb with Ústí nad Labem. The town of Chomutov is an important industrial centre of the Czech Republic.

Organizing Committee invites all companies to active participation through corporate sponsorships.

Corresponding Address:

Dr. Pavel Mazal
CNDT (Brno University of Technology)
Technická 2, CZ 616 00 Brno, Czech Republic

E-mail: cndt@cndt.cz
More info: www.cndt.cz

ISBN 978-80-214-5422-4