

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



# DEFEKTOSKOPIE 2019

**NDE for Safety**

## **SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS**

**49. mezinárodní konference a výstava NDT techniky  
49<sup>th</sup> International Conference and Exhibition**



7.–9. listopad 2019  
November 7–9, 2019

Clarion Congress Hotel České Budějovice, Czech Republic

Generální partner:

**OLYMPUS**

Partneři:



Mediální partneři:



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



# **DEFEKTOSKOPIE 2019**

## **NDE for Safety 2019**

**49<sup>th</sup> International Conference and NDT Exhibition**  
**49. mezinárodní konference a výstava NDT techniky**

# **PROCEEDINGS**

# **SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ**

**November 5 - 7, 2019**  
**5. až 7. listopad 2019**

**České Budějovice, Czech Republic**

Edited by Luboš Pazdera, 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
- Ing. Monika Manychová – VUT v Brně
- Ing. Zdeněk Převorovský – ÚT AV ČR Praha
- Mgr. Libor Topolář – VUT v Brně

Editors: Luboš Pazdera, Pavel Mazal, Pavel Turek

Copyright © 2019  
Czech Society for Nondestructive Testing  
All rights reserved

Published by:

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

and

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

printed version - ISBN 978-80-214-5799-7

# OBSAH / CONTENTS

## PŘÍSPĚVKY / PAPERS

- Michal BOHÁČIK, Břetislav SKRBK, Jakub MRÁZ** 1  
NEDESTRUKTIVNÍ MAGNETICKÉ A VÍŘIVOPROUDÉ TESTOVÁNÍ VE  
STUDENTSKÝCH PRACÍCH TU V LIBERCI  
*NON-DESTRUCTIVE MT AND ET IN STUDENTS' WORKS TECHNICAL  
UNIVERSITY OF LIBEREC*
- Michal BOHÁČIK, Břetislav SKRBK, Vladimír Nosek, Jakub MRÁZ** 7  
NORMY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V SLOVENSKÉ A V ČESKÉ  
REPUBLICI  
*NON-DESTRUCTIVE TESTING STANDARDS IN CZECH AND SLOVAK  
REPUBLIC*
- Vladimír BUKÁČEK, František VLAŠIC, Houssam MAHMOUD, Pavel  
MAZAL** 9  
PROVOZNÍ A LABORATORNÍ ZKOUŠKY PNEUMATICKÝCH POHONŮ  
*OPERATING AND LABORATORY TESTS OF PNEUMATIC DRIVES*
- Jaroslav FIALA, Pavel MAZAL, Vendula SKŘIVÁNKOVÁ, Housam  
MOHAMMAD** 21  
MAGICKÝ SEDMIÚHELNÍK ÚNAVY ANEB ÚNAVA JE BIMODÁLNÍ  
PROCES  
*MAGICAL HEPTAGON OF FATIGUE OR FATIGUE AS A BIMODAL  
PROCESS*
- Jiří HLOŽEK, Pavel MAZAL, Libor NOHÁL** 33  
ZMĚNY SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE V DŮSLEDKU DYNAMICKÉHO  
ZATĚŽOVÁNÍ LOŽISKOVÉ OCELI 100Cr6  
*CHANGES OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DUE TO DYNAMIC  
LOADING OF BEARING STEEL 100Cr6*
- Michal JANKŮ, Ilja BŘEZINA, Josef STRYK** 41  
PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PŘI HODNOCENÍ STAVU  
POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ  
*OVERVIEW OF METHODS USED IN ASSESSING ROAD CONDITIONS*
- R. KADEŘÁBEK, J. BOHÁČOVÁ, M. GHITA, M. HALÁK, J. UHER** 53  
ADVANCED ROBOTIC INSPECTION SCANNERS

<b>Bernard KOPEC</b>	<b>65</b>
NEDESTRUKTIVNÍ METODY V RESTAURÁTORSKÉM PRŮZKUMU <i>NON-DESTRUCTIVE METHODS IN THE RESTAURANT SURVEY</i>	
<b>Bernard KOPEC</b>	<b>69</b>
W. C. RÖNTGEN A STOLETÍ RENTGENOVÉ DEFEKTOSKOPIE <i>W. C. RÖNTGEN AND THE CENTURY RENTGEN DEFECTOSCOPY</i>	
<b>Tomáš KOSTROUN, Jan PILAŘ, Milan DVOŘÁK</b>	<b>75</b>
NÁVRH SYSTÉMU PRO DEFEKTOSKOPII POMOCÍ OPTICKY BUZENÉ AKTIVNÍ INFRAČERVENÉ TERMOGRAFIE <i>DESIGN OF ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY NDT SYSTEM WITH OPTICAL EXCITATION</i>	
<b>Housam MOHAMMAD, Libor NOHÁL, Pavel MAZAL</b>	<b>87</b>
ACTIVE DIAGNOSIS OF TOROIDAL BEARINGS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE	
<b>Lukáš MUZIKA, Michal ŠVANTNER</b>	<b>93</b>
ODHAD TLOUŠŤKY BARVY POMOCÍ PULZNÍ TERMOGRAFIE <i>PAINT THICKNESS ESTIMATION BASED ON PULSE THERMOGRAPHY</i>	
<b>Josef NEUGEBAUER</b>	<b>99</b>
NOVÁ NORMA PRO ŠKOLENÍ PRACOVNÍKŮ NDT <i>NEW STANDARD FOR NDT PERSONNEL TRAINING ORGANIZATIONS</i>	
<b>Martin POZDÍLEK, Jakub MATOUŠEK</b>	<b>105</b>
APLIKACE UMĚLÉ INTELIGENCE PŘI NEDESTRUKTIVNÍM TESTOVÁNÍ <i>APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NONDESTRUCTIVE TESTING</i>	
<b>Stanislav ŠTARMAN</b>	<b>113</b>
UNIKÁTNÍ AUTOMATIZOVANÝ SYSTÉM PRO NDT TESTOVÁNÍ ŽELEZNIČNÍCH KOLECH <i>UNIQUE AUTOMATED SYSTEM FOR TESTING FOR NDT OF RAILWAY WHEELS</i>	
<b>Stanislav ŠTARMAN</b>	<b>123</b>
POKROČILÉ METODY POUŽÍVANÉ PŘI ULTRAZVUKOVÉM TESTOVÁNÍ PRO PŘESNÉ DETEKCE ANOMÁLIÍ <i>ADVANCED PROCESSING METHODS USED IN ULTRASONIC AREAS FOR PRECISE ANOMALLY IDENTIFICATION</i>	

<b>Libor TOPOLÁŘ, Pavel ROVNANÍK, Pavel SCHMID</b>	<b>131</b>
VLIV OBSAHU SAZÍ NA AKTIVITU AKUSTICKÉ EMISE PŘI CYKLICKÉM NAMÁHÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ <i>EFFECT OF CARBON BLACK CONTENT ON ACOUSTIC EMISSION ACTIVITY DURING CYCLIC LOADING OF COMPOSITE MATERIALS</i>	
<b>Libor TOPOLÁŘ, Iveta PLŠKOVÁ, Richard DVOŘÁK, Michaela HODULÁKOVÁ, Luboš PAZDERA, Petr HRUBÝ</b>	<b>139</b>
SLEDOVÁNÍ ZMĚN DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ PŘI RŮZNÝCH PROCESECH DEGRADACE <i>STUDY ON DYNAMIC PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED MATERIALS AT DIFFERENT DEGRADATION PROCESSES</i>	
<b>Michal VÁŇA</b>	<b>147</b>
PROBLEMATIKA ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ <i>THE ULTRASONIC TESTING ISSUES, INTERPRETATION OF THE RESULTS OBTAINED</i>	
<b>Jana VESELÁ, Pavel MAREŠ, Jiří HODAČ</b>	<b>157</b>
OVĚŘENÍ VÝROBNÍCH VAD SVAROVÝCH SPOJŮ ZKUŠEBNÍCH TĚLES METODAMI NDT <i>VERIFICATION OF MANUFACTURING WELDING DEFECTS IN TEST SPECIMENS BY NON-DESTRUCTIVE METHODS</i>	
<b>František VLAŠIC, Marie SVOBODOVÁ, Pavel MAZAL</b>	<b>165</b>
ANALÝZA SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE Z CREEPOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ VZORKŮ PAROVODNÍHO POTRUBÍ <i>SIGNAL ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION DATA FROM CREEP DAMAGE OF STEAM PIPING MATERIAL</i>	
<b>Pavel ZAHŘÁDKA, Jan PATERA</b>	<b>177</b>
HODNOCENÍ KOROZNÍHO NAPADENÍ STĚNY MOKRÉHO ZÁSOBNÍKU REAKTORU LVR-15 <i>EVALUATION OF CORROSION ON SET STORAGE WALL OF LVR- 15 REACTOR</i>	
<b>Petr ŽBÁNEK</b>	<b>185</b>
ZKOUŠENÍ AUSTENITICKÉ OCELI POMOCÍ VYSOKOFREKVENČNÍCH SOND TECHNIKOU PHASED ARRAY <i>HIGH FREQUENCY INSPECTION SOLUTION FOR AUSTENITIC STAINLESS-STEEL WELDS</i>	

## ABSTRAKTY / ABSTRACT

- Šárka JEČMÍNKOVÁ** 201  
VYUŽITÍ DIGITÁLNÍ RADIOGRAFIE V PRAXI PRO RŮZNÉ TYPY  
MATERIÁLŮ A POROVNÁNÍ S FILMOVOU RADIOGRAFIÍ  
*USE OF DIGITAL RADIOGRAPHY IN PRACTICE FOR DIFFERENT  
TYPES OF MATERIALS AND COMPARISON WITH FILM  
RADIOGRAPHY*
- Veronika KADLECOVÁ, Radek SALAČ** 203  
DETEKCE DEFECTŮ POMOCÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ A  
AUTOMATICKÉ VYHODNOCENÍ S VYUŽITÍM METOD UMĚLÉ  
INTELIGENCE  
*DEFECT DETECTION BY MACHINE VISION AND AUTOMATIC  
EVALUATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS*
- J. KLIPPSTEIN, R. PAWELLETZ, N. RIESS** 205  
RAILWAY ENGINEERING: MAGNETIC PARTICLE TESTING ON  
WHEEL SET ASSEMBLIES
- Václav KOULA, Jan ŠIFNER, Martin DRÁB, Jiří SAMEK** 206  
DETEKCE SLABÝCH SIGNÁLŮ AE SROVNATELNÝCH SE ŠUMOVÝM  
POZADÍM  
*DETECTION OF WEAK AE SIGNALS COMPARABLE WITH  
BACKGROUND NOISE*
- Pavel MAŘÁNEK, Václav JANDURA** 207  
ČSN EN 12681-1:2018 - VÝZNAM A DŮLEŽITOST REVIZE EN  
12681:2003, POZNÁMKY A KOMENTÁŘE K ČESKÉMU PŘEKladU  
*ČSN EN 12681-1:2018 - IMPORTANCE OF EN 12681:2003 REVISION,  
NOTES AND COMMENTS ON THE CZECH TRANSLATION*
- Josef NEUGEBAUER** 208  
POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ PŘÍPUSTNOSTI ISO NOREM S RUSKÝMI  
STANDARDY  
*COMPARISON OF ADMISSIBILITY CRITERIA OF ISO STANDARDS  
WITH RUSSIAN STANDARDS*
- Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Jan  
KOBER** 209  
PŘESNÁ LOKALIZACE ÚNIKŮ NA POTRUBÍ POMOCÍ AKUSTICKÉ  
EMISE  
*PRECISE LOCATION OF LEAKAGES IN PIPELINES BY ACOUSTIC  
EMISSION*



<b>Miroslav ROXER</b>	<b>211</b>
VÝVOJ MAGNETIZÉRU S DVOUKANÁLOVÝM GAUSSMETREM PRO ZKOUŠENÍ TVAROVĚ SLOŽITÝCH DÍLŮ <i>DEVELOPMENT OF A MAGNETIZER WITH TWO-CHANNEL GAUSSMETER FOR TESTING OF COMPLEX SHAPED PARTS</i>	
<b>Václav SVOBODA, Lubomír GAJDOŠ, Jiří JANOVEC</b>	<b>213</b>
OVĚŘENÍ A LOKALIZACE DEFEKTŮ (TRHLIN) NA TRUBKÁCH KOTLE S POUŽITÍM METODY MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU <i>VERIFICATION AND LOCALIZATION OF DEFECTS (CRACKS) AT BOILER WATERWALL TUBES USING MAGNETIC MEMORY METHOD</i>	
<b>Václav SVOBODA</b>	<b>214</b>
SKUTEČNÁ FYZIKÁLNÍ PŘÍČINA ZŘÍCENÍ LÁVKY PŘES ŘEKU VLTAVU V PRAZE – TROJI <i>THE REAL PHYSICAL CAUSE OF THE FAILURE OF THE PEDESTRIAN BRIDGE OVER THE VLTAVA RIVER IN PRAGUE – TROJA</i>	
<b>Yuriy YAREMENKO</b>	<b>215</b>
RILUMINATI – A NEW METHOD FOR EARLY DETECTION OF FATIGUE CRACKS	
<b>Tomáš ZAVADIL</b>	<b>216</b>
ASME ANDE-1:2020 – NOVINKY SOUVISEJÍCÍ S VYDÁNÍM VERZE 2020 A VÝHLED ZAHÁJENÍ KVALIFIKACE V ČESKÉ REPUBLICE <i>ASME ANDE-1:2020 – NEWS RELATED TO NEW VERSION 2020 AND PROSPECT OF QUALIFICATION IN THE CZECH REPUBLIC</i>	
<b>Tomáš ZAVADIL, Zbyněk ZAVADIL</b>	<b>217</b>
OVĚŘENÍ ZPŮSOBILOSTI SUBDODAVATELŮ NDT PRO VELKÉ FIRMY POMOCÍ MEZILABORATORNÍHO ZKOUŠENÍ ZPŮSOBILOSTI <i>PROFICIENCY ASSESSMENT OF NDT SUPPLIERS FOR CORPORATIONS VIA INTERLABORATORY PROFICIENCY TESTING</i>	
<b>Tomáš ZAVADIL, Petr ŽBÁNEK</b>	<b>218</b>
URČENÍ TEPELNĚ INDUKOVANÝCH ZMĚN STRUKTURY MATERIÁLU POMOCÍ SOND PHASED ARRAY <i>ASSESSMENT OF HEAT-INDUCED MICROSTRUCTURE CHANGES BY PHASED ARRAY PROBES</i>	

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

# UPOUTÁVKA DEF 2020

## INDEX AUTORŮ / AUTHORS INDEX

Boháčik M.	1, 7	Neugebauer J.	99, 208*
Boháčová J.	53	Nohál L.	33, 87
Březina I.	41	Nosek V.	7
Bukáček V.	9		
Dráb M.	206*	Patera J.	177
Dvořák M.	75	Pawelletz R.	205*
Dvořák R.	139	Pazdera J.	139
		Pilař J.	75
Fiala J.	21	Plšková I.	139
Gajdoš Ľ.	213*	Pozdílek M.	105
Ghita M.	53	Převorovský Z.	209*
Halák M.	53	Riess N.	205*
Hložek J.	33	Rovnaník P.	131
Hodač J.	157	Roxer M.	211*
Hoduláková M.	139		
Hrubý P.	139	Salač R.	203*
		Samek J.	206*
Chlada M.	209*	Schmid P.	131
		Skrbek B.	1, 7
Jandura V.	207*	Skřivánková V.	21
Janků M.	41	Stryk J.	41
Janovec J.	213*	Svoboda V.	213*, 214*
Ječmínková Š.	201*	Svobodová M.	165
		Šifner J.	206*
Kadeřábek R.	53	Štarman S.	113, 123
Kadlecová V.	203*	Švantner M.	93
Klippstein J.	205*		
Kober J.	209*	Topolář L.	131, 139
Kopec B.	65, 69		
Kostroun T.	75	Uher J.	53
Koula V.	206*		
Krofta J.	209*	Váňa M.	147
		Veselá J.	157
Mahmoud H.	9, 21, 87	Vlašic F.	9, 165
Mareš P.	157		
Mařánek P.	207*	Yaremenko Y.	215*
Matoušek J.	105		
Mazal P.	9, 21, 33, 87, 165	Zahrádka P.	177
		Zavadil T.	216*, 217*, 218*
Mráz J.	1, 7	Zavadil Z.	217*
Muzika L.	93	Žbánek P.	185, 218*

\*) pouze abstrakt, článek nebyl dodán

\*) Only abstract, full paper was not delivered.



## EPOCH® 6LT Přenosný ultrazvukový defektoskop

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

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

**Jednoduchost použití:** Ovládání menu přístroje otočným voličem palcem jedné ruky

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

**Odolnost:** Dle normy IP65/67 – drop test

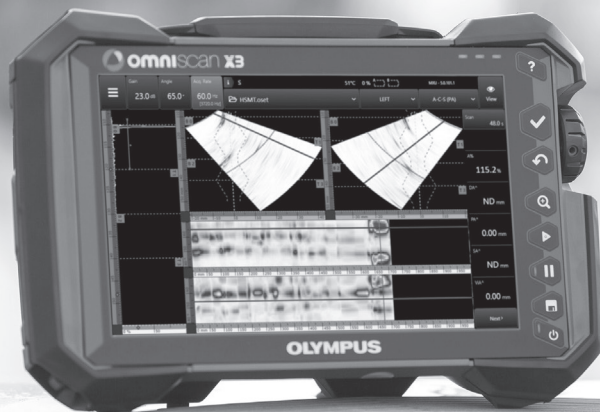
EPOCH je registrovaná známka společnosti Olympus.

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

Více informací na [www.olympus-ims.com/epoch6lt](http://www.olympus-ims.com/epoch6lt)

# OLYMPUS®

## Defektoskop OmniScan® X3



### Spolehlivost, kterou můžete zažít

Vyjímečné zobrazení a promyšleně navržený software - vyšší standard v přístroji phased array. Přístroje OmniScan jsou známé svojí spolehlivostí a jednoduchostí použití - X3 nabízí ještě lepší vlastnosti pro detekci nejrůznějších vad materiálů.

**TFM** (Total Focusing Method) a **FMC** (Full Matrix Capture) techniky s podporou **64 elementové aktivní apertury**.

**Vylepšené Phased Array zobrazení** včetně inovativní **live TFM obálky** a **simulátoru mapy akustického vlivu** (Acoustic Influence Map - AIM) pro TFM techniku.

Vytvořte si **komplexní skenovací plán v jednom kroku** a ověřte si jeho nastavení pomocí vizualizačních nástrojů. **Sdílejte obraz** ze svého defektoskopu s kolegy použitím Olympus Scientific Cloud.

Olympus a OmniScan jsou registrovanými známkami společnosti Olympus.

Scientific Solutions Division

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

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

Více informací na [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)





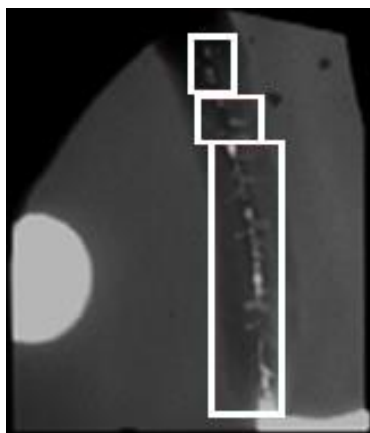
**SERVIS S.R.O.**

**MICRO FOCUS** software  
informační technologie

## ZAPOJTE UMĚLOU INTELIGENCI DO VÝROBY OPTIMALIZUJTE VÝROBU A NÁKLADY

S umělou inteligencí budou kontroly

- Přesnější
- Rychlejší
- Automatické
- Efektivnější



Zajistíme implementaci podle vašich potřeb



**DEFEKTOSKOPIE 2020**  
NDE FOR SAFETY 2020



**DEFEKTA NDT**  
NONDESTRUCTIVE TESTING

MF Servis s.r.o. Foerstrova 1682, 500 02 Hradec Králové 2

[www.mfservis.cz](http://www.mfservis.cz), tel.: 495 582 785

# **PŘÍSPĚVKY / PAPERS**

Poznámky / Notes





# **NEDESTRUKTIVNÍ MAGNETICKÉ A VÍŘIVOPROUDÉ TESTOVÁNÍ VE STUDENTSKÝCH PRACÍCH TU V LIBERCI NON-DESTRUCTIVE MT AND ET IN STUDENTS' WORKS TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC**

**Michal BOHÁČIK\*, Břetislav SKRBEK\*\*, Jakub MRÁZ\*\*\***

Žilinská Univerzita v Žiline\*,

Technická univerzita Liberec\*\*,

TEDOM a.s., Divize motory, Jablonec nad Nisou\*\*\*

bretislav.skrbek@tul.cz

## **Abstrakt:**

*Přehled diplomových, bakalářských a doktorských prací v toku času 20ti let v oblasti MT a ET. Práce spojující témata, rozvoj poznatků s aplikacemi- Zákaznická témata řešící dílčí výrobní problémy. Shrnutí, závěr, neřešené náměty pro budoucnost - nedostatek studentů technických oborů - kombinované doktorské studium - zahraniční studenti...*

**Klíčová slova:** *Studentské práce, oblast ET a MT*

## **Abstract:**

*Survey diploma work, baccalaureate and doctoral washing in flow time 20ti years in the area MT and ET. Work connecting topics, development piece of knowledge with applications- custom topics solving partial production problems. Summary, close, straddle topics for future - poverty of students technical spheres - combination doctoral study - external students...*

**Key words:** *Student works, area MT and ET.*

## **1. Úvod**

Príspevek predkladá teze a některé zajímavé výsledky diplomových a bakalářských prací v oblasti využití hlavně vířivých proudů. Práce vznikly dle zadání projektů, firem a specializace pracoviště katedry materiálu SF TU v Liberci. Mezi magnetické metody se řadí i metoda magnetické skvrny. Jejím výzkumu se věnovala řada prací. Bude však námětem některého samostatného příspěvku.

## 2. Zadání a výsledky studentských prací

V praktické části [1] je realizováno funkční zapojení vířivoproudého snímače firmy STARMANS (sonda byla původně součástí tloušťkoměru DIO-572 k měření povlakových vrstev). Nebyl k dispozici originální měřicí přístroj. Byla tedy vypracována kalibrační závislost výstupního napětí mV snímače na měřené tloušťce povlaku pro praktické využití snímače k měření vodivých a nevodivých vrstev na vodivém podkladovém materiálu Vyhodnocení naměřených hodnot:

Sonda není vhodná pro praktické měření vodivých povlaků. Zhruba do tloušťky povlaku 0,05 mm je charakteristika velmi strmá a pro praxi nepoužitelná, od 0,12 mm není patrná téměř žádná závislost výstupního napětí na tloušťce povlaku. Vypracovány kalibrační křivky a nastavení pro praktické použití pro měření tloušťky vodivých a nevodivých povlaků na feromagnetických a neferomagnetických vodivých podkladech.

Práce [2] se zabývá změnou magnetických vlastností materiálu u výfukového ventilu vznětového motoru během provozu řádově statisíců km. Vývoj aplikovaný pro servis LIAZ a.s. Poznátky:

1. Provozní teplotní dynamické podmínky motorů pro strukturní rozbor nelze simulovat v peci.
2. Umístění ventilu v jednotlivých spalovacích prostorech má statisticky významný vliv na velikost naměřené hodnoty magnetizmu.
3. Od hodnoty tepelné expozice odpovídající ujetí 120000 km lze orientační měření provádět pouze bez očištění ventilů, což značně urychluje prováděnou diagnostiku.
4. Na hodnoty naměřené v jednotlivých motorech má vliv uživatel i typ motoru.
5. Hodnota zbytkového magnetizmu oceli 17 465 (hlavy výfukových ventilů) je úměrná zkřehnutí (poklesu KCU). Kritická hodnota pro výměnu ventilu je  $H_r = 750A/m$ .

Pro odstranění rozdílných provozních vlivů působících na ventily u každého motoru doporučuje práce sledovat jednotlivé motory po celou dobu provozu a měření  $H_r$  provádět při jejich opravách.

Diplomová práce [3] si kladla za cíl ověřit aplikovatelnost metody vířivých proudů na detekci vad intermetalik - aluminidů  $Fe_3Al$  a  $FeAl$ , jejichž aplikačním výzkumem se zabývá tým vědeckých pracovníků na katedře materiálu TU v Liberci.

V přehledu postupů zpracování aluminidů jsou technologie, při jejichž použití mohou vzniknout na výrobku povrchové vady.

Vzorky aluminidů byly feromagnetické - permeabilita zkušebních vzorků bude vysoká.

Elektrická vodivost zkušební vzorku byla zjištěna pomocí tzv. čtyřbodové metody a ohmova zákona. Zjištěná hodnota  $\rho = 0,57$  [S.m.mm<sup>2</sup>] naznačuje, že elektrická vodivost aluminidu železa je ve srovnání s materiály jako ocel, hliník či měď o jeden až o dva řády nižší.

K diagnostice prasklin byl připraven zkušební vzorek aluminidu s dražkami o šířce 0.3 mm a hloubkách 0.5, 1.0, 1.5 a 2 mm.

Optimální měřicí frekvence přístroje NORTEC 1000 byla hledána s ohledem na nejlepší odlišení signálu. Nejvhodnější hodnota měřicí frekvence se pohybuje okolo 500 kHz. K porovnání s těmito výsledky byly dále změřeny drážky na zkušebních měrkách z hliníku a z austenitické oceli. Optimální nastavení metody pro tyto materiály, především tedy měřicí frekvence, fáze a zvolený typ sondy byly pochopitelně odlišné od zkušební vzorku aluminidu.

Z porovnání naměřených výsledků na drážkách o shodných hloubkách pak plyne, že při vhodně zvolené měřicí frekvenci, v tomto případě 500 kHz a typu sondy, je detekce povrchových náhradních vad na aluminidu i přes velmi malou elektrickou vodivost stejně dobrá jako u hliníku či oceli, tedy u materiálů, na nichž jsou vřívé proudy již běžně aplikovány.

Bakalářská [4] a po dvou letech i diplomová práce [5] Ondřeje Růžičky řešily nedestruktivní měření hloubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev rotačních dílů pro firmy automobilového průmyslu. Většina aplikací optimalizovala lokální ultrazvukové zkoušení (viz. příspěvek v sborníku DEFEKTOSKOPIE 2018). Elektromagnetické metody jsou průkaznější v případech povrchového kalení již zušlechtěných (popuštěný martenzit - sorbit) hřídelí, kdy se nevytváří odraz UZ vln od hranic zrn (perlitu a feritu) základní oceli. Běžné elektromagnetické úlohy pro přístroje typu MAGNATEST, EDDYLINER řeší spolehlivě měření vrstev do cca 5mm tloušťky.

Hloubku zakalení i přes 5mm zušlechtěné klikové hřídele nákladního automobilu TEDOM (LIAZ) věrohodně změří stejnosměrná metoda magnetické skvrny. Tuto metodu využívá přístroj DOMENA B3. Podobně hloubku zakalení přírubového hřídele a náboje kola z automobilu Volkswagen (pro VW Bratislava) také možno měřit metodou magnetické skvrny. Martenzit kalené vrstvy vykazuje nižší hodnotu  $H_r$ , jak sorbit /produkt zušlechtění – popuštění martenzitu)

Bakalářská práce [6] se Zabývá nedestruktivním zkoumáním porózy a tloušťky (desetiny mm) práškovou metalurgií naspěkané bronzové vrstvy (olověné bronz) na ložiskových pánvích ojnic a klikových hřídelí prostřednictvím nedestruktivních metod. Práce poměřuje vhodnost a spolehlivost nedestruktivních dílčích metod. Požadovanou komplexní informaci o vrstvě umožňuje kombinace měření

vířivoproudého a ultrazvukového tloušťkoměru s měřením vodivosti. Proto byl navržen a užitným vzorem chráněn kombinovaný strukturoskop [8]. Práce vznikla na základě potřeby firem odhalovat včas neshodné polotvary a pouzdra s příliš vysokou hodnotou porózy a tím nízkou únosností. V čase nastupující hospodářské krize se uplatňovaly laciné, ale často porézní polotvary na výrobu kluzných ložisek z východních trhů...

Potřeba diagnostiky vystupující porózy tlakových odlitků ze slitin Al pro bezpečnostní díly brzdových systémů (KNORR-BREMSE) nabídla námět práce [7] řešený ve spolupráci s polskou univerzitou Czentochowa, která vyřešila řízené odlévání vzorků s objemově konstantní porózitou (nezbytné pro vytváření matematických modelů k útlumu, vodivosti...).

Naměřené body v grafu 3 lze nejlépe proložit mocninnou křivkou funkce o rovnici s koeficientem korelace  $R = 0,9370$ .

Porezita byla stanovena metalografickou kvantifikací elektronickým odečítáním programem analýzy obrazu NIS-Elements 2'30 a přesným vážením.

Všechny vzorky obsahovaly ve svém objemu v průměru od 0,02 až 1,25 % póru. Kritická mez 0,5 % je spolehlivě detekovatelná.

### **3. Závěr**

Předložené studentské práce řeší témata s užitkem pro průmysl nebo řešitele projektů. Aktuálních námětů je řada, ale nejsou studenti. Řešení formou DČ nebo smluvního výzkumu nabízí omezený časový fond pedagoga. Většina zadání není rozsahem na stavbu projektu s vřejenou podporou (TAČR apod.) – nutno plnit mnoho formalit.

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

### **Acknowledgements**

Project of the Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering with the support of the Institutional Endowment for the Long Term Conceptual Development of Research Institutes, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2019.

## Literatura

- [1] Špáta, Tomáš. Kalibrace měření tloušťky vrstev na vodivých podkladech metodou vířivých proudů. Bakalářská práce, KMT-B-118, 2006.
- [2] Králík, Milan. Provozní změny struktury a fyzikálních vlastností austenitické ventilové oceli. KMT - 116, TU v Liberci, 1999.
- [3] Teršl, Michal. Defektoskopie slitin na bázi FeAl vířivými proudy. KMT – 184, TU v Liberci, 2005.
- [4] Růžička, Ondřej. Nedestruktivní měření h1oubky a tvrdosti povrchově kalených vrstev. KMT-B- 138, TU v Liberci, 2007.
- [5] Bc. Růžička Ondřej. Přípravek na topografii kalených a tvrzených vrstev nedestruktivními metodami. KMT 271, 2011
- [6] Švec Martin. Výzkum porózity soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování. KMT B 141, 2009
- [7] Kovács Ondřej. Diagnostika porezity lehkých slitin vířivými proudy na obrobených plochách. KMT B 183, 2011.
- [8] Skrbek, B., Nosek, V. Combined nondestructive structuroscopy of dispersion mettalic materials. 11<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing, Prague 2014, poster P7.16, ISBN 978-80-214-5019-6.





# **NORMY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ V SLOVENSKÉ A V ČESKÉ REPUBLICE**

## **NON-DESTRUCTIVE TESTING STANDARDS IN CZECH AND SLOVAK REPUBLIC**

**Michal BOHÁČIK\***, **Břetislav SKRBEK\*\***, **Vladimír Nosek\*\***, **Jakub MRÁŽ\*\*\***

Žilinská Univerzita v Žiline\*,

Technická univerzita Liberec\*\*,

TEDOM a.s., Divize motory, Jablonec nad Nisou\*\*\*

bretislav.skrbek@tul.cz

### **Abstrakt:**

*Studentské stáže v rámci projektu Erasmus. Disertace a společné články – potřeba srovnání českých a slovenských norem ve vztahu k EN v oblasti nedestruktivního zkoušení. Přehled platných norem k 1. 9. 2019 v České a Slovenské republice; komentář.*

**Klíčová slova:** *Evropské normy, nedestruktivní zkoušení,*

### **Abstract:**

*Project Erasmus. Thesis and papers – need juxtaposition Czech and Slovak standards in EN relation. Survey valid czech and slovak standards 1. 9. 2019. Commentary.*

**Key words:** *European standards, non-destructive testing.*

### **Úvod**

V rámci studentských stáží (projekt Erasmus) si české a slovenské vysoké školy často vyměňují studenty. Tato pro doktorandy obvykle povinná zahraniční stáž je v této formě s nejmenší jazykovou i finanční překážkou. Tvorba společných prací a publikací se školiteli a vedoucími stáží v oblasti nedestruktivního zkoušení vedla k zamyšlení - diskuzi nad národní interpretací společných evropských norem [1]. Vedla k příspěvku věnovanému EN normám s technikům srozumitelnými třídílnými znaky (šestimístnými číselnými) v České a Slovenské Republice s komentářem. Podklady čerpány z dostupných textů normalizačních institutů obou republik.

**Celý text příspěvku včetně přehledu norem je uveřejněn**

**v časopise NDT Welding Bulletin č. 2-3/2019**

## **Komentář**

K uvedeným 244 normám EN a ISO byly přiřazeny u 89ti standardů shodné třídící znaky. Pro 146 norem tyto znaky shodné nejsou a dokonce u 6ti norem se různí i ve skupině (první dvojčíslí) – obvykle pro testování polymerů (ČNI přiřadil 05 a SNI 64 (plasty)). Jen česká verze EN existuje u 9 norem. Tento seznam norem EN ISO (ČSN, STN) tvoří užitečnou pomůcku pro studenty i odborníky v oblasti NDT a oborů příbuzných [2].

## **Acknowledgements**

Project of the Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering with the support of the Institutional Endowment for the Long Term Conceptual Development of Research Institutes, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2019.

- [1] Skrbek, B. Přehled norem v oblasti nedestruktivního zkoušení. Vydavatelství TU v Liberci, 2011, pracovní pomůcka, ISBN-978-80-7372-757-4.
- [2] Skrbek, B. Technické dodací podmínky výrobku. Vydavatelství TU v Liberci, 2013, pracovní pomůcka, ISBN-978-80-7372-892-2.





## **PROVOZNÍ A LABORATORNÍ ZKOUŠKY PNEUMATICKÝCH POHONŮ OPERATING AND LABORATORY TESTS OF PNEUMATIC DRIVES**

**Vladimír BUKÁČEK\***, **František VLAŠIC\*\***, **Houssam MAHMOUD\*\***,  
**Pavel MAZAL\*\***

\* Poličské strojírný a.s., Polička, Czech Republic

\*\* Vysoké učení technické v Brně, Brno, Czech Republic

Contact e-mail: mazal@fme.vutbr.cz

### **Abstrakt**

*Prezentovaný příspěvek se zabývá analýzou signálu akustické emise a jeho změn v důsledku dlouhotrvajících zkoušek pneumatických válců v zatíženém a nezatíženém stavu. Testované válce byly cyklovány v předem stanovených intervalech, po kterých následovalo měření signálu akustické emise se záznamem standardních parametrů a kontinuálního signálu. Výsledky potvrzují změny ve vývoji signálu, který reflektuje chování válce v provozních podmínkách, zejména změny související s tzv. záběhovou fází a postupným provozním opotřebením. Součástí výsledků je také praktické měření úniků v provozní hale na pracovišti Poličských strojíren využitím nově vyvinutého detektoru úniků.*

**Klíčová slova:** *pneumatický válec, únik, akustická emise, detektor úniků*

### **Abstract**

*Presented paper deals with analysis of acoustic emission signal and its changes as a result of long-term tests of pneumatic cylinders in loaded and unloaded condition. The test cylinders were cycled at predetermined intervals, followed by measurement of acoustic emission signal with recording of standard AE parameters and a continuous signal. The results confirm changes in the development of a signal that reflects behavior of the cylinder under operating conditions, especially changes related to the so-called running-in phase and gradual operational wear. The results also include practical leak measurement in the operating hall at the Poličské strojírný workplace using a newly developed leak detector.*

**Key words:** *pneumatic cylinder, leak, acoustic emission, leak detector*

## 1. Úvod

I když se možná zdá, že jsou v dnešní moderní době hydraulické a pneumatické pohony trochu opomíjeny a jejich vývoj se zastavil, ani zdaleka to není pravda. Obě tyto skupiny pohonů mají svá pro a proti, ale nepochybné je, že v moderním strojírenství hrají stále důležitou roli. Pneumatické pohony využívají energii stlačeného vzduchu, který je nasáván o atmosférickém tlaku kompresorem, kde je následně stlačován na požadovaný tlak. Stlačený vzduch je poté distribuován potrubním rozvodem až k odběrným místům, kde je dále regulován. Pneumatické pohony jsou z velké části používány pro lineární, otočný nebo kyvný pohyb. Pneumatika si i přes vysoké náklady na provoz své místo ve výrobě našla, a to například v potravinářství, kde se hojně využívá a splňuje podmínku čistoty provozu na rozdíl od hydraulických systémů. Dále nalézá uplatnění v oblasti automobilového průmyslu a při manipulaci s materiálem, kde lze využít uchopovací hlavice nebo vakuové přísavky vhodné k uchopení výrobku různých materiálů a tvarů [1].

Nejčastěji používáme pneumatických pohonů v aplikacích, kde očekáváme malé až střední síly s velkou rychlostí a frekvencí opakování pohybů. Při výběru vhodného zdroje energie pro pohony, je kromě znalosti konkrétní aplikace, nutná znalost vlastností stlačeného vzduchu a jednotlivých výhod a nevýhod v porovnání s jinými druhy pohonu [2]. Nevýhodou pneumatických pohonů jsou hlavně vysoké náklady na výrobu stlačeného vzduchu, a proto je snahou v rámci různých projektů nalézt úspory nákladů například nežádoucích úniků stlačeného vzduchu včetně detailní analýzy s vyčíslením úspor po odstranění úniků.

Největším zdrojem ztrát při provozu pneumatických systémů jsou úniky v rozvodu stlačeného vzduchu. Některé jsou lehce zjištělné, jiné hůře. Může jít o miniaturní neslyšitelné úniky v přípojovacích závitech nebo o úniky opotřebeným těsněním pneumatických válců. Je zajímavé, že ani v dnešní době nebývá eliminaci těchto ztrát věnovaná náležitá pozornost [3]. Poličské strojírný a.s. (PoS) vyrábí a dodávají mobilní pneumatické systémy pod zn. MPS – komponenty a systémy pneumatického ovládní dveří u autobusů (IVECO CR a.s., Vysoké Mýto, SOR Libchavy s.r.o., a další) a jiných hromadných dopravních prostředků, u kterých se mohou v důsledku provozu a opotřebením komponent objevit nežádoucí úniky. Navzdory moderním technologiím je prakticky nemožné vyrobit systém, který by byl zaručeně těsný. Při důkladném seřízení lze ztráty snížit pod 10%.

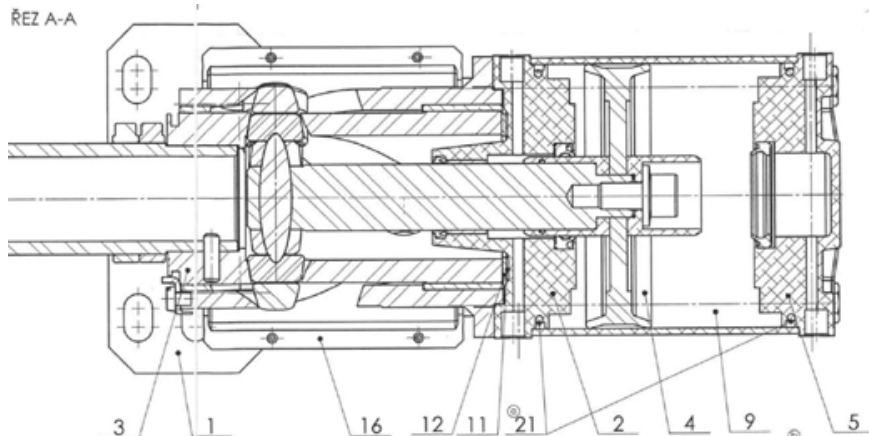
Zkoušky těsnosti jsou většinou jedním z kroků kontroly kvality. Jde o jednorázový nedestruktivní test. Možností, jak odhalit místo, kudy stlačený vzduch uniká je celá řada. Kromě hledání pomocí sluchu nebo aplikaci mýdlové vody, jsou nejspolehlivější metodou ultrazvukové detektory [4]. Ty pracují na principu detekce ultrazvuku - neslyšitelného lidským uchem a vznikajícího při průchodu plynu či kapaliny malým otvorem. V takovém místě se mění běžné laminární proudění na turbulentní a to

generuje ultrazvuk. Ultrazvukové vlny indikuje většinou přístroj pomocí LCD displeje, LED diod nebo převodem ultrazvuku na slyšitelný zvuk ve sluchátkách. Čím blíže je uživatel k místu úniku, tím silnější je indikovaný signál [5].

Přínosem a cílem projektu je vytvoření mobilní diagnostické jednotky pro detekci úniků vzduchu ze systémů s pneumatickými prvky používanými v hromadné dopravě a průmyslu. Eliminace a příp. kvantifikace úniků v těchto pneumatických systémech je velmi žádoucí, poněvadž úniky vzduchu, pokud nejsou masivní, jsou v provozu obtížně identifikovatelné a vznikají nejen značné energetické ztráty, ale také provozní rizika.

## 2. Metodika měření

V první části byla analyzována souvislost vlivu počtu pracovních cyklů autobusového válce na jeho opotřebení, které bylo hodnoceno změnou charakteru signálu akustické emise (AE). Pro tento účel byl vybrán typ válce OD 100 LT/145 AW s lineárně-rotačním pohybem, který byl ovládán pomocí elektro-magnetického rozvaděče vzduchu a magnetického snímače pro bezkontaktní snímání polohy při tlaku cca 6 bar. Zkušební úhel otočení pístu byl nastaven na 145° a zdvih 13 mm. Řízení zkušební stanice je realizováno pomocí PLC. Pro základní orientaci pneumatických částí válce je na obr. 1 zobrazena část výkresu.

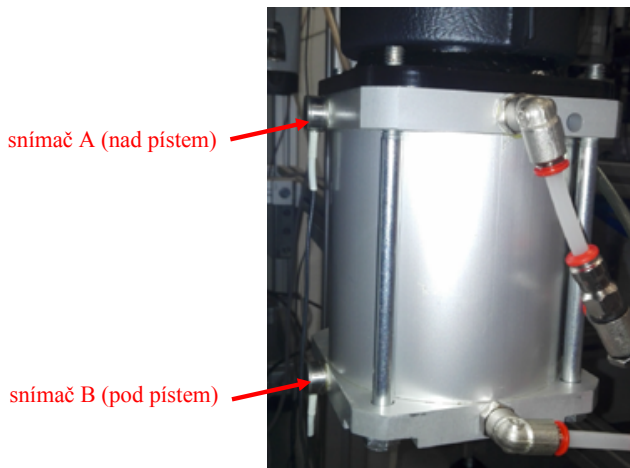


**Obr. 1** Část výkresové dokumentace autobusového válce  
1 – konzola, 3 – unašeč, 4 – píst, 9 – těleso válce

**Fig. 1** Part of drawing of the bus cylinder  
1 - bracket, 3 - carrier, 4 - piston, 9 - cylinder body

Na tělesu válce byly upevněny snímače AE (Dakel), které monitorovaly děje v prostoru před pístem a za pístem. Cílem měření bylo v závislosti na počtu cyklů zjistit, zda dochází ke změně signálu a příp. rozvoji opotřebení, v první fázi bez zatížení. Poté

bylo připojeno rameno přes objímku pístnice, které mělo stejně jako v provozu autobusových dveří gumový doraz, který simuloval kontakt mezi rámem dveří a ramenem. Na konci ramene bylo potom umístěno 10 kg závaží jako náhrada za zátěž dveří.



**Obr. 2** Umístění snímačů AE na tělese válce  
**Fig. 2** Position of AE sensors on the cylinder body

Druhá část příspěvku se týkala praktického ověření funkce laboratorního vzorku bezkontaktního ultrazvukového detektoru AE při kontrole těsnosti vzduchových rozvodů v prostorách PoS. Konkrétně se jednalo o dílnu Nástrojárna, která vznikla v nově rekonstruovaných prostorách sloučením několika menších dílen. Objekt byl v rámci stavebních úprav vybaven novými vzduchovými rozvody včetně kompresoru, jednotky úpravy vzduchu a vzdušníku. Část vzduchových rozvodů je např. na obr. 3. Prvně bylo měření úniků provedeno běžně dostupnou měřicí technikou a poté bylo provedeno měření laboratorním vzorkem detektoru AE.

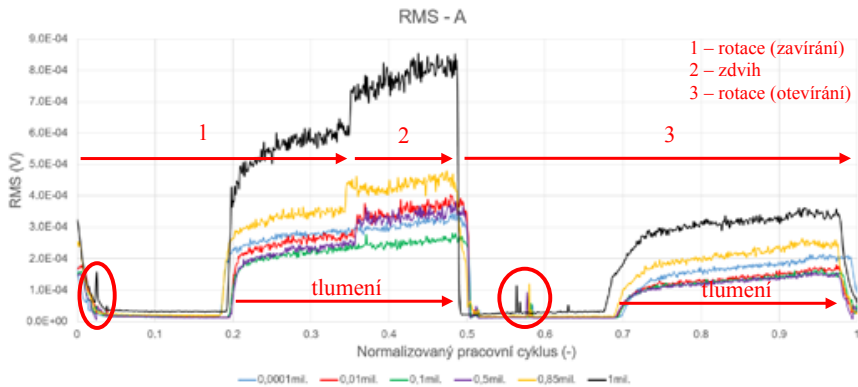


*Obr. 3 Vzduchové rozvody v nově zrekonstruované dílně*

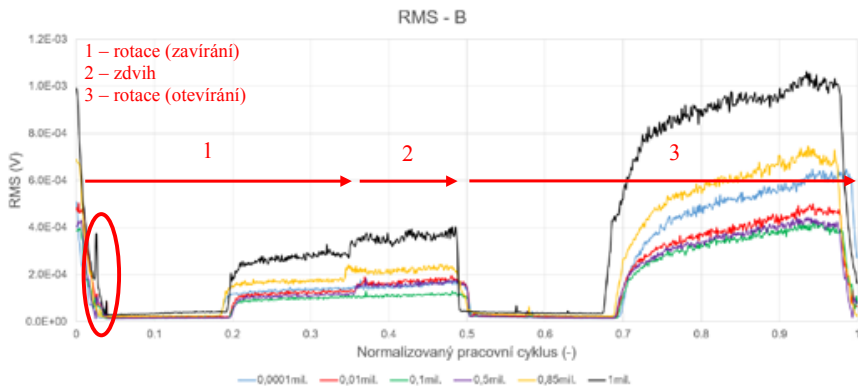
*Fig. 3 Air distribution in a newly renovated workshop*

### 3. Výsledky

V první fázi cyklování válce bez zátěže bylo měření signálu AE rozděleno na předem stanovené intervaly, ve kterých po cca 1 min. byly ukládány parametry spojitě AE (RMS, obálka signálu, energie signálu) vč. kontinuálně navzorkovaného záznamu na 2 MHz. Intervaly byly po 100, 1000, 5000, 10.000, 50.000, 100.000, 250.000, 500.000, 850.000 a 1000.000 cyklech. Pro účely srovnání vývoje změn parametrů signálu a frekvenčního spektra byly jednotlivé úseky přesně rozděleny na jeden pracovní cyklus, který byl vymezen digitálním vstupem signálu z bezkontaktních magnetických snímačů polohy při přepouštění vzduchu nad píst a pod píst. Následně tyto úseky byly znormovány a zobrazeny do grafu na obr. 4. Je zřejmé, že do cca 10.000 cyklů se RMS moc neměnilo (záběh), potom do cca 250.000 cyklů došlo k poklesu a od 500.000 cyklů dochází k nárůstu, který vyvrcholil nejvyšší hodnotou při 1000.000 cyklů. Silnější hodnoty signálu pocházejí vždy z fáze tlumení v závislosti na poloze daného snímače. Při rotaci během zavírání (dveří) je také vidět zvýšená hladina signálu, která odpovídá době na zdvih pístu o 13 mm. Jsou zde také zřetelně místa, kde se časem objevily nové prvky v charakteristice signálu (červené oblasti), které by mohly reflektovat známky opotřebení. V další fázi měření byl válec osazen reálným ramenem, které bylo na konci zatíženo 10 kg. Výsledky z tohoto měření budou zahrnuty v příštím článku.



a)

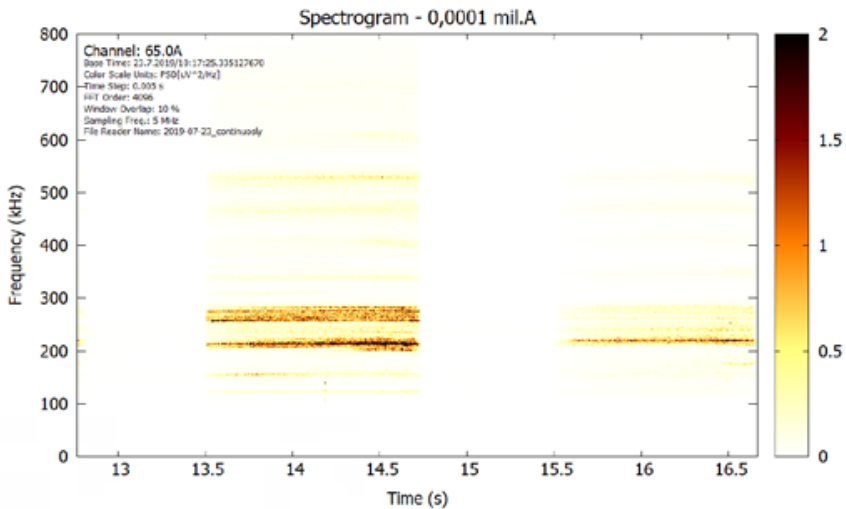


b)

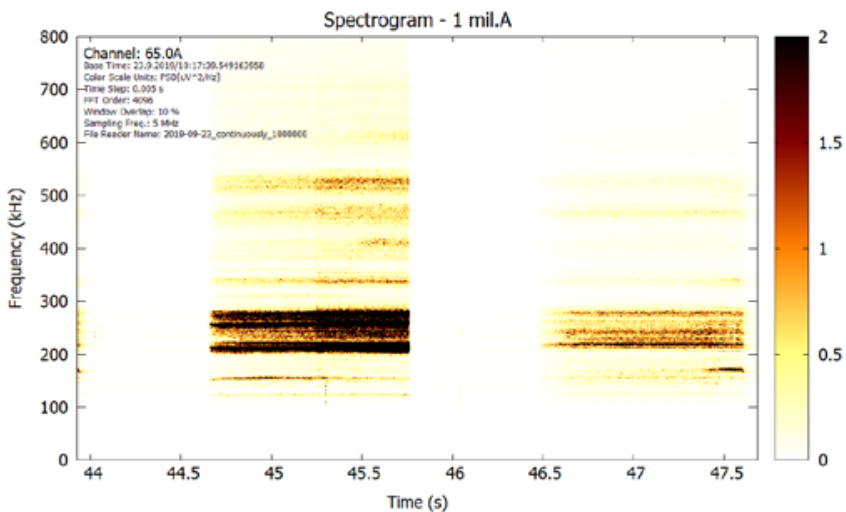
**Obr. 4** Odezva RMS na jeden pracovní cyklus na snímači A (a), snímači B (b)

**Fig. 4** RMS response to one working cycle on sensor A (a), sensor B (b)

Společně se záznamem standardních parametrů AE byl také uložen kontinuálně navzorkovaný signál, který sloužil zejména k vyhodnocení a následnému zobrazení vývoje frekvenčního spektra v čase, resp. v rámci jednoho pracovního cyklu. Barevná škála zobrazuje intenzitu amplitudy spektra. Obdobně jako na obr. 4 jsou i zde výrazné oblasti, jejichž dominantní frekvence se v čase mění, resp. zesilují. Můžeme si např. všimnout i nových složek spektra, které nebyly na začátku viditelné. Nejvíce je to znát na signálu ze snímače B (dolní pod písmem), kde jsou zesíleny složky spektra zejména na vyšších frekvencích (viz obr. 6). Pro hlubší analýzu bude však zapotřebí se zaměřit na detailní rozbor celého pracovního cyklu po kratších částech, kde by mohly být skryty složky spektra odlišné od původního stavu.



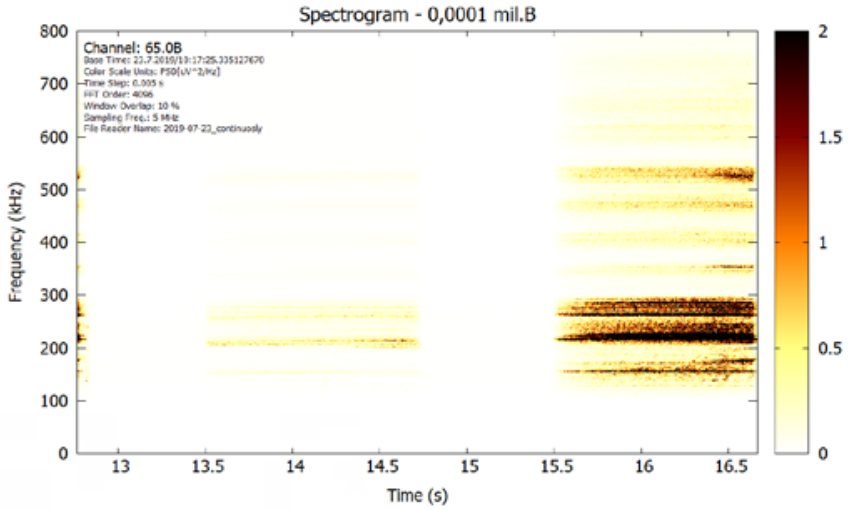
a)



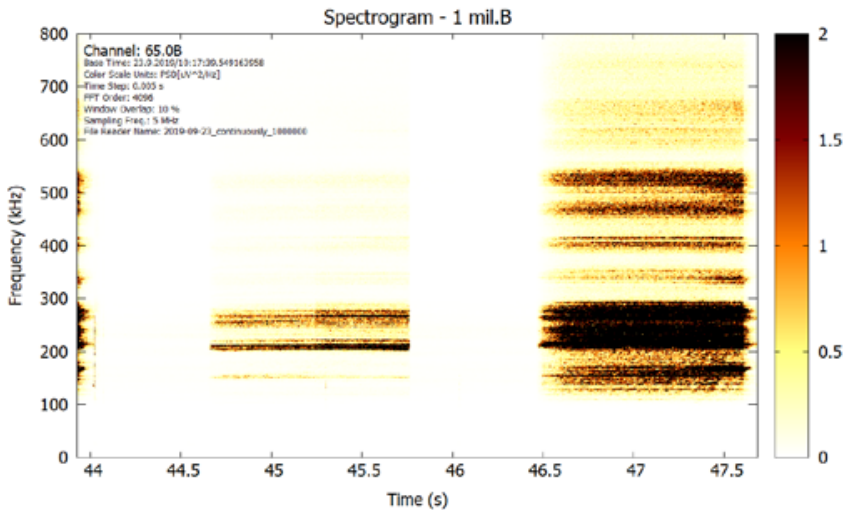
b)

**Obr. 5** Vývoj frekvenčního spektra v rámci jednoho pracovního cyklu na snímači A po 100 cyklech (a) a po 1 milionu cyklech (b)

**Fig. 5** Development of frequency spectrum to working cycle on sensor A after 100 cycles (a) and after 1 million cycles (b)



a)



b)

**Obř. 6** Vývoj frekvenčního spektra v rámci jednoho pracovního cyklu na snímači B po 100 cyklech (a) a po 1 milionu cyklech (b)

**Fig. 6** Development of frequency spectrum to working cycle on sensor B after 100 cycles (a) and after 1 million cycles (b)



Druhá část výsledků se týká ověření těsnosti vzduchových rozvodů provedené v dílně PoS. Během této analýzy byla prověřena celá potrubní soustava včetně koncových prvků pro připojení vzduchotechniky jednotlivých strojů. Koncovými prvky byly buď samotné uzavírací ventily, nebo uzavírací ventily v kombinaci s jednotkou úpravy vzduchu (JUV). Tlak ve vzdušníku byl zvýšen z běžného pracovního tlaku na 9,5 baru s předpokladem, že bude detekována i taková netěsnost, která by se při pracovním tlaku kolem 6 bar nemusela projevit.

Na spojích potrubí nebyl nalezen žádný únik. Rovněž nebyl zaznamenán únik v kompresorovně. Únik byl zaznamenán ve dvou případech v zámečnické dílně – vždy mezi prvky JUV u přívodů k pracovním stolům, 1x v malé obrobně, 1x v hlavní obrobně a 2x v brusírně. I v těchto případech se jednalo o úniky v oblasti JUV. Přesná místa úniku nebyla vyhodnocována, evidentní byla pouze v případech, kdy únik byl zaznamatelný smyslovými vjemy. Místa úniků byla zaznamenána do schematického výkresu vzduchových rozvodů. Následně jsme přistoupili k detekci úniků na těchto rozvodech s pomocí laboratorního vzorku bezkontaktního ultrazvukového detektoru AE. Praktické použití tohoto detektoru je na obr. 7.



**Obr. 7** Měření úniků vzduchových rozvodů pomocí bezkontaktního detektoru AE  
**Fig. 7** Measurement of air distribution leaks using non-contact AE detector

Všechny úniky zaznamenané při předchozím měření se potvrdily. Velikost úniků jsme rozdělili do 3 skupin: a) masivní únik, b) středně velký únik, c) lehký únik na hranici detekovatelnosti. U jednotlivých úniků bylo vesměs stanoveno přesné místo úniku díky směrovému nastavení a citlivosti laboratorního vzorku. Byly zaznamenány 2 úniky navíc proti prvnímu měření. Jeden z nich byl identifikován na šroubení manometru u JUV

horizontální frézky a druhý v blízkosti nástrojařské frézky, ten byl později upřesněn jako únik ze systému vlastního stroje.

Všechny zaznamenané úniky byly zaznamenány do schematického výkresu a podrobně vyhodnoceny. Úniky, které byly zaznamenány nově (proti měření běžným detektorem) byly oba na hranici detekovatelnosti. Skutečnost, že nebyly zaznamenány již při prvním měření, může být kromě rozdílů v citlivosti detektorů dána i pečlivostí měření, případně se tyto úniky mohly projevit dodatečně, protože mezi oběma měřeními byl časový odstup několika týdnů.

#### **4. Závěr**

Prvním cílem tohoto příspěvku bylo ověřit pomocí měření signálu AE, zda dochází v důsledku cyklování pneumatického válce (pro ovládání autobusových dveří) k jeho provoznímu poškození. Jako nevhodnější kritérium pro posouzení jeho stavu byl zvolen běžně užívaný parametr spojitě AE kvadratická hodnota signálu – RMS, která dle výsledků na obr. 4 reflektuje chování válce v provozních podmínkách, zejména změny související s tzv. záběhovou fází a postupným provozním opotřebením. Je však zapotřebí doplnit toto měření ještě o výsledky se zatížením. Vyhodnocení frekvenčního spektra sice prokázalo změny zejména v amplitudě spektra (barevné škály) na dominantních frekvencích, nicméně pro praktické využití za účelem hodnocení stavu se zdá být jako méně účinné. Bude zřejmě zapotřebí se zaměřit detailně na jednotlivé pracovní fáze jednoho cyklu a identifikovat změny v menším časovém úseku.

Druhým cílem bylo ověřit těsnost vzduchových rozvodů využitím nově vyvíjeného detektoru AE ve výrobní hale PoS. Na spojích potrubí nebyl nalezen žádný únik. Únik byl zaznamenan ve dvou případech v zámečnické dílně – vždy mezi prvky JUV u přívodů k pracovním stolům, 1x v malé obrobně, 1x v hlavní obrobně a 2x v brusárně. Zajímavým zjištěním byla skutečnost, že jsme zjistili změnu frekvence v okolí stroje pro elektrojiskrové obrábění. Jelikož se nepodařilo identifikovat žádné místo úniku, byl jev vyhodnocen jako vliv samotného stroje. Vyplývá z toho omezení pro použití ultrazvukového detektoru pro měření v místech, která mohou být rušena zařízeními emitujícími parazitní frekvence. Výsledky měření byly v PoS využity ke stanovení nápravných opatření a vady byly i s využitím detektoru opraveny.

Detekce úniků vzduchu ze vzduchových rozvodů ve výrobní hale prokázala, že laboratorní vzorek ultrazvukového detektoru AE je schopen identifikovat úniky minimálně srovnatelně s běžně využívanými zařízeními. Únik vzduchu byl patrný jak změnou frekvence zobrazovanou na displeji přístroje, tak i ve sluchátkách. Podle intenzity změny slyšitelné i viditelné frekvence lze poměrně spolehlivě usuzovat i na intenzitu úniku. Díky směrové trubici detektoru jsme určili velmi přesně místo úniku

v úrovni konkrétního spoje. Výsledky měření budou využity pro další zdokonalování ultrazvukového detektoru.

## 5. Poděkování

Prezentované výsledky z tohoto příspěvku souvisí s řešením projektu č. TH03010422 "Mobilní aparatura pro detekci vad pneumatických systémů" podporovaného Technologickou agenturou ČR.

## Literatura

- [1] Hydraulické a pneumatické pohony ve strojírenství. Fluidní technika, *MM Průmyslové spectrum*, (2014), 7, s. 86, [online], [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hydraulicke-apneumaticke-pohony-ve-strojirenstvi.html>.
- [2] STEFANOVIĆ, S., Pneumatic - Logic Synthesis of Bus Door from Aspect of Automation, (JPMNT) *Journal of Process Management – New Technologies, International*, Vol. 3, No. 1, 2015.
- [3] Efektivní provoz pneumatických systémů. Trendy CAD/CAM/CAE, *MM Průmyslové spectrum*, (2009), 6, s. 44, [online], [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-provoz-pneumatickych-systemu.html>.
- [4] WOROŇ, D. *Zkušební zařízení pro detekci netěsností*: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2017, 52 s. Vedoucí práce: Dvořák, L.
- [5] Detekce a měření ztrát stlačeného vzduchu, AIR Consult CZ s.r.o., [online], [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.airconsult.cz/clanky/blog/detekce-a-mereni-ztrat-stlaceneho-vzduchu>.





# MAGICKÝ SEDMIÚHELNÍK ÚNAVY ANEB ÚNAVA JE BIMODÁLNÍ PROCES

## MAGICAL HEPTAGON OF FATIGUE OR FATIGUE AS A BIMODAL PROCESS

Jaroslav FIALA\*, Pavel MAZAL\*\*, Vendula SKŘIVÁNKOVÁ\*\*,  
Housam MOHAMMAD \*\*

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

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

### Abstrakt

*Během (a v důsledku) cyklického mechanického namáhání dochází v mikrostruktuře zatěžovaného tělesa k určitým změnám. Tyto procesy ovlivňují odezvu materiálu na různé vnější podněty natolik, že to v některých případech lze využít k odhadu jeho zbytkové únavové životnosti. V této souvislosti porovnáváme měření difrakce rentgenového záření, elektrochemického potenciálu, tepelné odezvy, mechanických vlastností, koercitivní síly, akustické emise a útlumu ultrazvuku.*

**Klíčová slova:** *únava, difrakce rentgenového záření, elektrochemický potenciál, tepelná odezva, mechanické vlastnosti, koercitivní síla, akustická emise, útlum ultrazvuku*

### Abstract

*Specific changes develop in the microstructure of a body in the course of (and due to) its cyclic mechanical loading. These processes affect the material's response to various external effects to such a large extent that this may be in some cases used for estimation of its residual service life. In this context we compare the measurement of x-ray diffraction, electrode potential, thermal response, mechanical properties, coercive force, acoustic emission and ultrasound attenuation.*

**Keywords:** *fatigue, x-ray diffraction, electrode potential, thermal response, mechanical properties, coercive force, acoustic emission, ultrasound attenuation*

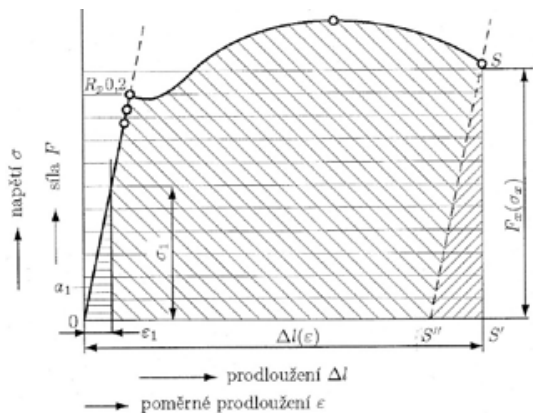
## 1. Úvod

Únava materiálu – totiž skutečnost, že kmitavému (cyklickému) zatěžování odolává mnohem hůře než statickému zatížení nebo zatěžování monotónnímu, které se v laboratorních podmínkách používá při obvyklých tahových zkouškách (tak například ocel zpravidla vydrží při kmitavém zatěžování sotva 50% napětí, jež snese při zatěžování monotónním) – je příčinou 90 % všech havárií strojních dílců a konstrukcí. Navíc, únava je zálužná – po většinu doby provozní exploatace příslušného tělesa se jeho mechanické vlastnosti nemění a nic nenasvědčuje tomu, že co nevidět praskne.

## 2. Hystereze

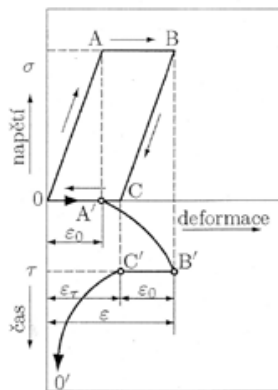
Příčinou únavy materiálu je jeho anelastická. Jestliže by zatěžování tělesa bylo (ideálně) pružné, energie vložená do něj deformací pod mezi kluzu  $R_p0,2$  (dané plochou trojúhelníka  $SS'S''$  v pravé části obr. 1) by se po jeho odlehčení zase spotřebovala; elastickou deformací by

se tudíž za těchto okolností do zatěžovaného tělesa žádná energie uložit – aby mu pak následně ublížila – nemohla.



**Obr. 1.** Stanovení přetvárné práce z pracovního diagramu zkoušky v tahu.

**Fig. 1.** Determination of strain work from the tensile stress diagram.



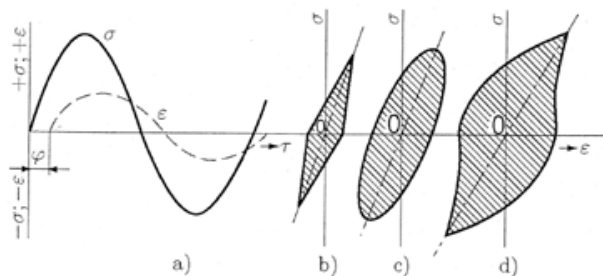
**Obr. 2.** Jev dopružování.

**Fig. 2.** The phenomenon of elastic recovery.

Skutečná deformace reálných těles zatěžovaných pod mezi kluzu však není ideálně elastická, ale anelastická (viskoelastická). Nenastává totiž okamžitě po zatížení tělesa, ale s určitým časovým zpožděním. A to způsobuje, že po odlehčení (anelasticky deformovaného) tělesa v něm určitá energie zůstane. Při každém cyklu proměnného zatěžování tělesa se do něj ukládá stále nová a nová energie a jejím hromaděním roste potenciál, který se pak využije na vykonání práce spojené s únavovým poškozením a posléze s lomem cyklicky namáhaného tělesa. Princip anelastických změn při pružném namáhání reálné pevné látky, kterým se říká též dopružování, znázorňuje obr. 2. Přímka OA představuje zatížení  $\sigma$ , při kterém vzniká okamžitá pružná deformace

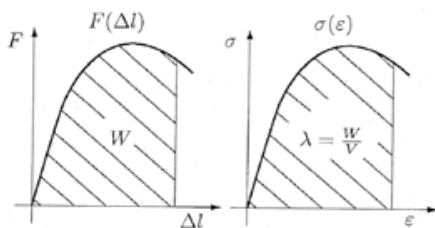
$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E} ,$$

kde E je modul pružnosti dané pevné látky v tahu. Úsečka AB odpovídá působení kontaktního zatížení za dobu  $\tau$ , během níž se uskutečňuje časově závislá deformace  $\varepsilon$ . V bodě B po uplynutí času  $\tau$  nastává odlehčení na  $\sigma = 0$ , přičemž deformace klesne o okamžitou hodnotu  $\varepsilon_0$ . V bodě C je těleso úplně odlehčené, ale má přitom ještě zbytkovou deformaci  $\varepsilon_r$ . Tato část celkové pružné deformace pak po odlehčení ubývá s postupně se zmenšující rychlostí. V důsledku dopružování (anelasticity) bude deformace  $\varepsilon$  při opakovaném namáhání tělesa opožděna za přivedeným napětím  $\sigma$  o fázový posuv  $\varphi$  (obr. 3). V průběhu jedné periody namáhání vznikne v souřadnicích  $\sigma - \varepsilon$  tzv. hysterezní smyčka, jejíž plocha  $\lambda$  je úměrná energii vložené do pevné látky během jednoho zatěžovacího cyklu (obr. 4).



**Obr. 3.** Fázový posuv  $\varphi$  mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\varepsilon$  (a) a charakteristické tvary hysteretních smyček při rostoucí amplitudě cyklického zatěžování (b), (c) a (d); jako  $\tau$  je označen čas.

**Fig. 3.** Phase shift  $\varphi$  between stress  $\sigma$  and strain  $\varepsilon$  (a) and characteristic forms of hysteresis loops when amplitude of cyclic loading increases (b), (c) and (d);  $\tau$  stands for time.



**Obr. 4.** Pracovní diagram „zatižení-protažení“, vyjádřený v hodnotách tahové síly  $F$  a prodloužení  $\Delta l$  (a), resp. v hodnotách smluvního napětí  $\sigma$  a relativního prodloužení  $\varepsilon$  (b).

$W$  = přetvárná práce tahové síly  $F$ ;  $\lambda = W/V$  = hustota přetvárné práce v jednotce objemu  $V$ .

**Fig. 4.** Stress-strain diagram expressed in terms of tensile force  $F$  and elongation  $\Delta l$  (a), or engineering stress  $\sigma$  and conventional linear strain  $\varepsilon$  (b).  $W$  = strain work of the tensile force  $F$ ;  $\lambda = W/V$  = strain work density in a unit of volume  $V$ .

### 3. Mechanismus

Během cyklického zatěžování materiálu dochází k rytmickým změnám orientačního stavu jeho mozaikové struktury. Hnací silou přechodu z orientovaného stavu (když jsou mozaikové bloky velké) do stavu dezorientovaného (když jsou mozaikové bloky malé) je energie, která se v hrubnocích mozaikových blocích hromadí v důsledku parakrystalických distorzí (viz Dodatek A), vznikajících při růstu krystalitů (mozaikových bloků). Co této hnací síle brání hrubnoucí mozaikovou strukturu peptizovat (dezintegrovat) a tím mozaikové bloky dezorientovat, je energie nezbytná pro vznik nadkritické zárodečné trhliny. Čím menší jsou mozaikové bloky, tím více je překážek (hranic mezi mozaikovými bloky), které musí zvětšující se trhlina překonat, než se její velikost stane nadkritická. Teprve tehdy, když se cyklickým zatěžováním nahromadí ve struktuře deformační energie (dislokací) dost velká na to, aby (vlivem tepelných fluktuací) byla tato aktivací bariéra překonána (což bude tím snazší, čím budou bloky větší), dojde ke spontánní dezintegraci hrubozrné (vysoce orientované) mozaikové struktury a jejímu přechodu do jemnozrného (dezorientovaného) stavu. Hnací silou přechodu z dezorientovaného stavu (když jsou mozaikové bloky malé) do stavu orientovaného (když jsou mozaikové bloky velké) je povrchová energie (viz Dodatek B), která je nepřímo úměrná průměrné velikosti mozaikových bloků. Co této hnací síle brání jemnozrnou mozaikovou strukturu koagulovat (srůstáním bloků, z nichž větší do sebe

procesem, který se nazývá Ostwaldovo stárnutí, inkorporuje blok menší je energie nezbytná pro zorientování spojovaných bloků (aby měly stejnou orientaci). Čím větší jsou mozaikové bloky, tím větší je jejich průměrná dezorientace a tím i práce nezbytná pro sladění orientace. Teprve tehdy, když se cyklickým zatěžováním nahromadí deformační energie (dislokací) dost velká na to, aby (vlivem tepelných fluktuací) byla tato aktivační bariéra překonána (což bude tím snazší, čím budou bloky menší), dojde ke spontánnímu hrubnutí (rozorientované) mozaikové struktury a jejímú přechodu do hrubozrnného (orientovaného) stavu (s výraznou přednostní orientací).

Strukturu materiálu popisujeme v této souvislosti (lineární) velikostí mozaikového bloku  $x$  a bez újmy obecnosti předpokládáme, že všechny mozaikové bloky jsou stejně velké. Počet

bloků v objemu daného tělesa (mozaikového agregátu)  $\approx \frac{1}{x^3}$ . Plošný obsah mezipovrchu bloků

v daném tělese a tedy i mezipovrchová energie agregátu  $\approx \frac{1}{x^3} \cdot x^2 = \frac{1}{x}$ . Objemová energie

parakrystalické distorze (jednoho) mozaikového bloku  $\approx x^4$  [1–3]. Objemová energie

parakrystalické distorze tělesa (agregátu mozaikových bloků)  $\approx \frac{x^4}{x^3} = x$ . Celková potenciální

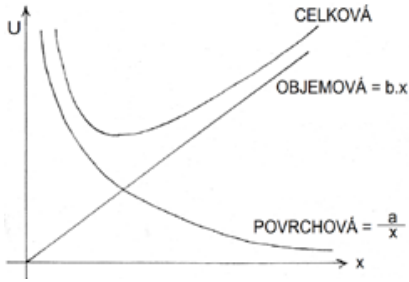
energie tělesa (agregátu mozaikových bloků)  $U = (\text{energie povrchová} + \text{objemová energie parakrystalických distorzí})$  závisí na velikosti bloků  $U = U(x)$  a jest

$$U(x) = \frac{a}{x} + b \cdot x$$

(obr. 5). Z tvaru této závislosti vyplývá, že těleso může při energii  $U_0$  (dané jednak tepelnou energií [úměrnou teplotě  $T$ ], jednak energií plastické deformace [hlavně dislokací], postupně vkládané do tělesa při každém zatěžovacím cyklu) existovat ve dvou různých strukturních stavech: jemnozrnném, s mozaikovými bloky o velikosti  $x_J$ , nebo hrubozrnném, s mozaikovými bloky o velikosti  $x_H$  – viz obr. 6.

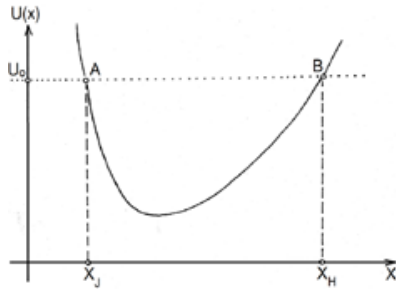
Pro přechod mezi těmito stavy musíme tělesu dodat aktivační energii  $U_A$  (obr. 7). Ta se spotřebuje při přechodu jemnozrnné struktury na hrubozrnnou podél potenciálového profilu reakční trajektorie  $A \rightleftharpoons$  na reorientaci srůstajících mozaikových bloků, při přechodu hrubozrnné struktury na jemnozrnnou pak podél potenciálového profilu reakční trajektorie  $B \rightleftharpoons$  na nukleaci zárodečných trhlin dělicích se mozaikových bloků. Se vzrůstajícím počtem přechodů mezi jemnozrnným a hrubozrnným stavem struktury potom roste pravděpodobnost, že dojde ke vzniku nadkritické necelistvosti a následnému spontánnímu růstu takto vzniklé únavové trhliny. (Během cyklického zatěžování se tedy nehromadí poškození struktury, jak se často uvádí, ale zvětšuje se pravděpodobnost, že k tomu poškození dojde.) Protože s velikostí mozaikových bloků aktivační energie přechodu jemnozrnné struktury na strukturu hrubozrnnou roste a aktivační energie přechodu hrubozrnné struktury na strukturu jemnozrnnou klesá (obr. 8), nejsou přechody mezi jemnozrnným a hrubozrnným strukturním stavem cyklicky zatěžovaného tělesa plovlné (spojité), ale skokové (diskretní): orientovaný a disorientovaný stav mozaikové struktury cyklicky zatěžovaného materiálu jsou (meta)stabilní a zřetelně oddělené.





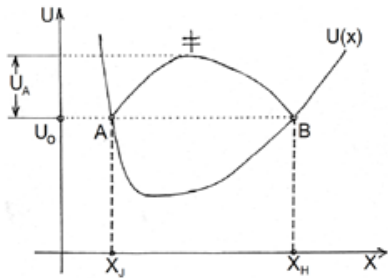
**Obr. 5.** Potenciální energie  $U = U(x)$  tělesa složeného ze stejných bloků o velikosti  $x$ .

**Fig. 5.** Potential energy  $U = U(x)$  of a body composed of equal blocks of size  $x$ .



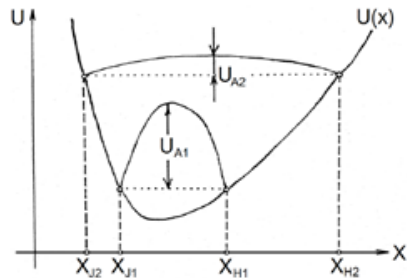
**Obr. 6.** Při dané energii  $U_0$  může být struktura tělesa buď jemnozrná (stav A o velikosti mozaikových bloků  $x_J$ ) nebo hrubozrná (stav B o velikosti mozaikových bloků  $x_H$ ).

**Fig. 6.** At a given energy  $U_0$ , the body may exist either in a fine-grained state A – with mosaic blocks of size  $x_J$  – or in a coarse-grained state B – with mosaic blocks of size  $x_H$ .



**Obr. 7.** Přechod struktury z jemnozrného stavu  $A(x_J, U_0)$  při velikosti mozaikových bloků  $x_J$  do hrubozrného stavu  $B(x_H, U_0)$ , který má stejnou energii  $U_0$  jako stav A a velikost mozaikových bloků  $x_H$  resp. naopak se děje přes aktivovaný komplex  $\ddagger$  podél potenciálového profilu  $A \rightarrow \ddagger \rightarrow B$  resp.  $B \rightarrow \ddagger \rightarrow A$  s vynaložením aktivační energie  $U_A$ .

**Fig. 7.** Transition of the structure from a fine-grained state  $A(x_J, U_0)$  with the mosaic blocks of size  $x_J$  to a coarse-grained state  $B(x_H, U_0)$  with the same energy  $U_0$  as the state A and the mosaic blocks of size  $x_H$ , or the other way round, comes about through an activated complex  $\ddagger$  along potential profile of the reaction trajectory  $A \rightarrow \ddagger \rightarrow B$  or  $B \rightarrow \ddagger \rightarrow A$  on exerting an activation energy of  $U_A$ .



**Obr. 8.** S velikostí mozaikových bloků aktivační energie přechodu jemnozrné struktury na hrubozrnou roste a aktivační energie přechodu hrubozrné struktury na jemnozrnou klesá.

**Fig. 8.** On increasing the size of mosaic blocks, the activation energy of the transition from a fine-grained structure to the coarse-grained structure grows while the activation energy of the transition from the coarse-grained structure to the fine-grained structure decreases.

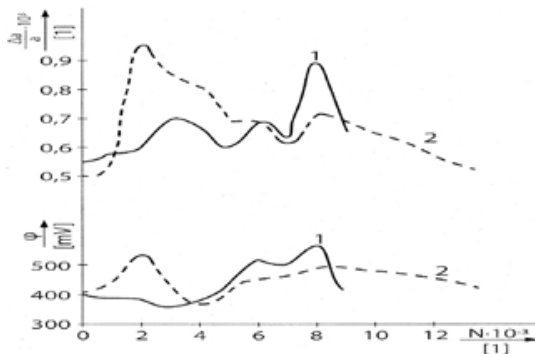
Přestože se cyklické zatěžování děje pod mezí kluzu, hrají při únavovém poškozování klíčovou úlohu dislokace a strukturalizace, specifická nerovnoměrnost jejich rozložení uvnitř pevné látky. Jestliže nerovnoměrnost rozložení deformace (a její koncentrace v jádrech dislokací) je příčinou nízké odolnosti pevné látky vůči plastické deformaci, pak – obdobně – nerovnoměrnost rozložení dislokací a jejich koncentrace v rozhraních mozaikových bloků je příčinou toho, že napětí,

při kterém dochází k únavovému lomu – nejnebezpečnější formě porušení celistvosti pevné látky – je mnohem menší než mez kluzu, tedy napětí, při kterém se těleso z té látky začne plasticky deformovat.

## 4. Diagnostika

### 4.1. Rtg difrakce

Rentgenová difrakce dokazuje, že mozaikové bloky (difrakčně koherentní oblasti, „zrna“) niklové konstrukční oceli 20H2M vhodné pro práci za nízkých teplot (0,2C; 2Ni; Mo/650°C/R<sub>p</sub> = 500 MPa) se během (a v důsledku) jejího cyklického zatěžování rytmicky zvětšují a zmenšují (obr. 9) [4–9].



**Obr. 9.** Vliv cyklického mechanického zatěžování na strukturu oceli 20N2M (charakterizovanou hodnotou fluktuace mřížkového parametru  $\Delta a/a$ ) a na elektrodový potenciál  $\varphi$  ve vzduchu (1) a v korozně agresivním prostředí (2). Na horizontální souřadnicové ose se uvádí počet cyklů, na vertikální souřadnicové ose pak veličina  $\Delta a/a$  (horní část grafu) a elektrodový potenciál  $\varphi$  na dolní části grafu. Hodnota  $\Delta a/a$  je měrou radiálního rozšíření difrakční linie, která je nepřímo úměrná velikosti (difrakčně koherentních) mozaikových bloků: čím je  $\Delta a/a$  větší, tím jsou mozaikové bloky menší.

*Fig. 9. The effect of cyclic mechanical loading on the structure of steel 20N2M (characterized by the value of fluctuation of the lattice spacing  $\Delta a/a$ ) and on electrode potential  $\varphi$  in air (1) and in a corrosive medium (2).  $\Delta a/a$  (top) and electrode potential  $\varphi$  (bottom) are drawn versus number of loading cycles  $N$ . The value of  $\Delta a/a$  is a measure of the radial broadening of the diffraction line, which is indirectly proportional to the size of the (diffraction coherent) mosaic blocks: the greater the value of  $\Delta a/a$ , the smaller are the mosaic blocks.*

### 4.2. Elektrodový potenciál

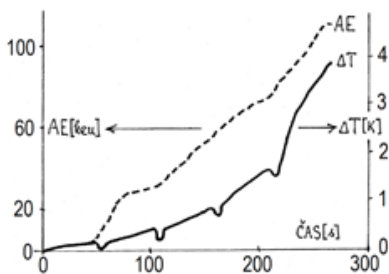
Standardní elektrodový potenciál  $\varphi$  niklové konstrukční oceli 20H2M se během (a v důsledku) jejího cyklického zatěžování rytmicky zvyšuje a snižuje, a to synchronně s velikostí jejích mozaikových bloků (obr. 9). Což odpovídá tomu, že elektrodový potenciál  $\varphi$  je úměrný molární volné entalpii materiálu  $\mu$ , která je podle Herringova vzorce

$$\mu = \mu_0 + \frac{\text{konst}}{x}$$

[4] nepřímo úměrná velikosti  $x$  mozaikových bloků: čím jsou bloky menší, tím je elektrodový potenciál větší.

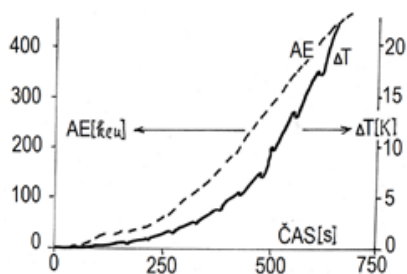
### 4.3. Termoemise

Teplota zkušebních těles ze dvou ocelí, C40 (uhlíková ocel: 0,4C) a AISI304 (austenitická chromniklová ocel: 19Cr, 9Ni, 2Mn,1Si) se během cyklického zatěžování postupně zvyšuje. Čas od času je však tento růst přerušován krátkodobými, nevelkými, nicméně dobře zřetelnými poklesy, které tvoří rytmickou sekvenci (obr. 10 a 11) [10]. Globální trend rostoucí teploty zkušebního tělesa půjde především na vrub disipace kinetické energie mechanického zatěžování na teplo. Vedle toho však tato energie aktivuje také povlovný růst mozaikových bloků; což je děj exotermní, jenž ke zvyšování teploty zkušebního tělesa přispívá – byť menším dílem – také. Když se pak zvětšující se mosaikové bloky nahromaděnou energii parakrystalické distorze rozpadnou, spotřebuje se naráz velké množství energie na náhlý vzrůst vnitřního povrchu agregátů: vznikne úzký, ne moc hluboký ale zřetelný endotermní pik. Na rozdíl od energie akustické emise, která se během cyklického zatěžování měřila současně s teplotou, ale žádně podobně singularity nejeví.



Obr. 10. Změna teploty a energie akustické emise během cyklického zatěžování oceli C40.

Fig. 10. Temperature variation compared with acoustic emission energy of the cyclic loaded steel C40.



Obr. 11. Změna teploty a energie akustické emise během cyklického zatěžování oceli AISI304.

Fig. 11. Temperature variation compared with acoustic emission energy of the cyclic loaded steel AISI304.

### 4.4. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti materiálu strojního dílce se během jeho cyklického zatěžování (s výjimkou přechodných dějů při samotném počátku zatěžování dílce a potom těsně před jeho únavovým lomem) nemění. Což je dáno mikrostrukturním mechanismem únavových procesů. Tak třeba mez kluzu  $R_p0,2$  je podle Hallova a Petchova vztahu

$$R_p0,2 = \sigma_i + \frac{\text{konst}}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

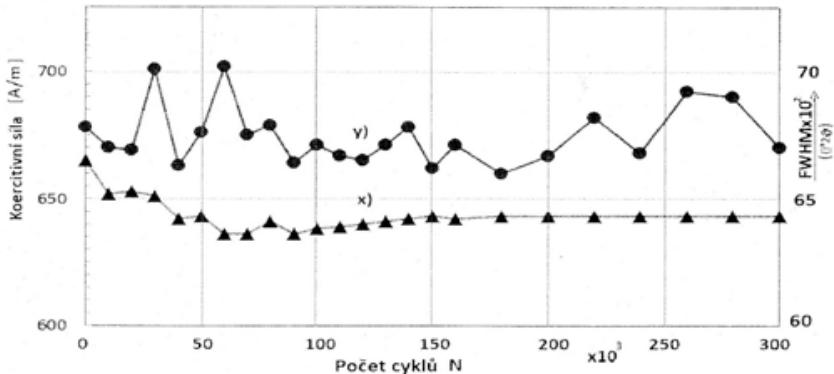
dána odporem, který materiál klade pohybu dislokací jednak uvnitř mozaikových bloků (Peierlsovo – Nabarrovo napětí  $\sigma_i$ ) a jednak při průchodu jejich rozhraním (kde  $d$  je velikost bloku). Během cyklického zatěžování se poloha dislokací mění: buď jsou uvnitř mozaikových bloků nebo na jejich rozhraní, ale celkový odpor, který materiál klade jejich pohybu a tedy i mez kluzu jsou konstantní. Podle jiného vztahu je mez kluzu materiálu úměrná druhé odmocnině celkové hustoty dislokací  $\rho$

$$R_p0,2 = a + b \cdot \sqrt{\rho} \quad (2)$$

která se během cyklického zatěžování nemění a proto se (s výjimkou přechodných dějů na začátku a na konci zatěžování) nemění ani  $R_p0,2$ . Proto nemůžeme na základě monitorování mechanických vlastností cyklicky zatěžovaného tělesa předpovídat jeho zbytkovou životnost.

#### 4.5. Koercitivní síla

Koercitivní síla feromagnetického materiálu je měrou odporu, který kladou dispersní magnetická pole jeho strukturálních nehomogenit (jmenovitě dislokací) usměrněnému pohybu Blochových stěn, vyvolanému vnějším magnetickým polem. Výsledky našich měření na oceli 15CH2NMFA (0,15C; 2,1Cr; 1,2Ni; 0,6Mo) [11–13] prokazují, že koercitivní síla se v průběhu cyklického zatěžování, až na počáteční exkurs, nemění (obr. 12). Vlivem mechanického cyklování se dislokační pole rozdělí do dvou populací: dislokace soustředěné na rozhraní mozaikových bloků – tam je vysoká hustota dislokací – a dislokace, kterých je málo a jsou uvnitř mozaikových bloků (v „bezdislokačních“ regionech). Dalším cyklováním dochází potom v důsledku hromadění parakrystalických distorzí uvnitř zvětšujících se bloků k rozpadu mozaikové struktury a jejímu opětovnému hrubnutí vlivem rozhranové energie, která se při rozpadu struktury zvyší.



**Obr. 12.** Koercitivní síla (x) a šířka difrakční linie (211) feritu v polovičce její výšky (y) v závislosti na počtu zátěžných cyklů pro vzorek oceli 15CH2NMFA. Na rozdíl od šířky difrakční linie, která se při cyklickém zatěžování mění podle aktuální velikosti mozaikových bloků, koercitivní síla se nemění, neboť je dána celkovou hustotou dislokací, jež zůstává při cyklování konstantní.

**Fig. 12.** Coercive force (x) and full width at half maximum of the diffraction line (211) of ferrite (y) as a function of the number of loading cycles for a sample of steel 15CH2NMFA. In contrast with the width of the diffraction line, which changes in course of loading according to the actual size of mosaic blocks, the coercive force does not change as it is given by the total dislocation density that remains constant during cycling.

Dislokace „pendlují“ mezi oběma populacemi a tento transfer je už nadále vyrovnaný (vybilancovaný): celkový počet dislokací v materiálu se již nemění. A proto se koercitivní síla, která je úměrná odmocnině (celkové objemové) hustoty dislokací, už také dále nemění. V tomto ohledu je to tedy s koercitivní silou obdobné jako s mechanickými vlastnostmi materiálu: monitorováním koercitivní síly cyklicky zatěžovaného tělesa z feromagnetického materiálu nemůžeme jeho zbytkovou životnost předpovídat.

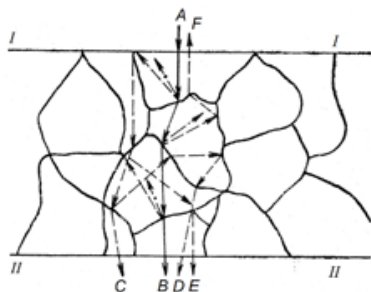
#### 4.6. Akustická emise

Jak dokládají obrázky 10 a 11, energie akustické emise uhlíkové oceli C40 a chromniklové austenitické oceli AISI304 při cyklickém zatěžování monotonně narůstá. Ty záznamy nenavštěvují, že by vlivem cyklického zatěžování docházelo ve struktuře těchto ocelí k nějakým rytmickým procesům, jež registrujeme v jiných případech třeba rentgenovou difrakcí či měřením elektrodového potenciálu nebo teploty. Ale k těm procesům v oněch

ocelích opravdu dochází, o čemž svědčí záznamy teploty, která se paralelně s akustickou emisí monitorovala. To, že se tyto procesy akusticky neprojeví, je zřejmě dáno způsobem registrace příslušné odezvy. Detektory akustické emise pracují ve frekvenčním pásmu do několika megahertzů, což jest o šest až sedm dekadických řádů pod pracovním pásmem detektorů termoemise ( $0,1 \div 100$ )THz. Takže vnitřní strukturní procesy, které generují zřetelné, rytmicky se opakující endotermní píky, mohou vyvolat v akustických detektorech pouze stochastickou odezvu. Je to jako s člověkem, který vidí očima světlo v pásmu několika stovek terahertzů, ale nevnímá zvuk v pásmu do 20 kHz, má-li zacpané uši. Ty pozorované skutečnosti jsou v souladu s tím, že skluz dislokací, kterým se realizují rytmické proměny disperzního stavu materiálu během jeho cyklického zatěžování, předpokládá aktivaci řádově 0,01 eV, což odpovídá frekvenčnímu pásmu kolem několika terahertzů.

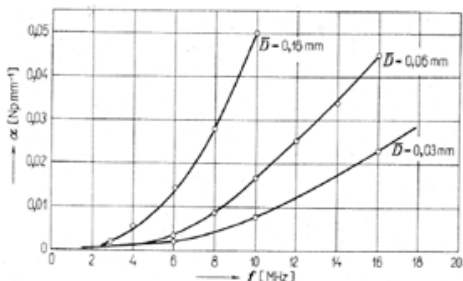
#### 4.7. Útlum ultrazvuku

Jako jiná metoda, která by snad umožnila sledování mikrostrukturních procesů vyvolaných cyklickým zatěžováním, je útlum ultrazvuku. V polykrystalických látkách [14–17] se jedná převážně o útlum rozptylem, při kterém se energie ultrazvuku ztrácí v důsledku odrazu a lomu na rozhraní mezi krystalitami (obr. 13). Ukazuje se, že tyto ztráty závisí na poměru vlnové délky ultrazvukových kmitů a velikosti krystalitů (obr. 14), která se – jak víme z jiných pozorování – rytmicky během cyklického zatěžování mění. To znamená, že jmenovitě tyto mikrostrukturní změny by bylo principiálně možné měřením útlumu ultrazvuku v závislosti na počtu zátěžných cyklů monitorovat.



Obr. 13. Šíření ultrazvukového vlnění krystalickou látkou.

Fig. 13. Propagation of ultrasonic waves in a crystalline solid.



Obr. 14. Závislost činitele útlumu  $\alpha$  na frekvenci ultrazvuku  $f$  v uhlíkové oceli obsahující 1,15% C;  $\bar{D}$  = střední velikost krystalitu.

Fig. 14. Dependence of attenuation coefficient  $\alpha$  on ultrasound frequency  $f$  in a carbon steel containing 1.15% C;  $\bar{D}$  = mean grain size.

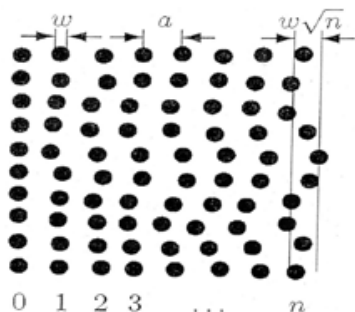
## 1. Závěr

Mechanismem únavy jsou procesy ve vnitřní struktuře materiálu, které můžeme různými technikami monitorovat, neboť mají rytmický charakter. Z toho ovšem vyplývá, že jednorázová inspekce strukturního stavu nám o zbytkové životnosti neřekne nic. Stav je ničím, proces je vším.

## Dodatek A. Parakrystalická distorze

Nepravidelnost vnitřní struktury pevných látek (odchylnost od dokonalé ideální struktury krystalů) má často původ již při jejich vzniku. Ať už krystalily rostou z fáze kapalně (z taveniny, z roztoku), plynně (techniky fyzikální či chemické depozice PVD a CVD) nebo pevně (slinování, rekystalizace, překystalizace, rozpad či uspořádávání tuhých roztoků, martenzitická transformace), většinou je rychlost těchto procesů tak velká, že „nově přirůstající“ atomy nemají dost času zaujmout pravidelné (energeticky nejvýhodnější) polohy, odpovídající ideální krystalové struktuře. Občas a na některém místě se „nově přistupující“ atom do rostoucího krystalu uchytí nepřesně a zůstane v této chybné poloze, přesto, že není energeticky nejvýhodnější, neboť po zachycení do struktury pevné fáze se pohyblivost tohoto atomu značně sníží (zpravidla o několik dekadických řádů). V nové, i když energeticky neoptimální poloze je atom držen silami, které sice nejsou tak velké, jako kdyby to byla optimální poloha, ale přece dost velké na to, aby tam atom dostatečně pevně „držel“. Měl-li by se z této polohy dostat do ideální polohy, kde by jeho energie byla nižší, musí se nejdříve jeho energie zvýšit, a to je to, co mu brání se z neideální polohy rychle dostat. Ale brzo je tento atom „přikryt“ dalšími atomy, které přecházejí z výchozí matriční fáze do tuhé krystalické fáze, a to učíní zakotvení onoho atomu na „nesprávném místě“ ještě pevnější. Další vrstvy atomů, které tento atom překryjí, již budou nad místem „špatně pohřbeného“ atomu vymístěné ze správné polohy a defekt se bude kopírovat dál. Časem se špatně zabuduje nějaký další atom jinde a od toho místa se bude v rostoucím krystalu kopírovat i tato špatná poloha atd.

Takovéto odchylky od správného uložení atomu – parakrystalické distorze [18] – se tedy při růstu krystalu hromadí (obr. 15) a molární energie krystalu roste (v krystalu se při jeho růstu hromadí mikroskopická napětí), až to zastaví další růst krystalu. Dokonalý krystal by rostl dále proto, že jeho (termodynamický) potenciál je nižší než potenciál matričního prostředí, ze kterého vyrůstá. Krystal, v němž se růstem nahromadily defekty, však posléze bude mít molární energii vyšší než matriční prostředí a jeho růst se v důsledku toho zastaví. Přispěje k tomu také zvětšení měrného povrchu rostoucího krystalu, který bude v důsledku hromadící se distorze čím dál tím větší.



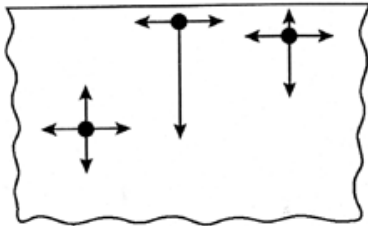
*Obr. 15. Chyby v periodickém uložení atomů, které vzniknou při růstu krystalu (parakrystalické distorze), se hromadí a posléze růst krystalu zastaví.*

*Fig. 15. Defects of periodic arrangement of atoms, which arise during the growth of a crystal (paracrystalline distortions), cumulate and finally discontinue its further growth.*

## Dodatek B. Povrchová energie

Molekula, která je uvnitř pevné látky, má sousedy na všech stranách, a proto se síly, kterými na takovou molekulu působí její sousedé, vzájemně vyruší. Molekule na povrchu tělesa však chybí sousedé v celém jednom poloprostoru, a proto je výslednice mezimolekulárních sil, které na takovou molekulu působí, nenulová; směřuje dovnitř tělesa, kolmo (k rovině tečné) k jeho povrchu a (v přepočtu na plošnou jednotku) představuje tzv. kohézní tlak. Mezimolekulární (kohézní) síly mají mnohem kratší dosah než síly gravitační nebo elektrické či magnetické

(ubývají se šestou až dvanáctou mocninou vzdálenosti, zatímco síly gravitační, elektrické a magnetické ubývají se čtvercem vzdálenosti) a proto se kohézní tlak projevuje jen v tenké povrchové vrstvičce o tloušťce několika desetin nanometru. Má-li se zvětšit povrch tělesa (počet molekul na povrchu tělesa), musí se na povrch dostat některé molekuly, které byly předtím uvnitř. Na dráze z vnitřku pevné látky k jejímu povrchu se molekula pohybuje volně, pokud je dost daleko od povrchu. Přiblíží-li se však k povrchu na několik desetin nanometru, začne na ni působit kohézní tlak, jenž musí molekula překonávat. Přitom vykoná práci, o kterou zvětší energii povrchu. Každá molekula, která se z vnitřku dostane na povrch, zvětšuje takto jeho energii (přispívá k povrchovému napětí, plošné hustotě energie povrchu – viz obr. 16).



*Obr. 16. Povrchové napětí vzniká proto, že atomy (molekuly) na povrchu (rozhraní) mají nesymetrické okolí.*

*Fig. 16. Surface tension is caused by asymmetry of the neighbourhood of atoms (molecules) of the surface (interface).*

Jestliže se má naopak povrch tělesa zmenšit (má-li se zmenšit počet molekul na povrchu tělesa), musí se některé molekuly, které byly předtím na povrchu, dostat dovnitř. Když přitom procházejí (několik desetin nanometru) tenkou povrchovou vrstvou, jsou zde urychlovány kohézním tlakem. Tím se zvýší jejich kinetická energie, která se pak rozptýlí uvnitř a stane se součástí energie vnitřku na úkor energie povrchu. Každá molekula, která opouští povrch, snižuje jeho energii, neboť s sebou odnáší i svůj podíl na povrchovém napětí [19]. Povrchové napětí, které působí v (tečné) rovině (k) povrchu, je tedy vyvoláno kohézním tlakem, jenž působí kolmo k povrchu. V důsledku povrchového napětí se tenká povrchová vrstva pevné látky chová jako napnutá pružná blána.

**Poděkování:** Výsledky prezentované v tomto příspěvku jsou součástí řešení projektů FSI-S-17-4428 a RV9090000315 řešených na Fakultě strojní ho inženýrství VUT v Brně.

## Literatura

- [1] A. M. Hindeleh, R. Hosemann: Paracrystals representing the physical state of matter, *Journal of Physics C: Solid State Physics* 21 (1988), 4155–4170.
- [2] J. Fiala: Parakrystaly, *Ceramics–Silikáty* 36 (1992), 49–57.
- [3] W. Wilke: The model of the paracrystal and its application to polymers. In: *Defect and Microstructure Analysis by Diffraction*, R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge (eds), Oxford University Press for International Union of Crystallography, Oxford 1999, 247–263.
- [4] J. Fiala, H. Frank, I. Kraus: Elektronová struktura a reaktivita povrchů a rozhraní, *Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha* 2018.
- [5] E. M. Gutman: *Mechanochimija metallov i zaščita ot korozii*, Metallurgija, Moskva 1981.
- [6] I. Kraus, N. Ganev: *Technické aplikace difrakční analýzy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.

- [7] J. Fiala, M. Kolega: Využití rtg difrakce pro nedestruktivní zkoušení materiálů, *NDT Welding Bulletin* 27 (2017), no. 1–2, 7–12.
- [8] R. L. Snyder, J. Fiala, H. J. Bunge (eds): *Defect and Microstructure Analysis by Diffraction*, Oxford University Press for International Union of Crystallography, Oxford 1999.
- [9] F. H. Chung, D. K. Smith (eds): *Industrial Applications of X-ray Diffraction*, CRC Print Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida 2000.
- [10] G. La Rosa, C. Clienti, F. Lo Savio: Fatigue analysis by acoustic emission and thermographic techniques, *Procedia Engineering* 74 (2014), 261–268.
- [11] Š. Jíra, J. Fiala: Hysterezní smyčka feromagnetik. In: *Proceedings of NDE for Safety/DEFEKTOSKOPIE 2016*, L. Pazdera, P. Mazal (eds.), Brno University of Technology, Brno 2016, 37–51.
- [12] J. Fiala, M. Kolega, Š. Jíra, P. Mazal, F. Vlašic, V. Kratochvílová: Sledování strukturních změn vyvolávaných cyklickým zatěžováním oceli 15CH2NMFA, pomocí rentgenové difrakce a měření koercitivní síly. In: *Proceedings of NDE for Safety/DEFEKTOSKOPIE 2017*, L. Pazdera, P. Mazal, M. Kořenská (eds), Brno University of Technology, Brno 2017, 63–70.
- [13] Š. Jíra, J. Fiala, P. Mazal, F. Vlašic, V. Skřivánková: Koercitivní síla a únava feromagnetického materiálu. In: *Proceedings of NDE for Safety/DEFEKTOSKOPIE 2018*, L. Pazdera, P. Mazal, P. Turek (eds), Brno University of Technology, Brno 2018, 203–208.
- [14] B. Míšek, L. Ptáček: *Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení*, SNTL, Praha 1973.
- [15] J. Obraz: *Ultrazvuk v měřicí technice*, SNTL, Praha 1976.
- [16] B. Kopec a kolektiv: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. pro Českou společnost pro nedestruktivní testování, Brno 2008.
- [17] V. V. Klyuev, G. V. Zusman (eds): *Nondestructive testing and diagnostics*, Russian Society for Nondestructive Testing and Technical Diagnostics, Moscow, Russia; Metrix Instrument Co., Houston, USA 2004.
- [18] I. Kraus, J. Fiala: *Elementární fyzika pevných látek*, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2017.
- [19] J. Fiala, I. Kraus: *Povrchy a rozhraní*, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2017.





# ZMĚNY SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE V DŮSLEDKU DYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ LOŽISKOVÉ OCELI 100Cr6

## CHANGES OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL DUE TO DYNAMIC LOADING OF BEARING STEEL 100Cr6

Jiří HLOŽEK<sup>1</sup>, Pavel MAZAL<sup>1</sup>, Libor NOHÁL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, e-mail: qmmazal@vutbr.cz

<sup>2</sup> ZKL - Výzkum a vývoj a.s., Brno, Czech Republic, e-mail: libor.nohal@zkl.cz

### Abstrakt

*V této práci bylo zkoumáno, jaký dopad má změna zatížení na vznik kontaktní únavy ložiskové oceli 100Cr6. Byly provedeny tři kompletní série experimentů pro stanovení základní trvanlivosti zkušebních vzorků, přičemž každá série měla jiný průběh zatížení. Během experimentů byla sledována intenzita vibrací, pro ukončení zkoušky a signál akustické emise, který podrobněji popisuje průběh modelových zkoušek ložiskových materiálů. Právě záznam metody akustické emise je zde detailněji zkoumán a popsán.*

**Klíčová slova:** kontaktní únava, akustická emise, ocel 100Cr6

### Abstract

*In this paper, the impact of the load change on the contact fatigue of bearing steel 100Cr6 was investigated. Three complete series of experiments were performed to determine the rating life of the test specimens, with each series having a different load pattern. During the experiments, the intensity of the vibration was controlled to end the test and the acoustic emission signal were monitored. Exactly the record of the acoustic emission method is more examined and described in more detail.*

**Key words:** Rolling contact fatigue, acoustic emission, steel 100Cr6

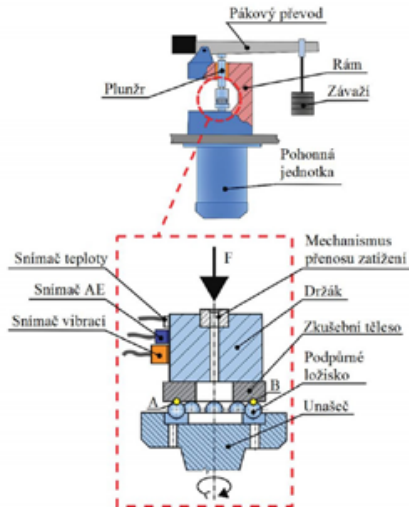
## 1. Úvod

Valivá ložiska jsou strojní součásti, které jsou hojně využívány v průmyslových strojích, ale i v běžně užívaných zařízeních. Důvodem užití těchto součástí je především vyvození tiššího a plynulejšího chodu příslušného zařízení, čímž dosáhneme jeho vyšší životnosti [1]. V případě, že dojde k poruše kulíčkového ložiska, se má za to, že není dále schopno provádět rotační pohyb a dochází k nepřipustnému nárůstu vibrací a hluku [2, 3]. Z důvodu zabránění větších poruch celých zařízení, je snaha určit trvanlivost ložisek co nej přesněji. Jedním z přístupů, jak tuto trvanlivost určit je experimentální testování ložisek.

Jelikož testování kompletních ložisek je velice finančně i časově náročné, jsou experimenty prováděny na jejich částech nebo vzorcích materiálu. Modelové zkoušky ložiskových materiálů jsou prováděny z důvodu zjištění trvanlivosti ložiskových materiálů, ale také z důvodu ověření kvality tepelného zpracování či jakosti materiálu. Jelikož byly tyto testy doposud prováděny pouze při statickém zatížení, proto bylo provedeno měření při dynamickém zatížení. Výsledky jednotlivých experimentů, především z hlediska průběhu signálu akustické emise a jejich diskuze jsou předmětem předkládaného příspěvku.

## 2. Zkušební zařízení a geometrie zkušebních vzorků

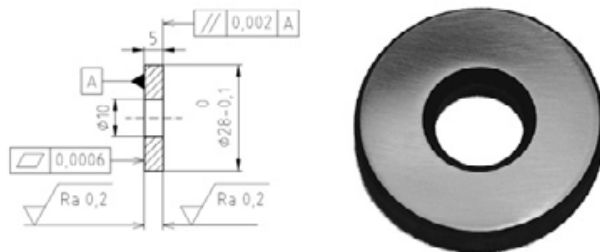
Pro všechny experimenty, které byly provedeny v této práci, byla použita zkušební stanice AXMAT. Toto zkušební zařízení slouží k ověřování jakosti materiálu a způsobu jeho tepelného zpracování. Toto zařízení je také možné použít pro výzkum vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů, zkoušky trvanlivosti probíhající za vyšších teplot, a především na testování vzniku a šíření kontaktní únavy u axiálních ložisek [4].



**obr. 1** Zkušební zařízení AXMAT [5]  
**fig. 1** Experimental test-rig AXMAT [5]

Na obrázku 1 je znázorněn základní princip zkušebního zařízení AXMAT. Zkušební vzorek v podobě disku je přichycen šroubem k držáku, který je zatěžován axiální silou. Tato síla je vyvolána pákovým mechanismem, který je opatřen závažím, kterým je možné regulovat velikost síly (v této práci byla použita síla 2616 N a 1913 N, které odpovídají hodnotám Hertzova tlaku 5000 MPa a 4500MPa). Díky této síle je zkušební vzorek přitlačován na odvalující se libovolný počet kuliček. Podpůrný kroužek, který vykonává rotační pohyb je uchycen k unášeči ve hřídeli pohonu. Dále je na držáku umístěno několik senzorů, a to především z důvodu zajištění potřebných dat k vyhodnocení testu. Konkrétně se jedná o snímač vibrací (akcelerometr), který reaguje na první makro poškození zkoumaného materiálu a v případě vzniku pittingu tento snímač odstaví zkušební stanici. Pro případ selhání akcelerometru nebo při extrémním vzniku tepla v kontaktu je mezi plunžrem a držákem umístěna tepelná spojka (polyamidová vložka), která díky teplotní dilataci odlehčí zatížení. Dále je na držáku umístěn snímač teploty a snímač akustické emise.

Pro experimenty byly použity materiálové vzorky, jejichž rozměry a tvar jsou znázorněny na obr. 2.



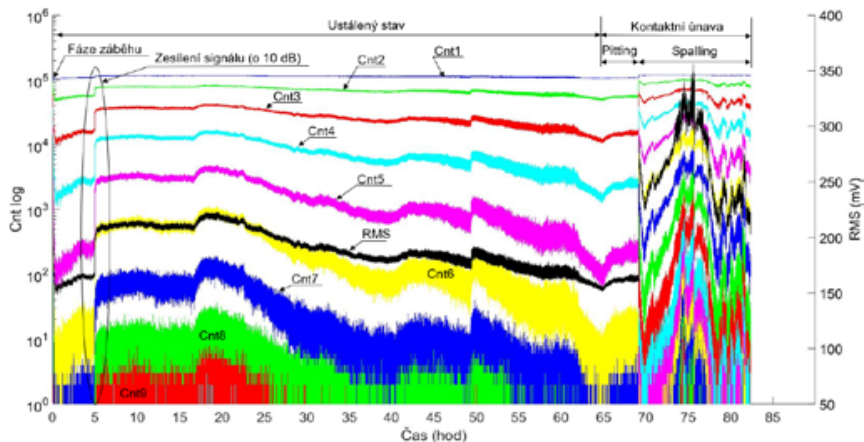
obr. 2 Geometrie zkušební vzorku [4, 5]  
fig. 2 Geometry of specimen [4, 5]

K záznamu akustické emise byla použita měřící aparatura XEDO od firmy DAKEL. Měřící aparatura se dále skládala z piezosnímačů typu MIDI (frekvenční rozsah 80-750 kHz, teplotní rozsah použití -20 až 150 °C) a předzesilovačů, jejichž hodnota předzesílení byla nastavena na 10 dB [6].

### 3. Výsledky měření

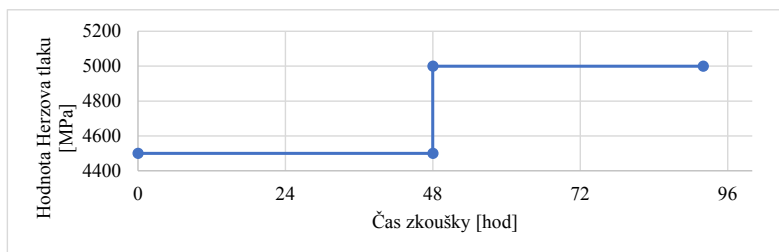
Experimenty prezentované v této práci byly provedeny pro různé průběhy zatížení. V první řadě byla ověřena trvanlivost dvaceti zkušebních vzorků oceli 100Cr6 při statickém zatížení, kdy hodnota Hertzova tlaku dosahovala hodnoty 5000 MPa. Vzorky byly zatěžovány při konstantních otáčkách 1380 min<sup>-1</sup>. Při zkoušce byla sledována intenzita vibrací a signál akustické emise.

Průběh signálu akustické emise během těchto experimentů je znázorněn na obrázku 3. Je zde sledována odezva signálu AE na vznik kontaktní únavy. Díky tomuto experimentu bylo potvrzeno, že metoda akustické emise je schopna detekovat kontaktní únavu dříve, než se tento druh poškození projeví nárůstem vibrací. Na záznamu signálu akustické emise během zkoušky je znázorněn je zobrazeno devět hladin četnosti překmitů přes stanovený práh (Cnt1 až Cnt9) a efektivní hodnota signálu (RMS–Root mean square).



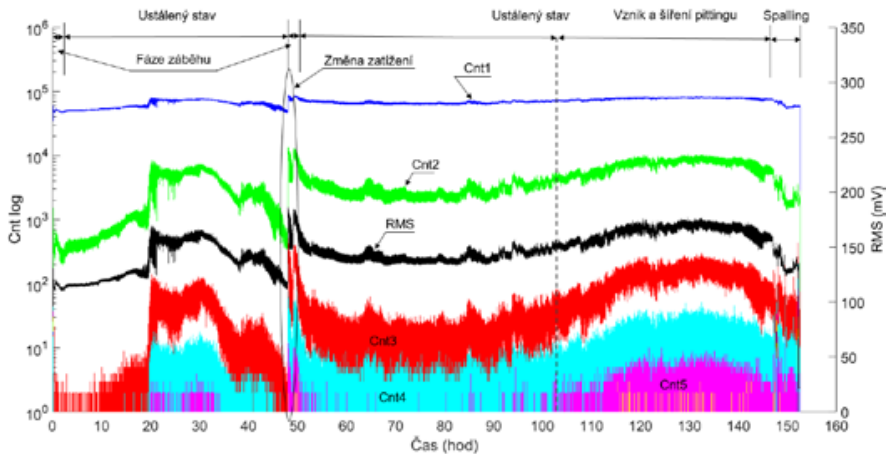
obr. 3 Průběh zkoušky trvanlivosti při statickém zatížení  
fig. 3 Observation of experiment during static loading

Dále je na obr. 3 možné pozorovat jednotlivá stádia poškození vzorku. Zpočátku je zde zachycena fáze záběhu, při které dochází k vytvoření oběžné dráhy na zkušebním vzorku, která vzniká plastickou deformací. Tato fáze trvá řádově několik minut (maximálně do jedné hodiny). Následuje klidová fáze v podobě ustáleného stavu. V této fázi se pohybovala intenzita vibrací mezi 1 až 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Během ustáleného stavu dochází nejprve k nárůstu signálu, ovšem ten poté (po 20. hodině) začne klesat. To je způsobeno postupným vyhlazováním vyjeté dráhy, ale také zpěvňováním materiálu v tomto místě. Po 65. hodině experimentu dochází k opětovnému nárůstu signálu. To je již způsobeno vznikajícím pittingem, který před 70. hodinou přechází ve spalling. Současně v tuto dobu, kdy dochází k rapidnímu nárůstu všech hladin četnosti překmitů, a především efektivní hodnoty signálu (RMS), začíná také narůstat intenzita vibrací. Dále byla trvanlivost ověřena opět u série dvaceti vzorků, ovšem během těchto experimentů došlo ke k dynamické změně. Tato změna byla vyvolána zvýšením zatížení z 4500 MPa Hertzova tlaku na 5000 MPa po 48 hodinách od počátku experimentu. Průběh zatížení je ukázán na obrázku 4.



*obr. 4 Průběh zatížení během experimentů s jednou změnou*  
**fig. 4** *Course of loading during experiments with one change of load*

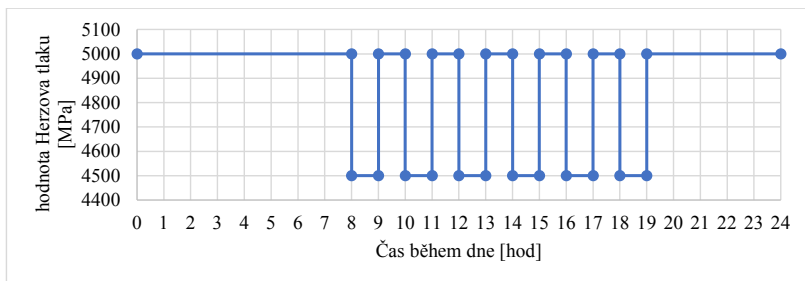
Na obrázku 5 je možné vidět průběh signálu akustické emise zkoušky vzorku s touto jednou změnou. Je zde vyobrazeno pět hladin četnosti překmitů z celkových šestnácti a efektivní hodnota signálu (RMS). Opět je zpočátku zachycena fáze záběhu, po které následuje fáze ustáleného stavu. Jelikož bylo po 48. hodině experimentu zvýšeno zatížení na hodnotu 5000 MPa Hertzova tlaku, následuje opět fáze záběhu pro toto zvýšené zatížení. Poté následuje ustálený stav. Okolo 103. hodiny zkoušky je detekován růst hodnoty RMS a Cnt2 až Cnt5, přičemž právě hladina Cnt5 začíná růst výrazným způsobem. Tento nárůst je způsoben pravděpodobným vznikem pittingu, který se ovšem neprojevuje nárůstem vibrací, tudíž zkouška dále pokračuje. Od 145. hodiny dochází ke skokovým změnám signálu, což značí počáteční výskyt spallingu, který vede k nárůstu vibrací a ukončení testu.



**obr. 5** Průběh signálu AE experimentů s jednou skokovou změnou zatížení

**fig. 5** Observation of AE signal of experiments with one change loading

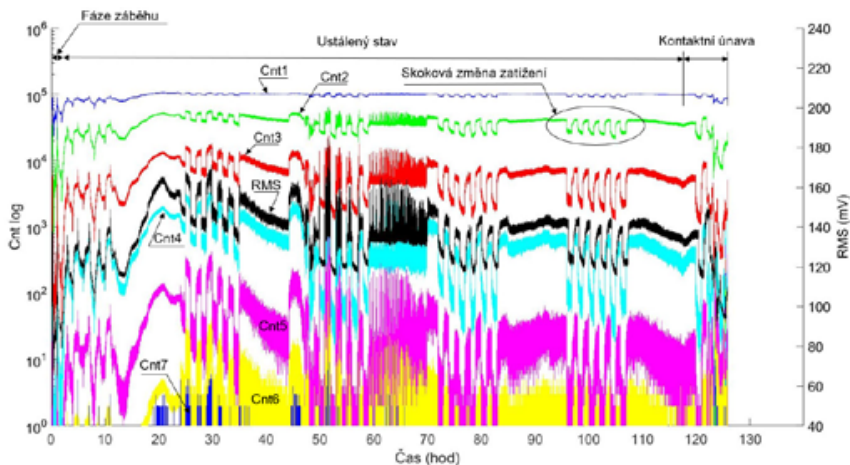
Na závěr byly provedeny experimenty, u kterých se změna zatížení opakovaně měnila. Tato dynamická změna se skládala z 24hodinových cyklů (obr. 6), které se stále opakovaly až do ukončení zkoušky. Během jednoho cyklu byla 12 hodin prováděna změna zatížení (každou hodinu), a zbylých 12 hodin bylo zatížení konstantní. Během opakované skokové změny zatížení je vyvozováno zatížení tak, aby hodnoty kontaktního tlaku dosahovaly 4500 MPa a 5000 MPa.



**obr. 6** Cyklus zatížení experimentů s opakovanou změnou zatížení

**fig. 6** Loading cycle of experiments with repeating change loading

Na obrázku 7 je zobrazen záznam signálu AE ze zkoušky, při které byla aplikována dynamická změna zatížení a je díky tomuto záznamu zachycena.



obr. 7 Úplný záznam akustické emise ze zkoušky při opakované změně zatížení  
 fig. 7 Observation of AE signal during experiments with repeating change of loading

Ze záznamu akustické emise je možné vidět obdobné fáze jako u předchozích experimentů. Po počáteční fázi záběhu následoval ustálený stav. Ze signálu AE je možné vidět, že okolo 20. až 30. hodiny dochází k dosažení maxima signálu, a to na všech hladinách. Dále od 47. hodiny do 70. hodiny experimentu je možné pozorovat výraznější změny akustického signálu na všech hladinách. Tímto je zaznamenán vznik pittingu, který nevedl k ukončení experimentu, ale postupně došlo k zaválcování tohoto defektu oběžné dráhy a experiment tedy pokračoval dále. Od 118. hodiny dochází opět k nárůstu signálu, který je zachycen na 2. až 6. hladině četnosti překmitů (Cnt2-Cnt6), a také efektivní hodnotou signálu (RMS). To značí počátek vzniku povrchového defektu v podobě pittingu, který od 123. přechází ve vznik spallingu. Spalling se také začíná projevovat na vibracích.

#### 4. Diskuze

Díky experimentům, které byly provedeny v této práci, bylo zjištěno, že metoda akustické emise je schopna zachytit vznik kontaktní únavy mnohem dříve, na rozdíl od vibrací. Výhodou akustické emise je také schopnost zachycení změny zatížení, kterou vibrace nejsou schopny detekovat. Na druhou stranu, nevýhodou je, že během experimentů, kde dochází ke vzniku kontaktní únavy během změny zatížení, nejde jednoznačně určit, kdy přesně došlo ke spallingu. V porovnání s [5, 7] bylo zjištěno, že se signál výrazně neliší od provedených experimentů v těchto pracích.

Dále bylo zjištěno, že trvanlivost zkušebních vzorků se v důsledku změny zatížení mění i přes to, že ocel 100Cr6 není ideální pro tento druh zatěžování. V tabulce 1 je možné vidět dosažené základní trvanlivosti  $L_{10h}$ , které jsou mezi sebou porovnány.

**tab. 1** Cyklus zatížení s opakovanou změnou zatížení  
**fig. 1** Experimental test-rig AXMAT

Experimentálně získaná hodnota trvanlivosti [h]	Odchylka [%]
101,2	0,0
118,6	17,2
111,0	7,9

## 5. Závěr

Na základě provedených experimentů, které zkoumali vznik kontaktní únavy ložiskové oceli 100Cr6 bylo zjištěno, že vliv zatěžování má dopad na trvanlivost zkoumaného materiálu. Bylo potvrzeno, že metoda akustické emise je schopna zachytit vznik a rozvoj kontaktní únavy, ale také, že je schopna zachytit průběh zatížení během experimentů.

## Poděkování

Tento článek byl vytvořen na základě výsledků získaných v průběhu řešení diplomové práce Bc. Jiřího Hložka a za finanční podpory projektu Technologické agentury ČR (EPSILON) č. TH02010306 Výzkum a vývoj konstrukce a technologie nové generace axiálních soudečkových ložisek.

## Literatura

- [1] SKF GROUP a S K F GROUP. Rolling bearings. *Skf bearings*. 2012, s. 97–114.
- [2] T. A. KOTZALAS, M. N. Harris. *Advanced Concepts of Bearing Technology*. 5. vyd. 2006. ISBN 978-0849371820.
- [3] BHADESHIA, H. K.D.H. Steels for bearings. *Progress in Materials Science*. 2012, roč. 57, č. 2, s. 268–435. ISSN 00796425.
- [4] NOHÁL, L. *Korelace změny signálu AE s rozvojem kontaktního poškození*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] NOHÁL, L., F. HORT, J. DVOŘÁČEK a P. MAZAL. An experimental investigation of rolling contact fatigue of steels using acoustic emission method. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2013, roč. 55, č. 12, s. 665–669. ISSN 13542575.
- [6] MAZAL, Pavel. AN EVALUATION OF ROLLING CONTACT FATIGUE OF METALLIC MATERIALS. 2014, roč. 21, č. 5, s. 299–304.
- [7] DVORACEK, J, L KOMENDA a L NOHAL. Modification of Experimental Station AXMAT. nedatováno, s. 319–323.







## PŘEHLED METOD POUŽÍVANÝCH PŘI HODNOCENÍ STAVU POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

### OVERVIEW OF METHODS USED IN ASSESSING ROAD CONDITIONS

Michal JANKŮ \*, Ilja BŘEZINA \*, Josef STRYK \*

\* Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Contact e-mail: michal.janku@cdv.cz

#### **Abstrakt**

*Jen stěží se najde řidič motorového vozidla, který by se nikdy nevyjadřoval ke stavu té či oné pozemní komunikace. Nejčastěji si pak všímáme množství a velikosti výtluků na vozovce. Ač se to možná někomu nezdá, pravidelné kontroly stavu vozovek zabezpečuje i vlastník nebo správce dotčené komunikace a o jejím výsledku vede záznam. Tyto prohlídky mají většinou charakter vizuální kontroly a podle rozsahu se dělí do čtyř kategorií. Nejkratší interval mají běžné prohlídky, na dálnicích se provádí každý pracovní den, na silnicích I. třídy 2x týdně, na silnicích nižších tříd již méně často. Běžnou prohlídkou se zjišťuje hlavně správná funkce dopravního značení, bezpečnostního zařízení a závady ve sjízdnosti. Naopak podrobnější diagnostický průzkum zpravidla předchází plánované opravě či rekonstrukci vozovky a slouží jako podklad pro přípravu projektové dokumentace. Některá měření se také provádí před uvedením nové vozovky do provozu. K tradičním zkoumaným parametrům patří měření protismykových vlastností vozovky, měření průhybů a hodnocení únosnosti prostřednictvím rázového zařízení FWD, či odběr jádrových vývrtů a jejich analýza v laboratoři. Mezi novější metody lze zařadit georadar, s jehož pomocí je možné stanovit tloušťky vrstev vozovky. Laserové skenování umožňuje měřit proměnné parametry, jako je příčná a podélná nerovnost a díky termokameře lze mimo jiné určit teplotu asfaltové směsi při pokládce vrstev asfaltových vozovek.*

**Klíčová slova:** prohlídka silnic, georadar, termokamera, rázové zařízení FWD

#### **Abstract**

*It is hard to find a driver of a motor vehicle who would have never commented on conditions of this or that road. Most often we notice the amount and sizes of potholes on roads. Even if it may seem strange, regular inspections of road condition is performed by the owner or administrator of the road and the results are recorded. These inspections are mostly visual and divided into four categories. General inspections are performed on shortest intervals, every working day on motorways, twice a week on first class roads, and less often on lower class roads. General inspection is mainly focused on the right operation of road signing and marking,*

*safety devices and defects on road pavements. In contrast, a more detailed diagnostic survey usually precedes a planned road reconstruction and is used as a basis for the project documentation. Some measurements are also performed before a new road is put into operation. Typical measured parameters include anti-skid properties of road pavement, deflection measurement and the evaluation of bearing capacity using a Falling Weight Deflectometer, and extraction of drill cores and their analysis in the laboratory. Regarding more recent methods, a georadar can be used to determine thicknesses of pavement layers. Laser scanning allows for variable parameter measurements, such as transverse and longitudinal unevenness. In addition, it is possible to determine the temperature of hot asphalt mixture when laying asphalt pavement layers thanks to the thermal camera.*

**Key words:** road inspections, georadar, thermal camera, Falling Weight Deflectometer

## 1. Úvod

Tento článek popisuje procesy a metody sloužící k monitorování stavu či k diagnostice pozemních komunikací. Autoři článku se osobně přes 3,5 roku podíleli na provádění běžných prohlídek silnic I. třídy v Jihomoravském kraji a provedli mnoho diagnostik na pozemních komunikacích v České republice. V první části článku jsou charakterizovány typy jednotlivých prohlídek prováděných na pozemních komunikacích v České republice. Následuje přehled tradičních diagnostických metod a dále i těch novějších.

## 2. Prohlídky pozemních komunikací

Vykonávání prohlídek nařizuje a upravuje zákon o pozemních komunikacích č. 13/1997 Sb. V něm se mimo jiné píše, že vlastník nebo správce pozemní komunikace zajišťuje její prohlídky. Prohlídka se zaměřuje na posouzení dopadů zejména stavebních, technických a provozních vlastností pozemní komunikace na její bezpečnost. Vyhláška č. 104/1997 Sb. rozlišuje čtyři kategorie prohlídek podle rozsahu a frekvence provádění: běžné, hlavní, mimořádné a bezpečnostní inspekce komunikací zařazených do transevropské silniční sítě

Z výše zmíněných, jsou nejčastěji prováděny běžné prohlídky, které se soustředí především na správnou funkci dopravního značení, bezpečnostního zařízení a závady ve sjízdnosti. Na dálnicích jsou vykonávány každý pracovní den, na silnicích I. třídy 2x týdně, na silnicích II. třídy 2x měsíčně a na silnicích III. třídy 1x měsíčně.

Běžné prohlídky jsou vykonávány z jedoucího vozidla. V případě, že inspektor zahlédne nějakou poruchu, odstaví bezpečně vozidlo a jde ji zaznamenat. V době, kdy zaměstnanci Centra dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV) prováděli běžné prohlídky silnic I. třídy v Jihomoravském kraji, byl záznam poruch prováděn pomocí chytrého mobilního telefonu. Při pořízení fotografie poruchy došlo zároveň k automatickému

zaznamenání polohy díky GPS. Po doplnění komentáře byly záznamy odeslány odpovědným osobám na Ředitelství silnic a dálnic (ŘSD).

Mezi nejčastěji zaznamenané poruchy patřily výtluky, vytržené nebo poničené směrové sloupky, vyvrácené značky a poškozená svodidla. Rychlost opravy se lišila podle typu poruchy a střediska či cestmistrovství, ke kterému náležel úsek silnice, na němž se nacházela porucha. Dle našich zkušeností byla většina výtluků obratem opravena. Horší situace panovala v případech poškozených svodidel, ty často čekaly na opravu několik týdnů až měsíců.

Cílem hlavní prohlídky je zjištění stavebně technického stavu komunikace, včetně jejích součástí a příslušenství. Hlavní prohlídka se provádí nejméně jednou za 5 let, jinak vždy při uvedení nového nebo rekonstruovaného úseku komunikace do provozu a před skončením záruční doby. Hlavní prohlídka se provádí formou pochůzky a je při ní sledován stav vozovky a tělesa komunikace včetně krajnice. U poruch se zjišťuje jejich rozsah (plocha, délka) a umístění na vozovce. Jevy zjištěné v průběhu hlavní prohlídky jsou doplněny o dostupné údaje proměnných parametrů (drsnost, podélná a příčná nerovnost, zbytková životnost), změřené a vyhodnocené na základě příslušných ČSN.

Mimořádnou prohlídku zajišťuje vlastník nebo správce mimo termíny běžných a hlavních prohlídek, a to zejména při náhlém poškození vozovky (např. dopravní nehodou, živelní pohromou), při výrazné změně dopravního zatížení (např. v důsledku nařízení objíždky) nebo při nutnosti získat vstupní data pro systémy hospodaření s vozovkou. Jak u hlavních, tak i u mimořádných prohlídek silnic bývají často použity některé z níže uvedených diagnostických metod.

### **3. Protismykové vlastnosti vozovky**

U většiny dopravních nehod je za viníka označován řidič dopravního vozidla. Jako příčina nehody se v takových případech často uvádí nepřiměřená rychlost. V lepších případech končí nehody jen pomačkanými plechy, v těch nejhorších naopak až těžkým zraněním nebo smrtí. Otázkou je, jestli tato daň není až příliš vysoká, obzvláště, pokud zraněný ani nebyl viníkem nehody. Nekvalitní vozovka se špatnými protismykovými vlastnostmi zvyšuje riziko smyku a prodlužuje brzdnou dráhu až o desítky metrů.

Protismykové vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují bezpečnost silničního provozu. Prokázaly to různé výzkumné projekty, které porovnávaly počty dopravních nehod se stavem protismykových vlastností povrchu vozovky. Z porovnání vyplynulo, že na úsecích silnic I. třídy s hodnocením protismykových vlastností povrchu vozovky klasifikačním stupněm 5 – havarijní stav je 16x více nehod než na úsecích s hodnocením klasifikačním stupněm 1 – velmi dobré protismykové vlastnosti. V současnosti se často používá termín „odpouštějící silnice“, což znamená, že pokud

řidič udělá chybu, tak by silnice měla být v takovém stavu, aby řidič měl možnost svoji chybu napravit, případně aby následky dopravní nehody byly minimalizovány [1].

Zhoršený stav vozovky hodnotí běžný řidič většinou podle nerovností či množství výtluků. Špatné protismykové vlastnosti naopak často pozná, až když je pozdě. V praxi se k měření užívá vozidlo TRT (obr. 1).



*Obr. 1 Měřicí vozidlo TRT [2]*

Pro zjištění kontinuálního průběhu součinitele podélného tření se používá jednokolový závěs s měřicím kolem rovnoběžným se směrem pojezdu umístěným v levé jízdni stopě. Hydraulicky ovládané brzdění měřicího kola umožňuje při měření na pozemních komunikacích nastavení poměru skluzu na 25 %, což odpovídá systémům ABS v automobilech. Snímače měří rychlost vozidla a rychlost měřicího kola. Stálý kontakt měřicí pneumatiky se zkoušeným povrchem lze nastavit v rozmezí 700 - 1300 N. Řídící a regulační technika ve vozidle umožňuje automatický provoz měřicího zařízení ve zvoleném režimu, výpočetní technika se stará o záznam a vyhodnocování měřených veličin v reálném čase. Měření se provádí na vodním filmu tloušťky 0,5 mm, proto je vozidlo vybaveno dávkovacím zařízením a nádrží s vodou.

#### **4. Diagnostika a hodnocení únosnosti vozovky**

Diagnostika a hodnocení vozovek z hlediska jejich únosnosti se obvykle provádí měřením průhybů povrchu vozovky rázovým zařízením FWD, které zatěžuje vozovku stacionárním impulzním zatížením. Rázové zařízení FWD umožňuje nastavit parametry zatížení tak, aby se blížily reálnému zatížení kol pohybujících se vozidel. Skutečnému průhybu však nejvíc odpovídá průhyb měřený při pohyblivém dynamickém zatížení. Nejnovějším zařízením splňujícím toto kritérium je zařízení TSD

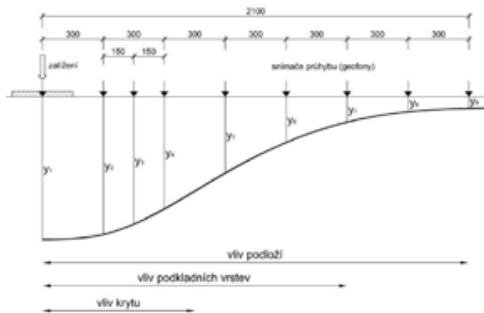
(Traffic Speed Deflectometer), které umožňuje měřit při rychlosti provozu na pozemní komunikaci.

Rázové zařízení FWD (Falling Weight Deflectometer, obr. 2) je tradiční zařízení používané pro měření průhybů, které zatěžuje povrch vozovky tlumeným rázem odpovídajícím zatížením kolem nápravy nákladního vozidla (je generováno pádem břemene na gumové tlumiče a přenáší se přes kruhovou zatěžovací desku na povrch zkoušeného místa vozovky), zároveň měří odezvu vozovky na toto dynamické zatížení. Omezením pro měření zařízením FWD jsou především teplotní podmínky. Teplota povrchu vozovky při měření musí být v rozsahu 5 – 30 °C.

Výstupem z měření na diagnostikovaných bodech (obvykle s odstupem 25 m mezi jednotlivými body) jsou hodnoty průhybu v různých vzdálenostech od osy zatížení tvořící průhybovou křivku (obr. 3).



**Obr. 2:** Rázové zařízení FWD pro měření průhybů vozovek, zdroj: CDV



**Obr. 3:** Průhybová křivka vynesená z výsledků měření rázovým zařízením FWD při použití 9 snímačů průhybu, zdroj: CDV

Cílem měření je vyhodnotit únosnost konstrukčních vrstev vozovky a jejího podlaží na základě změřených dat. Na hodnocení únosnosti vozovek se používají komplexní výpočtové programy. Zjišťuje se zbytková životnost vozovky a tloušťka potřebného zesílení, přičemž se počítá s rázovými moduly pružnosti vrstev určenými zpětným výpočtem z průhybové křivky změřené na povrchu vozovky.

Zesílení, případně rekonstrukce vozovky, se navrhuje v případě, že je vozovka hodnocena jako neúnosná. Tloušťka zesílení se odvíjí od předpokládaného dopravního zatížení, kvality materiálu zesilující vrstvy, únavových procesů ve vozovce apod.

Pro hodnocení únosnosti z měření průhybů vstupují do výpočtu rázových modulů pružnosti tloušťky vrstev vozovky. Ty se obvykle zjišťují odběrem jádrových vývrtů po pravidelných vzdálenostech (např. po 250 m). Tento přístup však nemůže zaručit



umístěn tuhý nosník s příslušným počtem laserových snímačů pracujících na bázi Dopplerova jevu, které snímají povrch vozovky pravé stopy vozidla v ose dvojmontáže návěsu.

## 5. Jádrové vývrty

Odběr vzorků vrstev vozovky umožňuje vysvětlit příčiny poruch vozovky a získat doplňující informace pro návrh opravy. Slouží ke zjištění stavu konstrukce vozovky, jejího krytu, podkladních vrstev a podloží. Jádrové vývrty jsou odebírány za účelem zjištění typu, tloušťky a stavu porušení stmelěných vrstev konstrukce vozovky a zároveň pro potřebu získání dostatečného množství materiálu asfaltových vrstev pro jeho laboratorní posouzení. V silniční laboratoři lze zjišťovat například kvalitu spojení jednotlivých vrstev, obsah asfaltového pojiva a zrnitost směsi kameniva, mezerovitost asfaltové směsi, míru zhutnění a mezerovitost vrstvy, odolnost asfaltové směsi proti trvalým deformacím či vlastnosti zpětně získaného asfaltového pojiva.

Na jádrových vývrtech odebraných z cementobetonového krytu a lze určit pevnost betonu v tlaku a v tahu za ohybu. V CDV jsme dále schopní nad rámec stanovení fyzikálně mechanických vlastností provádět analýzu vzorků polarizačním mikroskopem (petrografie kameniva), skenovacím elektronovým mikroskopem, energiově disperzním analyzátozem a petrografickým či chemickým rozbozem.

Jádrové vývrty jsou nejběžněji odebírány prostřednictvím silniční vrtačky postavené na podvozku přívěsu. Součástí je nádrž s vodou o objemu 200 l na chlazení jádrové korunky při vrtání. Pro pohon vrtačky se používá benzínový motor o výkonu 5 kW, který je také součástí soupravy (obr. 5).



**Obr. 5** Odběr jádrového vývrty, zdroj: CDV



**Obr. 6** Jádrový vývrt, zdroj: CDV

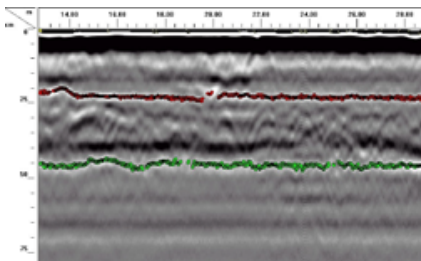
## 6. Georadar

Tato metoda je založena na opakovaném vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického (EM) signálu v rozsahu od několika set MHz do několika GHz do zkoumaného prostředí a záznamu odrazu části energie tohoto signálu od rozhraní vrstev a různých materiálů [4]. Nejčastější aplikace v oblasti dopravní infrastruktury jsou následující stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovek, detekce dutin pod krytem vozovky, detekce nadměrného obsahu vody v konstrukčních vrstvách vozovek apod.

Tloušťky konstrukčních vrstev vozovky se počítají ze změřeného času průchodu signálu konstrukčními vrstvami vozovky a z určené rychlosti šíření EM signálu. Obvykle se pro účely stanovení rychlosti šíření EM signálu jednotlivými konstrukčními vrstvami vozovek provádí minimálně jeden jádrový vývrt. Tímto způsobem se kalibrují stanovené tloušťky vrstev. Přesnost při stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovek se pohybuje v rozsahu 3–15 %, v závislosti na porušení vrstev, druhu materiálu jednotlivých vrstev a požadovaném hloubkovém dosahu použité antény. Dle našich zkušeností jsou pro účely kontinuálního měření tloušťek krytových vrstev vozovek vhodné trychtýřové antény s centrální vysílací frekvencí 1 až 2 GHz (obr. 7). Pro účely měření tloušťek podkladních vrstev vozovek je vhodné použití antény s centrální vysílací frekvencí 400 až 900 MHz, ideálně v kombinaci s měřením trychtýřovou anténou. Měření je možné provádět za vysokých rychlostí až 80 km/h s krokem měření od 5 cm, viz záznam z měření na obr. 8.



**Obr. 7** Příklad zařízení pro měření tloušťek vrstev vozovky, zdroj: CDV



**Obr. 8** Záznam tloušťek konstrukčních vrstev vozovky - radargram, zdroj: CDV

## 7. Laserové skenování

Moderní měřicí vozidla jsou vybaveny technikou pro zaznamenávání proměnných parametrů vozovek a snímání jejich povrchu - například systém RST snímá podélný profil a makrotexturu ve třech stopách. Systém LCMS dokáže skenovat povrch ve 3D s rozlišením lepším, než jeden milimetr, přičemž zvládá jeden příčný sken každých 5 mm i při rychlosti 90 km/h. Vozidla také mohou disponovat systémem automatického rozpoznávání a klasifikace poruch vozovky (především trhlin). Výhodou je, že všechna



měření mohou probíhat současně, jsou synchronizována a georeferencována. Systém funguje při běžných rychlostech silničního provozu, není proto potřeba nijak omezovat dopravu na měřené komunikaci. Laserová měření nejsou závislá na světelných podmínkách, avšak nelze měřit na mokré vozovce.

Automatizované zpracování dat poskytuje objektivní informace o stavu silniční sítě. Měřící vozidlo vybavené laserovým systémem dokáže v krátkém čase poskytnout zásadní informace pro vlastníky a správce komunikací pro oblast kontroly a plánování běžné údržby a systémy hospodaření s vozovkou.

V praxi se měření provádí zejména u nových vozovek před jejich přijímkou, opakovaně se kontrolují parametry vozovek v průběhu záručních lhůt. Díky rychlosti měření lze kontrolovat stav vozovek během jejich životnosti i u rozsáhlých sítí komunikací [5].



**Obr. 9 Multifunkční měřící systém - CleveRa Car [5]**

## 8. Termografie

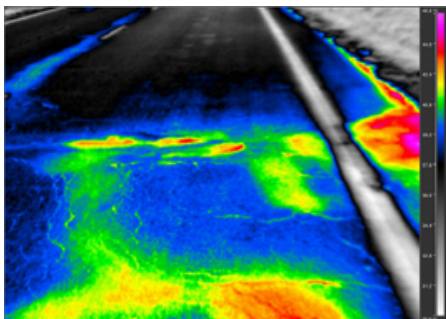
V CDV se zabýváme výzkumem v oblasti použití termografie při diagnostice vozovek pozemních komunikací. Při měření používáme jak ruční termokameru, tak i termokameru připevněnou na měřící vozidlo. Výsledkem měření jsou termogramy znázorňující povrchové rozložení teplot na vozovce. Ukazuje se, že na některých termogramech jsou například trhliny ve vozovce (obr. 10) lépe rozeznatelné, než na běžné kameře.

Asi více praktické je využití termokamery při pokládce nových asfaltových vrstev vozovek (obr. 11). V této aplikaci se již termokamera v některých zemích používá. Při pokládce asfaltových vrstev je důležité, aby asfaltová směs měla správnou teplotu. Příliš studená směs zhoršuje zpracovatelnost, snižuje se schopnost asfaltovou vrstvou dostatečně ztuhnout. Výsledkem je zvýšená mezerovitost, která potenciálně může vést

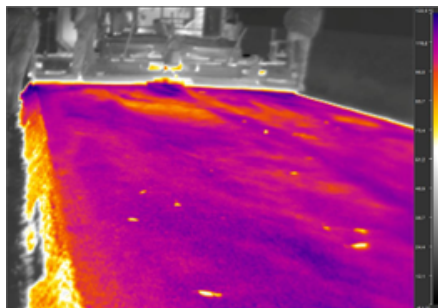
k budoucí tvorbě poruch. Případně může docházet k problémům spojených s přítomností vlhkostí v konstrukci.

Hlavní příčiny nadměrného vychladnutí směsi jsou příliš dlouhý časový interval mezi naložkou a vykládkou, nesprávné naložení nákladu a absence plachty či jiných prostředků určených k omezení nadměrného ochlazování směsi během přepravy.

Termokameru lze využít jako nástroj pro ověření správné teploty asfaltové směsi při její pokládce a tedy i pro kontrolu kvality práce. Termografie může do jisté míry přispět k prodloužení životnosti asfaltových vozovek a zároveň pomoci snížit náklady na budoucí opravy.



**Obr. 10** Termogram povrchu vozovky, zdroj: CDV



**Obr. 11** Termogram pořízený při pokládce asfaltové vozovky, zdroj: CDV

## Poděkování

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

## Literatura

- [1] NEKULA, L. Skutečně děláme vše pro to, aby silnice byly „odpouštějící“? In: *Konference asfaltové vozovky 2015: 24. - 25. 11. 2015, České Budějovice*. Praha: PRAGOPROJEKT, 2015. ISBN: 978-80-903925-7- 1.
- [2] NEKULA, L. *Technická specifikace zařízení TRT*. Vyškov: Měření PVV, 2012.

- [3] BECKEDAHL, H. J., KRARUP, J., FERNE, B. 2015. Optimierung der Erhaltungsplanung durch den Einsatz des Tragfähigkeitsmesssystems Traffic Speed Deflectometer (TSD) für die Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB). In *Straße und Autobahn*. 2015, no. 3, p. 202 - 209. ISSN 0039-2162.
- [4] STRYK, J. Uplatnění nových diagnostických metod při hodnocení stavu vozovek PK. In: *Silniční konference 2017: sborník příspěvků*, Brno, 18. - 19. 10. 2017, s. 107 - 111.
- [5] VARS, 2018 [online] VARS Brno a.s. [Cit. 29. 9. 2018]. Dostupné z: <http://www.vars.cz/clevera-car-zakladni-informace-o-multifunkcnim-vozidle>
- [6] JANKŮ, M. a STRYK, J. Metodika pro termografické měření objektů dopravní infrastruktury. In: *Defektoskopie 2017, 47. mezinárodní konference: 7. – 9. 11. 2017, Chomutov, Česká republika*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2017, 97 - 108. ISBN 978-80-214-5592-4.
- [7] JANKŮ, M. a STRYK, J. Využití infračervené termografie při pokládce asfaltových vrstev vozovky. In: *Konference Asfaltové vozovky 2017: 28. - 29. listopadu 2017, České Budějovice*. Praha: PRAGOPROJEKT, 2017. ISBN 978-80-906809-0-6.
- [8] STRYK, J., JANKŮ, M., GROŠEK, J., BŘEZINA, I. Diagnostika objektů dopravní infrastruktury nedestruktivními metodami. *Silniční obzor*, 2017, roč. 78, č. 12, s. 323-327. ISSN 0322-7154.





## **ADVANCED ROBOTIC INSPECTION SCANNERS**

**R. KADERÁBEK\*, J. BOHÁČOVÁ\*, M. GHITA\*, M. HALÁK\*, J. UHER\***

\*Radalytica a.s., Technologická 945/10, Holice, 779 00 Olomouc

Contact e-mail: richard.kaderabek@radalytica.com

### **Abstract**

*Modern robotic manipulators are finding their use not only in production lines, but also in non-destructive testing. Radalytica a.s. has developed versatile robotic scanners for X-ray radiography, computed tomography and ultrasound inspection.*

*The system implements a pair of Universal Robots UR5e manipulators. The first of them carries a compact X-ray tube. The second one holds a spectral photon-counting X-ray detector produced by Czech company Advacam s.r.o. The scanner generates over 200MPixel images with spatial resolution at level of 55  $\mu\text{m}$ . The flexibility of robot movements also allows rotating with the X-ray tube/detector pair around the sample measuring data for computed tomography (CT). The high sensitivity of photon counting detectors allows performing inspection of large light composite objects to detect cracks, impurities or even fiber orientation.*

*The X-ray tube and detector can be complemented by other imaging modalities such as air-coupled ultrasound probes. The air-coupled ultrasound sensors are particularly powerful for detection of delaminations in composites which are "invisible" to X-rays. The combination of X-rays and ultrasound allows detection of majority of flaws in composite materials.*

*Further development of the scanner focuses on additional techniques such as X-ray diffraction (XRD). Thanks to the new generation of detectors and robotics, it could be also applied to nondestructive testing of large object.*

**Key words:** *robotic inspection*

### **1 Introduction**

Radalytica a.s. is developing and producing X-ray imaging systems that combine a new generation of X-ray imaging detectors and air-coupled ultrasound testing with the flexibility of collaborative robots. We are building systems that achieve an excellent imaging quality for non-destructive testing of light advanced materials.

### **2 X-ray imaging**

X-rays reveal internal structures of inspected samples. The principle of the transmission X-ray imaging is in Fig.1. An X-ray beam emitted by a tube passes through an inspected object

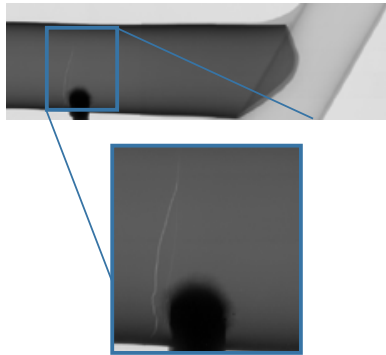
and casts a shadow. The shadow intensity depends on structure and composition of the sample. The shadow is recorded by an imaging detector. Both the X-ray tube and the detector in classical X-ray imaging systems are either fixed or can move only in a limited range of directions (up/down/left/right). There is typically no flexibility to rotate about an arbitrary axis, i.e. to easily look at the sample from different angles. Changing the view often requires rearranging the tube/detector pair in respect to the sample.

Common is only rotation about one axis in Computed Tomography. It is also not easy or possible at all to automatically inspect small parts of larger structures. An example could be welds of A, B and C pillars of a car body that are important for structural strength yet hard to inspect with classical devices especially in a production line.

Contrary to the classical X-ray system, the robotic one allows nearly arbitrary flexibility of view angles. This is shown on an example of a high-performance titanium bike frame. The resulting X-ray image with identified defect is shown in Fig.2.



**Fig.1** The transmission X-ray imaging principle is that X-rays emitted by an X-ray tube are passing through the object. The object casts a shadow in the X-ray spectrum. The shadow is detected by an imaging detector revealing the internal sample structure.



**Fig.2** *Left: the robotic X-ray imaging system. The rear robot arm holds an X-ray tube, the front robot moves with the imaging detector. The sample, a titanium bike frame, is mounted between them. Right: the resulting X-ray image of the titanium bike frame with a well visible crack.*

The robotic system implements an entirely new generation of single-photon counting X-ray imaging detectors produced by Czech company Advacam s.r.o. [1]. The detector technology originates from the Medipix collaboration [2] lead by CERN [3]. The imaging detectors provide an excellent sensitivity thanks to the use of direct conversion semiconductor and semi-insulator sensors such as Si, CdTe or CZT. The photon-counting principle eliminates all sources of noise other than the Poisson noise of the random photon detection. Moreover, the detectors can discriminate different wavelengths of X-rays, which opens new applications of X-ray imaging.

The major advantages of the robotic scanner based on pair of robotic arms and photon counting X-ray detectors are:

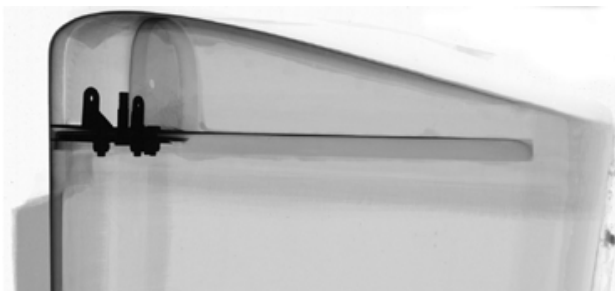
- high resolution (55  $\mu\text{m}$  or better) imaging of large objects,
- fully digital data acquisition,
- real-time imaging with immediate viewing angle and position control,

- variety of scanning modes for different sample types,
- arbitrary plane of scanning or scanning over a complex shape,
- spectral X-ray imaging for material identification.

## 2.1 The robotic scanner = intuitive X-ray imaging

The key parts of the scanner are two robotic arms. The first arm holds an X-ray tube, the second one holds an imaging detector. Thanks to the robots the X-ray tube/detector pair can move and rotate freely about the sample. The robots are moving synchronously so that the mutual position of the X-ray tube and detector is kept the same under all circumstances.

The sensitivity and image quality of photon counting detectors allows X-ray imaging of light materials such as composites. That makes the system an ideal tool for instance for X-ray imaging of composite materials in aerospace industry. An example of X-ray scan is in Fig.4.



**Fig.3** An overview scan of a glider rudder top part done in the scanning mode, where the stationary X-ray tube aims towards the moving detector. This scanning mode is suitable for thick objects.

The scanner system includes:

- The photon counting X-ray imaging detector **Widepix 1x5 MPX3 Si or CdTe** [5]. It is a new generation of X-ray imaging detectors based on Medpix3 chip with two energy discrimination thresholds per pixel allowing measuring the wavelength of X-rays.
- Pair of collaborative robotic arms Universal Robots **UR5e** [6].
- X-ray tube **Oxford Instruments Apogee** (50kVp @ 1mA, 30 μm spot size, Be window).
- **X-ray shielded cabinet** 1.8x1.8x1.8 m (WxHxL) including interlocks and safety warning light.
- Control PC or Mac.
- Scanner control and data processing software.



## 2.2 Scanning modes

The imaging detector's sensitive area is relatively small. It is typically 14x70 mm. A large X-ray image is acquired by repositioning the X-ray tube and detector and measuring an array of images. These images are automatically stitched into a final large area image.

The plane of scanning can be easily defined manually by the "free run" mode where the robots can be moved by hand to a required position and tilt. The position can be also controlled from the software interface. This is especially useful for scanning of large samples with complex shapes. The scans can be performed at an arbitrary scan plane orientation with scan area of up to 1.0x0.7 m<sup>2</sup>. That corresponds to over 200M pixels large image.

The system supports several different scanning approaches. Each is designed for a different type of samples.

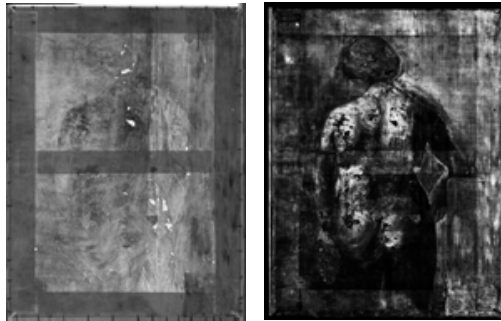
### 2.2.1 2D scans with stationary X-ray tube

This is the basic scanning mode suitable for most of sample types. The X-ray detector is moving. The X-ray tube remains at the same location and it is rotated to aim towards the detector. This mode mimics a situation where an X-ray tube with a large emission angle would be used.

This mode of scanning is particularly useful for overview scans of thicker samples, such as wings, rudders, etc.

### 2.2.2 2D scans of thin samples

Thin samples can be scanned using a mode where both the X-ray tube and the detector move together. The advantage of this scanning mode is that the X-ray tube / detector distance can be short, hence the X-ray intensity higher and scanning faster. This is particularly important for the X-ray hyperspectral imaging where the whole spectrum is measured. The advantage of the hyperspectral X-ray scanning is nicely demonstrated on a painting from 19th century where the spectral signal of lead containing pigment could be extracted revealing an overpainted nude (Fig.5). The spectral information can be used in heterogenous samples where different materials need to be identified.



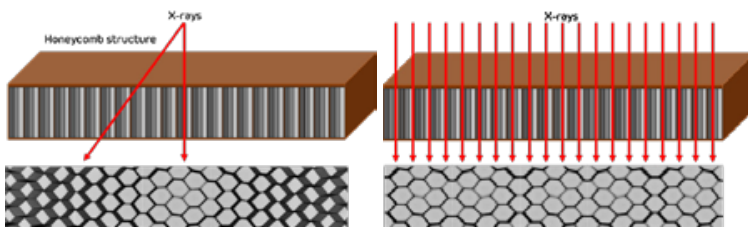
**Fig.4** Left: a common X-ray scan of a painting, right: the spectral information was used to extract the lead containing pigment signal revealing overpainted layers of a hidden painting. The scan was done in the mode where both the X-ray tube and the detector move together.

### 2.2.3 Scans with no parallax distortion

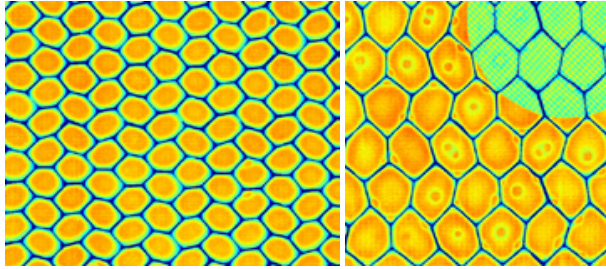
Samples with a significantly dominating orientation of some internal structures suffer from the effect of parallax.

This is illustrated on a honeycomb structure where gluing of an aluminium mesh to the top and the bottom skin has to be inspected. It is not possible to see the gluing well in X-ray images distorted by the parallax (Fig.5, left). Therefore, the scanner offers the “parallel” beam scanning mode that virtually creates a large parallel X-ray beam (Fig.5, right). It is achieved by performing smaller steps between measured image tiles. The software then automatically stitches the set of images together.

All cells of the honeycomb are then imaged with X-rays parallel to the cell walls. Any defects in the gluing are easily detectable in such images (Fig.6).



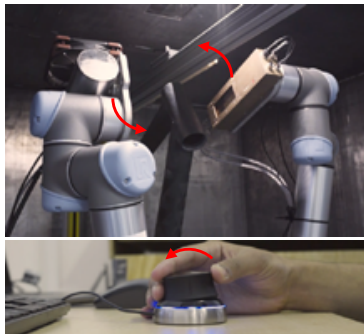
**Fig.5** Demonstration of the parallax effect on a honeycomb composite. Left: the cells further away from the image center are viewed under angle due to the divergence of the X-ray beam. Right: The honeycomb structure imaged with a parallel beam of X-rays - all cells are well visible.



**Fig.6** X-ray scan of the honeycomb composite. The image is shown in pseudo-colors to better visualize the gluing. Bubbles or missing glue is easily visible in the scan. Even the carbon fiber bundles in the skin can be observed. The image is shown in the full resolution on the right side.

#### 2.2.4 Real time X-ray inspection

The previously described scanning modes are used to create an overall image of the structure. However, the system can be switched to a real-time imaging mode where the robot position and orientation is controlled via a 3D mouse while the imaging detector is streaming images onto a screen.



**Fig.7** X-ray view can be controlled online using a 3D mouse. Position, pitch, yaw and roll of the view can be smoothly changed while observing real-time X-ray images.

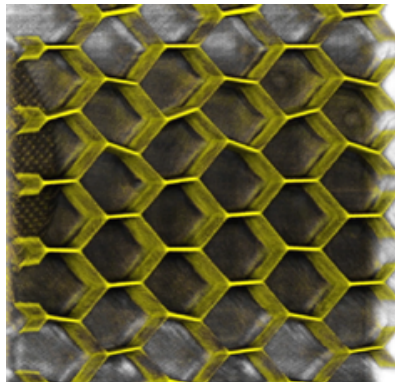
The 3D mouse allows the full control of position, pitch yaw and roll of the X-ray image view. The X-ray image of the given sample area is shown in real-time on the screen. The smooth manual control of the view with the online image stream creates a perfect tool to localize defects in the inspected structure in 3D.

The immediate feedback between the manual view direction control and the X-ray image is what makes the system very intuitive to use. Thanks to the link between the image and our action, our brain is able to create a very clear idea about the 3D structure of the sample. Hence, localizing defects in an inspected structure is intuitive and simple.

### 2.2.5 Computed Tomography

In case the real-time viewing is not sufficient, the system allows measuring the full 3D data using Computed Tomography (CT) approach. The X-ray/detector pair is in this case navigated by robots around the inspected object measuring a sequence of X-ray projections. These are processed by regular CT reconstruction tools. The Fig.8 shows a reconstructed volume corresponding to the sample of honeycomb structure scanned 2D in Fig.6. The spatial resolution of the reconstructed volume is at about 50  $\mu\text{m}$ .

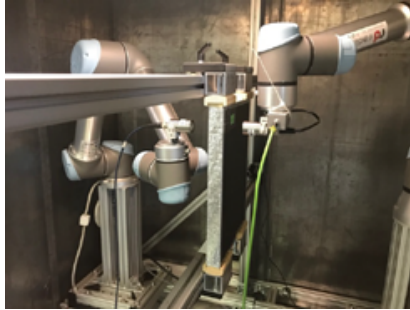
Just by re-programming the movements, the robotic system allows switching between computed-tomography and tomosynthesis. Therefore, it is possible inspecting a broad range of sample sizes and shapes. This is a major advantage compared to common industrial CT or tomosynthesis systems that are tailored to only one type of inspection.



**Fig.8** Visualisation of the honeycomb structure. It is the same sample as in Fig.6 except in this case the full 3D data were acquired.

### 2.3 Air-coupled ultrasound testing

X-ray and ultrasound imaging are sometimes considered as competitive methods in non-destructive testing. However, at least in case of composites, these two techniques are complementary. Therefore, Radalytica a.s. and SONOTEC GmbH [7] run feasibility tests of ultra-sound inspection using Radalytica's robotic system.



**Fig.9** The robotic arms hold ultrasonic transducers that are moving along the scanned object. Attenuation of the sound wave is measured and image created.

The robotic scanner was modified to carry SONOTEC air-coupled ultrasound transmitter and receiver (Fig.9). The ultrasound is passing through an examined sample and ultrasound attenuation is measured. The robotic arms are repositioning the transmitter/receiver pair creating an area scan. A series of samples was scanned by the ultrasound technique and X-rays to provide comparison.

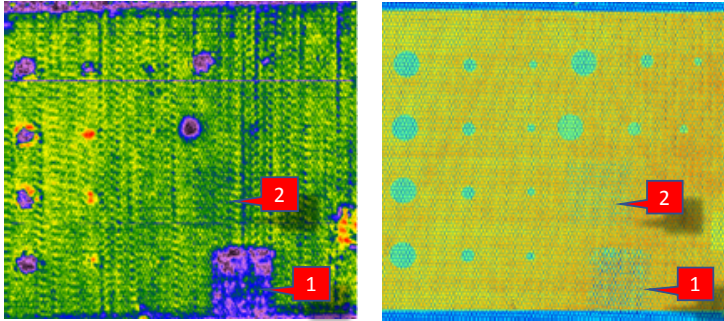
### 2.3.1 X-rays vs air-coupled ultrasound testing

The following table summarises comparison of both methods implemented in the robotic system:

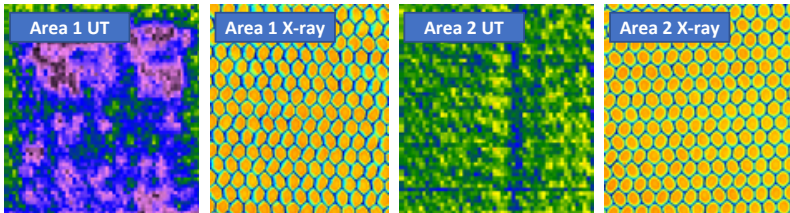
	<b>Air-coupled UT</b>	<b>RTG</b>
<b>Spatial resolution</b>	0.5 to 1 mm	0.03 to 0.06 mm
<b>Realtime inspection</b>	No	Yes
<b>Computed Tomography</b>	No	Yes
<b>Delamination detection</b>	Yes	No
<b>No shielding required</b>	Yes	No
<b>Inspection of structures in several layers</b>	No	Yes
<b>Parallel beam scanning</b>	Yes	Yes

The method was initially tested on a honeycomb sandwich panel shown in Fig.9. The resulting UT and X-ray images are in Fig.10. The area marked 1 in the scanned image contains a damaged mesh structure. Both X-ray and UT detects this area easily. X-rays in

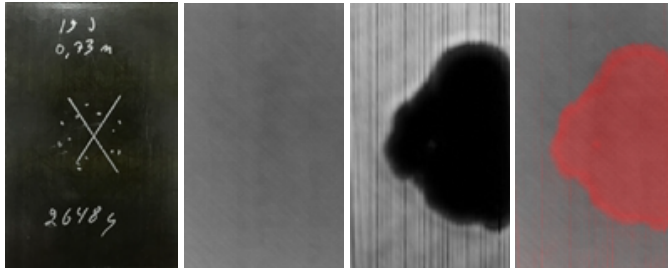
addition reveal the extend of aluminum structure damage. The area 2 contains excessive glue. It is at the limit of detection by UT and probably would be missed under real conditions. On the other hand, X-rays reveal this area easily. The X-ray image also shows the general orientation of fiber bundles in the skin (diagonal stripes across the image). The high resolution of X-rays also allows inspection of the Al honeycomb quality. I.g. detection of aluminum layers disbonded from each other. Details of both areas are shown in Fig.11.



**Fig.10** Honeycomb sandwich panel with artificial defects in skin-to-honeycomb connection. Left: UT scan, right: X-ray scan. Both scans show the artificial circular inserts simulating disconnection of the honeycomb from the skin. The X-ray can detect all insert sizes. UT detects inserts at level of ~4 cells. The disbonding between the skin and mesh is simulated by inserted circles of various sizes. The X-ray can detect all insert sizes. UT detects inserts at level of ~4 cells.



**Fig.11** The UT and the X-ray of the honeycomb. The area 1 is a damaged aluminum honeycomb. Both methods detect the damage and the X-rays also clearly show the extent and the type of damage. The area 2 contains excessive glue. The X-ray image shows this area at a high resolution and also allows estimation of the excessive glue amount. UT does not detect this area with a sufficient reliability.



**Fig.12** Composite with impact damage causing delamination. From left: photo, X-ray scan, UT scan, combined UT+X-ray. The X-ray image again reveals orientation of fiber bundles and the delamination defect is perfectly detected with UT.

Another demonstration of X-ray and UT complementarity is shown on a carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The sample was intentionally damaged by an impact creating a dent on the composite surface (Fig.12). Even though the damaged area on the surface is only about 10 mm in diameter, underneath the impact caused large delamination. This is a typical type of damage where the ultrasound technique excels and delamination is detected easily. The X-ray scan on the other hand shows the structure of CFRP composite including fiber bundles. The ultrasound and X-ray scans were combined into a single picture. The red color indicates delamination and luminosity (brightness) in the image coming from the X-ray scan.

## 2.4 Conclusion

Non-destructive testing scanners produced by Radalytica a.s. combine three advanced technologies: robots, new generation of digital X-ray photon-counting imaging detectors and air-coupled ultrasound transducers. The robots give the system excellent flexibility and thus also extend the range of scannable objects. The robots can follow curved paths or rotate about the inspected object to collect data for tomosynthesis or computed tomography. The combination of X-ray imaging and ultrasound enables detection of a very board range of flaws in light, composite materials.



**Fig.13** *The flexibility of robotic scanner is in the image on the left: robots can be installed even inside an aircraft inspecting areas otherwise difficult to access. Right: the robot on motorized rails to extend the scanning range allowing inspection of very large objects like wings.*

Radalytica continuously works on robotic scanner improvements, extensions and upgrades. The next system upgrade will be in a new robot support structure. It will allow easy installation in environments like hangars or even inside aeroplanes for in-situ inspection (Fig.13).

The new X-ray detectors also allow simplifying methods like X-ray diffraction (XRD) to study crystalline structure of inspected object or fibre orientation in composites. Therefore, the next development will focus on XRD implementation into the scanner allowing extending the XRD measurement from small samples measured in laboratory to large area objects.

The robotic system is a multimodal imaging platform that enables integration of many imaging methods and techniques for NDT.

## 2.5 References

- [1] Advacam s.r.o., Prague, Czech Republic, <https://advacam.com>
- [2] Medipix collaboration, Geneva, Switzerland, <https://medipix.web.cern.ch>
- [3] CERN, Geneva, Switzerland, <https://home.cern>
- [4] AdvaPIX 2(1)x5 MPX3, <https://advacam.com/widepix>
- [5] Universal Robots, Odense, Denmark, <https://www.universal-robots.com>
- [6] SONOTEC GmbH, <https://www.sonotec.eu>
- [7] J. Jakubek, "The X-ray diffraction (XRD) with Timepix3 detector and polychromatic beam," <https://www.linkedin.com/pulse/x-ray-diffraction-xrd-timepix3-detector-polychromatic-jan-jakubek/>





## **NEDESTRUKTIVNÍ METODY V RESTAURÁTORSKÉM PRŮZKUMU**

### **NON-DESTRUCTIVE METHODS IN THE RESTAURANT SURVEY**

**Bernard KOPEC**

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

#### **Abstrakt**

*Historici umění, restaurátoři, znalci umění, soudci našli v nedestruktivním zkoušení výtvarných uměleckých děl, využívajících především rentgenové záření a infračervené záření, velmi užitečného pomocníka. Rentgenové a infračervené záření se ve výtvarném umění využívá ve dvou oblastech: při zjišťování historických souvislostí tvorby výtvarného díla restaurátory a historiky umění a při odhalování padělků uměleckých děl znalci a pro soudní účely. V obou případech nedestruktivně, bez jakéhokoliv poškození uměleckého díla nebo odebrání vzorků pro zkoumání. Paprsky rentgenu pronikají několika vrstvami malby nebo sochy a vypovídají nejen o autentické struktuře díla, ale i o tajemstvích skrytých pod povrchem. Prezentace rentgenologického průzkumu Křížové cesty na Orlici J.W.Bergla.*

**Klíčová slova:** výtvarné umění, restaurování výtvarného díla, rentgenové záření, infračervené záření, historie uměleckého díla, padělky výtvarného díla, Křížová cesta, Orlice, J.W.Bergl

#### **Abstract**

*Art historians, restorers, art connoisseurs, the judge found in non-destructive testing of works of art, primarily using X-rays and infrared thermography, a very useful helper. X-rays and infrared thermography are used in the fine arts in two areas: on the historical context detection creation of artwork in the restoration and history of art and the detection of counterfeit artworks of art connoisseurs and judicial purposes. In both cases without any damage to the artwork or the taking of samples for the study as the use of other method. X-rays penetrate several layers of paintings or sculptures and reveal not only the authentic structure of the work, but also the secrets hidden beneath the surface layers of painting or sculpture materials. Presentation of X-ray exploration of the Way of the Cross on Orlice J. W: Bergl.*

**Key words:** fine art, X-rays, infrared thermography, history of art work, counterfeit artworks, Way of the Cross, Orlice, J.W.Bergl

## NDT používané ve výtvarném umění

Z nedestruktivních metod, které používaných v průmyslové defektoskopii se ve výtvarném umění používají dvě a to zkoušení prozařováním, nazývané v tomto případě rentgenologie a zkoušení infračervenou termografií nazývané v tomto případě infračervená reflektografie. Vedle pojmenování Nedestruktivní metody se užívá termín neinvazní metody, ke kterým se zahrnují klasické zobrazovací metody jako chemické metody a fotografie ve viditelném světle.

Nedestruktivní metody přinášejí zásadní informace o:

- struktuře a výstavbě obrazu,
- rukopisu,
- tvůrčím přístupu umělce,
- použitých materiálech,
- skutečném stavu díla a jeho poškození.

Tyto informace jsou nesmírně cenné nejen pro restaurátory při samotné opravě, ale i pro poučení historikům umění, kteří tak mají jedinečnou možnost sledovat charakteristiku autorova rukopisu přímo ve spodních vrstvách, kde původní malířovy záměry ještě nejsou zjemněny finálními tahy. Všechny tyto informace, dnes v digitálním zpracování slouží soudním znalcům a majitelům aukčních síní pro rozpoznávání padělků při aukci a prodeji uměleckých děl.

I když se jim běžně říká metody moderní s ohledem na stále se zdokonalující diagnostická zařízení, především japonské výroby, které byly prezentovány i na poslední evropské konferenci v Praze 2014. Rentgenu bylo poprvé použito k přezkoumání obrazu Madony se sv. Janem Křtitelem Leonarda již v roce 1940.

Rentgenologický průzkum je stěžejním nedestruktivním zdrojem poznání způsobu výstavby obrazu. Stínové zobrazení vlastní malby je založeno na atomové hmotnosti jednotlivých pigmentů. Čím vyšší atomové číslo daný pigment má, tím větší je jeho absorpce rentgenového záření. Atomové číslo hmotnosti závisí především na přítomnosti těžkých kovů v pigmentu. Při sledování spodních vrstev malby nejvíce pomáhá rentgenový obraz olovnaté běloby. Rentgenové záření o krátkých vlnových délkách 10 nanometrů až 1 pikometr prochází analyzovaným materiálem, míra absorpce je přímo úměrná hustotě analyzovaného materiálu, resp. atomovému číslu analyzovaného prvku. Je silně pohlcováno těžkými kovy, např. Pb., Hg, Ba. V rentgenové transmisní radiografii dochází tak při průchodu rentgenového záření objektem k útlumu jeho intenzity. Zobrazovací detektor umístěný za objektem zaznamená změny intenzity záření, které jsou pro jednotlivé materiály charakteristické.

K získání rentgenových snímků se v praxi restaurátorského průzkumu používají nejvíce konvenční medicínské rentgeny a lékařské rentgenové výpočetní tomografy.

Rentgenové snímky umožňují díky značné penetrační hloubce rentgenového záření odlišit velkoplošné přemalby, odhalit spodní vrstvy malby, pentimenti, určit rozsah druhotných zásahů, charakterizovat podložku.

Nejmenší absorpční schopnost mají naopak barvy rostlinného a živočišného původu a pigmenty bituminózní.

Další, dnes velice používanou metodou jsou techniky, využívající infračervené záření. Infračervený obor spektra se dělí na více podoborů, pro infračervenou reflektografii (IR) je nejdůležitější tzv. blízká infračervená oblast (NIR) od 780 do 1400 nm, případně i oblast krátkých vlnových délek (SWIR) od 1400 do 3000 nm. Snímky, získané IR reflektografií umožňují pozorovat autorskou techniku malby, identifikovat vlastní podkresbu, pentimenti i skryté signatury nebo nápisy. Běžně používanými přístroji jsou vidiové kamery Hamamatsu v kombinaci s červenými výbojkami. Speciální kamery nebo infračervené skenery snímají ve vysokém rozlišení až do 1700 nm.

## **Restaurování souborů obrazů čtrnácti zastavení Křížové cesty z Orlice**

Ve shodě s Benátskou chartou, musí být restaurování uměleckých a uměleckořemeslných děl provázeno dokonalou dokumentací v podobě analytické a kritické písemné zprávy ilustrované např. kresbami, kopiemi, fotografiemi, plány aj. Musí být zaznamenány podmínky, v nichž se památka nachází, technické a formální znaky vztahující se k procesu jejího vzniku a historii. Dále by měly být dokumentovány všechny fáze restaurování a všechny užití materiály a metody. Tato dokumentace by měla obsahovat přesné údaje o termínech průzkumů, diagnos a opatření. Tradiční metody psané a grafické dokumentace je možné doplnit digitálními metodami. V posledním době jsou klasické chemické metody nahrazovány efektivnějšími nedestruktivními (neinvazními) metodami rentgenovými a metodami používajícími infračervenou termografii.

Kristovy pašije, jeho umučení a zmrtvýchvstání představují hlavní mystérium křesťanské víry. S jejich zobrazením se setkáváme již od raného středověku, kdy se postupně stávaly prostředníkem k navázání niterného vztahu věřících s trpícím Ježíšem.

Obrazový soubor Křížové cesty z kostela Nanebevzetí Panny Marie v Orlici u Letohradu reprezentuje poměrně početnou řadu prací z 18. století ve východních Čechách vzniklých rukama ve Vídni usazených malířů. Jedním z takových vídeňských malířů, zasahujícím svoji tvorbou do oblasti východních Čech, byl také ve Dvoře

Králové nad Labem narozený Johann Wenzel Bergl (1718-1789), autor obrazů orlické Křížové cesty.

Rentgenologický průzkum Křížové cesty od Johanna Wenzela Bergla začal být prováděn v roce 2010 v rámci grantu Pardubického kraje jako první krok, vedoucí k úplné rehabilitaci tohoto významného souboru maleb. V rámci průzkumu bylo provedeno celkem 37 snímků z důležitých partií všech obrazů souboru. Na rentgenogramech se rozehrává celá škála Berglova mistrovství – rentgenové záznamy spodních vrstev malby jsou příznačné svojí expresí a rozmanitostí v přístupu k jednotlivým zobrazovacím detailům – od uvolněných tahů, spojujících ještě mokré barevné pasty v chvějivé „belle matiere“, krásné hmotě barvy, která činí z dvourozměrného záznamu výtvarné vize vpravdě trojrozměrný zážitek, až po ukázněné, kresebně brilantní finální detaily, podtrhující nejvyšší světelné akcenty.

Kvalitativně se ze souboru poněkud vymyká zastavení č. XI., obraz s největším poškozením. Prohlídka RTG snímku ukázala na pravděpodobný vyšší podíl dílenské práce, kdy tento obraz byl před 15 léty restaurován. Analýzou se dospělo k názoru, že autor měl před malbou vše dostatečně promyšlené a maloval bez dalších oprav a domalování. Přesto rentgenem byly zjištěny na některých obrazech drobnější i rozsáhlejší autorské změny – pentimenty. Nejzásadnější nález se objevil na obraze XII. Zastavení, kde průzkum zachytil významné změny v pozici hlavy Panny Marie a rukách sv. Jana Evangelisty. Tyto změny souvisí nikoliv s prostou změnou kompozice, ale se změnou citového náboje výjevu. Rentgenologický průzkum prokázal mimořádnou kvalitu malířského rukopisu i autorské změny v průběhu procesu vzniku díla. U každého z obrazů proběhl kompletní postup restaurátorských prací od nedestruktivního průzkumu, přes stabilizaci plátna a malby až po postupné čištění povrchu, tmelení a závěrečnou retuš.

Restaurátorské práce provedli v letech 2010-2018 restaurátoři Šárka a Petr Bergerovi. Výstava v Arcibiskupském muzeu v Olomouci, připravena kurátorkou Helenou Zápalkovou ve dnech 14. 2 – 19. 5. 2019, přiblížila náročný projekt záchrany souboru Křížové cesty, který by nemohl být uskutečněn bez použití nedestruktivní rentgenovy metody.

## Literatura

- [1] ZÁPALKOVÁ, H.: Křížová cesta z Orlice, Muzeum umění Olomouc 2019
- [2] BERGEROVI, Š. a P: Rentgenologický průzkum Křížové cesty na Orlici od J. W. Bergla, Muzeum umění Olomouc 2010



## W. C. RÖNTGEN A STOLETÍ RENTGENOVÉ DEFEKTOSKOPIE

## W. C. RÖNTGEN AND THE CENTURY RENTGEN DEFECTOSCOPY

**Bernard KOPEC**

Quality Testing Ultrasound

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

### **Abstrakt**

*Neobvyklý pohled do historie využití rentgenu při zkoušení materiálů a výrobků od objevu rentgenových paprsků po dnešek. V počátcích výzkumu rentgenového záření se uplatnilo mnoho významných vědců jako sir William Crookes, Johann Wilhelm Hittorf, Eugene Goldstein, Heinrich Rudolf Hertz, Philipp Lenard, Hermann von Helmholtz, Nikola Tesla, Thomas Alva Edison a Charles Glover Barkla. Wilhelm Conrad Röntgen německý vědec, 8. listopadu 1895 začal provádět a zaznamenávat experimenty s rentgenovým zářením ve vakuové trubici. Použití rentgenologie spolu s gamagrafií v nedestruktivním zkoušení materiálů a výrobků je disciplínou mladší, porovnájí-li se s aplikací rentgenového a gama záření v lékařství a jiných oborech fyziky. Málo známe skutečnosti bohatého života objevitele rentgenových paprsků W. C. Röntgena, velkého fyzika a pokorného člověka. Pohled do historie české radiografie. Začátek české rentgenové defektoskopie možno datovat třicátými léty minulého století, kdy tuto metodu zaváděli Faltus a Baimler ve Škodových závodech.*

**Klíčová slova:** historie, nedestruktivní zkoušení, rentgen, zkoušení materiálů a výrobků, fyzika, W.C.Röntgen, M.Baimler

### **Abstract**

*An unusual look at the history of X-ray usage in testing materials and products from the discovery of X-rays to today. Many prominent scientists such as Sir William Crookes, Johann Wilhelm Hittorf, Eugene Goldstein, Heinrich Rudolf Hertz, Philipp Lenard, Hermann von Helmholtz, Nikola Tesla, Thomas Alva Edison and Charles Glover Barkla have been involved in X-ray research. Wilhelm Conrad Röntgen German scientist, November 8, 1895 began to perform and record X-ray experiments in a vacuum tube. The use of X-rays together with gammagraphy in non-destructive testing of materials and products is a younger discipline when compared to X-ray and gamma radiation applications in medicine and other fields of physics. Little known facts of the rich life of the discoverer of X-rays W.C. Röntgen, a great physicist and humble person. A look at the history of Czech radiography. The beginning of the*

*Czech X-ray defectoscopy can be dated back to the 1930s when Faltus and Baimler introduced this method in the Škoda Works.*

**Key words:** *history, non-destructive testing, X-ray, testing of materials and products, , physics, W.C.Röntgen, M.Baimler*

## **Život W.C.Röntgena**

Německý fyzik s nizozemskými předky se narodil 27. března 1845 v městě Lennep, dnešní části města Remscheid, jako jediné dítě v rodině obchodníka. V jeho třech letech se rodina přestěhovala do nizozemského Apeldoornu. V šestnácti letech ho rodiče poslali za dalším vzděláním do Utrechtu, kde žil ve spřátelené rodině u profesora chemie místní univerzity Jana Willema Guninga. Návštěva utrechtské technické školy měla být přípravou na Röntgenovo povolání. Avšak nebyla tam vyučována latina ani řečtina, u absolventů se tedy nepředpokládalo, že by chtěli později studovat na univerzitě. Chybějící znalosti klasických jazyků působily Röntgenovi v akademické kariéře nemalé těžkosti.

Podle známek na vysvědčení si vedl velmi dobře v technických předmětech, ve francouzštině, angličtině i „hochdeutsch“. Přesto studia nedokončil. Důvodem byla karikatura jednoho z pedagogů, nakreslená křídou na zástěně ke kamnům. Autorem byl někdo jiný, přesto však byl Röntgen ze studií vyloučen. Událost měla rozhodující vliv na celý další Röntgenův osud. Bez maturity se nemohl totiž zapsat na žádnou německou vysokou školu. Nikdo mu však nebránil navštěvovat ze zájmu na utrechtské univerzitě přednášky z matematiky, fyziky, chemie, zoologie a botaniky.

Přestože Röntgen vyloučen ze školy považoval za křivdu, od svého cíle mít maturitu neupustil. Jeden člen zkušební komise pro privátní zkoušku dospělosti ale náhle onemocněl; náhradní examinátor přišel ze školy, která Röntgena předtím vyloučila a uchazeč propadl.

Od podzimu 1865 byl přijat na Vysoké škole technické v Curychu, která přijímala zájemce i bez maturitního vysvědčení, pouze na základě vstupní zkoušky. Po šesti semestrech studia stavby strojů získal diplom strojního inženýra a rok nato ještě doktorát filozofie na curyšské univerzitě. I když se později věnoval experimentální fyzice, byla mu inženýrská kvalifikace velmi užitečná. Protože měl znalosti konstruktéra i technologa, mohl většinu pokusů, které vymyslel, také sám s běžnými prostředky realizovat.

Röntgen se oženil v roce 1872 s Annou Berthou Ludwig z Curychu, dcerou místního kavárníka. Ta byla sestřenicí básníka Otta Ludwiga. Röntgen se svou manželkou neměl vlastní děti, ale v roce 1887 adoptovali Josephinu Berthu Ludwig, dceru Annina bratra. Poslední rok devatenáctého století přešel do Mnichova.

Zemřel v chudobě 10. února 1923 v Mnichově na rakovinu střev. Byl pohřben v hrobě svých rodičů v Giessenu. Zde mu také byl vybudován památník.

Röntgenův život ovlivnilo setkání s profesorem fyziky Augustem Kundtem. V roce 1869 se stal jeho asistentem, po roční spolupráci v Curychu s ním odešel do Würzburgu a o dva roky později (1872) na nově zřízenou univerzitu ve Štrasburku. Tam podal habilitační práci a začal působit jako soukromý docent univerzitního ústavu (1874). Následující rok (1875) nastoupil na místo profesora matematiky a fyziky na Vysoké škole zemědělské v Hehenheimu. Protože mu tam ale chyběla možnost pracovat experimentálně, vrátil se (jako mimořádný profesor matematické fyziky) už za dva semestry zase ke Kundtovi do Štrasburku. Po třech letech (1879) byl pak povolán za řádného profesora a ředitele Fyzikálního ústavu univerzity v Giessenu, tam zůstal až do roku 1888. Dalších dvanáct let působil na würzburšské univerzitě. Řídil nejen její nový fyzikální ústav a na jedno funkční období (1894) byl zvolen rektorem.

Svou první vědeckou práci, která se týkala plynů, publikoval Röntgen v roce 1870. Později zveřejnil práce z oblasti piezoelektrických a pyroelektrických vlastností krystalů. Röntgen mimo jiné popsal jev, kdy rotující dielektrikum v elektrickém poli má magnetické vlastnosti. Toto zjištění přispělo k formulování Lorentzovy elektronové teorie.

28. prosince 1895 napsal předběžnou zprávu „O novém druhu paprsků“. Poslal ji do žurnálu Würzburgské lékařské společnosti. Toto je první formální a veřejně známá kategorizace rentgenového záření. Röntgen o záření psal jako o "paprscích X".

Nejvýznamnější prací z giessenského období je důkaz, že při pohybu polarizovaného dielektrika vzniká magnetické pole. Mnozí z velkých fyziků hodnotili tuto práci jako objev rentgenových paprsků. Pohybující se polarizované dielektrikum bylo holandským fyzikem Lorentzem nazváno Röntgenův proud. Tím se stalo Röntgenovo jméno nesmrtelným v teorii elektřiny a magnetismu. Pro Röntgenův samotářský způsob práce je příznačné, že se jeho tehdejší asistent dověděl o tomto objevu teprve z odborného tisku. I když při pokusu pomáhal, netušil, o co vlastně jde.

## **Objev rentgenových paprsků a přístup W.R.Röntgena k objevu**

V roce 1894 začal Röntgen ve své würzburšské laboratoři systematicky zkoumat katodové paprsky. Röntgen byl neobyčejně důkladný experimentátor. Když se dal do práce v nové oblasti fyziky, nejdříve všechny předešlé pokusy zopakoval.

Co bylo skutečným cílem Röntgenova výzkumu večer 8. listopadu 1895, není známo. Katodovou trubici obalil černým papírem, aby ho při pozorování světelných jevů vyvolaných katodovými paprsky vystupujícími z trubice tenkým hliníkovým okénkem nerušilo světlo výboje. Přestože neprůsvitný obal nemohl žádné viditelné ani

ultrafialové záření z výbojky propustit, krystalky platnatokyanidu barnatého, ležící na experimentátorově stole, se ve tmě laboratoře bledězeleně rozzářily. V místě, kam na sklo výbojky dopadalo katodové záření, vznikaly dosud neznámé paprsky, které dokázaly prostupovat neprůhlednými látkami. K prvním rentgenovým fotografiím patřily stínové obrazy ruky objevitelovy manželky a část hlavně lovecké pušky. Neviditelné paprsky začaly tak sloužit medicíně a technické defektoskopii už v době, kdy byly ještě označeny symbolem X.

Již v lednu příštího roku byl Roentgen pozván na zasedání společnosti lékařů a přírodovědců, kde zhotovil fotografický snímek ruky jistého anatoma. Ten potom navrhl, aby se paprsky X nazvali rentgenovými. Návrh byl přijat s velkým nadšením. Paprsky rychle nabyly obrovského významu ve vědeckém výzkumu, technice i lékařství. Poprvé se dělaly fotografie kostí v lidském těle přímo bez pitvy, daly se přesně zjisit zlomeniny a mnoho detailů v lidském těle. Vzápětí se ukázalo, že paprsky mají i léčivý účinek. V Uhrách předvedl první rentgenová přístroj praktický lékař Vojtěch Alexander v Kežmarku roku 1896. Podstatu rentgenových paprsků odhalil v roce 1912 Max von Lane. Dokázal interferenci rentgenových paprsků na krystalové mřížce a tím vysvětlil, že jde o elektromagnetické vlnění. Roentgen si svůj objev nedal patentovat a kategoricky odmítl všechny nabídky různých firem. Dobrovolně odevzdal svůj vynález lidstvu. K práci W. X. Roentgena na univerzitě se váže historka: Na Roentgenových přednáškách na univerzitě v Mnichově nebylo vždy právě ticho. Jednou Roentgen ztratil trpělivost a vybuchl: "Kdyby pánové, kteří se spolu baví, přišli do stavu, v němž jsou studenti, kteří na mých přednáškách spí, jistě by to potěšilo ty, kteří si mě přišli poslechnout."

V počátcích výzkumu rentgenového záření se uplatnilo mnoho významných vědců jako Ivan Pului, sir William Crookes, Johann Wilhelm Hittorf, Eugene Goldstein, Heinrich Hertz, Philipp Lenard, Hermann von Helmholtz, Nikola Tesla, Thomas Alva Edison, Charles Glover Barkla..

Fyzik Johann Wilhelm Hittorf (1824 - 1914) pozoroval vakuovou trubici vyzářující záření na záporné elektrodě. Toto záření způsobovalo při dopadu na stěnu trubice světélkování. Roku 1876 je Eugene Goldstein pojmenoval „katodové záření“. Později anglický fyzik William Crookes studoval výboje v řídkých plynech a zkonstruoval Crookesovu trubici, skleněnou trubici s elektrodami naplněnou zředěným plynem, v němž při přiložení vysokého stejnosměrného napětí dojde k výboji doprovázenému zářením. Když umístil neexponované fotografické desky nedaleko od trubice, na desce se objevily šmouhy.

V prosinci 1901, při prvním udílení Nobelových cen, se nejvyššího uznání za vynález nebo objev v oblasti fyziky dostalo právě objeviteli rentgenového záření. Spolu s medailí a diplomem mu bylo při slavnostním ceremoniálu ve Stockholmu předáno



i 150 800 švédských korun. Žádnou jinou finanční odměnu Röntgen v souvislosti s objevem nepřijal. Chtěl, aby dílo vykonané na univerzitní půdě s pomocí veřejných prostředků sloužilo zdarma úplně všem. Nikdy nepožádal o patentování objevu a neměl zájem ani o nabídky firem, které mu za spoluúčast při výrobě lékařských diagnostických zařízení slibovaly výhodné podmínky.

Röntgen byl asketicky skromný, odřekl dobře placenou hodnost akademika Berlínské akademie věd stejně jako vedení tzv. Helmholtzovy katedry fyziky na berlínské univerzitě nebo funkci prezidenta Fyzikálně-technického říšského ústavu. Nepřijal dokonce ani Korunní řád, kterým ho v roce 1896 princ Luitpold, hlava tehdejšího Bavorska, povýšil do šlechtického stavu. Přesto má seznam medailí, čestných titulů a vyznamenání udělených mu vysokými školami a učenými společnostmi celého světa 89 položek. Je mezi nimi doktorát Lékařské fakulty univerzity ve Würzburgu, čestné občanství rodného města Lennepe, dekret dopisujícího člena Mnichovské akademie, zlatá Rumfordova medaile od Royal Society v Londýně, Bernardova medaile z Columbijské univerzity a samozřejmě i první Nobelova cena za fyziku.

Paprsky se staly ve dvacátém století nástrojem k výzkumům, za něž bylo fyzikům, chemikům i biologům uděleno více než 20 dalších Nobelových cen. Díky rentgenovému záření známe nejen stavbu mnoha desítek tisíc anorganických krystalických látek (kovů, slitin, polovodičů, minerálů apod.), ale např. i strukturu globulárních bílkovin, nukleových kyselin, penicilinu, cholesterolu, vitamínu B12 nebo nukleoproteinů.

## Co bylo pojmenováno po Röntgenovi

- Rentgenové záření
- Rentgen (jednotka) (zkratka R), jednotka expozice ionizujícímu záření
- Rentgen, zařízení k vyšetření pomocí tohoto záření
- chemický prvek Röntgenium
- planetka (6401) Röntgen
- Deutsche Röntgengesellschaft e.V., lékařsko-vědecká společnost německých radiologů
- vysokorychlostní vlak ICE 884 „Wilhelm Conrad Röntgen“ (po železniční nehodě v Eschede už toto jméno není užíváno)

### Vědecká ocenění

- Röntgenova plaketa města Remscheidu pro vědce, kteří v rentgenologii dosáhli vynikajících výsledků (udělována od roku 1951)

- Röntgenova cena za příspěvky v oblasti radiační fyziky a radiační biologie (Institut für Strahlenphysik und Strahlenbiologie) univerzity v Gießenu (do roku 1960)
- Cena Wilhelma Conrada Röntgena pro nejlepší mladé vědce Ústavu fyziky a astronomie, uděluje Univerzita ve Würzburgu
- dvě ocenění Německé rentgenologické společnosti (Deutschen Röntgengesellschaft): cena Wilhelma Conrada Röntgena a Röntgenův prsten

Jménem Wilhelma Conrada Röntgena jsou v Německu pojmenovány školy, ulice a náměstí. Jde například o Röntgenovo gymnázium ve Würzburgu, Remscheid-Lennepu, a střední školu ve Weilheimu.

## Literatura

- [1] KRAUS, I. : Wilhelm Conrad Röntgen – dědic šťastné náhody, Prometheus Praha 1997
- [2] HAJDOVSKÝ, J.: Zkoušení materiálů a výrobků rentgenovými paprsky a paprsky gama. SNTL Praha 1956
- [3] KOPEC, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. ČNDT, CERM, Brno 2008



# NÁVRH SYSTÉMU PRO DEFEKTOSKOPII POMOCÍ OPTICKY BUZENÉ AKTIVNÍ INFRAČERVENÉ TERMOGRAFIE

## DESIGN OF ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY NDT SYSTEM WITH OPTICAL EXCITATION

Tomáš KOSTROUN\*, Jan PILAŘ\*, Milan DVOŘÁK\*

\*Czech Technical University in Prague; Faculty of Mechanical Engineering,  
Contact e-mail: tomas.kostroun@fs.cvut.cz

### **Abstrakt**

*Kompozitní materiály nacházejí stále širší uplatnění nejen v konstrukci letounů, ale i kolejových a silničních vozidel. S jejich provozem je spojena nutnost kontrolovat stav nosných částí konstrukce. K dispozici je řada konvenčních NDT metod, v minulosti vyvinutých pro kontrolu kovových konstrukcí. Naneštěstí pro kontrolu typicky tenkostěnných dílů letadlových draků, s lepenými spoji, voštinami apod. často nejsou v plné míře použitelné.*

*Jako možná alternativa k tradičním metodám se jeví metoda bezkontaktní kontroly pomocí aktivní termografie. V článku je popsán návrh a verifikace otevřeného řešení přístrojového řetězce, optimalizovaného pro tenkostěnné kompozitové konstrukce. Snahou bylo dosáhnout funkčně a cenově výhodného otevřeného řešení systému, modifikovatelného na míru dané aplikaci. Zařízení je sestaveno z IR kamery, zábleskových a halogenových světel pro buzení tepelné vlny na povrchu a hlavně nově navržené přístrojové jednotky. Ta slouží k napájení kamery a osvětlení, k ovládání i k záznamu naměřených dat. Sestava je ovládána pomocí PC a programu vytvořenému v prostředí LabVIEW. Naměřená data jsou následně zpracovávána v programu MATLAB. Výhodou systému je nezávislost na uzavřených komerčních řešeních, často limitovaných hardwarově i softwarově.*

*Navržená konfigurace měřicího systému byla testována na typických konstrukčních uzlech letadlových konstrukcí. Cílem bylo ověření provozních vlastností a zhodnocení schopnosti detekce vad a poškození tenkostěnného dílu z uhlíkového kompozitu.*

**Klíčová slova:** NDT, aktivní termografie, IR, kompozity

### **Abstract**

*Composite materials are increasingly used not only in an aircraft design, but also in a rail and a road vehicles construction. Their operation is associated with the need to check the condition of the main structural parts. A number of conventional NDT methods is available, but they were previously developed with focus on inspection of metal structures. Unfortunately, for checking*

*thin-walled parts of aircraft structures, with glued joints, honeycomb cores etc. they are often not applicable instantly.*

*The method of contactless part control using active thermography seems to be promising as an alternative to common NDT methods. The paper describes the design and verification of an open solution of instrument configuration, which is optimized for thin-walled composite structures. The aim was to achieve a functional and cost-effective open system solution, customizable to the application needs. The device consists of IR camera, flash and halogen lights for excitation of the surface heat wave, and mainly the newly designed instrument unit. It is used to power the camera and lighting, to control and record measured data. Instrument configuration is controlled by PC, using the custom-designed software made in LabVIEW environment. MATLAB computing environment is used for the processing of measured data. The advantage of the system is an independence from closed commercial solutions, which are often limited by hardware and software.*

*The proposed configuration of the measuring system was tested on typical structural parts of the aircraft structure. The aim was to verify operational properties and evaluate the ability to detect defects and damage inside the thin-walled carbon/epoxy composite parts.*

**Key words:** NDT, active thermography, infrared, composites

## 1. Úvod

S rostoucím uplatněním kompozitních materiálů v různých odvětvích transportního průmyslu (typicky např. letectví) roste i potřeba vhodných NDT metod pro kontrolu tenkostěnných kompozitních konstrukcí nejen během výroby, ale i provozu. Naneštěstí pro kontrolu typicky tenkostěnných dílů letadlových draků s lepenými spoji, voštinami apod. často nejsou tradiční NDT metody v plné míře použitelné. Jako možná alternativa k tradičním metodám se jeví metoda bezkontaktní kontroly pomocí metody aktivní termografie. Pro realizaci systému pro tuto metodu byl zvolen jeden ze základních způsobů excitace tepelné vlny pomocí světelných zdrojů. Celý systém je řešen jako modulární s možností pozdější adaptace jiných hardwarových i softwarových prvků a tím i přizpůsobení případným požadavkům zkoušení.

Otevřený modulárně řešený systém dále oproti komerčním produktům umožňuje podrobnější analýzu a zpracování naměřených dat s případným použitím nově navržených postupů.

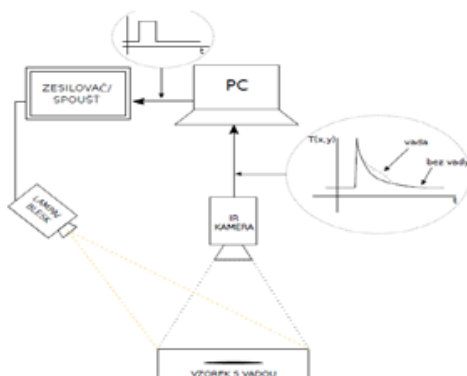
## 2. Základní popis použitých testovacích metod

Nejjednodušší metodou aktivní termografie je tzv. pulzní termografie (PT). Jedná se o zahřátí vzorku z jedné strany krátkým pulsem a následné sledování křivky chladnutí v jednotlivých bodech povrchu. Teplotní pole je možno měřit odrazovou nebo průchodovou metodou.

Vysláním pulzu na povrch vzorku se materiálem začne šířit tepelná vlna. Vlivem šíření tepelné vlny (vedením) do materiálu ve směru hloubky, ale také v důsledku ztrát konvekci a radiací, povrch chladne. Jestliže se pod povrchem nachází vada s rozdílnou jímavostí než základní materiál (např. delaminace), dojde k odrazu tepelné vlny směrem zpět k povrchu a tím se změní průběh jeho chladnutí v tomto místě. Vady, které se vyskytují ve větší hloubce, se na termogramu objeví později, z čehož vyplývá,

že indikace vzdálenosti od povrchu je časovou funkcí a metoda je tudíž tzv. časově závislá.

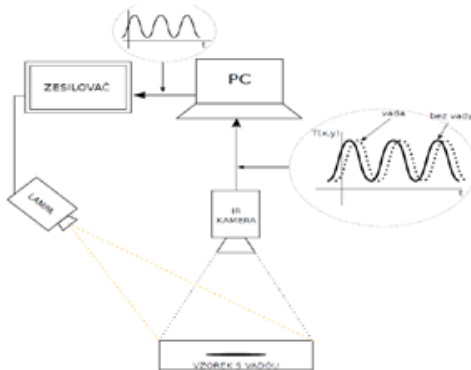
Nevýhodou této metody je citlivost na nerovnoměrnost zdroje tepla a rozložení emisivity na zkoušeném povrchu. Tuto vlastnost je ale možné do jisté míry eliminovat dodatečným zpracováním naměřených dat. Naopak výhodou je rychlé provedení měření ve srovnání s dále popisovanou Lock-in metodou zkoušení.



**Obr.1** Schéma uspořádání PT včetně ukázky průběhu chladnutí [1]

**Fig.1** Pulse Thermography measurement scheme, including cooling progress example

Druhou použitou metodou je tzv. Lock-in termografie (LT). Tato metoda vystavuje zkoumaný objekt delšímu působení tepelného zdroje o nízkém výkonu. Zde se však nejedná o dlouhý pulz, ale o amplitudově modulovaný průběh ohřevu. Ohřev z vnějšího zdroje vyvolá na povrchu tepelnou vlnu, která se šíří ve směru tloušťky materiálu. U LT metody se využívá principu odrazu tepelné vlny na rozhraní dvou prostředí, kdy se odražená vlna vrací na povrch vzorku a ovlivňuje tak teplotní pole způsobené modulovaným zdrojem (superponuje se s dopadajícím zářením).



**Obr.2** Schéma uspořádání LT s plošným ohřevem včetně ukázky průběhu teplot [1]

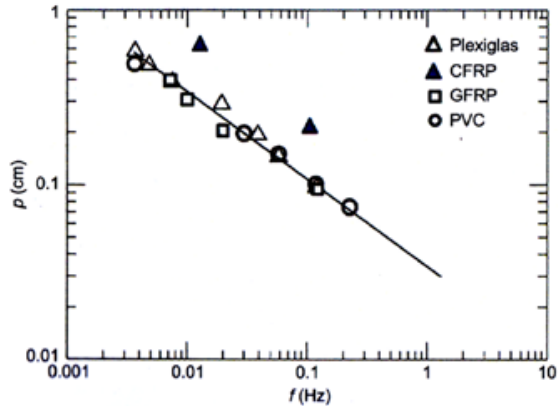
**Fig.2** Lock-in Thermography measurement scheme with the surface heating, including temperature change example

Ohříváný povrch je snímán termokamerou a následně podroben frekvenční analýze, která převede záznam z časové oblasti do frekvenční, a ze které lze získat amplitudový a fázový obraz teplotního pole (resp. amplitudu a fázový posun oproti zdroji pro každý pixel termogramu). Amplitudový obraz je opět zatížen problémy s emisivitou povrchu a s neuniformitou ohřevu, podobně jako u předchozí PT metody. Proto je klíčovou veličinou pro tuto metodu fázový posun zaznamenaného signálu z povrchu od signálu řídicího modulovaného ohřev. Fázový posun odražené a vyslané tepelné vlny se liší v závislosti na hloubce odrazu a tak je možné detekovat případný defekt, případně hodnotit i jeho hloubku.

Hloubkový rozsah zkoušení  $\rho$  je nepřímo úměrný druhé odmocnině budící frekvence tepelného zdroje. U amplitudového obrazu se maximální hloubka zkoušení přibližně shoduje s hloubkou vniku tepelné vlny. U fázového obrazu je přibližně 1.8x větší. Hloubka vniku tepelné vlny je dána součinitelem teplotní vodivosti  $\alpha$  a budící frekvence  $f$  dle následující rovnice:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$$

V případě zkoušení kompozitních materiálů se budící frekvence  $f$  pohybuje v rozmezí desetin až tisíců Hz.



**Obr.3** Hloubka zkoušení  $p$  v závislosti na budící frekvenci  $f$  pro různé materiály [2]  
**Fig.3** Testing depth  $p$  as a function of excitation frequency  $f$  for various materials

### 3. Způsoby hodnocení signálu

Pro hodnocení výsledků testů bylo vybráno několik základních metod zpracování získaného signálu. Metody hodnocení DAC a TSR byly použity pro hodnocení výsledků zkoušek pomocí PT a metoda hodnocení pomocí FFT byla využita pro zkoušky pomocí LT.

#### Metoda DAC (Differential Absolute Contrast)

Tepelným kontrastem se obecně rozumí rozdíl mezi naměřenou teplotou nad defektem a mimo něj. Tento jednoduchý princip není příliš vhodný např. kvůli nehomogenitě ohřevu a emisivitě tělesa. Z toho důvodu byla použita komplexnější metoda výpočtu zvaná DAC. Místo určování bodu bez defektu bere v potaz všechny body v čase  $t'$ , což je snímek těsně před objevením prvního zkraslení od defektu. Z takto určené teploty bez vady se dále počítá absolutní kontrast:

$$\Delta T_{DAC}(t) = T(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(t') \text{ [K]}$$

Takto měřený kontrast nevyžaduje znalost místa bez defektu a do značné míry kompenzuje neuniformitu ohřevu a emisivity (zahrnuje je do teploty bez defektu). Určení času  $t'$  běžně vyžaduje přímý zásah obsluhy při určování přesného snímku. [3]

#### Metoda TSR (Thermographic Signal Reconstruction)

Metoda vychází z předpokladu, že v místě, kde není defekt, dochází k vývoji teploty podle vztahu pro polo-nekonečný materiál dle Fourierovy rovnice takto [4]:

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \cdot \ln(\pi \cdot t)$$

Tuto rovnici lze vyjádřit jako polynom  $n$ -tého stupně pomocí polynomicke regrese časových dat podle logaritmu časové osy.

$$(\Delta T(t)) = a_0 + a_1(t) + a_2(t)^2 + \dots + a_n(t)^n$$

Volba stupně polynomu závisí především na vlastnostech zkoušeného materiálu a předpokládané hloubce vad, např. u epoxidových kompozitů to může být i 7 a více. Konečná volba tak bude záviset především na výsledku laboratorní zkoušky. V případě dostatku výpočetního výkonu lze také provést regresi pro několik stupňů najednou. Prvním výsledkem je sekvence  $n+1$  obrazů složená z koeficientů polynomu.

Jelikož je vývoj teploty nyní dán pomocí časové funkce  $\ln(\Delta T(t))$ , lze jej podrobit první a druhé derivaci. První derivace fyzikálně vyjadřuje rychlost ochlazování a druhá pak její změny v čase. Tyto obrazy pak mohou vykazovat větší ostrost hran a částečně tak vyrovnávat problém laterální difuzivity materiálu. Výsledné snímky také nejsou zatíženy šumem a neuniformitou ohřevu. Nevýhodou je pak otázka určení stupně polynomu a výběr výsledného snímku k vyhodnocení. Ze snímků také nelze odečíst hloubku vady a polynomicke regrese vyšších stupňů jsou náročné na výpočetní výkon. [3]

### Metoda FFT (Fast Fourier transformation)

Metoda FFT byla použita pro hodnocení zkoušek pomocí LT. Výhodou použití fázového obrazu, který vznikne frekvenční analýzou signálu, je relativní nezávislost na uniformitě ohřevu a emisivitě povrchu.

Každá z diskretních funkcí časového průběhu teploty pro každý pixel byla podrobena rychlé Fourierově transformaci (FFT), jejíž konečným výsledkem je amplituda nebo fázový posun signálu v daném bodě:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} T(n) \cdot e^{i \frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n} = Re(k) + i \cdot Im(k)$$

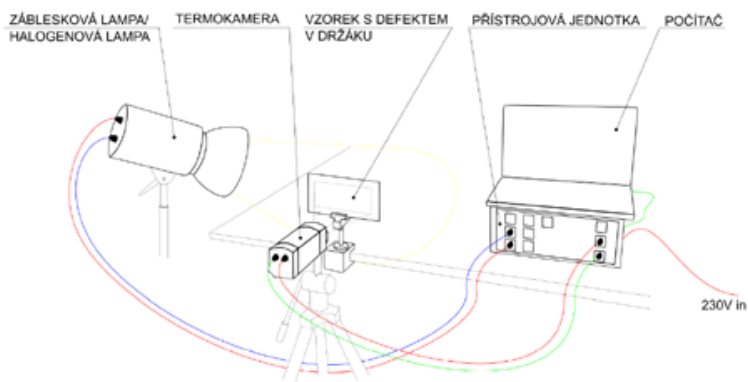
$$A(k) = \sqrt{Re(k)^2 + Im(k)^2}; \quad \Phi(k) = \arctg \frac{Im(k)}{Re(k)}$$



kde  $N$  je celkový počet snímků v sekvenci,  $F(k)$  vyjadřuje komplexní vyjádření Fourierovy posloupnosti pro budící frekvenci reprezentovanou odpovídajícím celočíselným koeficientem  $k$ .

#### 4. Testovací systém

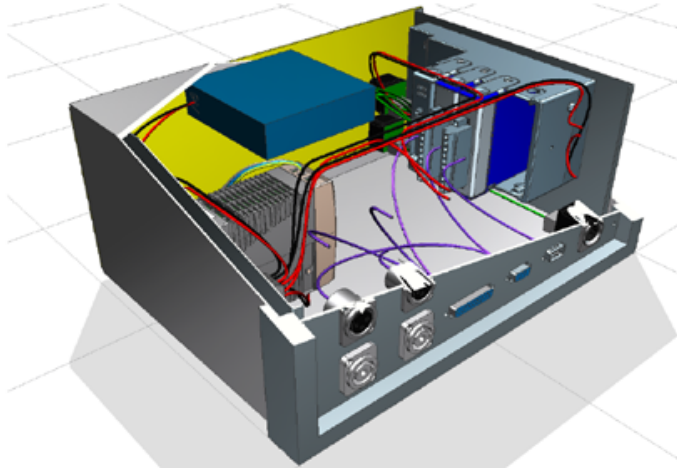
Pro účely testování pomocí PT a LT NDT metody byl navržen a realizován modulárně řešený systém. Základní HW prvky tohoto systému jsou tvořeny bolometrickou nechlazenou IR kamerou FLIR A325SC (rozdílení 320x240 pixelů, NETD<50 mk, maximální snímací frekvence 60 Hz), přístrojovou jednotkou s PC pro řízení zkoušek a záznam dat a podle metody buď zábleskovým světlem (1200 J) nebo halogenovým reflektorem (max. 1000 W). Modulární řešení systému poskytuje výhodu v možnosti jej relativně snadno v budoucnu rozšířit.



**Obr.4** Schéma uspořádání experimentu [1]  
**Fig.4** Experimental configuration set-up

Přístrojová jednotka tvořící komunikační rozhraní mezi PC, IR kamerou a excitačními světly je tvořena především měřícím a řídicím systémem cDAQ od firmy National Instruments, vybaveným kartami analogového výstupu (pro řízení excitačních světel) a digitálního vstupu/výstupu a dále pak další nezbytnou pomocnou elektronikou.

Pro řízení zkoušek a záznam naměřených dat bylo využito programu vytvořeného pro tyto účely v prostředí LabView od firmy National Instruments. Zpracování a vyhodnocení získaných dat bylo provedeno v prostředí MATLAB firmy MathWorks.

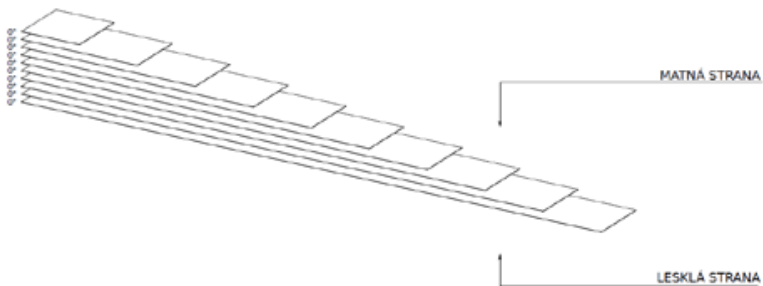


**Obr.5** Vizualizace uspořádání přístrojové jednotky [1]  
**Fig.5** Inner design of instrument unit

## 5. Ověřovací vzorky

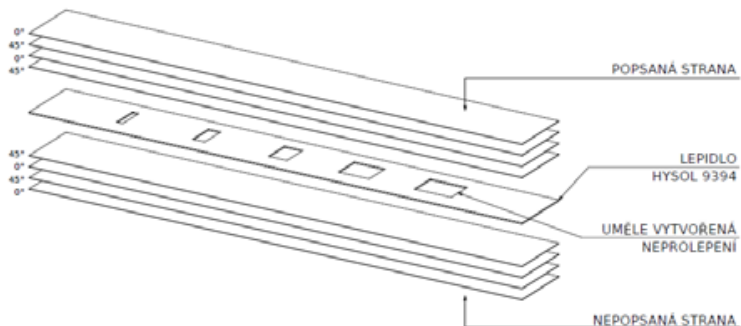
Pro ověření základní funkčnosti IR NDT systému byly použity 2 vzorky s umělými vadami reprezentující tenkostěnné kompozitové konstrukční uzly. Tyto vzorky byly převzaty z práce Ing. Hergessela [5].

První vzorek (označení SCH) tvoří desetivrstvý jednosměrný kompozit s postupně přibývajícimi vrstvami do podoby „schodů“. Vzorek byl vyroben z prepregu (EHKF 420-C20-45) o nominální tloušťce vrstvy 0,2 mm vakuováním a následným vytvrzením v peci. Tento vzorek je vhodný např. ke zjištění reálné detekovatelné hloubky či hloubkové rozlišitelnosti v nízko tepelně vodivém prostředí či ke kalibraci metody při nastavení na určitou hloubku [4].



**Obr.6** Skladba vzorku SCH  
**Fig.6** Composite lay-up of SCH specimen

Druhý vzorek (označení LPA) reprezentuje plochý lepený spoj dvou dvousměrných čtyřvrstvých desek z uhlíkového kompozitu (CFRP) vyrobených autoklávovou technologií. Ve vrstvě lepidla Hysol 9394 jsou pak vytvořeny mezery, představující neslepení částí. Vady byly vytvořeny vložením obdélníčků z plastové fólie potřebné velikosti do lepeného spoje. [5]

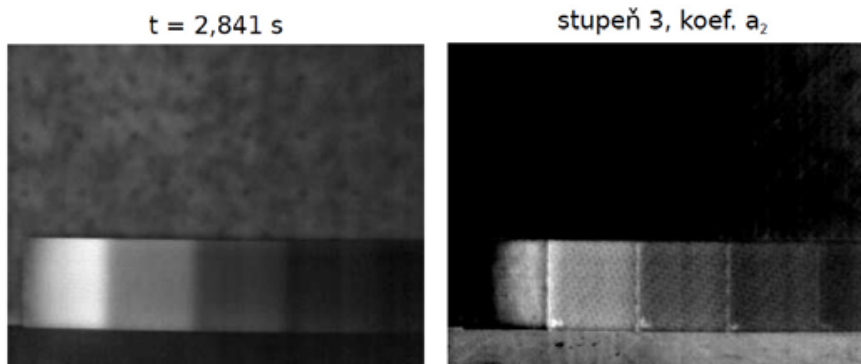


**Obr.7** Skladba vzorku LPA  
**Fig.7** Composite lay-up of LPA specimen

## 6. Výsledky ověřovacích zkoušek

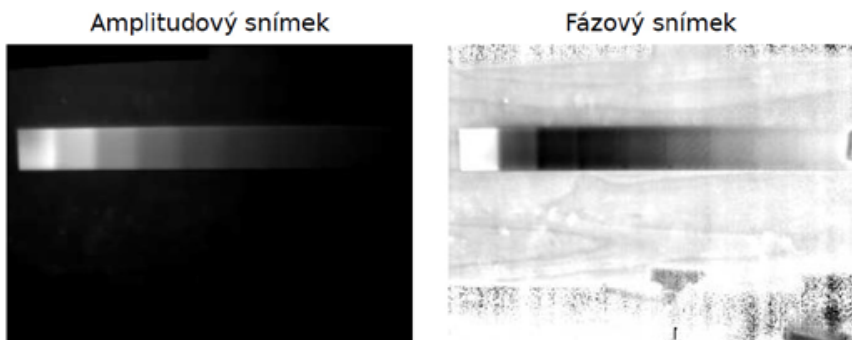
V následující části jsou pro ukázkou uvedeny výsledky ze zkoušek na referenčních vzorcích pro jednotlivé zkušební metody.

Na Obr.8 jsou uvedeny výsledky ze zkoušky pomocí pulsní metody na vzorku SCH. Z výsledků je patrná dobrá rozlišitelnost jednotlivých vrstev až do 4 vrstvy v případě vyhodnocení metodou DAC, respektive do 5 vrstvy při využití metody TSR.



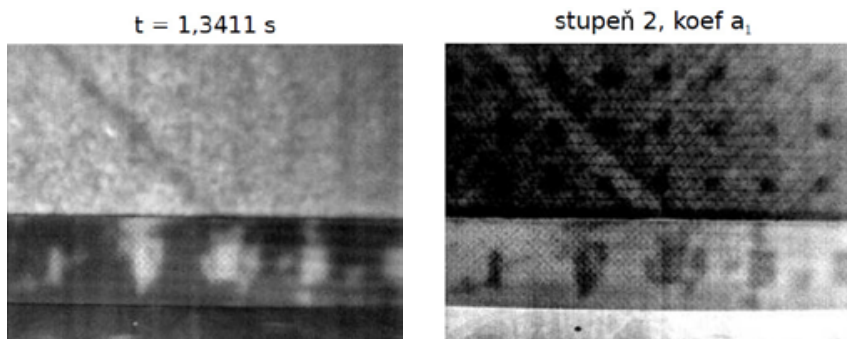
**Obr.8** Snímek metodou DAC (vlevo) a metodou TSR (vpravo) na vzorku SCH  
**Fig.8** Image of SCH specimen taken by DAC method (left) and TSR method (right)

V případě použití Lock-in metody a z ní vyhodnoceného fázového obrazu je na Obr. 9 patrné dobré rozlišení pro všech 9 vrstev kompozitního materiálu.

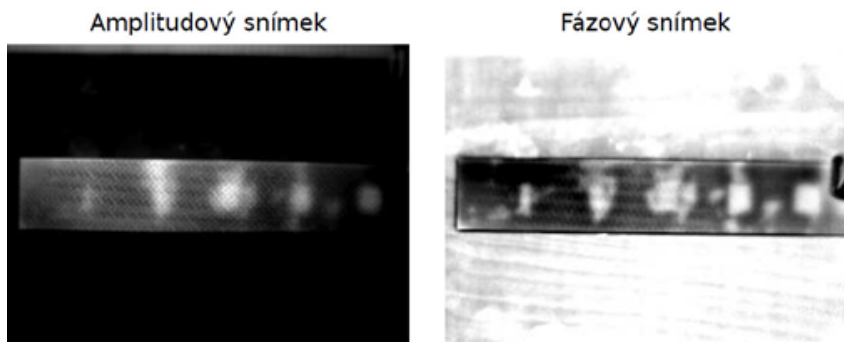


**Obr.9** Fázový a amplitudový snímek metodou FFT na vzorku SCH (LT, 0.03Hz)  
**Fig.9** Phase and amplitude image of SCH specimen using the FFT method (LT, 0.03Hz)

Na Obr.10 a Obr.11 jsou uvedeny výsledky PT a LT zkoušek provedených na vzorku LPA. Z výsledků jsou patrné dobré výsledky v detekovatelnosti simulovaného neprolepení ve vzorku. Zkoušky zároveň ukázaly, že zkoušený vzorek obsahuje mimo simulovaných vad lepeného spoje i vady skutečné. Z toho důvodu není vhodné tento vzorek používat jako etalon pro stanovení detekčních schopností NDT metod.



**Obr.10** Snímek metodou DAC (vlevo) a metodou TSR (vpravo) na vzorku LPA  
**Fig.10** Image of LPA specimen taken by DAC method (left) and TSR method (right)



**Obr.11** Fázový a amplitudový snímek metodou FFT na vzorku LPA (LT, 0.03Hz)  
**Fig.11** Phase and amplitude image of LPA specimen using the FFT method (LT, 0.03Hz)

## 7. Závěr

Funkčnost navrženého NDT systému se podařilo úspěšně ověřit na několika vzorcích reprezentujících vybrané konstrukční uzly a vady v kompozitních konstrukcích. Zároveň ale ověření prokázalo, že navržený systém má své limity hlavně v oblasti pulsní termografie a její hloubkové detekovatelnosti. To je způsobeno jak použitím cenově dostupnější nechlazené termokamery, tak i relativně malým výkonem zábleskových světel.

## 8. Poděkování

Autoři publikace by rádi poděkovali Technologické agentuře ČR za podporu tohoto výzkumu v rámci projektu TE02000032.

- [1] J. Pilař, T. Kostroun, T. Čenský. Návrh systému pro NDT pomocí infračervené termografie, TZP-ULT-88-2019. ČVUT v Praze. 2016
- [2] C. Meola, S. Boccardi, G. M. Carlomagno. Infrared Thermography in Evaluation of Aerospace Composite Materials. Woodhead Publishing, 2017
- [3] C. Ibarra-Castanedo, H. Benítez, X. Maldague, A. Bendada. Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography. In *Proc. Int. Workshop on Imaging NDE (Kalpakkam, India, 25–28 April 2007)*, pages 1–6, 2007.
- [4] C. Ibarra-Castanedo, J.-M. Piau, S. Guilbert, N. P. Avdelidis, M. Genest, A. Bendada, X. PV Maldague. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Research in Nondestructive Evaluation*, 20(1):1–31, 2009.
- [5] J. Hergessel. Nedestruktivní zkoušky primární konstrukce letounu pomocí bond testeru - diplomová práce. ČVUT v Praze 2015.





## **ACTIVE DIAGNOSIS OF TOROIDAL BEARINGS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE**

**Housam MOHAMMAD\*, Libor NOHÁL\*\*, Pavel MAZAL\***

\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,  
Technická 2, Brno, 616 69, Czech Republic

\*\*ZKL - Výzkum a vývoj a.s., Jedovnická 2346/8, 628 00 Brno  
Contact e-mail: qmmazal@vutbr.cz

### **Abstract**

*In this paper we study the results of testing toroidal bearings using the parameters extracted from Acoustic Emission testing. The aim is to find the characteristics of the Rolling Contact Fatigue (RCF) in these special bearings during testing. We concentrate on the period before pitting. We think that by studying this period intensively, we are able to specify the pattern of the signal which will distinguish the initiation of pitting. And it will enable us later to better understand the behavior of the specimen during the last stages of the test, and then come up with a way to predict the pitting before it happens. The experiment takes place in a specially designed stand for this type of bearings to obtain the best results from acoustic emission sensors. Toroidal bearings are characterized by their special design, which can combine the self-aligning capability with the axial displacement ability, and that makes their applications very versatile and important. This study is an initial step towards other more advanced steps to better understand the crack and pitting mechanisms in the specially important toroidal bearings.*

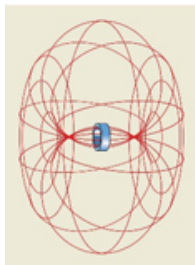
**Key words:** Acoustic emission, contact fatigue, frequency, toroidal bearing.

### **1. Introduction**

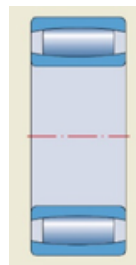
The Acoustic Emission method (AE) is a Non-destructive Testing (NDT) method that depends on capturing and processing acoustic waves, which are caused by local changes in the material. Acoustic waves propagate from the place of origin of the defect to the surface of the material, so we can locate the defects and also monitor the course of their origin [1]. Contact fatigue is a very unfavorable phenomenon and it is better to minimize it as much as possible [2]. Rolling Contact Fatigue (RCF) occurs in surface layers by repeated contact of two non-conformal surfaces. Contact bodies are contacted by mutual contact at a point, on a straight line or along a curve. Because the surfaces of the bodies meet in a small area, very high local contact pressures occur. In pure rolling, the main stresses are compressive. Shear stresses reach their

maximum at a certain depth below the surface. In these places, cracks arise and grow, which penetrate the surface and lead to peeling or crumbling of small volumes of material. This creates small cavities, which are collectively referred to as pitting. The main parameters influencing the contact fatigue strength include Hertz stress, number of cycles, surface quality and hardness, temperature, and presence of lubricants [3]. The acoustic emission method is used to precisely capture the beginning of pitting. It is one of the methods of non-destructive material testing based on the principle of elastic stress wave propagation in the material [4]. The basic parameters of the acoustic emission signal evaluation include RMS (RMS value), counts, and frequency characteristics of the signal [5]. The most commonly used time-domain acoustic emission signal parameter is RMS (Root Mean Square). A very often used parameter of the time domain signal is the counts parameter, which is defined as the number of overshoots over the set threshold level per unit of time [6].

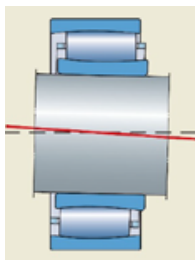
The tested toroidal bearing is a specially designed bearing, which have one row of long, slightly barrel-shaped symmetrical rollers and torus-shaped raceway profiles, as shown in Fig. 1 [7].



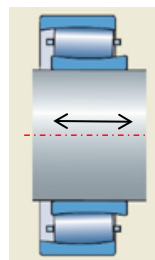
A. The inner and outer raceways are parts of a torus.



B. Section in the toroidal bearing in normal rotation without loading.



C. Section in the toroidal bearing shows its tolerance towards angular displacement.



D. Section in the toroidal bearing shows its tolerance towards axial displacement.

**Fig.1** Sections in the toroidal bearing [7]



## 2. Materials and test equipment

The experiment took place in one of the facilities of the Czech bearing company ZKL (Závod Kuličkových Ložisek), which is the company that produces the toroidal bearing under test, and where the special testing stands were designed and produced as well. As shown in the figure 2, the specimen, a toroidal bearing of the type C4030V, *Inner (d) 150mm, Outer (D) 225mm, Width (B) 75mm, Weight 10.50 kg*, has been put under variable controllable load and it runs according to various testing regimes.

The tested toroidal bearing is a specially designed bearing, which have one row of long, slightly barrel-shaped symmetrical rollers and torus-shaped raceway profiles. The main part of the stand is the bearing housing that contains two signal transition rods, which are the rods responsible for transmitting the AE signal from the surface of the tested bearing to outside the housing where it can be picked up easily using a regular AE sensor. The ideal situation is when we attach two AE sensors to the two signal transmission rods, and compare the results that we obtain from the two sensors.

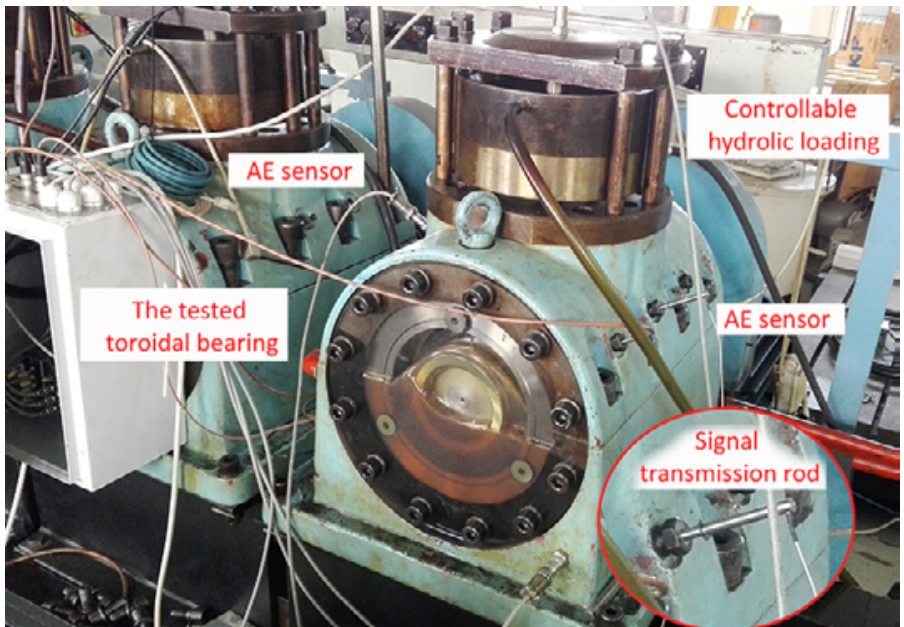


Fig.2 The setup of the toroidal bearing testing station in ZKL

**Tab. 1** The three stages of rotation speeds and loading.

	Stage 1			Stage 2			Stage 3		
Speed (r.p.m)	250			500			750		
Loads (MPa)	2.4	3	3.6	2.4	3	3.6	2.4	3	3.6
Duration (hour)	1	1	1	0.5	1	1	0.5	1	1

### 3. Results and discussion

The bearing was loaded by different loads during three chosen rotation speeds. Two AE sensors were used to acquire the signals during the operation, they were fixed on the outside end of the signal transmission rods. The received signal was processed and analyzed using DAKEL Zedo analyzer. Three parameters of AE were used to process and analyze the signals, they are: RMS, Energy, and Count of hits. The processed signals were divided into three stages according to the rotation speed of the bearing. We notice that in:

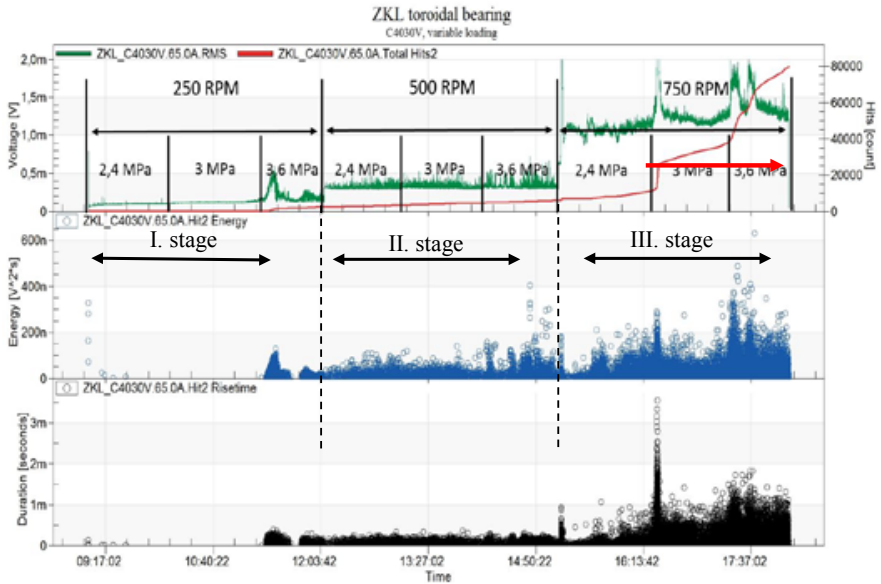
**Stage 1**, where the rotation speed is relatively slow (250 r.p.m) the effect of different loading was significantly small. The RMS value of the signal was very low, less than 0,1 mV. Although there was a small peak immediately after the loading with 3,6 MPa.

The Energy parameter was almost redundant at this stage. And the count hit just followed the same pattern.

**Stage 2**, in this stage the rotation speed was raised to (500 r.p.m) which reflected in a big impact on the value of RMS of the signal, that reached the value of 0,3 mV. By implementing the same previous loading regime on the bearing we notice a very small, almost negligible effect of change when raising the loading during the same r.p.m.

The two other parameters, Energy and count of hits, as the RMS, showed a relevant change in values according to the increase of rotation speed, but almost no change for the increase in loading.

**Stage 3**, where the rotation speed reached (750 r.p.m), we see a respectively different relationship pattern between the loading and the signal. In this stage the increase of loading had a proportionate impact on the RMS value, and the other two parameters as shown in the Fig. 3.



**Fig.3** The relationship between AE parameters and the rotation speed and loading of the toroidal bearing.

We conclude that the increase of the rotation speed of the bearing has a bigger effect on the signal parameters. The increase of loading of the bearing during the relatively small rotation speeds has a very low effect on the signal parameters, while the same change in loading in bigger rotation speed has resulted in a more proportionate increase of the value of signal parameters.

#### 4. Conclusion

The analysed signal was divided into three stages according to the rotation speed, and we applied the same gradual increase of loading regime on each stage.

The signal parameters were more affected by the rotation speed than the loading.

The increase in rotation speed makes the changes of loading more noticeable on the signal parameters.

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

#### 5. Acknowledgment

This work was supported by the project of the Technology Agency of the Czech Republic No. TH 02010306 " Research and development of new generation design and technology of spherical roller thrust bearings". In addition, by the project of Ministry

of Industry and Trade of the Czech Republic FV 20687 "Research and development of toroidal bearings with full number of rolling elements up to 400 mm outside diameter".

## References

- [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. ISSN 01651684. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168407001934>
- [2] Johnson, K. L. Contact mechanics, Cambridge: Cambridge University Press, 1985, First edition. 452 p. ISBN 0-521-25576-7.
- [3] Harris, T. A. and Kotzalas, M. N.: Advanced Concepts of Bearing Technology, Fifth edition, Taylor & Francis, 2006.
- [4] Kopec, Bernard; a kol. Nedestruktivní zkoušení materialu a konstrukcí. 1.vyd. Brno: CERM s.r.o, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4. DAVIS, Ivan C. *Damage Detection in Aluminum Cylinders Using Modal Analysis*. Blacksburg, 2002. Master's thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] Hort, F. Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [6] 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.
- [7] SKF CARB® toroidal roller bearings, a revolutionary concept. Publication 5102 E. January 2004.



## ODHAD TLOUŠŤKY BARVY POMOCÍ PULZNÍ TERMOGRAFIE

### PAINT THICKNESS ESTIMATION BASED ON PULSE THERMOGRAPHY

Lukáš MUZIKA\*, Michal ŠVANTNER \*\*

\*Západočeská univerzita v Plzni, \*\*Západočeská univerzita v Plzni

Contact e-mail: muzika@ntc.zcu.cz

#### **Abstrakt**

*Příspěvek popisuje rychlé plošné měření tloušťky barvy pomocí pulzní termografie. Vzorky z AISI 304 nastříkané černou barvou byly vybuzeny flash lampou pomocí jednoho krátkého pulzu (několik ms) a teplotní odezva byla snímána IR kamerou. Data byla zpracována pomocí rychlé Fourierovy transformace pro získání fázové odezvy. Rozdíly ve fázi korespondovaly s rozdíly v tloušťce barvy. Byla nalezena závislost v podobě kalibrační křivky mezi hodnotami fáze a tloušťkou. Tloušťka odhadnutá přes tuto kalibrační křivku se lišila od změřené tloušťky pomocí standardního tloušťkoměru pro rozsah tlouštěk barvy 40 – 80  $\mu\text{m}$  maximálně o 10 %. Výhody, nevýhody a omezení představené techniky jsou diskutovány v příspěvku.*

**Klíčová slova:** *aktivní termografie, pulzní termografie, IRNDT, tloušťka vrstvy*

#### **Abstract**

*The paper describes a fast areal measurement of paint thickness using pulse thermography. AISI 304 samples sprayed with a black paint were excited by a flash lamp using one short pulse (several ms) and the temperature response was recorded by an IR camera. The data was processed using a fast Fourier transform to obtain phase angles. The differences in the phases corresponded to the differences in paint thickness. A dependency was found in the form of a calibration curve between phase values and thickness. The thickness estimated over this calibration curve differed maximally by 10 % from the measured thickness using a standard thickness meter for the thickness range 40-80  $\mu\text{m}$ . Advantages, disadvantages and limitations of the presented technique are discussed in the paper.*

**Key words:** *active thermography, pulse thermography, IRNDT, coating thickness*

## 1. Úvod

Vlastnosti barvy nanesené na díl mohou být značnou měrou ovlivněny její tloušťkou. To je především problém v případě, že barva plní i jiný účel než dekorativní

(např. zajišťuje odolnost proti korozi, proti chemikáliím, proti teplu). Nedostatečná tloušťka může vést k selhání obarveného dílu, díky čemuž může dojít nejen k ekonomickým ztrátám. Opačný jev, tj. nadbytek barvy je také problém, jelikož se používá zbytečné množství barvy (vyšší cena) zároveň se zvyšuje hmotnost celého dílu. V některých případech se snižuje adheze barvy.

Díky těmto důvodům je tloušťka barvy v mnoha odvětvích průmyslu sledována. Nedestruktivní měření tloušťky barvy je dnes řešeno mnoha různými technikami. Mezi ně patří [1] magnetická metoda, magnetickoindukční metoda, metoda vířivých proudů a další. Každá z těchto technik je vhodná pro měření tlouštěk pouze určité kombinace barvy a substrátu. Navíc měření zpravidla probíhá bodově, takže není známa tloušťka na všech místech testovaného dílu.

Jednou z perspektivních metod pro určení tloušťky barvy se jeví pulzní termografie [2]. Hlavní výhodou je plošné snímání a tedy zvýšení rychlosti měření a zároveň možnost využití této techniky na široké pole materiálů. Zjišťování tloušťky povlaků bylo již úspěšně provedeno [3], [4]. Jednalo se však o zpravidla povlaky, které sloužily jako tepelné bariéry (TBC). Tento příspěvek se zaměřuje na zjišťování tloušťky barvy pomocí pulzní termografie. Jedná se tedy o tloušťku povlaku (desítky mikrometrů) nižší než v případě standardních TBC (stovky mikrometrů).

## 2. Určení tloušťky barvy pomocí pulzní termografie

Při pulzní termografii dochází k tepelnému vybuzení testovaného objektu pomocí jednoho velmi krátkého pulzu (několik ms). Teplotní odezva na toto vybuzení je změřena IR kamerou. Tato odezva může ukázat změnu v tepelném přenosu způsobenou výskytem defektu, či jiné anomálie. V případě testování dvou a více ploch s rozdílnou tloušťkou povlaku (barvy) na stejném substrátu je tepelný přenos ovlivněn právě tloušťkou vrchní vrstvy.

Ze standardního výsledku IR kamery, tj. termografické sekvence, většinou není možné od sebe odlišit jednotlivé anomálie. Rozdíly v teplotních odezvách bývají totiž velmi malé. Z toho důvodu se využívají různé techniky post-processingu, které zvýrazňují tyto rozdíly.

V příspěvku využíváme pro tyto účely rychlou Fourierovu transformaci (FFT) v režimu fáze. Vhodný phasegram (výsledek FFT fáze) zobrazuje nerovnoměrnosti v tloušťce barvy.

Převedení hodnoty fáze (rad) na hodnoty tloušťky ( $\mu\text{m}$ ) je pak provedeno pomocí kalibrační funkce. Je třeba znát tedy hodnoty tloušťky pro získání kalibrační křivky. Rovnice použité křivky je

$$z_c = C_1 \cdot \Phi^3 + C_2 \cdot \Phi^2 + C_3 \cdot \Phi + C_4, \quad (1)$$

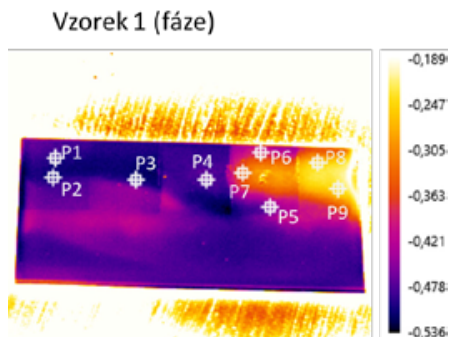
kde  $z_c$  je tloušťka,  $C_1-C_4$  jsou konstanty a  $\phi$  je fáze. Po zjištění konstant je možné převést hodnoty fáze na hodnoty tloušťky.

### 3. Popis experimentu

Dva vzorky z oceli AISI 304 byly nastříkány černou barvou (LabIR HERP-LT-MWIR-BK-11). Nástřik byl prováděn tak, aby vznikaly plochy s rozdílnou tloušťkou barvy (40-80  $\mu\text{m}$ ). Tyto vzorky byly otestovány pomocí flash pulzní termografie. Vzorkovací frekvence kamery (Flir SC7650) byla 250 Hz. Během každého měření bylo zaznamenáno 1000 snímků. Buzení bylo provedeno flash lampou (Hensel 6 kJ). Vzdálenost vzorku od lampy byla 38 cm a lampa byla umístěna kolmo na vzorek. Pro zjišťování tloušťky barvy je nutné, aby byla kamera synchronizována se zábleskem flash lampy. Tzn., aby bylo zajištěno snímání tepelné odezvy vždy ve stejných časech po záblesku. Bez této synchronizace je možné pomocí popsané techniky detekovat nerovnoměrnost v tloušťce nanesené barvy, ale není možné získat skutečnou tloušťku barvy.

### 4. Výsledky

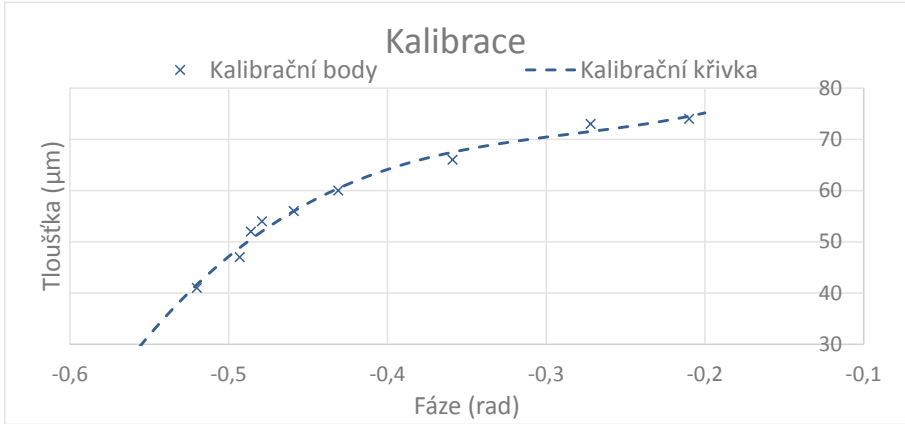
Na Obr. 1 je ukázáno rozmístění bodů pro získání kalibrační křivky. Z těchto bodů byly odečteny hodnoty fáze z phasegramu. Z těchto bodů byla také odečtena tloušťka pomocí tloušťkoměru (Positector 6000). Data pro získání kalibrační křivky jsou v Tab. 1 a samotná kalibrační křivka na Obr. 2.



**Obr. 1** Umístění bodů pro tvorbu kalibrační křivky/points position for calibration curve

**Tab. 1** Tabulka pro získání kalibrační křivky/Calibration curve table

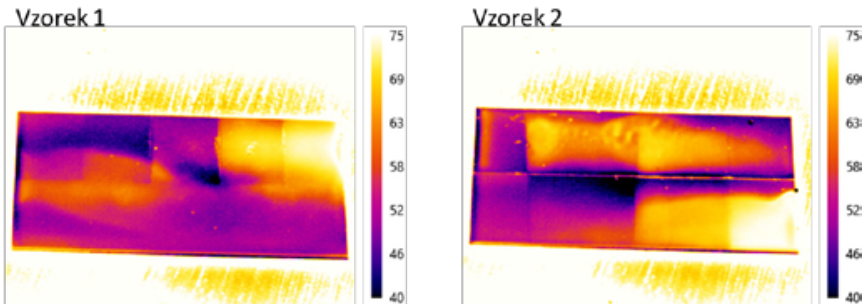
Bod	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Tloušťka ( $\mu\text{m}$ )	41	47	52	54	56	60	66	73	74
Fáze (rad)	-0.521	-0.493	-0.486	-0.479	-0.459	-0.431	-0.359	-0.272	-0.211



**Obr. 2** Kalibrační křivka/Calibration curve

Graf kalibrační křivky ukázal velmi dobrou shodu mezi kalibračními body (tj. naměřenými daty) a kalibrační křivkou. Konstanty  $C_1$ - $C_4$  pro výpočet kalibrační křivky byly 1515, 1284, 401,4 a 116,2.

Po zjištění kalibračních koeficientů bylo možné každé hodnotě fáze přiřadit hodnotu tloušťky. Na Obr. 3 jsou výsledné mapy tloušťky barvy obou vzorků vypočítané z phasegramů.



**Obr. 3** Rozložení tloušťky barvy v  $\mu\text{m}$ /Thickness map in  $\mu\text{m}$



Maximální chyba odhadu tloušťky oproti měřením provedenými tloušťkoměrem byla menší než 10 %, což odpovídalo rozdílu v tloušťce 6  $\mu\text{m}$ . Takováto odchylka je pro většinu průmyslových aplikací akceptovatelná.

## 5. Závěr

V příspěvku byla popsána technika flash pulzní termografie pro testování tloušťky barvy. Tloušťka byla zjištěna z hodnot fáze, které byly přepočteny pomocí kalibrační křivky tloušťka-fáze. Maximální chyba určení tloušťky byla 6  $\mu\text{m}$  v rozmezí tlouštěk 40 – 80  $\mu\text{m}$ . Hlavní výhodou představené techniky je její rychlost. V případě testovaných vzorků se během 4 s měření pokryla celá plocha vzorku s rozměry 5 x 10 cm. Standardními tloušťkoměry je možné získat 1 hodnotu tloušťky za 1 s. Hlavní nevýhodou představené techniky je nutnost získání kalibrační křivky. Výsledky FFT (fáze) jsou závislé především na vzdálenosti mezi lampou a vzorkem, materiálovými vlastnostmi vzorku a barvy a na použité lampě. To znamená, že samotná kalibrace je platná pouze na neměnnou měřicí konfiguraci. Kalibrační křivka není lineární, a proto se může lišit citlivost a tedy i přesnost určení tloušťky v různých intervalech tloušťky barvy. Výsledky ukazují, že flash pulzní termografie by mohla být vhodným nástrojem pro rychlé plošné testování tloušťky barvy v sériové výrobě.

## Poděkování

Tento výsledek vznikl v rámci projektu SGS-2019-008.

## Použitá literatura

- [1] MEZGHANI, S, E PERRIN, J L BODNAR, J MARTHE, B CAUWE, V VRABIE a A SAMPLES. Evaluation of Heterogeneity of Paint Coating on Metal Substrate Using Laser Infrared Thermography and Eddy Current [online]. 2015, 9(5), 837–842. ISSN 1359-6640. Dostupné z: doi:10.1039/B919800H
- [2] MEZGHANI, S., E. PERRIN, V. VRABIE, J. L. BODNAR, J. MARTHE a B. CAUWE. Evaluation of paint coating thickness variations based on pulsed Infrared thermography laser technique. Infrared Physics and Technology [online]. 2016, 76, 393–401. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2016.03.018
- [3] SHRESTHA, Ranjit a Wontae KIM. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part I: Simulation. Infrared Physics and Technology [online]. 2018, 92, 24–29. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2018.05.001
- [4] SHRESTHA, Ranjit a Wontae KIM. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography – Part II: Experimental investigation. Infrared Physics and Technology [online]. 2018, 92(May), 24–29. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2018.05.001





## **NOVÁ NORMA PRO ŠKOLENÍ PRACOVNÍKŮ NDT NEW STANDARD FOR NDT PERSONNEL TRAINING ORGANIZATIONS**

**Josef NEUGEBAUER**

TÜV NORD Czech, s.r.o.

Contact e-mail: [neugebauer@tuev-nord.cz](mailto:neugebauer@tuev-nord.cz)

### **Abstrakt**

*V červenci 2019 vyšla nová předběžná norma ČSN P CEN ISO/TS 25108 - Nedestruktivní zkoušení – Organizace pro školení pracovníků NDT.*

*Tato nově vydaná norma zavádí požadavky a doporučení pro školicí organizace nedestruktivního zkoušení (NDT) s cílem harmonizovat a udržovat obecnou úroveň školení pracovníků NDT pro průmyslové potřeby.*

*Dočteme se zde o minimálních požadavcích na efektivní strukturované školení pracovníků NDT tak, aby byla zajištěna způsobilost pro kvalifikační zkoušky vedoucí k certifikaci třetí stranou podle uznávaných norem.*

*Zároveň je připravováno vydání nové normy ISO/TS 25107, která uvádí požadavky a doporučené osnovy určené pro školení NDT. Tato norma bude vycházet z materiálu a osnov, které vyšly pod hlavičkou PROQUALINDT.*

*Proti původnímu vydání tato norma věnuje větší důraz na ověřování dosažených znalostí během školení. Zavádí nové pojmy, jako jsou dálkové studium či e-learning.*

*Tento článek se zabývá konsekvencemi, které z přijetí této normy vyplývají pro školicí střediska.*

**Klíčová slova:** *školení pracovníků NDT, harmonizace školení, kompetence pracovníků NDT, školicí střediska*

### **Abstract**

*A new ISO/TS 25108:2018 – Non-destructive testing – NDT personnel training organizations - preliminary standard was published in July 2019.*

*This newly published standard sets requirements and recommendations for non-destructive testing (NDT) training organizations, with the intention to harmonize and maintain the general standard of NDT personnel training for industrial needs.*

*It also introduces the minimum requirements for effective structured training of NDT personnel to ensure competence for qualification examinations leading to a third-party certification according to the recognized standards.*

*At the same time, a new ISO / TS 25107 standard, which specifies the requirements and recommended syllabus for NDT training, is being prepared. This standard will be based on the material and syllabus published under the PROQUALINDT heading.*

*Compared to the original edition, this standard puts more emphasis on verifying knowledge achieved during training. It introduces new concepts such as distance education or e-learning. This article deals with the consequences resulting from the acceptance of this standard for training centers.*

**Key words:** NDT personnel training, training harmonization, NDT personnel competencies, training centers

## 1. Úvod

V červenci 2019 vyšla předběžná norma ČSN P CEN ISO/TS 25108 - Nedestruktivní zkoušení – Organizace pro školení pracovníků NDT. Doposud platná norma ISO/TR 25108 je v zásadním dokumentu pro kvalifikaci a certifikaci personálu NDT – ISO 9712 zatím uvedena jen v poznámce (str. 15) jako vodítko pro organizace zajišťující školení pracovníků NDT. V již delší dobu avizované změně normy ISO 9712 je možnost, že se tato předběžná norma stane normou mandatorní. Tento článek se zabývá konsekvencemi vyplývajícími z možnosti, že bude tato norma uvedena v ISO 9712 jako povinná.

Na aktualizaci uvedené normy by mělo navazovat taktéž nové vydání ISO/TS 25107 – Non-destructive testing -- Guidelines for NDT training syllabuses. Nové vydání by mělo vycházet z materiálů, které vznikly v rámci programu PROQUALINDT.

Norma vyšla v české verzi v červenci 2019. Toto předběžné vydání je určeno k ověření. Případné připomínky k obsahu normy přijímá, jak se píše v Národní předmluvě, Česká agentura pro standardizaci.

Jak se lidově říká: „Každá změna je vždycky k horšímu“, tak i v této revidované normě nalezneme několik problematických pasáží. K těm se dostaneme dále v textu příspěvku.

V první části tohoto příspěvku se pokusím srovnat předchozí verzi s verzí aktuální a v další rozeberu některé nové povinnosti. Přílohu A: Pokyny pro organizaci školení NDT v organizacích, záměrně vynechávám.

## 2. Změny v novém vydání

Zaměřil jsem se tedy na aktualizovanou verzi diskutované normy a pokusil jsem se ji srovnat s verzí předchozí.

Hned v části Termíny a definice si můžeme povšimnout, že doznala změn. Proti původnímu odkazu na řadu norem EN 1330, jsou zde uvedeny konkrétní termíny. Dovolím si tvrdit, že některé z nich jsou v komunitě školících středisek novinkou. Mezi tyto novinky patří např. „dálkové studium“ či „e-learning“. Jsou zde taktéž rozlišení

jednotliví pracovníci školících středisek: školící personál (administrativa) a instruktor (aktivní vzdělavatel).

Aktuální verze doznala zajímavých změn v kapitole 8. (v původní normě kapitola 7.). Tato kapitola byla rozšířena o vývojový diagram, ze kterého je zřejmé, že uchazeč, který nesplní podmínky průběžného hodnocení, musí absolvovat část/celé školení znovu. Jen úspěšné absolvování průběžného školení je cesta jak úspěšně ukončit školení.

Na tuto skutečnost musí školící středisko uchazeče upozornit před zahájením vzdělávacího procesu.

Novinkou je také kvantitativní rozdělení školení části teoretické a praktické. Praktická cvičení mají nově zabírat 50±10% z celkového rozsahu školení.

Kapitola 12. Zařízení, konkretizuje požadavek staré normy „dostatečné množství a to tak, že za dostatečné množství jsou považováni maximálně dva studenti současně na stejném cvičení.

Naopak v aktuální normě vypadl požadavek na lektory, kteří učí v kurzech pro uchazeče o stupeň 3, že musí mít sami lektori také stupeň 3. Navíc aktuální norma upravuje počet studentů na každého instruktora během praktických cvičení (max. 10).

### **3. Poznámky k aktuálnímu vydání**

V Úvodu normy se dozvíme, že jejím vydáním jsou sledovány cíle veskrze ušlechtilé. Cituji:

*„S cílem harmonizovat a udržovat školení a certifikaci pracovníků NDT byl tento dokument pro školící organizace NDT společně s osnovami pro školení NDT (ISO/TS 25107) vyvinut s cílem sloužit osobám zapojeným do školení tak, aby bylo dosaženo jednotné úrovně školení, materiálů pro školení a následně kompetence pracovníků“.*

Tak a teď se podíváme na to, jak tato norma bude sloužit „osobám zapojených do školení“.

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, je kapitola Termíny a definice konkrétní.

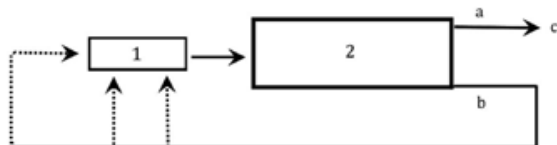
Otvírá cestu k aplikacím LMS (Learning Management Systems) ve školících střediscích a to v Poznámce 1 k heslu Materiál kurzu. Zde se praví, že materiály pro školení mohou být v tištěné nebo elektronické formě. Také v definici termínu E-learning, je uvedeno, že jde o učební metodu usnadněnou informačními a komunikačními technologiemi. E-learningu je věnována také celá Příloha B zmiňované normy.

Další z nových termínů, který já osobně vidím jako lehce problematický, je „Dálkové studium“. O domácí přípravě uchazečů mám svoji představu, kterou jsem nabyt praxí

lektora i zkušebního komisaře. Jako funkční dálkové studium si jej dokážu představit snad jen u uchazečů o Level 3.

Kosmetickou a snad i úsměvná je změna v terminologii, kdy lektora nahradí instruktor. Doufám, že to nebude důvod měnit jednotlivé Příručky jakosti školících středisek.

To že školící střediska v rámci výuky provádějí ověřování znalostí uchazečů není žádnou novinkou. Aktualizovaná norma zavádí pojem: požadovaný standard. Hodnocení studentů je zde znázorněno následujícím vývojovým diagramem:



#### Legenda

1 školení

2 průběžné hodnocení

POZNÁMKA Tečkovaná čára označuje další školení s možnostmi teoretického, praktického doškolení nebo obojího.

a dobře

b špatně

c úspěšné ukončení školení

Obr.1 Hodnocení studentů

Fig.1 Student assessment

Podle uvedeného vývojového diagramu je zřejmé, že uchazeč, který nedosáhne požadovaného standardu, bude muset absolvovat konzultace a pokusit se o opakované absolvování průběžného školení.

V normě se dále praví, že ve smlouvě mezi studentem (uchazečem) a školící organizací musí být zdůrazněny možné důsledky v případě, kdy student během školení nesplní požadavky některého bodu hodnocení.

Problém je, že nejsou definovány „požadované standardy“. Jak je nastavit? To bude asi na lidové tvořivosti jednotlivých školících organizací.

Co mi dost v této normě chybí, to jsou konkrétní kvalifikační požadavky na lektora, pardon, vlastně na instruktora.

#### 4. Závěr

Záměrem toho článku bylo upozornit na změny revidovaného vydání ČSN P CEN ISO/TS 25108 - Nedestruktivní zkoušení – Organizace pro školení pracovníků NDT. V kapitole 2 jsem zmínil podstatné změny proti předchozímu vydání. V kapitole 3 jsem připojil svůj komentář ke změnám, které považuji za důležité.

Záměrně se v článku vyhýbám hodnocení informativní přílohy A: Pokyny pro organizaci školení NDT v organizacích. Jak je uvedeno v Národní předmluvě, jde o vydání určené k ověření. Připomínky mají být zaslány na Českou agenturu pro standardizaci (ČAS).

Připomínkování obsahu normy bude součástí práce odborné skupiny OS10. Tato skupina všechny případné připomínky k obsahu shrne do jednoho dokumentu, který předloží výboru ČNDT, a jak doufám, budou tyto připomínky zaslány jménem ČNDT na ČAS.







## APLIKACE UMĚLÉ INTELIGENCE PŘI NEDESTRUKTIVNÍM TESTOVÁNÍ

### APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN NONDESTRUCTIVE TESTING

**Martin Pozdílek, Jakub Matoušek**

MF servis s.r.o., DEFEKTA NDT s.r.o.

Contact e-mail: mpozdzilek@mfservis.cz

#### **Abstrakt**

*Nedestruktivní testování se používá k detekci materiálových nekonzistencí výrobků, posouzení vlastností materiálu, ze kterého je předmět vyroben, a to bez jejich porušení nebo poškození. V praxi se různé NDT metody používají pro ověření kvality výroby. Ve výrobním procesu je potřeba co nejdříve vyřadit nebo opravit polotovary a výrobky, u kterých byla detekována vada vedoucí k budoucímu možnému poškození nebo zničení, a to zejména tam, kde je v ohrožení lidský život nebo životní prostředí. Bude ukázáno, jak lze aplikací různých typů umělých neuronových sítí (ANN) zkvalitnit a zpřesnit proces vyhodnocování rentgenových snímků výrobků. Jednak bude ukázána ANN, která klasifikuje vstupní rentgenové snímky výrobků do jedné z předdefinovaných kategorií, jako Bez vady, Vada, Pórovitost apod. Dále bude prezentován typ ANN, který umožňuje na vstupním snímku přímo detekovat typ a umístění zjištěných vad výrobku. Výstupem z neuronových sítí není pouze určení vady případně umístění vady, ale i další informace jako pravděpodobnost přiřazení do kategorie a obrázek „teplotní mapy“, ze které lze zjistit, které části vstupního snímku byly pro ANN nejdůležitější pro její rozhodnutí. Tyto dodatečné informace lze použít pro zdůvěhodnění výstupu ANN.*

**Klíčová slova:** nedestruktivní testování, umělá neuronová síť, klasifikace objektů, detekce objektů

#### **Abstract**

*Non-destructive testing is used for detection of material's inconsistencies, for assessing the properties of the material, without any damage to the product. In practice, various NDT methods utilize a high quality of production. The production process will be optimized when material corruption will be detected as soon as possible. It will be shown how applications of various artificial neural networks (ANN) can improve and refine this process of evaluation of X-ray images of products. First shown ANN classifies input X-ray image of product into one of the predefined classes, such as No Defect, Defect, Porosity etc. Next presented ANN can be used as well as for detection of the presence and also for visualization locations of material corruptions. Neural network outputs contain not only the detection of material corruption but*

also other information such as a probability and a heatmap. This useful information provides useful information for making ANN output reliable.

**Key words:** nondestructive testing, artificial neural networks, image classification, object detection

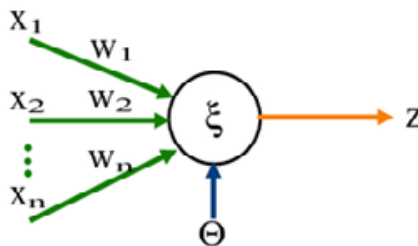
## 1. Úvod

V dnešní době se do průmyslové výroby začínají prosazovat prvky Průmyslu 4.0. Do výroby jsou nasazovány infromaticko-kyberneticko-fyzikální systémy, které mají výrobu co nejvíce zefektivnit a zkvalitnit. Ve výrobním procesu jsou identifikovány pravidelné, opakující se jednodušší činnosti, u kterých je lidská činnost podpořena nebo zcela nahrazena těmito systémy.

To má vliv na změnu pracovního stylu zaměstnanců. Zaměstnanci, kterým asistují tyto infromatické systémy, se mohou soustředit na nejasné, komplikované situace, kdy automatický systém není s dostatečnou mírou jistoty schopen rozhodnout o kvalitě výrobku. Zaměstnanci mají více času na kvalifikovanější práci, další pracovní úkoly. Případně může být systém nasazen na zlepšení kontroly kvality, kdy je kontrola zařazena do průběhu výroby a ne jen na koncový výrobek. Nebo je kontrola zdvojnásobena a souběžně prováděna lidským pracovníkem a nezávisle i automatickým systémem. Minimalizuje se tak možnost selhání kvůli lidské chybě způsobené nepozorností, přepracováním, zdravotním stavem nebo ztrátou pozornosti.

## 2. Umělá neuronová síť

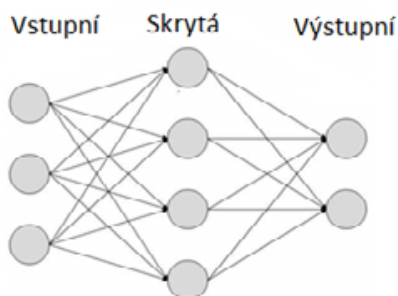
Umělá neuronová síť je v posledních letech jedním z nejpoužívanějších výpočetních modelů, který se prosazuje v umělé inteligenci. Tento model se snaží napodobit chování biologického mozku. Neuronová síť se skládá z umělých neuronů. Matematických modelů neuronů je více, ten nejjednodušší se nazývá perceptron. Do perceptronu vstupuje  $N$  vstupů  $x$ . Každý vstup má definovanou váhu  $w$ . Výstupem z perceptronu je hodnota  $Z$  spočítaná přenosovou funkcí. Příkladem této funkce může být například vážený součet.



**Obr. 1** Schéma perceptronu  
**Fig. 1** Scheme of the perceptron

Stejně jako u biologických mozků, kdy jsou neurony propojeny pomocí synapsí, které přenášejí elektrické signály mezi neurony, jsou i umělé neurony propojeny. Výstupní hodnoty umělých neuronů jsou vstupem pro jiné umělé neurony. Spojování umělých neuronů probíhá systematicky po vrstvách. Každá neuronová síť má vstupní vrstvu neuronů, výstupní vrstvu neuronů. Mezi nimi může být několik skrytých vrstev neuronů.

S rostoucím výkonem počítačů lze vytvářet složitější a složitější modely neuronové sítě. Původní neuronové sítě s jednou nebo několika málo skrytými vrstvami jsou postupně nahrazovány hlubokými neuronovými sítěmi (*deep neural networks*), které mají skrytých vrstev velmi mnoho. Právě tyto hluboké neuronové sítě dosahují velmi dobrých výsledků.



**Obr. 2** Schéma umělé neuronové sítě  
**Fig. 2** Scheme of Artificial neural network

Navrhnutí správné struktury neuronové sítě je otázkou zkušeností. Po vytvoření struktury neuronové sítě jsou všechny váhy vazeb nastaveny do výchozích hodnot. Aby mohla síť vyhodnocovat vstupní data, musí nejprve proběhnout časově a výpočetně náročný proces učení, při kterém se síť naučí, jak vyhodnocovat vstupní data na správné výstupní odpovědi.

Stejně jako se malé dítě učí s pomocí rodičů rozpoznávat barvy, obrázky, osoby, předměty, stejně jako se školák učí s pomocí učitele různou podobu písmenek nebo čísel, musí se neuronová síť naučit správně rozpoznávat vstupní data s pomocí školitele. Před samotným učením je tedy potřeba vytvořit učební soubor dat – číselná data, obrázky, videa apod., u kterých člověk dopředu určil výsledek.

V našem případě se jednalo o RTG snímky výrobků. U každého snímku bylo určeno, zda je bez vady nebo obsahuje nějakou vadu. Podle typu použité neuronové sítě se definovaly různé kategorie vad snímků, nebo i konkrétní pozice vad na snímcích. Příprava dat pro učení je kritickým místem při vytváření správně fungující neuronové sítě. Snímků spadajících do stejné kategorie musí být dostatečné množství. Snímky by měly být dostatečně kvalitní. Pokud existuje více variant snímků, které spadají

do stejné kategorie, měly by být zastoupeny všechny atd. Pokud se učební data připraví špatně, bude i výsledná neuronová síť nepřesná nebo chybná.

Učení neuronové sítě je výpočetně velmi náročné, vyžaduje server, který má dostatečný počet výkonných více jádrových procesorů, velké množství paměti, a především výkonné grafické karty. Data z učební souboru jsou interně rozdělena na učící a testovací. Učící data postupně prochází neuronovou sítí a postupně jsou upravovány váhy vazeb mezi umělými neurony. Stejně jako u živočichů, jsou některé vazby posíleny a některé oslabeny. Průchod dat pro učení se mnohonásobně opakuje a je prokládán ověřováním na testovací části dat. Podle vlastností neuronové sítě a nastavení parametrů trvá učení od několika málo minut až po několik dní.

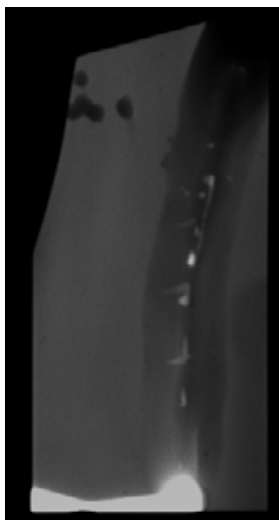
Vycvičenou neuronovou sítí je potřeba pečlivě ověřit na učebních a testovacích datech, ale hlavně na dalších datech, které se neúčastnily učebního procesu. Pokud neuronová síť dosahuje požadované přesnosti, lze ji použít. V opačném případě je potřeba upravit učební data a případně další parametry sítě a proces učení znovu opakovat.

### **3. Klasifikace RTG snímků**

V této kapitole je popsán první typ neuronové sítě, který byl použit pro automatické rozpoznávání vad výrobků (svarů) zobrazených na rentgenových snímcích. Tato síť byla vytvořena tak, aby vyhodnocovala rychle s minimálními výpočetními nároky. Dokáže přiřadit vstupní RTG snímek do jedné ze dvou kategorií – Bez vady, S vadou. Pro realizaci byla vybrána konvoluční neuronová síť GoogLeNet. Neuronová síť obsahuje 22 vrstev.

Učební soubor dat obsahoval přibližně 100 snímků výrobků bez vady a 100 výrobků s různými typy vad.

Úspěšnost neuronové sítě na množině 2780 snímků byla 98,5 %.



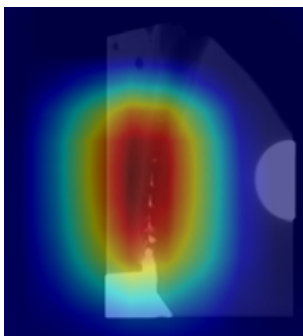
**Obr. 3** RTG snímek detekovaný jako vadný

**Fig. 3** RTG detected as defected

Pro každý vyhodnocovaný snímek mimo přiřazení do jedné z kategorií bylo i procentní vyčíslení pravděpodobnosti náležitosti do kategorie. V produkčním prostředí lze nastavit prahovou pravděpodobnost, při které je třeba přiřazení do kategorie nechat ověřit kvalifikovaným zaměstnancem.

Další informací, kterou neuronová síť nabízí, je i teplotní mapa (*heatmap*). Jedná se grafickou reprezentaci důležitosti jednotlivých oblastí vyhodnocovaného obrázku na finální přiřazení do kategorie. Důležitost je vyjádřena barvami od tmavě modré k tmavě červené. Překrytím teplotní mapy a vstupního obrázku lze zpětně ověřit, že pro neuronovou síť jsou opravdu důležité oblasti, kde se nachází vada výrobků.

Tyto dodatečné výstupy napomáhají důvěryhodnosti neuronové sítě.



*Obr. 4 RTG snímek překrytý teplotní mapou*  
*Fig. 4 RTG detected interlaced with heatmap*

#### **4. Detekce vad na RTG snímkách**

Standardní konvoluční neuronové sítě dokáží přiřazovat snímky pouze do předdefinovaných kategorií. Z jejich výstupu nelze určit, kde se určený objekt nachází. Pokud má neuronová síť najít a označit přesné místo výskytu vady, je třeba použít jiný typ neuronové sítě.

Pro úlohu určení konkrétní pozice vady byla vybrána neuronová síť Faster R-CNN. Síť vrací seznam obdélníkových oblastí obrázku, u kterých byla identifikována naučená kategorie hledaných objektů.

V tomto případě učební soubor musí obsahovat rentgenové snímky, na kterých byly vyznačeny obdélníkové oblasti, u kterých se vyskytovaly různé vady.

Výpočetní náročnost této neuronové sítě je již vyšší. Na počítačovém serveru použitým v předchozí kapitole byla doba vyhodnocení snímku přibližně 15 vteřin. Pro zrychlení doby odezvy bylo potřeba neuronovou síť provozovat na výkonnější grafické kartě. Poté doba vyhodnocení snímku opět klesla pod 1 vteřinu.

Úspěšnost neuronové sítě na množině 2780 snímků byla 97,8 %.

Výstupem této neuronové sítě je seznam všech nalezených oblastí na snímku, kde se vyskytuje obraz vady. Informace o pozicích lze například použít na zpětné zakreslení vady do kopie snímku, tedy vytvoření obohaceného snímku.

Mimo oblastí určených čtyřmi body síť vracela pro každou oblast i procentuální jistotu detekce dané vady. Tuto dodatečnou informaci lze opět využít na filtraci málo pravděpodobných vad nebo jako indikaci, že je potřeba názoru lidského experta.



*Obr. 5 Oblasti detekce vady na RTG snímku*  
*Fig. 5 Regions on a RTG with detected defections*

## 5. Kombinace postupů

Pro efektivní nasazení do produkčního prostředí je výhodnější namísto vytváření jedné univerzální neuronové sítě využít kombinaci různých specializovaných neuronových sítí, které jsou vyladěny na dílčí úkoly.

Jednoduchá nenáročná konvoluční neuronová síť může v prvním kroku zařazovat příchozí snímky do různých kategorií. Například identifikovat různé vyráběné produkty, určit typ svarů na snímku - koutový, tupý, plátovaný, rohový, apod. Následně jsou snímky posílány pro detailnější vyhodnocení, identifikaci místa vady, do jedné ze specializovaných sítí, která je vytvořena pouze pro danou kategorii snímků.

Takto jde průběžně vytvářet automatizovaný systém, který se průběžně přizpůsobuje požadavkům výroby.

## 6. Závěr

Umělá inteligence napomáhá automatizovat, zrychlovat, zpřesňovat nebo škálovat lidské kognitivní schopnosti jako jsou vnímání, uvažování nebo rozhodování. Jejím zapojením do výrobního procesu lze dosáhnout vyšší efektivity a kvality. Opakující se činnosti podpořené systémem s umělou inteligencí budou rychleji a přesněji vykonávány, protože se sníží podíl lidské chybovosti.

Při využití neuronových sítí na rentgenových snímcích nebo kontinuálním záznamu v reálném čase je nejefektivnější nalezení zájmové oblasti a označení vady. Takto lze mnohonásobně zefektivnit kontrolu hlavně při aplikacích na velké, opakovatelné výrobní série, jako jsou například výroba automobilových kol z lehkých slitin nebo opakovatelná kontrola jednoduchých svařenců.

Úspory prostředků lze dosáhnout zkrácením potřebného času pro kontrolu, a tím mnohonásobně většího počtu zkontrolovaných kusů za stejný čas. V praxi je pak možné redukovat počet paralelních kontrolních linek, nebo zvýšení produktivity bez potřeby nákupu dalších zařízení. Další oblastí je rozpoznávání a určování přípustnosti vad, učení pro tento účel je mnohem složitější a náročnější. Nepůjde pravděpodobně nikdy obsáhnout všechny sektory NDT jedním souborem neuronových sítí, proto je nutné učit sítě pro dané aplikace. Je zřejmé, že není možné s ohledem na povahu a důležitost vynechat lidský faktor pro supervizi systému a korigování výsledků, přesto již nyní úspěšně pracují obdobné systémy na letištích pro rozpoznávání hrozeb v zavazadlech při odbavení cestujících. Je tedy jen otázkou ekonomičnosti, pro jakou kontrolu je systém umělé inteligence využitelný.





## UNIKÁTNÍ AUTOMATIZOVANÝ SYSTÉM PRO NDT TESTOVÁNÍ ŽELEZNIČNÍCH KOLECH

### UNIQUE AUTOMATED SYSTEM FOR TESTING FOR NDT OF RAILWAY WHEELS

Stanislav ŠTARMAN

STARMANS electronics, s r.o.

Contact e-mail: info@starmans.cz

#### **Abstrakt**

*Tento článek představuje jedinečný, nově, vyvinutý inteligentní a pokročilý systém pro automatickou detekci a klasifikaci vad na železničních kolech. Popsaný systém je plně automatický a využívá principů nedestruktivních metod založených na ultrazvukovém testování a magnetické práškové metodě. Námí navržený a kompletně zkonstruovaný systém se používá v průmyslových aplikacích, kde je velmi žádoucí nedestruktivní testování železničních kol se zaměřením na detekci a klasifikaci vad. Prezentovaný systém je součástí komplexní testovací linky a umožňuje detekovat jak povrchové, tak podpovrchové vady. Pomocí tohoto systému je možné otestovat až 15 kol za hodinu, což je v praxi ojedinělé. Prezentovaný systém je již nainstalován a plně funkční v různých průmyslových aplikacích i v zahraničí.*

**Klíčová slova:** *Ultrazvuk, magnetická prášková metoda, železniční kola, automatické testování*

#### **Abstract**

*This paper presents the unique newly developed intelligent system for automated detection and classification of flaws on railway wheels. The described system is fully automatic and uses the principle of non-destructive method based on ultrasonic testing and magnetic particle inspection. Our proposed and finally constructed system is used in industrial applications where non-destructive testing of railway wheels with focus on flaws detection and classification is highly desired. The presented system is the part of complex testing line, so it is possible to detect both surface and subsurface flaws. Using this system, it is possible to test up to 15 wheels per hour. The presented system is already installed and fully functional in industrial applications also abroad.*

**Key words:** *Ultrasound testing, magnetic particle inspection, railway wheels, automated non-destructive testing*

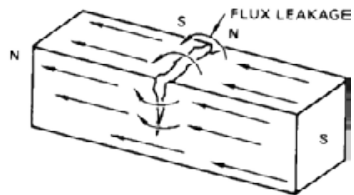
## 1. Introduction

High safety standards required in the management of railroad lines demand the inspection of railway wheels directly after production in order to detect the presence of surface cracks that could seriously affect the integrity of the railway, and therefore passengers' safety.

During the last three years, we have been developing an automatic system for surface defect detection on railway wheels. The main goal was to develop the highly reliable system based on image processing algorithms that gives a warning of surface flaws to prevent possible future accidents. The system is based on magnetic particle inspection where the railway wheel is put into the magnetic field and the cracks and flaws cause a magnetic stray field. By this technique the cracks are visible and they can be easily recorded using high speed digital camera. Using the implemented advanced signal processing algorithms it is possible to detect and classify all recorded flaws and cracks. Intelligence System brings the automatic detection and classification of defects that do not require the presence of the human factor. The mentioned testing of railroad wheels is based on magnetic particle inspection.

## 2. Magnetic Particle Testing

Magnetic particle inspection (MT) processes are non-destructive methods [1] for the detection of surface and sub-surface defects in ferrous materials [2]. They make use of an externally applied magnetic field or electric current through the material, and the principle that the magnetic flux will leave the part at the area of the flaw. The presence of a surface or near surface flaw in the material causes distortion in the magnetic flux through it, which in turn causes leakage of the magnetic fields at the flaw. This deformation of the magnetic field is not limited to the immediate locality of the defect but extends for a considerable distance; even through



*Fig. 1. Magnetic flux flow*

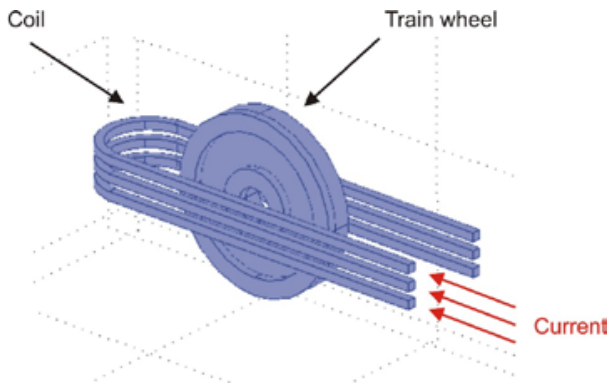
the surface and into the air if the magnetism is intense enough. Thus the size of the distortion is much larger than that of the defect and is made visible at the surface of the part by means of the tiny particles that are attracted to the leakage fields. Magnetic particles are usually applied as a suspension in water or paraffin. This enables the particles to flow over the surface and to migrate to any flaws. The most sensitive technique, however, is to use fluorescent particles viewed under UV (ultraviolet) light. The principle of the piece magnetization can be seen in Fig. 1.

### 3. System proposal

As described in previous section, our system uses non-destructive testing method based on magnetic particle testing. As our system is developed for inspection purposes of railway wheels we set initial requirements that have to be finally fulfilled. The first requirement was to scan the whole surface of railway wheel in different wheel diameters. The desired wheel diameter is within 500 – 1300 mm. In general, the system had to be flexible to scan the surface in different dimensions. This also corresponds to requirements on magnetization of tested railway wheels. Different wheel diameters require different magnetization currents. Another requirement was to automatically scan the surface of the wheel, without using the human intervene. For this reason we proposed new digital cameras with high-resolution that were automatically driven to scan the whole surface of the wheel. With these cameras, it was necessary to scan all corners and drapes of the wheels. The last main requirement was to propose and implement efficient signal processing methods used for safe detection and classification of flaws in exact sizes. The minimal size of detected flaw was determined to 1 mm in length and 0.3 mm in thickness. These values are based on standards defined in rail industry. As described before, the system was as a part of complex inspection line used for subsurface defect detection using ultrasonic non-destructive testing it has to be also prepared to inspect wheels in adequate speed.

### 4. System overview

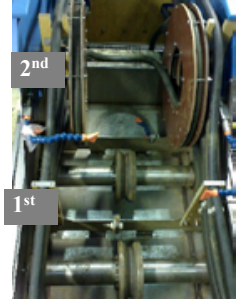
The system's requirements mentioned above have been kept in mind during the system proposal. As a basis for railway wheel inspection was the magnetic particle method. Based on this, we propose settings of inspection line. The main part of proposed testing system is the coil used for magnetization of inspected wheels.



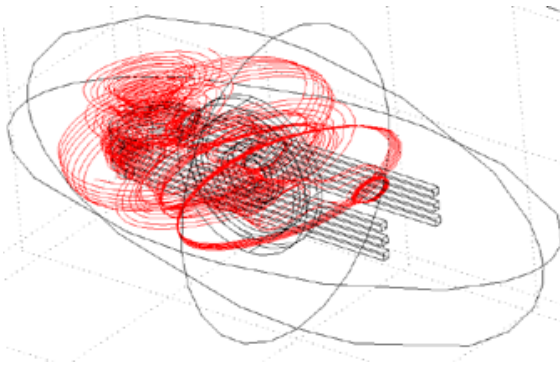
*Fig. 2. System configuration for railway wheel testing*

The configuration of proposed coil has to correspond to correct magnetization [3] of railway wheel. The whole volume of railway wheel has to be efficiently magnetized. To obtain such magnetization, we have decided to rotate the railway wheel during the magnetization process (i.e. during the time when the current is applied to the coil). The Fig. 2 shows the proposal of coil configuration and location of railway wheel in the area of coil.

In the developing stage, we simulated the magnetic field to find out the optimal position of railway wheel in magnetic field for the best defect visibility. In Fig. 3., the streamlines of magnetic flux density represents the magnetic field. The strongest magnetic field (flux density) can be visible at the bending of coil. It means, in case the railway wheel has sizable diameter than it is better magnetized. As we need to reach the appropriate magnetization of all predefined wheels (all required diameters), it was necessary to use the second spiraled coil located near to the centre of the railway wheel (see Fig. 3.). The second spiraled coil was used to improve the total magnetization of railway wheel and make the magnetic field stronger in relation to definitions mentioned in standards. Finally, the main goal was to detect flaws in all directions. The simulation of magnetic flux density distribution can be seen in Fig. 4.

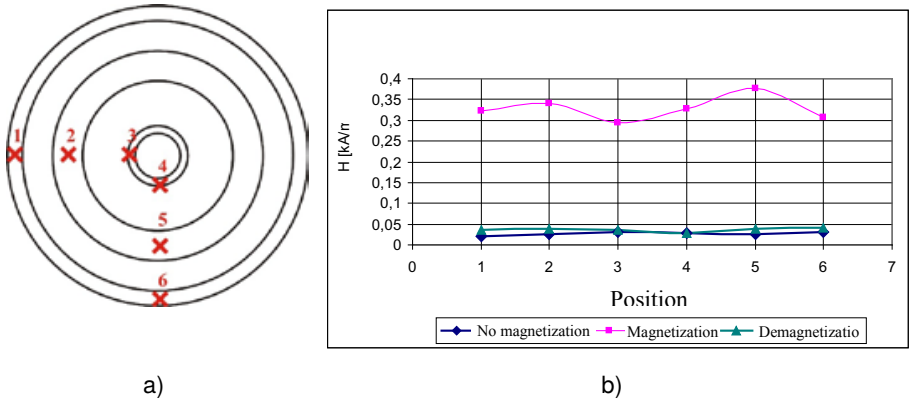


**Fig. 3.** Configuration of coils



**Fig. 4.** Magnetic flux density

To make the decision about the proper configuration of coils and location of railway wheel, the first measurements were performed. For such measurements, six measured points were determined. All these measured points can be seen in Fig. 5a. The results of magnetic intensity  $H$  measurements are visible in Fig. 5b.

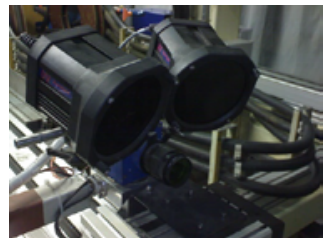


**Fig. 5.** Magnetic intensity measurement, a) locations, b) results

As can be seen in Fig. 5., the minimal intensity was reached near to the center (locations 3 and 4) of the railway wheel (about 300 A/m). On the other hand, the maximal intensity was obtained in place 5 ( $H = 376$  A/m). This value of intensity was reached due to overlay of both coils.

As railway wheels were successfully magnetized, we were able to resolve the second step. As second step, we considered the dousing of railway wheel by liquid containing ferrous fluorescent particles [4]. In case, the wheel is covered by ferrous fluorescent particles the flaws are consequently easily visible. During this step we had to find out at which phase the liquid needed to be spout on the inspected wheel. The best time we found was the time during magnetization. This led to certain time that wheel needed to be magnetized and covered with fluorescent liquid simultaneously.

When the inspected railway wheel was successfully magnetized and covered with fluorescent liquid, the flaws and cracks had to be found. All recent lines used for this inspection employed operator. Defects and cracks were manually found using ultraviolet lights. As our goal was to develop automated inspection line with intelligent algorithms, we used for defect detection our developed cameras. During the magnetic inspection of railway wheel, the railway wheel surface was scanned using the digital camera. Each place of inspected wheel was inspected on-line, almost in real time. Digital camera (see Fig. 6.) scans the whole surface and all recorded pictures were promptly evaluated using our proposed image processing algorithms. Whole surface and different sizes of railway wheels can be inspected.



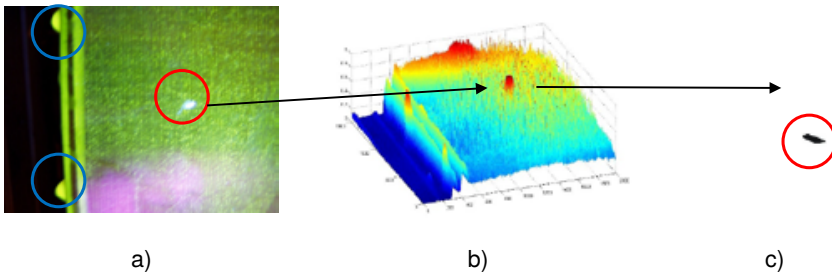
**Fig. 6.** Digital camera with UV light

## 5. Defect detection and classification

As was mentioned before, for defect detection we proposed simple signal processing algorithms. The defect detection process can be briefly described in the three following main steps:

### a) Noise reduction

The recorded picture is corrupted (see Fig. 7a.) with relatively high noise level (see Fig. 7b.) and detection process is more difficult. As a noise suppression technique, we used simple mathematical processing algorithm based on space pixel averaging. Each pixel of recorded picture has certain amplitude level. By application of space averaging moving along the picture, the places with high amplitudes represent flaws and places with random amplitudes represent noise. It means places with random amplitudes were suppressed.



*Fig. 7. Defect detection algorithm, a) recorded picture, b) flaw amplitude level, c) detected flaw*

### b) Defect detection

Defects should be recognized from scratchy surface of railway wheel. By using our signal processing algorithm, defects are recognized from noise. The final pictures contain amplitudes representing flaws only (see Fig. 7c.). In case the defect appears, it was automatically marked on pictures. All pictures containing flaws were stored.

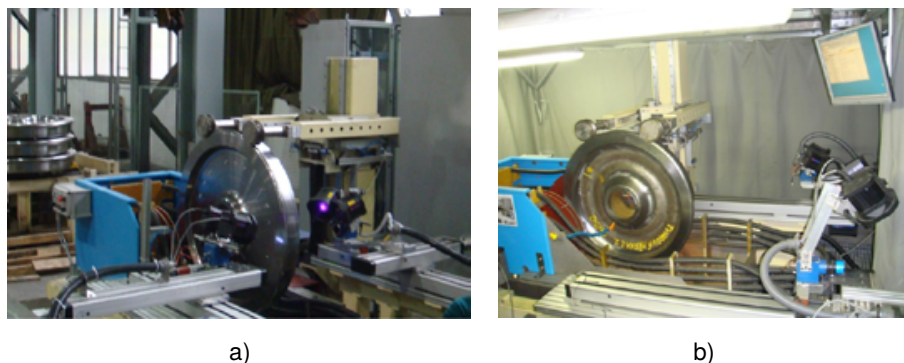
### c) Defect classification

The defects most commonly occurring on railway wheels are like straight line. With proposed algorithm, we can recognize the flaw shape and consequently classified as a linear object in various slope or as an object with distinct shape (drop of magnetic particles).

## 6. System construction

The previous sections describe system proposal, coil configuration, and defect detection algorithms. Our proposed inspection system is mainly focused on surface

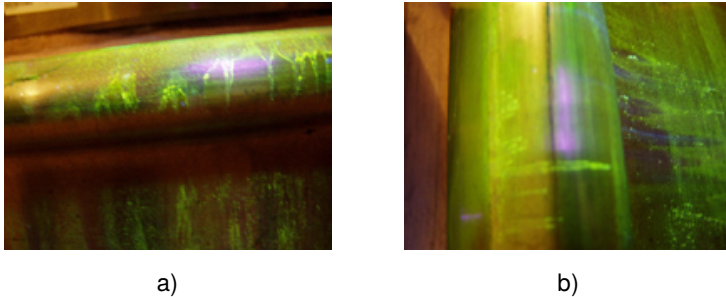
defect detection on railway wheels using magnetic particle testing method. To have all adequate system's parts working together the industrial control system (PLC - Programmable logic controllers) was used. Such developed industrial system controls all processes to successfully detect flaws on railway wheels. In general, our system cooperates with ultrasonic inspection line (also developed by our company). In technical standpoint, the inspected wheel is automatically put into the inspection area (to the center of coils) and using automated holding system, the wheel is rotated all around. During the rotation, the wheel is magnetized and covered with fluorescent liquid. Consequently, the surface of railway wheel is scanned by digital cameras and flaws are recognized on-line. In case the flaw is detected, picture is automatically saved to database and operator is acoustically warned of flaw presence. Operator can finally check the flaw presence and location. The basic overview of our developed inspection system is in Fig. 8.



*Fig. 8. Developed inspection system, a) wheel under inspection, b) magnetization process*

## 7. Experimental results

Using the described intelligent system, we could acquire images representing the surface of railway wheel. All measurements correspond to real industrial environment and processes used during the testing of railway wheels using magnetic particle inspection method. Based on the initial measurement we have noticed some issues which make the detection and classification process more difficult. As can be seen in Fig. 8, the picture shows the flaw (red circle) and areas which represents the drops (blue circles). Drops are formed during wetting process using the fluorescent liquid. For SP methods, such drops represent the presence of flaws and the detection process can finally detect wrong defects. Other pictures representing drops formed during wetting process can be seen in Fig. 9.



**Fig. 9.** Pictures with drops which make the detection process more difficult

Based on that, the next research stage was focused on the elimination of drops. Using our knowledge and other experiments we have improved the signal processing methods. These improved methods were based on acquisition more pictures which were synchronized with rotation speed of railway wheel. Such method leads to elimination of drops, where the places with decreasing amplitude were removed from the detection process. The defects, areas with the same amplitudes were successfully recognized as flaws.

## **8. Conclusion**

This paper presents our fully developed industrial system used for surface defect detection on railway wheels using magnetic particle inspection method. Using the described system, it is possible to detect surface flaws on railway wheels. The digital camera with adequate resolution was developed for the surface scanning and advanced image processing algorithms are finally implemented in hardware part. In case of flaw detection, it is possible to detect the flaws in length of 1 mm and thickness (width) of 0.3 mm. The proposed system is fully automatic and is capable to detect and classify flaws. During the implementation and verification we have discovered some issues (drops) that make the detection process more complicated. Based on the experiments and practical knowledge we have resolved the issue and drops are efficiently suppressed. The presented system is as a part of complex inspection line and can be easily modified for special desired industrial applications.



## References

- [1] Bray, Don E. and Don McBride: "Nondestructive Testing Techniques," John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [2] Vetterlein T., Tiede G.S.: Application of Magnetic Particle Inspection in the Field of the Automotive industry, Berlin, ECNDT, 2006.
- [3] George Downes: DC or AC Magnetising Waveforms in Magnetic Particle Inspection. Insight NDT Equipment Ltd, 2003.
- [4] William C. Chedister: Quantitative Evaluation of Magnetic Particle Inspection Materials. PANNDT, 2003.





# **POKROČILÉ METODY POUŽÍVANÉ PŘI ULTRAZVUKOVÉM TESTOVÁNÍ PRO PŘESNÉ DETEKCE ANOMÁLIÍ ADVANCED PROCESSING METHODS USED IN ULTRASONIC AREAS FOR PRECISE ANOMALLY IDENTIFICATION**

**Stanislav ŠTARMAN**

STARMANS electronics, s r.o.

Contact e-mail: info@starmans.cz

## **Abstrakt**

*Předložený článek popisuje nově vyvinuté metody používané při ultrazvukovém testování s cílem detekce různých anomálií nacházejících se jak v materiálech, tak v tkáních. Článek uvádí využití stávajících ultrazvukových systémů s implementovanými unikátními metodami zpracování signálu a obrazu, které nacházejí široké uplatnění v průmyslových i lékařských aplikacích. Vyvinutý systém umožňuje detekci a klasifikaci anomálií v mikrometrové oblasti. Navržený a vyvinutý systém je v současné době nasazen v praktických aplikacích a provádí se detailní otestování s cílem postupného vylepšení a optimalizace vizualizačních obrazovek. Výsledný systém musí umožňovat jednoznačnou identifikaci a lokalizaci anomálií tak, aby došlo k předčasné identifikaci zdraví ohrožujících příčin.*

**Klíčová slova:** Ultrazvuk, zpracování signálu a obrazu, lékařství, automatická detekce

## **Abstract**

*The present paper describes newly developed methods used in ultrasound testing to detect various anomalies found in both materials and tissues. The paper presents the use of existing ultrasonic systems with implemented unique methods of signal and image processing, which are widely used in industrial and medical applications. The developed system allows detection and classification of anomalies in the micrometer area. The designed and developed system is currently deployed in practical applications and detailed testing is carried out in order to gradually improve and optimize visualization screens. The resulting system must allow for an unambiguous identification and location of anomalies so that the health-threatening causes can be identified early.*

**Key words:** Ultrasound, signal and image processing, medical applications, automated detection

## **1. Introduction**

Ultrasonic non-destructive testing (UT) is commonly used for flaw detection in materials. Ultrasound uses the transmission of high-frequency sound waves in a material to detect a discontinuity or to locate changes in material properties [1]. Ultrasonic wave propagation in tested materials is essentially influenced by the tested material structure. In general, due to material structure the acquired ultrasonic signal can be corrupted with relatively high noise level, commonly called backscattering noise [2]. In present, the most desired task is to detect the fault echo in ultrasonic signal; it means to locate the subsurface cracks or defects in materials. The noise level mainly influences the flaw detection efficiency and on this account the efficient signal processing techniques used for noise reduction have to be proposed. As all acquired signals are processed with our implemented signal processing methods than all signals are reconstructed to create flaw visualization using phased array technology.

## **2. Phased Array technology**

Our main goal was to implement the advanced ultrasonic phased array technique [5] and visualize the internal bulk of material in detail. Phased array holds the promise of being able to efficiently detect all significant flaws by combining many angles and focus depths into one probe and image the resulting reflections in an understandable way. Flaw acceptance still requires the comparison of flaw reflections represented as an A-scan with the A-scan of a known artificial reflector such as a side-drilled or flat-bottomed hole. The use of special signal processing and image reconstruction algorithms allows generating A-scans of several angles and/or sector-scans, which can be implemented in real time. With parallel computing structures, this principle is used for automatic testing systems at very high inspection speed.

Over the past few years, many companies have introduced systems making use of phased array technology. Phased array training courses for operators usually address general principles and only few examples of real applications. One of the major difficulties often omitted during training and in practice is the actual coverage of phased arrays. It is easy to say that a sector scan will detect all defects in a material as it passes through a large range of probe angles. Although a high probability of detection can be achieved – certainly a lot higher than manual UT – it is by no means guaranteed that all defects will be detected. The resolution in terms of the step width between angles and the focus depth range are of major importance to detect defects and discriminate between adjacent flaws. The angle at which an ultrasonic reflector is detected is not only dependent upon the angle of incidence of the transducer array, but is also dependent upon the position of the transducer relative to the weld axis.

When these parameters are not adequately addressed, these factors can seriously affect the degree of success of phased array inspection.

As we mentioned before, the first implemented phased array technology is based in synchronous transmitting of signals from all elements followed by receiving of reflected signals, we are working on improvements. These improvements are based on transmitting of each element independently with some delay based on focused point. Other elements transmit ultrasonic signals with derived delay. The following drawing represents our calculation of time delay of each element.

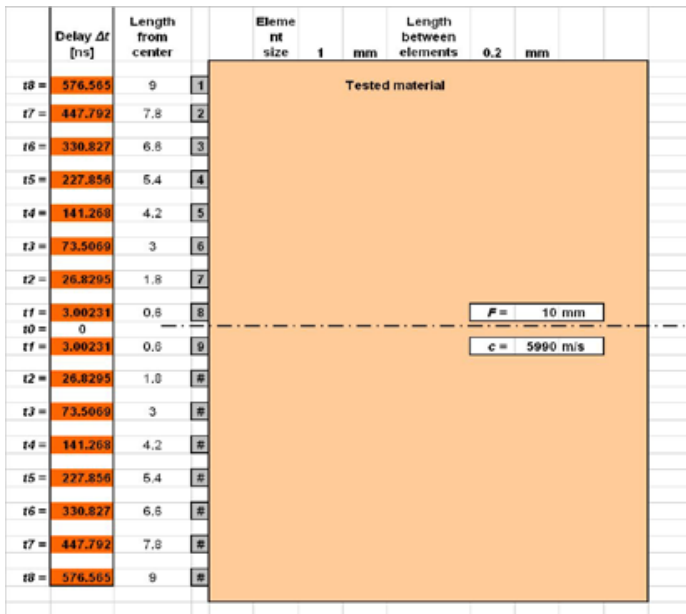
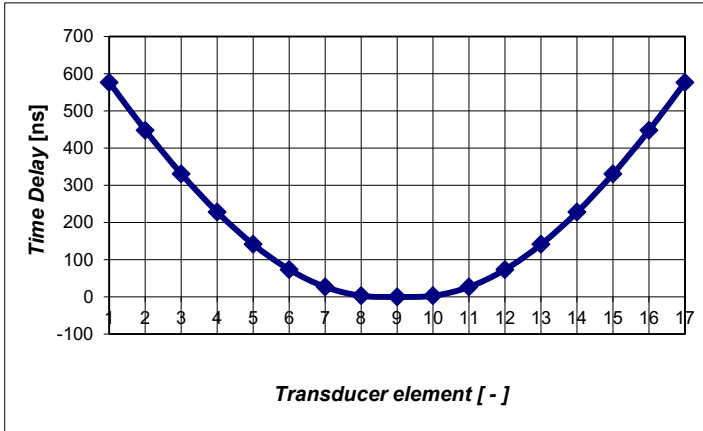


Fig. 1: Calculation of time delay

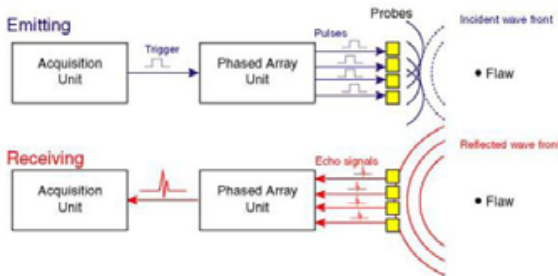
We suppose, the transducer is located on the tested material and each element is transmitting signal with derived delay. The following Fig. 4 shows the curve of time delay based on each element location deviated from central position of phased array transducer (see central axis in Fig. 2).



**Fig. 2:** Time delay of transmitted signals

As can be seen in Fig. 2 the transmitting of all elements has semicircle curve shape. By calculated time delay we can receive signals with unique information about flaw location during manual testing. Our analysis supposes there is circled flaw in the center of the material under the phased array transducer.

The following Fig. 3. shows how the signal delay is in relation with phasing.



**Fig. 3.** Phasing of ultrasonic signals

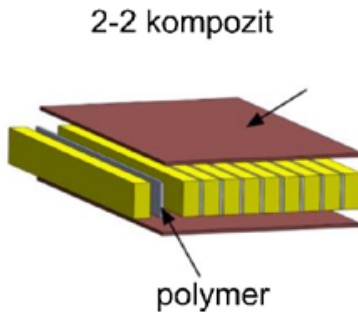
Each signal received by the phased array unit has specific delay, which needs to be corrected to have the proper information about the flaw location. The correct delay  $d_n$  had the following formula.

$$d_n = \sqrt{d_a^2 + (x_a - x_n)^2}, \tau = \frac{2d_n}{c}$$

As signals are received from more ultrasonic transducers, the final signal summary has to be calculated.

$$C_{\Lambda}(k) = \frac{1}{m} \sum_{n=\Lambda-\frac{m}{2}}^{\Lambda+\frac{m}{2}} s_{\Lambda}(k) s_n(k),$$

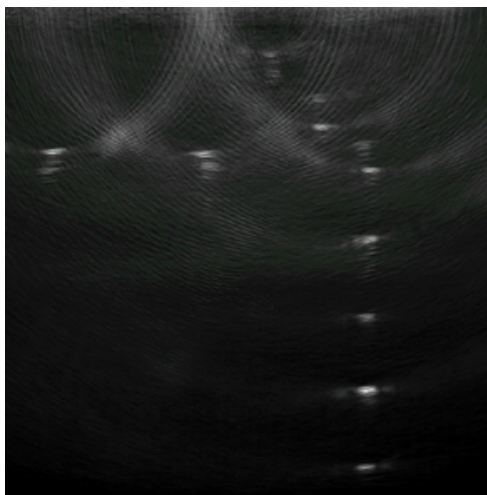
Using our theoretical analysis and development resources, we have successfully developed ultrasonic instrument with implemented advanced signal processing algorithms using multiarray ultrasonic transducers. The sample of two-dimensional ultrasonic transducer is shown in Fig. 4. As displayed, there are several layers of ultrasonic transducers, each of them has implemented phasing, so causing delay of ultrasonic signals based on the specific signal generation algorithm.



*Fig. 4. Model of 2D ultrasonic transducer*

Using the developed and constructed 2D ultrasonic transducer and phased array technique, we can easily detect flaws within the range of scanned angles. To verify the proposed system and properly configure all parameters we also constructed calibration gauge with defined flaws (see Fig. 5.). When we passed all tests and initial experiments we could see the flaws on calibration gauge. Using the predefined settings, we use our system for industrial application, see below.

During the last few years we have been working on improvements in resolution. Based on special settings and configuration we have reached the resolution to recognize two flaws located 1 mm between each other. The main improvements were made in signal processing; the noise has been successfully suppressed and signal representing flaws and cracks are simply displays.



**Fig. 5.** Detection of artificial defects on calibration gauge

### 3. Conclusion

This paper presented our developed ultrasonic portable system where advanced signal processing methods are presented. The developed system contains implemented conventional ultrasonic testing and phased array testing using multidimensional ultrasonic transducers. The presented system is equipped with phased array technology. As we are continuously improving our system we are able to scan flaws using transmitting and receiving signal at the same time. The presented paper describes phased array technique using transmitting the signals with derived time delay based on distance from focused point. Using this system, we are able to detect anomalies in materials in micrometer sizes. Our proposed system is not used only for NDT applications, but for medical applications as well. More details will be presented during the conference.

### References

- [1] Krautkramer J., Krautkramer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer-Verlag, 4th fully revised edition, 1990, 670 p., ISBN 3-540-51231-4.
- [2] Matz, V., Šmíd, R., Štarman, S., Kreidl, M.: Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing. *Ultrasonics*, Elsevier: In press, 2009.



- [3] Masahiko Hirao, Hirotsugu Ogi: *Emats for science and industry, Noncontacting ultrasonic measurements*. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] Robert E. Green, Jr.: *Non-contact ultrasonic techniques*, Ultrasonics, Volume 42, Issues 1-9, April 2004, Pages 9-16.
- [5] Noël Dubé: *Advances in Phased Array ultrasonic technology applications*. Waltham, MA: Olympus NDT, 2007.
- [6] A Bulavinov *et al*, 'Sampling phased array a new technique for signal processing and ultrasonic imaging', Berlin, ECNDT, 2006.





# VLIV OBSAHU SAZÍ NA AKTIVITU AKUSTICKÉ EMISE PŘI CYKlickÉM NAMÁHÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

## EFFECT OF CARBON BLACK CONTENT ON ACOUSTIC EMISSION ACTIVITY DURING CYCLIC LOADING OF COMPOSITE MATERIALS

Libor TOPOLÁŘ\*, Pavel ROVNANÍK\*, Pavel SCHMID\*

\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Contact e-mail: libor.topolar@vutbr.cz

### **Abstrakt**

*Klasický beton na bázi cementu je nejpoužívanějším stavebním materiálem. Dnešní doba si ovšem žádá stále vyšší nároky na nízkou energetickou náročnost, na trvanlivost konstrukcí spojenou s jednoduchou a levnou diagnostikou stavu konstrukce a velmi důležitým aspektem je také ekologie. Tento příspěvek se zabývá aluminosilikátovými kompozity s obsahem vodivých plniv, díky kterým je možné monitorovat změnu elektrických vlastností v závislosti na mechanickém namáhání. V rámci experimentu byly vyrobeny zkušební kostky (o hraně 150 mm) na bázi alkalicky aktivované strusky s obsahem sazí. Zkušební kostky byly namáhány cyklicky tlakem a byla sledována aktivita akustické emise.*

**Klíčová slova:** metoda akustické emise, aluminosilikátové kompozity, cyklická zkouška tlakem

### **Abstract**

*Ordinary cement-based concrete is the most widely used building material, but nowadays, requirements for low energy consumption, the durability of structures associated with simple and inexpensive diagnostics of the state of the structure, and ecology is also a very important aspect. This paper deals with aluminosilicate composites containing conductive fillers, thanks to which it is possible to monitor the change of electrical properties in dependence on mechanical stress. Within the experiment, test cubes (150 mm edge) were produced based on alkali-activated slag containing carbon black. The test cubes were cyclically stressed and the acoustic emission activity was monitored.*

**Key words:** acoustic emission method, aluminosilicate composite, cyclic compression test

## 1. Úvod

Při výrobě jedné tuny portlandského cementu, který je majoritně využíván jako pojivová složka betonu, se vyprodukuje přibližně jedna tuna oxidu uhličitého, jehož produkce se snaží být co nejvíce eliminována. Z těchto důvodů je nutností vylepšovat vlastnosti betonu pomocí různých přísad a ideálně, alespoň částečně, nahrazovat cement jinou pojivovou složkou jakou může být například elektrárenský popílek nebo vysokopecní struska [1].

V posledních letech dochází také k výraznému rozvoji v použití tzv. chytrých materiálů. Jsou to často materiály, které jsou běžně využívány ve stavební praxi, ale jejich modifikací je možné získat přidanou funkcionalitu. Příkladem takové modifikace může být přídavek vodivého plniva, které umožní snížit elektrický odpor základního materiálu [2]. Jako plnivo se nejčastěji používají grafitový prach, uhlíkové saze, uhlíkové nanotrubičky, uhlíková vlákna, ocelová vlákna, niklový prach nebo ocelářská struska [3,4]. Pokles elektrického odporu betonu otevírá možnosti vývoje materiálů se sensorickými vlastnostmi, samovyhříváných kompozitů, bezpečnostních materiálů zabrahujících průchodu elektromagnetických vln nebo materiálů využitelných při detekci a zjištění hmotnosti projíždějících vozidel [5-8]. Takový stavební materiál je zároveň konstrukční a současně i senzor. Tento chytrý stavební materiál tak poskytuje nový přístup k vyhodnocování bezpečnosti a trvanlivosti konstrukce během celé její životnosti.

V rámci této studie byly zkoumány mechanické vlastnosti geopolymerního kompozitu při namáhání v tlaku. Jako základní materiál byl použit geopolymer na bázi popílku z vysokoteplotního spalování a jako vodivá přísada byly využity uhlíkové saze. Pro obsah sazí byly zvoleny hodnoty 0,5 a 1,0 % z hmotnosti popílku. Výsledky měření byly srovnány se základním geopolymerním materiálem bez uhlíkových sazí. Uhlíkové saze jsou formou amorfního uhlíku, který má velmi velký měrný povrch. Výhodami sazí jsou nízká hmotnost, vysoká chemická a tepelná stabilita, trvalá elektrická vodivost a nízká cena. V současné době jsou saze jedno z nejčastěji používaných funkčních plniv pro výrobu chytrého materiálu.

## 2. Popis experimentu

V rámci experimentu byly sledovány vzorky se dvěma různými obsahy sazí 0,5 % (CB\_05) a 1,0 % (CB\_10) a referenční vzorek (REF) bez přísady sazí. Zatěžování probíhalo ve třech cyklech, kdy každý cyklus měl v sobě vzrůstající i klesající amplitudu zatěžovací síly (viz Obr. 1).

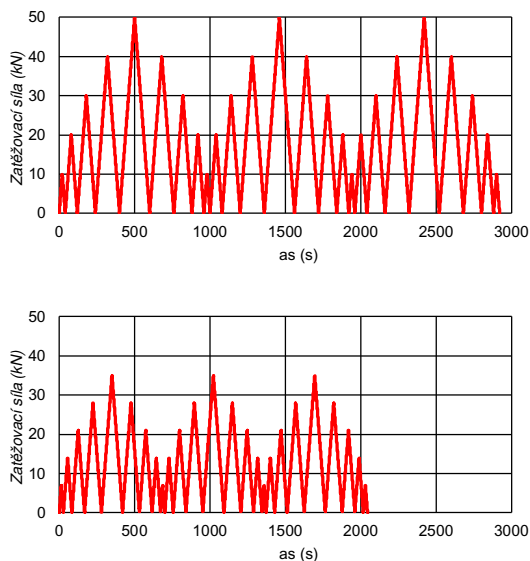
Pro studium mechanických vlastností byl zvolen jako referenční materiál geopolymer na bázi popílku z vysokoteplotního spalování uhlí z elektrárny Dětmorovice, jehož měrný povrch činil 340 m<sup>2</sup>/kg. Popílek byl aktivován sodným vodním sklem

se silikátovým modulem 1,6 (Vodní sklo, a.s.). Pro zvýšení elektrické vodivosti byly do geopolymery přidány uhlíkové saze Vulcan 7H (Cabot CS) v obsahu 0,5 a 1,0 % z hmotnosti popílku. Jako aditiva byly použity 2% roztok Tritonu X-100, pro zlepšení smáčivosti a dispergace uhlíkových sazí. Křemenný písek o velikosti zrn do 2,5 mm byl použit jako plnivo. Složení jednotlivých směsí je uvedeno v Tab. 1.

**Tab. 1** Složení testovaných směsí

**Tab. 1** The composition of tested mixtures

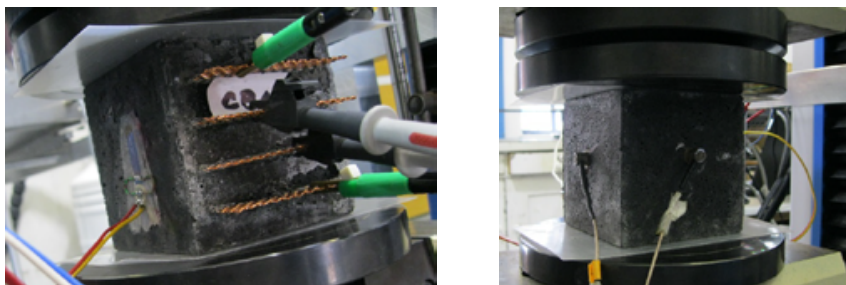
	REF	CB_05	CB_10
Popílek (g)	1200		
Vodní sklo (g)	960		
Písek (g)	3600		
Voda (g)	120		
Uhlíkové saze (g)	-	6	12
Aditivum (g)	-	6	12



**Obr. 1** Průběh zatěžovací síly pro jednotlivé sady vzorků  
(horní graf pro referenční sady, spodní graf pro sady CB\_05 a CB\_10)

**Fig. 1** Progress of loading force for individual sample sets  
(upper graph for the reference sets, the lower graph for sets CB\_05 and CB\_10)

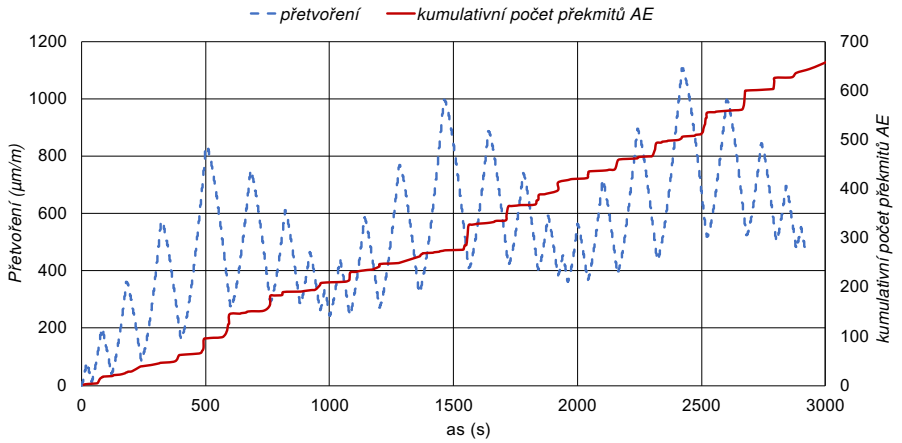
Pro mechanické namáhání vzorků bylo využito elektromechanického zkušebního stroje LabTest ® 6.250 (Labortech), který umožňuje pracovat do maximálního zatížení 250 kN. Zatěžování bylo lineární cyklické zatěžování rychlostí 500 N/s s proměnnou amplitudou a maximální silou odpovídající 25 % pevnosti v tlaku. Pro měření deformací v kolmém směru byl vzorek osazen odporovým tenzometrem viz Obr. 2 (vlevo), pro měření aktivity akustické emise (AE) byl vzorek osazen dvěma snímači akustické emise viz Obr. 2 (vpravo).



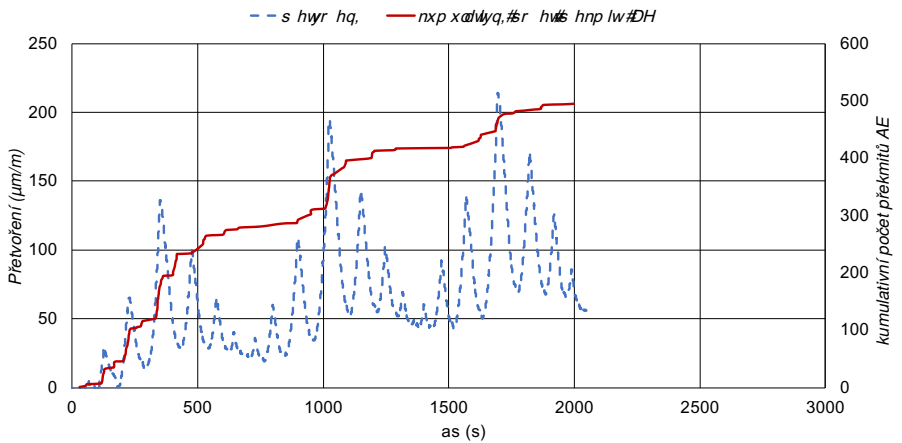
*Obr. 2 Fotografie experimentálního uspořádání*  
*Fig. 2 Photo of experimental set-up*

### 3. Výsledky

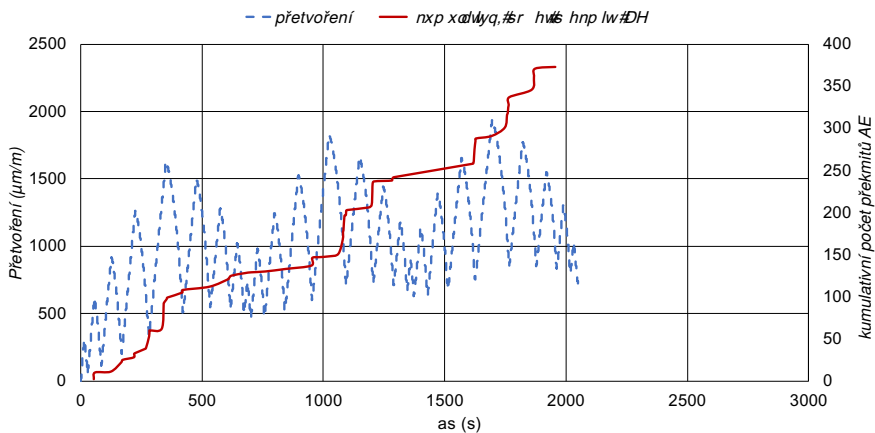
Při měření byly vzorky cyklicky zatěžovány s proměnnou amplitudou, která v maximu dosahovala 25 % pevnosti v tlaku. Grafy na Obr. 3 až 5 ukazují křivky poměrného přetvoření a kumulativního počtu překmitů AE pro všechny tři testované směsi. Z hlediska deformací je patrné, že přetvoření u směsi CB\_05 je téměř o řád menší než u ostatních vzorků. Zároveň lze pozorovat vznik trvalých deformací, které jsou nejvýraznější u směsi CB\_10 (až 730  $\mu\text{m/m}$ ). Celková aktivita AE byla po všech měřících cyklech nejvyšší u referenčních vzorků a s přidávkou sazí klesala. Rozdíl u jednotlivých sad vzorků nebyl jen v celkovém počtu překmitů AE, ale i v průběhu, jak tohoto maxima bylo dosaženo. U sad REF a CB\_10 se jednalo o víceméně lineární růst aktivity AE. V případě sady vzorků CB\_05 byl největší růst aktivity AE během prvního cyklu, pak se aktivita výrazně utlumila a růst už byl pouze minimální, jak je vidět z grafu na Obr. 3.



**Obr. 3** Kumulativní počet překmitů AE v závislosti na přetvoření pro referenční vzorky  
**Fig. 3** The cumulative number of AE overshoots depending on the strain for reference specimens



**Obr. 4** Kumulativní počet překmitů v závislosti na přetvoření pro vzorky s 0,5 % sazí  
**Fig. 4** The cumulative number of AE overshoots depending on the strain for specimens with 0.5 % carbon black



**Obr. 5** Kumulativní počet překmitů v závislosti na přetvoření pro vzorky s 1,0 % sazí  
**Fig. 5** The cumulative number of AE overshoots depending on the strain for specimens with 1.0 % carbon black

#### 4. Závěr

Tato práce prezentuje výsledky mechanických vlastností a akusticko-emisní odezvy geopolymerních kompozitů na bázi vysokoteplotního popílku s uhlíkovými sazemi jako elektricky vodivým funkčním plnivem. Akusticko-emisní odezva byla studována při cyklickém zatěžování vzorků v tlaku s proměnnou amplitudou. Ukázalo se, že trvalé deformace se v případě přidání 0,5 % sazí z hmotnosti popílku 8násobně sníží oproti referenční sadě. V případě zvýšení obsahu uhlíkových sazí se trvalé deformace zvýší až 10násobně. Z hlediska aktivity AE je pozorována zejména změna průběhu nárůstu kumulativního počtu překmitů AE. Zatímco v případě referenční sady a sady s obsahem 1,0 % uhlíkových sazí se jedná o téměř lineární nárůst, tak v případě 0,5% obsahu sazí se jedná v počátku o strmý růst aktivity AE, který se u druhé a třetího cyklu podstatně sníží na velmi pozvolný růst.

Výsledky měření také ukázaly, že popílkový geopolymerní materiál není dostatečně tuhý materiál a při zatěžování u něj dochází k trvalým deformacím, které jsou spojeny se vznikem mikro defektů ve struktuře pojiva. Z hlediska praxe a využitelnosti tohoto materiálu se tedy nejlépe jeví geopolymerní kompozit s obsahem 0,5 % uhlíkových sazí.



## 5. Poděkování

Tento příspěvek byl finančně podpořen Grantovou agenturou České republiky v rámci projektu GA 19-11516S „Geopolymery pro sofistikované aplikace ve stavebnictví“.

## 6. Literatura

- [1] AZHARI, Faezeh; BANTHIA, Nemkumar. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34.7: 866-873.
- [2] HAN, Baoguo; YU, Xun; OU, Jinping. *Self-sensing concrete in smart structures*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [3] TIAN, Xin; HU, Hu. Test and study on electrical property of conductive concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2012, 5: 83-87.
- [4] HAN, Baoguo; DING, Siqi; YU, Xun. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement*, 2015, 59: 110-128.
- [5] MINGQING, Sun, et al. Experimental studies on the indoor electrical floor heating system with carbon black mortar slabs. *Energy and Buildings*, 2008, 40.6: 1094-1100.
- [6] HONG, Lei; ZHAO, Yanhua. The electrical properties and snow melting of graphite slurry infiltrated steel fiber concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2010, 25.4: 609-612.
- [7] GUAN, Hongtao, et al. Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28.5: 468-474.
- [8] HAN, Baoguo; YU, Xun; KWON, Eil. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. *Nanotechnology*, 2009, 20.44: 445501.





## SLEDOVÁNÍ ZMĚN DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLŮ PŘI RŮZNÝCH PROCESECH DEGRADACE

### STUDY ON DYNAMIC PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED MATERIALS AT DIFFERENT DEGRADATION PROCESSES

Libor TOPOLÁŘ\*, Iveta PLŠKOVÁ\*, Richard DVOŘÁK\*, Michaela  
HODULÁKOVÁ\*, Luboš PAZDERA\*, Petr HRUBÝ\*\*

\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

\*\*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická

Contact e-mail: libor.topolar@vutbr.cz

#### **Abstrakt**

*Příspěvek se zabývá zjišťováním dynamických modulů pružnosti stavebních materiálů na bázi alkalicky aktivované strusky (AAS). Popisuje metody stanovení dynamických modulů pružnosti získávaných nedestruktivními metodami, mezi které patří ultrazvuková impulzová metoda a rezonanční metoda. Jako výchozí směs pro realizaci experimentu byla zvolena malta, jejíž pojivovou část tvořila hydroxidem sodným aktivovaná vysokopecní granulovaná struska. Na zkušebních tělesech (trámce s rozměry 40×40×160 mm) byl sledován vývoj dynamických modulů pružnosti v průběhu degračních procesů.*

**Klíčová slova:** alkalicky aktivovaná struska, dynamický modul pružnosti, ultrazvuková impulzová metoda

#### **Abstract**

*The paper deals with the determination of dynamic modulus of elasticity of building materials based on alkali-activated slag (AAS). Describes methods for determination of dynamic modulus of elasticity obtained by non-destructive methods, which include ultrasonic impulse method and resonance method. The AAS mortar was prepared for the experiment and consisted of granulated blast furnace slag activated using sodium hydroxide. The development of dynamic modulus of elasticity during degradation processes was observed in specimens with dimensions 40 × 40 × 160 mm.*

**Key words:** alkali-activated slag, dynamic modulus of elasticity, ultrasonic impulse method

## 1. Úvod

Ultrazvuková metoda je ve stavebnictví využívána řadu desetiletí. Patří mezi nedestruktivní metody zkoušení stavebních materiálů, prvků, dílců a konstrukcí. Hlavní výhodou je, že při jejím použití nedochází k žádnému porušení materiálu, nemůže tedy ohrozit únosnost nebo použitelnost stavebního prvku. Podstatou této metody je opakované vysílání UZ impulzů do zkoušeného materiálu. Po proběhnutí změřené dráhy  $L$  jsou impulzy sejmuty snímačem. Přitom je měřena doba průchodu UZ vlnění, čas  $t$ , od vyslání impulzu budičem po zaznamenání jeho dopadu na snímač [1–3].

Alkalicky-aktivované systémy jsou moderní alternativou pojivového materiálu proti tradičnímu Portlandskému cementu. Jejich hlavní benefity tkví v přívětivosti k životnímu prostředí, kdy při vhodném nastavení složení směsi lze ve srovnání s Portlandským cementem (na 1 t pojiva se vyrobí přibližně 1 t CO<sub>2</sub>) docílit snížení emisí oxidu uhličitého o 50 až 100 %, a to díky možnosti efektivně využívat tzv. druhotné suroviny hliníkokřemičitanové podstaty jako jsou právě v této práci použítá vysokopecní struska či vysokoteplotní popílký. Ve srovnání s Portlandským cementem mají i další výhody jako zvýšenou odolnost vůči působení agresivních prostředí, rychlejší nástup vývoje pevností či nižší uvolněné hydratační teplo [4–6].

## 2. Popis experimentu

Pro měření rychlosti průchodu ultrazvukového (UZ) signálu testovanými vzorky jsme použili přístroj "Pulse analyser 58-E4900". Při měření jsme postupovali dle ČSN 73 1371 [7]. Zkušební tělesa byla umístěna na pryžových podložkách (viz Obr. 1). Jako vazební akustický prostředek jsme použili tenkou vrstvu plastelíny. Měření probíhalo v rovině kolmé na směr hutnění.



**Obr.1** Ukázka měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu  
**Fig.1** The demonstration of ultrasonic signal velocity measurement

Zaznamenávali jsme dobu průchodu UZ vlnění, od vyslání impulzu budičem po zaznamenání jeho dopadu na snímač. Tato rychlost závisí na druhu a vlastnostech materiálu. Z průměru tří naměřených časů, byla následně vypočtena rychlost průchodu

ultrazvuku  $v_L$ . Z rychlosti šíření ultrazvukového vlnění jsme pomocí normových vztahů určili hodnotu dynamického modulu pružnosti  $E_{bu}$  [1,7]:

$$E_{bu} = \frac{\rho \cdot v_L^2}{k^2} \cdot 10^{-6}, \quad (\text{Rce 1})$$

- $\rho$  je objemová hmotnost betonu ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )  
 $v_L$  je impulzová rychlost šíření podélného UZ vlnění ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
 $k$  je koeficient rozměrnosti prostředí (-).

Destruktivní testování bylo realizováno prostřednictvím stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196-1 [8] na přístroji Desttest 4310 Compact A (Beton Systém s. r. o.).

### 3. Složení vzorků a degradačních roztoků

Výchozí materiál byl založen na alkalické aktivaci vysokopecní strusky 50% roztokem hydroxidu sodného. Dávka aktivátoru na pojivo tvořila 6 %  $\text{Na}_2\text{O}$ . Za účelem zlepšení zpracovatelnosti bylo užito 1% dávky plastifikátoru na lignosulfonanové bázi (ChrysoPlast 461). Vodní součinitel byl nastaven na hodnotu 0,445. Pro přípravu malty bylo použito normové kamenivo s maximální velikostí zrna 2 mm.

Struska o specifickém měrném povrchu  $400 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  (stanoveném metodou dle Blaine) byla dodána společností Kotouč Štramberk s. r. o. Chemické složení vysokopecní strusky (VPS) je uvedeno v Tab. 1. Amorfní podíl strusky tvoří 84 %, zbytek tvoří krystalické fáze jako jsou akermanit, kalcit či merwinít.

**Tab. 1** Chemické složení VPS stanovené metodou rentgenové fluorescence (XRF)

**Tab. 1** VPS chemical composition by X-ray fluorescence (XRF)

Chemické složení hm. %									
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
41,1	34,7	10,5	9,1	1,4	1,0	0,9	0,6	0,4	0,3

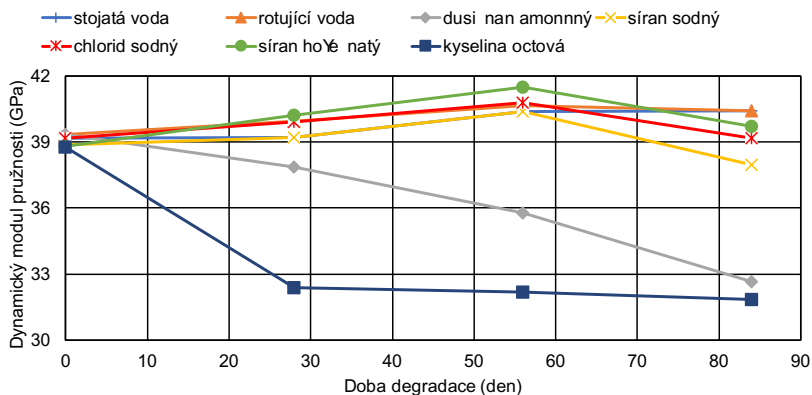
Vzorky byly odformovány po 24 hodinách a ponechány zrát ve vodním uložení. Po uplynutí 28 dní bylo započato vlastní testování vlivu expozice zkušebních těles různým degradačním médiím na sledované parametry.

Pro studium degradace byla zvolena následující degradační média – stojatá a rotující voda, 5% roztoky vybraných solí (chlorid sodný, síran sodný, síran hořečnatý), 6M roztok dusičnanu amonného a roztok kyseliny octové o  $\text{pH} \approx 3$ . Degradační média byla obměňována po 14; 28 a 56 dnech loužení zkušebních těles. U roztoku kyseliny octové

byla pravidelně v 3denních intervalech prováděna kontrola pH a případně upravena přidavkem koncentrované kyseliny octové na požadovanou hodnotu. Všechny použité chemikálie dosahovaly minimálně třídy čistoty označované jako čisté, tj. obsah látky min 98 %.

#### 4. Naměřené výsledky

Ze získaných hodnot vlastním měřením a za použití Rce 1, byly vypočteny hodnoty dynamického modulu pružnosti, které jsou uvedeny v grafu na Obr. 2. Z průběhů dynamických modulů, které byly degradovány vybranými roztoky, je patrné, že největší vliv na hodnotu dynamického modulu pružnosti měly roztoky kyseliny octové a dusičnanu amonného. Při působení roztoku dusičnanu amonného docházelo po celou dobu (84 dní degradace) sledování k poklesu hodnot dynamického modulu pružnosti. V případě kyseliny octové došlo k prudkému poklesu hodnot dynamického modulu pružnosti již po 28 dnech degradace, v následujícím sledovaném období se již hodnota klesala pozvolna. V případě působení ostatních roztoků na vzorky došlo spíše k mírnému růstu hodnot dynamického modulu pružnosti.



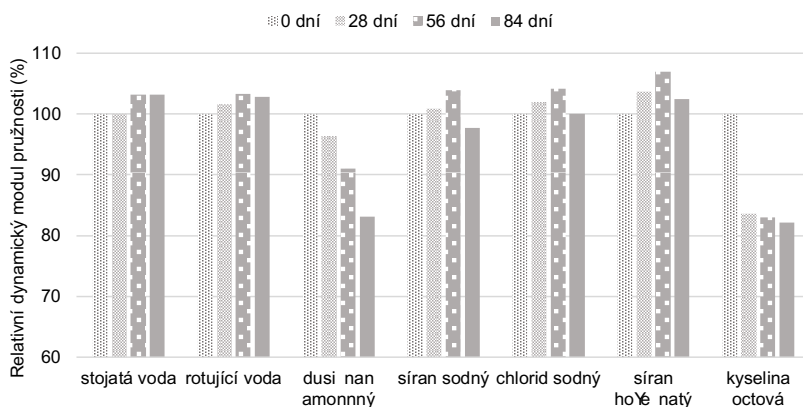
**Obr. 2** Změna dynamického modulu pružnosti v čase pro jednotlivé roztoky

**Fig. 2** The change of dynamic modulus of elasticity over time for each aqueous solution

V případě jiného srovnání dojdeme k dalšímu zajímavým zjištěním, které by nemusely být z grafu na Obr. 2 zcela patrné. Graf na Obr. 3 představuje relativní hodnoty dynamického modulu pružnosti vztahované k počáteční hodnotě (100 %) naměřené před vložením vzorků do jednotlivých roztoků. Tady je pak vidět zcela jasný pokles hodnot dynamického modulu pružnosti v případě kyseliny octové (o více než 15 %) a v případě dusičnanu amonného (postupně o 5, 10 a 15 % po 84 dnech degradace). Když se podíváme na změny hodnot dynamického modulu pružnosti při působení

roztoků síranu a chloridu sodného i síranu hořečnatého zjistíme, že dochází k růstu hodnot po 28 a 56 dnech jejich působení na vzorky. Při působení po dobu 84 dnů dochází již k výraznému poklesu a v případě síranu sodného i pod původní vstupní hodnotu. V případě působení vody (stojatá i rotující) výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti spíše rostou (o 2 až 3 %).

V Tab. 2 jsou uvedené hodnoty pevnosti v tlaku. Je vidět, že u všech sledovaných roztoků mají hodnoty v tlaku rostoucí tendenci. Jen v případě dusičnanu amonného dochází k počátečnímu navýšení (28 dní) a pak následné stagnaci (56 dní) až poklesu (84 dní). Jen v případě degradace kyselinou octovou dochází k poklesu hodnot pevnosti v tlaku.



**Obr. 3** Hodnoty relativního dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé roztoky  
**Fig. 3** Values of relative dynamic modulus of elasticity for each aqueous solution

Zhoršení mechanických vlastností AAS následkem loužení v roztoku kyseliny octové o pH 3 souvisí s procesem dekalifikace C-S-H (C-A-S-H) gelu a s tím spojenou mikrostrukturní změnou. Uvolněné vápenaté ionty reagují s octanovým aniontem za vzniku octanu vápenatého, který je dobře rozpustný a nedochází tak ke snižování rychlosti penetrace vlivem vzniku ochranné vrstvy ze sloučeniny s malou rozpustností (např. síran vápenatý). Míra dekalifikace závisí na řadě parametrů, mezi hlavní lze zařadit např. porozitu zkušebních těles, či poměr CaO/SiO<sub>2</sub> tak jak bylo nastíněno v publikaci Bernala [9]. Proces dekalifikace C-S-H gelu je realizován i v případě loužení v roztoku dusičnanu amonného, nicméně jeho příspěvek není zjevně tak fatální jako u CH<sub>3</sub>COOH. Dalším aspektem vysvětlujícím pokročilou míru degradace je snížení povrchového napětí loužičího roztoku kvůli přidavku kyseliny octové, což je spojeno se zvýšením míry penetrace do pórové struktury. Výsledky dosažené v této

práci se shodují s publikací [9], kde byl rovněž pozorován výrazný pokles pevnosti v tlaku následkem degradace vlivem působení CH<sub>3</sub>COOH (pH 4,5).

**Tab. 2** Hodnoty pevnosti v tlaku v MPa

**Tab. 2** Values of compression strength in MPa

počet dní degradace	0	28	56	84
degradační roztok				
stojatá voda	18,5 ± 0,5	25,2 ± 0,5	25,1 ± 0,2	25,4 ± 0,3
rotující voda		22,4 ± 0,2	26,3 ± 0,5	26,5 ± 0,6
dusičnan amonný		22,3 ± 0,5	22,9 ± 0,5	21,2 ± 0,8
síran sodný		24,0 ± 0,5	26,3 ± 0,5	26,4 ± 0,8
chlorid sodný		22,9 ± 0,3	26,8 ± 0,2	27,0 ± 0,7
síran hořečnatý		22,2 ± 0,5	26,4 ± 0,6	27,5 ± 0,3
kyselina octová		15,8 ± 0,1	19,6 ± 0,6	16,8 ± 0,2

## 5. Závěry

Na základě uvedených výsledků lze říci, že malta na bázi hydroxidem sodným (6 % Na<sub>2</sub>O) aktivované vysokopecní strusky je nejvíce degradovaná roztokem kyseliny octové (pH ≈ 3). Pokročilý stupeň degradace doprovázený zhoršením mechanických vlastností úzce souvisí s dekalifikací C-S-H gelu a tím doprovázenými mikrostrukturními změnami. Je také patrné, že výsledky nedestruktivní zkoušení jsou v dobrém souladu s destruktivními zkouškami.

## 6. Poděkování

Tento příspěvek byl finančně podpořen Českou grantovou agenturou v rámci projektu GA 19-04703S „Využití nedestruktivních metod pro testování stavu degradovaných alkalicky-aktivovaných betonů“.

## 7. Literatura

- [1] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. CERM, 2001.
- [2] HOBST, Leonard, et al. Diagnostika stavebních konstrukcí. *Studijní opora, VUT v Brně FAST*, 2005.
- [3] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení*. CERM, 2002.



- [4] SCRIVENER, Karen L.; KIRKPATRICK, R. James. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 2008, 38.2: 128-136.
- [5] BERNAL, Susan A., et al. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41.1: 1-8.
- [6] ZHANG, Jian, et al. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 598-613.
- [7] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2011.
- [8] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha, 2016.
- [9] BERNAL, Susan A., et al. Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2012, 1.3: 138-151.





## PROBLEMATIKA ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

### THE ULTRASONIC TESTING ISSUES, INTERPRETATION OF THE RESULTS OBTAINED

Michal VÁŇA

ŠKODA JS a.s.

Contact e-mail: [michal.vana@skoda-js.cz](mailto:michal.vana@skoda-js.cz)

#### **Abstrakt**

*Tato práce popisuje postup a časové zařazení nedestruktivních zkoušek při kontrole tupého jednostranného svaru o tloušťce 40mm, který je svařený na podložku. Tento svar je jedním z vnějších svarů na tělese kontejneru CONSTOR RBMK 1500/M2 sloužícího pro uskladnění vyhořelého jaderného paliva.*

*Oblast, na kterou je kladen důraz je především v získaných výsledcích při zkoušení ultrazvukem metodou impulsovou-odrazovou, které nelze ověřit jinými konvenčními nedestruktivními metodami a jsou závislé na interpretaci a zkušenosti zkoušejícího. Proto se dále věnuje výrobě a následnému postupu na zkušební vzorku, jež je podroben rozřezu a zkoumání vzniklých konstrukčních změn vlivem deformace při svařování.*

**Klíčová slova:** svar, ultrazvuk, zkušební vzorek, deformace

#### **Abstract**

*This document describes the procedure and timing of non-destructive tests in the inspection of a butt one-sided weld with a thickness of 40mm, which is welded onto a base washer (substrate). This weld is one of the outer welds on the body of the CONSTOR RBMK 1500/M2 cask for spent nuclear fuel storage.*

*The area of emphasis is primarily on the results obtained by pulse-echo ultrasound testing, which cannot be verified by other conventional non-destructive methods and which are dependent on the examiner's interpretation and experience. Therefore, it further deals with the production and subsequent procedure on a test sample, which is subjected to cutting and examination of the structural changes due to deformation during welding.*

**Key words:** weld, ultrasound, test sample, deformation

## 1. ÚVOD

V plzeňské Škoda JS a.s. probíhá výroba již několikáté generace těles kontejneru, které jsou používány pro dlouhodobé uskladnění vyhořelého jaderného paliva. Současně vyráběná série je určena pro jadernou elektrárnu Ignalina v Litvě.

Těleso kontejneru se skládá z vnitřního pláště, na který je navržen kovaný kroužek, sloužící k upevnění víka kontejneru. Na druhé straně ho uzavírá vnitřní dno. Vnější plášť a vnější dno obklopuje vnitřní sestavu kontejneru.



**Obr. 1** Pohled na svar SN5



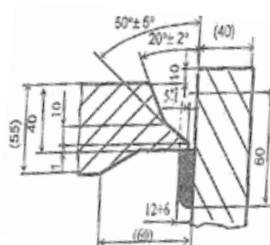
**Obr. 2** Těleso kontejneru RBMK 1500/M2

Po celou dobu výroby je kontrolován jak základní materiál, tak následné svař spojovací konstrukci kontejneru.

Z hlediska nedestruktivní kontroly jsou užívány metody vizuální, magnetická prášková, penetrační a ultrazvuková, na kterou se dále zaměříme.

Vnější plášť a vnější dno tvoří svar SN5, problematikou, kterou se budeme zabývat je vyhodnocení indikací při ultrazvukové zkoušce. Svoji konstrukcí je tento svar složitý na hodnocení a poskytuje nám řadu nerelevantních indikací, které ztěžují jeho kontrolu.

Plášť a dno jsou svařeny tupým svarem  $\frac{1}{2}U$ , svařeným na podložku. Na kořen svaru navazuje technologický neprůvar.



**Obr. 3** Konstrukce svaru SN5

Základní materiál pláště a dna je nelegovaná konstrukční ocel S355NL1 svařená metodou 111 a 121 s přídavným materiálem OE-Ni38R.

Zkouška kapilární metodou je prováděna zkušebním systémem IICe2, tedy barevný penetrant odstranitelný vodou a rozpouštědlem a vývojka na bázi rozpouštědla.

Ke zkoušce ultrazvukem je použita konvenční metoda impulsní odrazová.

Zkušebním předpisem k provedení a vyhodnocení je AD 2000-Merkblatt HP5/3 cat. B April 2015 edition a AD 2000-Merkblatt HP5/3 Appendix 1

## 2. SVAR SN5

Prvotní kontrolou je ultrazuková zkouška okrajových zón, které budou tvořit svarový úkos svaru SN5 dle EN 10160 E3. Po obrobení je provedena kontrola kapilární metodou pro vyloučení povrchových necelistvostí.

Podložku svaru tvoří svarový návar o výšce  $12 \pm 6$  mm. Obvyklá výška návaru se pohybuje mezi 14 a 15mm. Tento návar je proveden po vnitřním rádiu pláště, kde se ultrazvukem kontroluje jeho přilnutí k základnímu materiálu pláště. Na finální rozměry je návar s pláštěm obroben a je provedena zkouška na povrchové necelistvosti.

Posledním krokem před svařováním je ustavení dna na tento návar.

Výkresová tloušťka svaru je 40mm, avšak díky povolené plusové toleranci dna je nominální tloušťka 42 až 43mm, tato tloušťka je důležitá pro následné hodnocení.

Svar se svařuje ve třech krocích

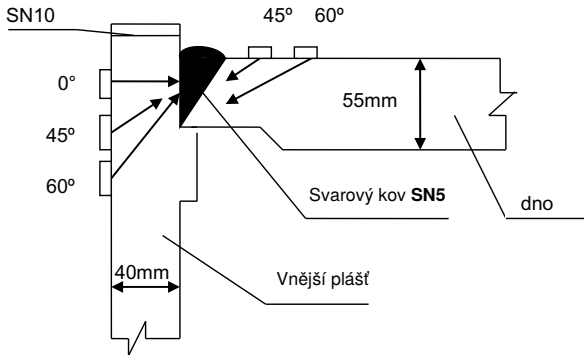
- 1) Kořen svaru, svařený ručně metodou 111 do výšky cca 10mm
- 2) Mezivrstva svaru, svařovacím automatem metodou 121 do výšky cca 33mm
- 3) Konečná vrstva včetně převýšení svaru svařovacím automatem metodou 121

Mimo finální kapilární zkoušky na dokončeném svaru je v průběhu výroby provedena tato zkouška i na kořenu svaru a v mezivrstvě svaru.

V mezivrstvě svaru je proveden technologický ultrazvuk pro odhalení vad, které jsou již považovány za nevyhovující.

Ke zkoušení ultrazvukem je použita přímá dvojitá sonda DL4R-6x20-0 a úhlové sondy se svazkem pod 45 a 60 stupňů AM4R-8x9. Použity jsou ultrazvukové přístroje fy. OLYMPUS EPOCH 600 a 650.

### 3. ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM



Obr. 4 Schéma směrů zkoušení svaru SN5

#### DL4R-6x20-0

Zkoušení dvojitou přímou sondou probíhá z pláště směrem do dna, průřezem svaru.

Při tomto zkoušení dostáváme v kořenové oblasti do přístroje zpět echo na dráze 54÷56mm – echo od návaru, sloužícího jako podložka svaru. Dalším echem, které získáme, je na dráze 47÷51mm. Vzdálenost tohoto echa od sondy je proměnná v závislosti ustavení dna vůči plášti. S větší kořenovou mezerou pro svařování je i získané echo na větší dráze od sondy. Velikost získaného echa je proměnná, pouze ojediněle překročí přípustnou mez, avšak vyskytuje se prakticky po celém obvodu tělesa.

Tato indikace je přisuzována geometrii svaru, kdy se předpokládá, že za kořenovou mezerou vzniká proteklina svarového kovu při ručním svařování kořene svaru. Je považována za irelevantní indikaci pro hodnocení.

Všechny indikace, které mají dráhu od sondy kratší nežli 47mm jsou považovány za relevantní a podléhají dalšímu hodnocení.



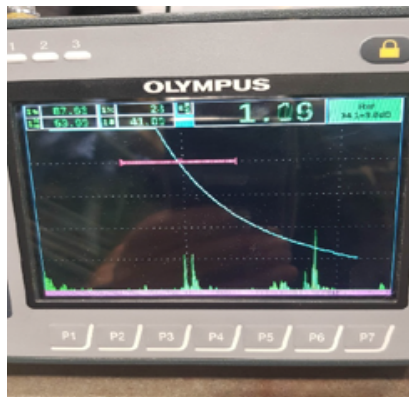
Obr. 5 Indikace přímou dvojitou sondou



Obr. 6 Zkoušení dvojitou přímou sondou

### AM4R-8x9-60

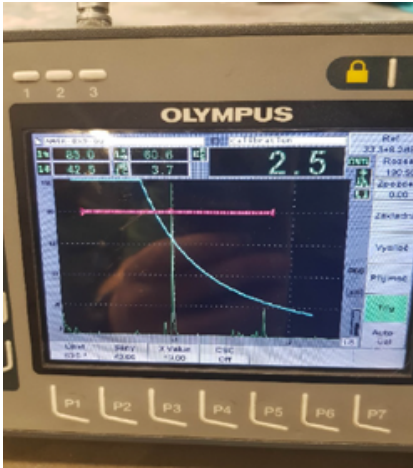
Při zkoušení ze dna úhlovou sondou AM4R-8x9-60 jsou zaznamenány nerelevantní indikace na konci kroku průchodu svazku, způsobené geometrií. Dalšími získanými echy jsou indikace na půl kroku dráhy v rozmezí 40 až 43 mm hloubky svaru.



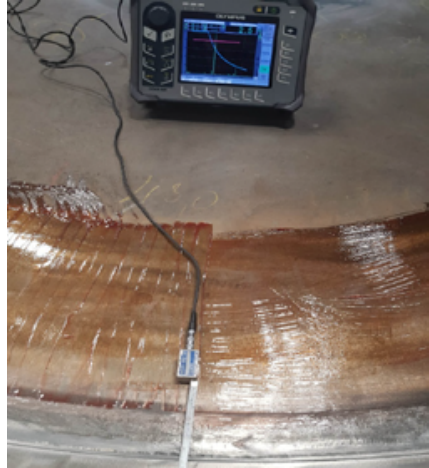
Obr. 7 Indikace úhlovou sondou

Tyto indikace mají délku až stovek mm a jsou rozmístěny nepravidelně po celém obvodu zkoušeného tělesa kontejneru a jejich poloha je v oblasti začátku technologického neprůvaru. Jejich dB velikost se mění v závislosti na tom, zda je zkouška prováděna při technologickém zkoušení nebo finální kontrole. Při technologickém zkoušení v mezivrstvě svaru jsou tyto indikace zaznamenány, avšak výjimečně je na ně brán zřetel, protože dosahují velikosti pouze několik jednotek procent výšky obrazovky ultrazvukového přístroje.

U finální zkoušky po vyplnění svarovým kovem do plna, jsou tyto indikace nalezeny o stejné délce, ale jejich dB velikost se liší, jsou obvykle výrazně větší. Rozdíl velikostí těchto indikací je v řádu několika násobků původních nálezů a často je překročena mez přípustnosti.



**Obr. 8** indikace přesahující mez přípustnost

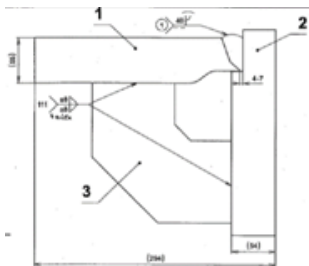


**Obr. 9** Zkoušení úhlovou sondou

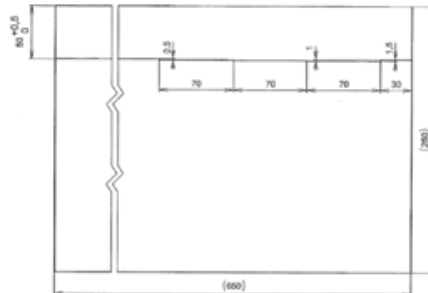
Byla vyzorována souvislost, kdy indikace nalezené přímým svazkem na dráze  $47 \div 51$  mm překročí mez přípustnosti, tato mez je překročena i svazkem úhlovým. Obavy, že by se mohlo jednat o trhlinu a její možné šíření z důvodu vysokého prnutí ve svařeném materiálu, je třeba vyvrátit.

#### 4. ZKUŠEBNÍ KUS

Proto bylo přistoupeno k výrobě zkušebního kusu, na kterém je simulován svar SN5 se čtyřmi různě širokými kořenovými mezerami.



**Obr. 10** Výkres zkušebního kusu



**Obr. 11** Výkres zkušebního kusu



Plán kontrol při výrobě tohoto vzorku byl totožný s nedestruktivními kontrolami svaru na tělese kontejneru. Po jeho dohotovení byla ve svaru simulována vada, tedy výbrus svaru a jeho opětovné zavaření.

Při zkoušení ultrazvukem na vzorku jsou výsledky srovnatelné s nálezy, které získáváme na tělese. Prvotní informací po vyzkoušení vzorku je, že při kontrole úhlovým svazkem jsou s větší kořenovou mezerou, větší i nalezené indikace.

Po provedení zkoušek byl zkušební vzorek rozřezán na čtyři kusy. Na těchto rozřezech je provedena magnetická prášková kontrola v místě řezu svarem.



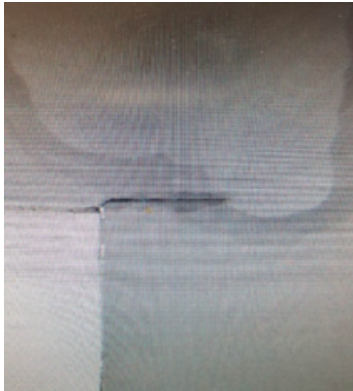
**Obr. 12** Zkušební vzorek po magnetické práškové zkoušce



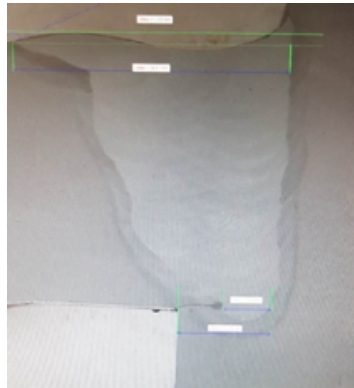
**Obr. 13**

Z této zkoušky nejsou patrné žádné necelistvosti. Průvar je bez viditelných anomálií a začátek technologického neprůvaru je tupý bez pozorovaného šíření jakékoliv trhliny.

Rozřezy byly dále podrobeny makroskopické zkoušce struktury. Makroskopické snímky ukazují linii svarového kovu i s tepelně ovlivněnou zónou, na který navazuje technologický neprůvar. I na těchto snímcích je patrné, že navazující neprůvar je bez známek šířících se necelistvostí. Zásadním zjištěním je zpozorování deformace dna, kdy je porušena rovinnost jeho spodního okraje, která leží na návaru.



Obr. 14 Detail makroskopického snímku

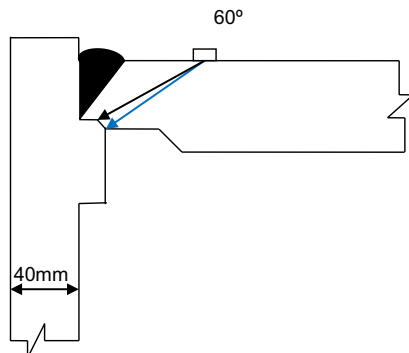


Obr. 15 Řez svarem SN5

## 5. ZÁVĚR

Echa získané dvojitou přímou sondou jsou odrazy od tupé plochy vznikající začátkem technologického neprůvaru, které odrážejí zpět ultrazvukový svazek. Vzdálenost jejich dráhy od sondy je závislá na šířce kořenové mezery.

Vlivem vysoké teploty při svařování se okolní materiál stává plastickým a foremým. Dno je pro velké materiálové pnutí tlačeno směrem dolů na návar a ten díky větší tvrdosti navařeného svarového kovu dno vymačkává. Tento proces způsobuje, že je do dna vytlačený návar a na základním materiálu dna v oblasti konce návaru vzniká odrazová plocha pro ultrazvukový svazek pod úhlem  $60^\circ$ .

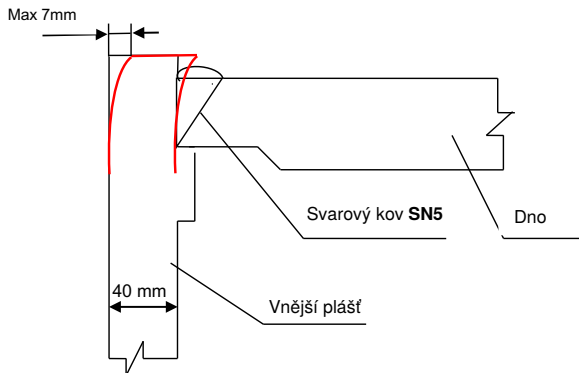


Obr. 16 Odrazová plocha pro úhlovou sondu  $60^\circ$

Tím je vyloučena relevantnost těchto nálezů úhlovou sondou. Není však objasněna odlišná geometrická poloha těchto nálezů, které jsou při zkoušce na tělese indikovány v oblasti začátku technologického neprůvaru. Makroskopický snímek však

ukazuje vytvořený odražeč o několik mm dále směrem do středu dna, na konci návaru.

Hledáním příčiny této odlišné polohy nalezené indikace je zjištěna zásadní deformace vzniklá svařováním v horní části pláště. Deformace dosahuje až 7 mm, zlomením pláště směrem dovnitř.



**Obr. 17** Deformace pláště směrem do středu tělesa

Přičtením této zjištěné odchylky ke zkrácené projekční vzdálenosti úhlové sondy se nalezené indikace posouvají z oblasti začátku neprůvaru na konec návaru. Zde je snímkem z makroskopické zkoušky zjištěn odražeč, který je pro nás irelevantní.

Zkušební vzorek objasnil, že při hodnocení indikací v oblasti kořene svaru je nutné zjistit velikost deformace pláště. Změřenou odchylku je třeba brát v úvahu při přesném zjišťování polohy těchto indikací a v případě, že je poloha nálezů v oblasti konce návaru, je nutné hodnotit takovou indikaci jako irelevantní.

Analýza této zkušební úlohy ukázala, že při zkoušení ultrazvukem, zvláště konvenční odrazovou technikou, může být jednoznačné hodnocení nalezených indikací velmi obtížné.

Správné hodnocení nalezených indikací bylo dosaženo až při podrobném zkoumání zkušební vzorku a porozumění mechanismu vzniku irelevantních indikací.





## OVĚŘENÍ VÝROBNÍCH VAD SVAROVÝCH SPOJŮ ZKUŠEBNÍCH TĚLES METODAMI NDT

### VERIFICATION OF MANUFACTURING WELDING DEFECTS IN TEST SPECIMENS BY NON-DESTRUCTIVE METHODS

Jana Veselá\*, Pavel Mareš\*, Jiří Hodač\*

\*Centrum Výzkumu Řež, s.r.o.

Contact e-mail: jana.vesela@cvrez.cz

#### **Abstrakt**

*Svařování je jedním ze základních postupů spojování materiálů. V průběhu procesu svařování dochází ke vzniku vad. Hlavní vliv na vznik výrobních vad svarových spojů mají zejména zvolená metoda včetně parametrů svařování, základní i přídatný materiál a v neposlední řadě i svařec sám. Typickými vadami, které svým charakterem odpovídají v praxi zkoušeným komponentám, jsou studený spoj, trhliny, neprovařený kořen, hubený kořen, nadměrné převýšení kořene, vměstky, porozita a další.*

*Zkušební tělesa obecně slouží ke kvalifikaci personálu v oblasti nedestruktivního zkoušení (NDT). Cílem je vyrobit tělesa ze stejného materiálu, stejnou metodou svařování s vadami, které odpovídají vadám detekovaným v technické praxi energetického průmyslu. Výroba vad je většinou provedena změnami parametrů v průběhu svařování, případně kontaminací svarových ploch látkami, které zapříčiní vznik vady. Vhodnými metodami pro zjišťování objemových vad (studený spoj, vměstky, trhliny) jsou ultrazvuková a prozařovací metoda. Při ultrazvukovém zkoušení se v posledních letech s výhodou využívá techniky Phased Array. Jednotlivé metody nedestruktivního zkoušení jsou porovnávány navzájem a společně jsou podrobeny destruktivnímu ověření přítomnosti vady metalografickým rozbořem.*

**Klíčová slova:** svařování, zkušební tělesa, nedestruktivní zkoušení, Phased Array technika, metalografie

#### **Abstract**

*Welding is one of the basic methods of joining materials. Defects occur during the welding process. The main influence on the production defects of welded joints is mainly the chosen method including welding parameters, basic and filler material and finally the welder himself. Typical defects, which by their nature correspond to components tested in practice, are lack of fusion, cracks, incomplete root penetration, root concavity, excess penetration, inclusions, porosity and others.*

*Test specimens generally serve to qualify personnel in non-destructive testing (NDT). The aim is to produce bodies from the same material, by the same welding method with defects that*

correspond to the defects detected in the technical practice of the power industry. The production of defects is usually done by changing the parameters during welding, eventually by contamination of the weld surfaces with substances that cause the defect. Ultrasonic and radiation methods are suitable methods for detecting bulk defects (lack of fusion, inclusions, cracks). Ultrasonic testing has been using the Phased Array technique in recent years. The individual methods of non-destructive testing are compared with each other and together they are subjected to destructive verification of the defect presence by metallographic analysis.

**Key words:** welding, test specimens, nondestructive testing, Phase Array technique, metallography

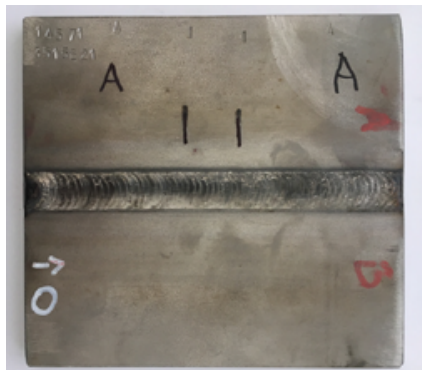
## 1. Úvod

V oblasti energetiky se nedestruktivní zkoušení často zaměřuje na kontroly svarových spojů. S výhodou jsou tak pracovníky NDT využívána zkušební tělesa (ZT) se známými vadami záměrně vyrobenými při svařování. Zkušební tělesa reálných rozměrů a použitého materiálu tak slouží k ověření správnosti zvolených nastavení a postupů ultrazvukového zkoušení svarových spojů, případně k jejich kvalifikaci.

## 2. Zkušební vzorky

Výroba vývojových zkušebních těles s výrobními vadami svarových spojů byla realizována na vzorcích válcovaného nerezového plechu a trubkách metodou svařování 141 – TIG (obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu).

Bližší se článek věnuje ZT typu plech s finálním rozměrem 150x140x10 mm, označením A-A až H-H a homogenním svarem, obr. 1.



**Obr. 1** ZT typu plech

- A. Neprovařený kořen
- B. Nedostatečný tlak argonu
- C. Znečištění úkosu uhlodíky
- D. Znečištění grafitem
- E. Zavařená struska
- F. Zavařený korundový písek
- G. Studený spoj
- H. Wolframové vměšky

**Obr. 2** Typy vad svarů

Celkem bylo pro vyrobeno 8 zkušebních těles a v každém je umístěn jeden typ vady vyrobený dle popisu v obr. 2. Snahou bylo umístit vady do druhé svarové housenky

s minimální délkou vady 20 mm. Oblast výskytu vady je na všech ZT vyznačena (černé linie), jak je patrné na obr. 1 a oblast zájmu se vyskytuje ve vzdálenosti 65 až 90 mm od nulového bodu. Poloha vady je pro lepší orientaci vyznačena také na všech rentgenových snímcích bez ohledu, zda vada byla nebo nebyla detekována.

### **3. Aplikované metody NDT**

Z oblasti nedestruktivního zkoušení byly pro detekci vad využity metody ultrazvukového a radiografického zkoušení.

Ultrazvuk byl provedený technikou Phased Array (PAUT) na přístroji Dynaray 128/128PR a sondou AS-5. Zkoušení bylo provedeno z obou stran svaru pro zvýšení pravděpodobnosti detekce vybraných vad. Ne všechny typy vad jsou detekovatelné z obou stran a jejich zjištění je v provozu závislé na přístupnosti svarového spoje, který je velmi často omezený pouze na jednu stranu svaru. Detekce vad typu znečištění grafitem, zavařené strusky a korundového písku i wolframové vměstky je při zkoušení ultrazvukem závislá na orientaci vady vůči ultrazvukovému svazku.

Radiografické zkoušení (RT) bylo u ZT typu plech provedeno externí firmou a k prozařování zkušebních těles byl použit přístroj Philips MG 161L. Zkouška RT byla provedena dle normy ČSN EN ISO 17636-1 ve třídě B.

### **4. Výsledky nedestruktivního zkoušení a metalografického hodnocení**

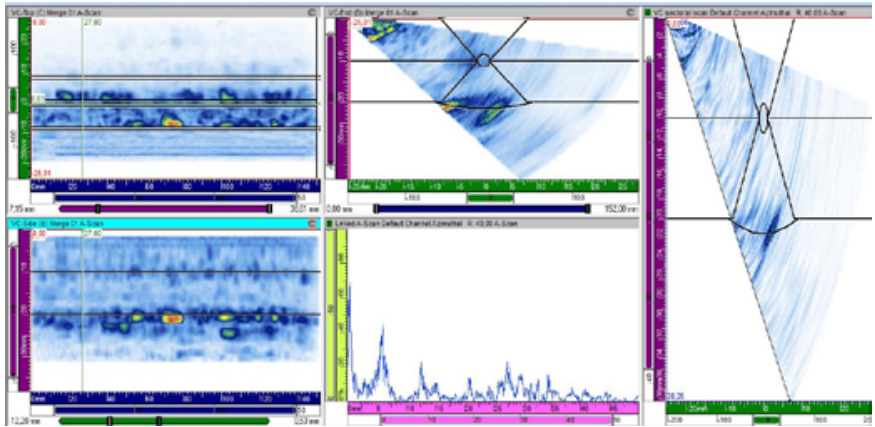
Pro možnost srovnat výsledky PAUT byla vyrobena také tělesa se svarovým spojem bez vad, obr. 3.

U těles s detekcí jednotlivých typů vad byl proveden také jejich sizing, tj. určení velikosti vady. Výsledky PAUT jsou shrnuty v tabulce 1.

ZKUŠEBNÍ TĚLESO	OBLAST ZÁJMU – cca 65–90 mm od bodu 0					
	STRANA A			STRANA B		
značení	Výška indikace [mm]	Délka indikace [mm]	Poloha od 0 [mm]	Výška indikace [mm]	Délka indikace [mm]	Poloha od 0 [mm]
A-A	3	11	67–78	4	6	65–71
B-B	2,4	7	73–80	2,7	16	69–85
C-C	nedetekováno		n/a	nedetekováno		n/a
D-D	4	11	71–82	nedetekováno		n/a
E-E	nedetekováno		n/a	3	5	78–83
F-F	nedetekováno		n/a	3,4	6	85–91
G-G	2,5	6	72–78	2,7	12	65–77
H-H	nedetekováno		n/a	2,9	6	71–77

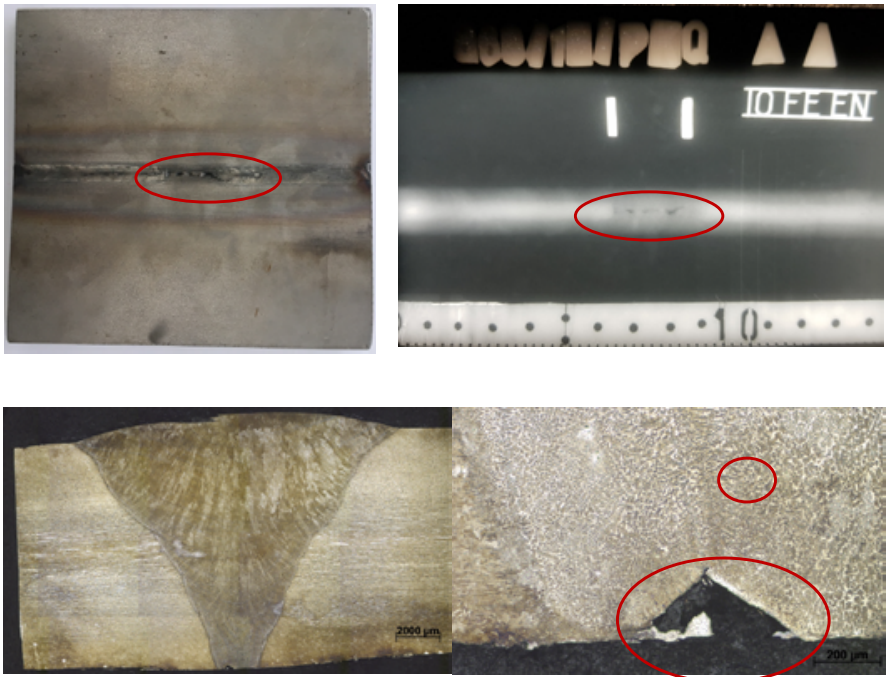
**Tab. 1** Vyhodnocení PAUT

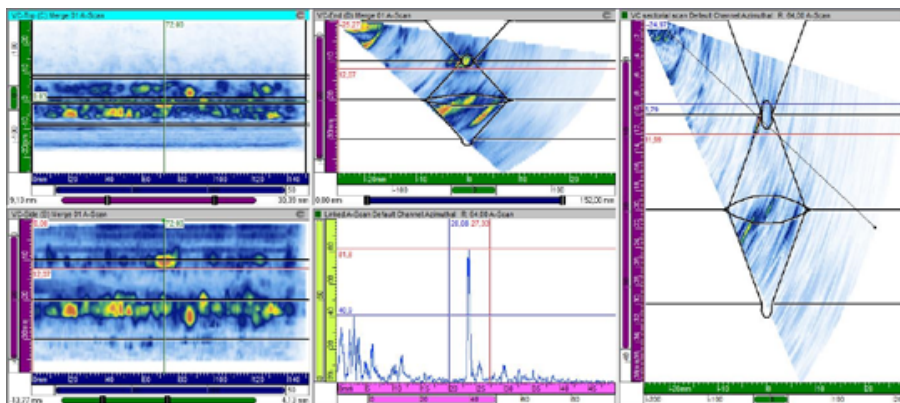




**Obr. 3** Zkušební těleso bez vady ve svarovém spoji

Srovnání detekce vady typu neprovařený kořen metodami NDT, včetně makroskopického vyhodnocení po rozřezu zkušebního tělesa v místě určeném při zkoušení PAUT je uvedeno na obr. 4.





Obr. 4 Neprovařený kořen - srovnání PAUT, RT a metalografie

## 5. Shrnutí

Vzájemné srovnání schopnosti detekovat zvolené typy vad objemovými metodami UT a RT společně s výsledky makroskopického rozboru je uvedeno v tabulce 2.

TYP VADY		DETEKCE		
		PAUT	RT	MAKRO
A	neprovařený kořen	x	x	x
B	nedostatečný tlak argonu	x		x
C	znečištění úkosu uhlodíky			x
D	znečištění grafitem	x		x
E	zavařená struska	x		x
F	zavařený korundový písek			
G	studený spoj	x	x	x
H	wolframové vměstky	x	x	x

Tab. 2 Vzájemné srovnání detekovatelnosti vad metodami UT, RT a makroskopickým hodnocením

Z obou stran svaru je technikou PAUT detekovatelná vada typu neprovařený kořen, vada vzniklá v důsledku nedostatečného tlaku argonu (ochranná plynová atmosféra procesu svařování 141) a studený spoj.

Jednostranně jsou detekovatelné wolframové vměstky, zavařená struska a vada vzniklá v důsledku znečištění úkosové hrany grafitem.

Mezi nedetekované vady se řadí zavařený korundový písek a znečištění úkosu uhlovodíky.

Metoda RT je v souladu s normou schopna detekovat vady typu neprovařený kořen, studený spoj a přítomnost wolframových vměstků ve svarovém spoji.

Metalograficky byly potvrzeny téměř všechny typy vyrobených vad, s výjimkou zavařeného korundového písku.

## **6. Závěr**

Parametry svařování a specifické postupy vedoucí ke vzniku vad, které byly získány při výrobě vývojových zkušebních těles byly ověřeny. Metody UT a RT společně s metalografickým hodnocením potvrdily detekovatelnost jednotlivých typů vad.

Výroba zkušebních těles s vadami svarových spojů je specifická a v mnohém i obtížná zejména pro svářeče, který na rozdíl od svých standardních povinností má za úkol řízeným chybným procesem před svařováním a v jeho průběhu vady vyrobit.

## **Poděkování**

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.





## ANALÝZA SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE Z CREEPOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ VZORKŮ PAROVODNÍHO POTRUBÍ SIGNAL ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION DATA FROM CREEP DAMAGE OF STEAM PIPING MATERIAL

František VLAŠIČ \*, MARIE SVOBODOVÁ \*\*, Pavel MAZAL \*\*\*

\* Zemědělské družstvo Rpety - středisko technické diagnostiky DAKEL, Rpety 118,  
268 01 Hořovice, Czech Republic

\*\* UJP Praha, a.s., Nad Kamínkou 1345, Praha, 156 10, Czech Republic

\*\*\* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,  
Technická 2, Brno, 616 69, Czech Republic

Contact e-mail: vlasic@dakel.cz

### Abstrakt

*Jedním z významných faktorů degradace materiálů z hlediska integrity je erozní koroze v potrubních systémech a tečení (creep) ve vysokotlakých potrubích systémech tepelných elektráren. Během provozní životnosti zařízení se jeho integrita postupně zhoršuje a intervaly generálních oprav jsou potom dány schopností vhodných metod nedestruktivního testování spolehlivě najít různé typy defektů, jako je koroze, eroze, trhliny a creepové poškození. Tento článek je zaměřen na analýzu souboru vzorků z parovodu s heterogenním svarovým spojem, které byly podrobeny creepovému poškození. Stupeň degradace materiálu vzorku byl hodnocen metodou akustické emise (AE) pomocí lokalizace zdrojů emisních událostí a extrahovaných parametrů AE. V této studii je kladen hlavní důraz na analýzu signálu v časové a frekvenční oblasti. Bylo zjištěno, že makrotrhlina, která vznikla propojováním dutin a mikrotrhlin, začíná růst přibližně v 70 % životnosti vzorku. Nedílnou součástí studie je také podrobná metalografická a fraktografická analýza poškozeného vzorku za účelem nalezení vztahu mezi creepovým poškozením a odezvou AE.*

**Klíčová slova:** signál akustické emise, creepové poškození, parovodní potrubí

### Abstract

*One of the significant material degradation factors in terms of integrity is erosion-corrosion in piping systems and creep in high pressure pipelines of thermal power plants. Through a product or plant's operating life its integrity will deteriorate and the overhaul intervals are dictated by the capability of non-destructive testing to find many types of defects such as corrosion, erosion, cracks and creep damage. This article is focused on analysis of a set of*

*steam piping specimens with dissimilar welded joints which were subjected to creep damage. Material degradation was characterized by acoustic emission (AE) method using their source locations and extracted AE parameters. A great benefit in this study was the use of time-frequency signal analysis and evaluation of basic AE parameters. It was found that macro-crack formed by the coalescence of cavities with each other and the crack, is starting to growth from about 70% of the creep life. In order to find a relationship between the creep damage and its AE response, a detailed metallographic and fractographic evaluation of the damaged specimen was performed.*

**Key words:** *acoustic emission signal, creep damage, steam piping*

## 1. Úvod

Nejslabším bodem jakéhokoli strojního zařízení zatěžovaného v creepovém režimu jsou svarové spoje, kde se snižují jeho mechanické vlastnosti a creepová pevnost. Snižování creepové odolnosti nastává jak ve svarovém kovu, tak v jednotlivých zónách tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje. U energetických zařízení se kromě homogenních svarových spojů využívají také svarované spoje standardních ocelí s jinými nízkolegovanými slitinami odolnými proti tečení. V současné době je častým technologickým problémem kombinace ocelí s různými stupni a mikrostrukturami, kde je nutné spojit bainitické oceli s martenzitickými nebo feriticko-perlitickými oceli, bainitické oceli s nízkolegovanými a obecně feritické oceli s austenitickými [1]. Takové rozdílné spoje mohou vytvářet řadu technologických problémů. Těmto spojům je věnována velká pozornost, zejména z hlediska svařitelnosti, technologie svařování, mechanizace svařování a ověřování jejich vlastností odolných vůči tečení [2, 3].

Obecně se uvádí, že ke creepu může dojít u uhlíkových ocelí při teplotách nad 400–440°C, což platí zejména pro tlustostěnné potrubí [4]. Dlouhodobé experimentální výsledky však ukazují, že při vysokých teplotách dochází k významnému snížení jejich creepové pevnosti a tím i nadhodnocení jejich životnosti [5]. Nejvýznamnějším mechanismem tečení na mikrostrukturální úrovni je pohyb dislokací, doprovázený difuzí vakancí v rozsahu teplot a napětí, ke kterému běžně dochází ve strojírenském sektoru [6]. Běžně se v literatuře uvádí, že mikro-dutiny vytvořené nukleací kavit v důsledku pohybu dislokací nebo trhlin, mají tendenci se vzájemně ortogonálně uspořádat. Následně se shlukují do mikrotrhlin a nakonec do makrotrhlin, které vedou k lomu [7, 8]. Hlavním zájmem v odvětví výroby energie jsou zejména náhlé poruchy způsobené lokálním creepem ve svařencích. Tradičně se posuzuje zbývající životnost součástí, které jsou vystaveny zvýšeným teplotám, jedním z následujících způsobů [9]:

- a) výpočetní metodou založenou na tepelně-mechanické historii součástí
- b) zrychlenými creepovými zkouškami vzorků z provozu
- c) technikami nedestruktivního hodnocení (NDE)

NDE metody jsou nyní dobře zavedeny a běžně využívány pro inspekci JE, aby bylo možné včas odhalit strukturální poškození. K detekci poškození při creepu jsou používány různé metody (ultrazvuk, vířivé proudy, potenciálové metody, pozitronové anihilace), nicméně metoda akustické emise (AE) umožňuje za provozu detekovat strukturální změny materiálu a ve velké míře se používá ke studiu deformačních mechanismů, lomového chování a ke stanovení únavového poškození a růstu únavové trhliny. Může být také použita pro detekci poruch a tlakových úniků v nádobách, nádržích, potrubí, a také pro sledování průběhu koroze a svařování [10, 11]. Ve všech případech je elasticky uložená energie částečně uvolněna a vytváří elastickou napěťovou vlnu.

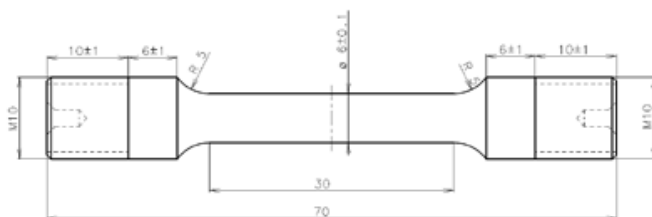
Pro lepší porozumění AE a jeho zpracování jsou signály rozděleny na diskrétní (praskavou) a kontinuální emise. První typ je generován energií jednotlivých „prasknutí“ ze zdroje AE, jako je např. lom částice. Naproti tomu kontinuální emise se sestává z velkého počtu praskavé AE s nízkou amplitudou, které jsou vzájemně překryty [12]. Odezva AE na růst únavové trhliny při zvýšené teplotě nerezové oceli 304 byla zkoumána např. v [13] nebo predikce creepového porušení v [14].

Tato práce je zaměřena na využití metody AE k popisu creepového poškození vzorků parodovního potrubí s heterogenním svarem oceli P91 a 15Ch1M1F (dle ruského značení). Vzhledem k tomu, že mechanismy iniciace a růstu creepové trhliny v mikrostrukturálních oblastech svaru a TOO ještě nejsou jednoznačně vysvětleny, je cílem této práce objasnit procesy creepové degradace zejména v jeho sekundární (ustálené) fázi, protože pro konstrukci vysokoteplotních komponent v uvažovaném dlouhodobém provozu je tato fáze creepu nejzávažnější.

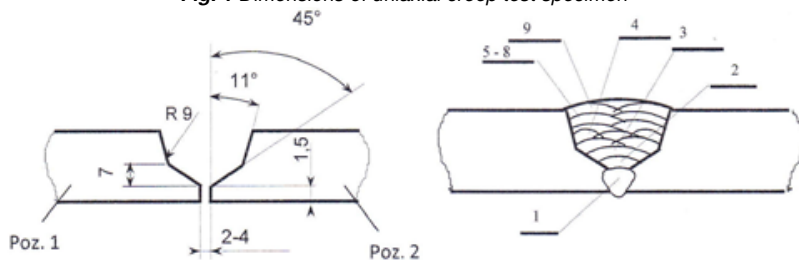
## 2. Materiál a zkušební zařízení

Zkušební vzorek (tyč s rozměry na obr. 1) byl odebrán z kořenové oblasti heterogenního svarového spoje. Základním materiálem byly bezešvé válcované trubky délky cca 150 mm, průměru 273 mm (obr. 2). Rozměry zkušebních prstenců byly: průměr 270 mm a tloušťka 25 mm. Jedna trubka byla podle EN 10216-2 z oceli značky X10CrMoVNb9-1 (P91, poz. 2 na obr. 2) a druhá dle ruských technických podmínek TU 14-3-460-75 z oceli značky 15CH1M1F (poz. 1 na obr. 2). Svařování bylo provedeno ručně metodami TIG (141) a obalenou elektrodou (111) s použitím přídatných materiálů Böhler P 23-IG (kořen svaru) a Böhler Thermanit P 23 (výplň

svaru). Po svaření byl svarový spoj normalizován při teplotě 735 °C po dobu 2,5 hodin s chladnutím ve vypnuté peci a následně uměle degradován při 600 °C / 10 000 hodin.



**Obr. 1** Rozměry zkušební creepové tyče  
**Fig. 1** Dimensions of uniaxial creep test specimen



**Obr. 2** Příprava svaru (vlevo) a postup svařování (vpravo)  
**Fig. 2** Weld preparation (on the left) and welding procedure (on the right)

Tab.1 Chemické složení testovaných materiálů (hm.%)

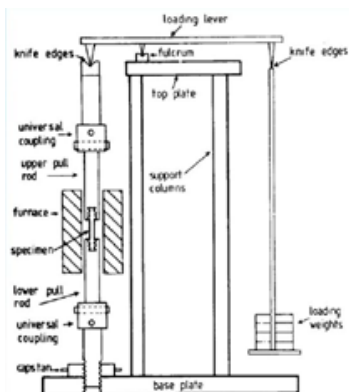
Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	N	Al
P91	0.13	0.48	0.41	0.02	0.011	8.42	0.10	0.09	1.0	0.23	0.09	0.07	0.01
15Ch1MIF	0.1	0.67	0.24	0.011	0.010	1.18	0.10	0.15	0.94	0.22	0.003	0.03	0.018

Jednoosé tahové zkoušky byly provedeny na zkušebním tří-pozicovém zařízení Zst 2/3, vyrobeném firmou Veb Werkstoff Prüfmaschinen Leipzig (obr. 3). Teplota v peci je kontrolována třemi kalibrovanými termočlánky typu K a zaznamenávána pomocí modulu ADAM (výrobce Advantech) do počítače. Creepové prodloužení je kontinuálně snímáno pomocí citlivého inkrementálního rotačního čidla (zapojeného přes kladku).





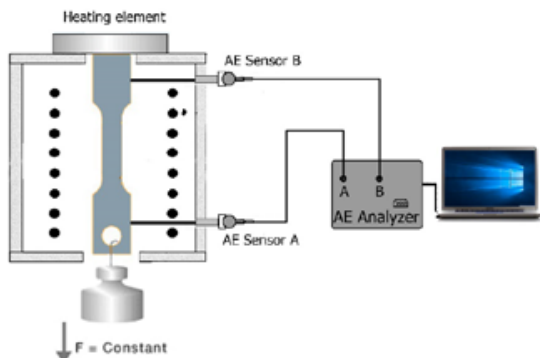
a)



b)

**Obr. 3** Tří-pozicové creepové zařízení (a), schema principu creepového zkoušení (b)  
**Fig. 3** Three-position machine for creep tests (a), illustration of creep testing (b)

Základní konfigurace měření signálu AE, založená na 16-bitovém modulárním systému ZEDO (DAKEL), pracujícím v kontinuálním režimu až do rychlosti 10 MSamples/s nebo na základě triggerů, je popsáno na obr. 4. Na konci každého vlnovodu (přivařen k závitové části vzorku), byly upevněny s použitím vazebného media Sonotech High Z dva magnetické snímače MDK13 (DAKEL).



a)



b)

**Obr. 4** Schema měření signálu AE (a), detail upevnění snímače AE (b)  
**Fig. 4** Schematic illustration of AE measurement (a), AE sensor mounting detail (b)

### 3. Výsledky a diskuze

V rámci řešení tohoto projektu bylo testováno několik (parovodních) materiálů s různými konfiguracemi svarů, zde budou analyzovány výsledky ze zkoušky vzorku D18 (heterogenní svar P91-15Ch1M1F) s následujícími parametry:

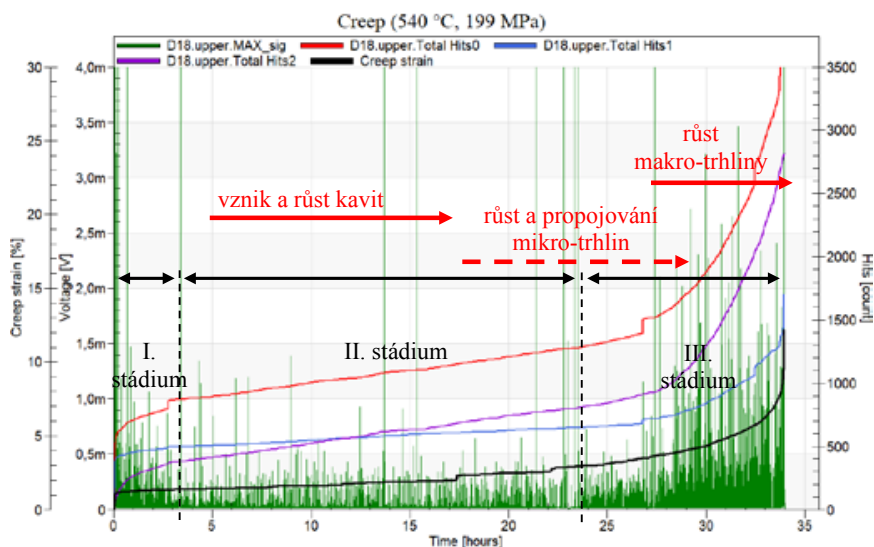
- pozice creepového stroje: 1
- teplota: 540 °C
- konstantní zatížení: 199 MPa
- doba do lomu: 33,9 h
- prodloužení A5: 12,2 %
- kontrakce Z: 70,5 %
- lom: v interkritické oblasti oceli 15Ch1M1F

Výstupní data creepového chování nemají vzhledem k záměru zkoušek požadovanou hodnotu, nicméně k identifikaci degračních procesů na základě vyhodnocených dat z AE jsou dostačující. Pro účely tohoto projektu bylo nutné získat AE data v relativně krátkém časovém období, proto byly zkoušky urychleny vhodným technologickým zpracováním. Tento vzorek byl odebrán z uměle degradovaného stavu 600 °C/10.000h a následně „docreepován“ při teplotě 540 °C s aplikovaným napětím 199 MPa. Laboratorním žháním za zvýšené teploty se oproti provoznímu vyvolává urychlená strukturní degradace a lze odhadnout, jaké době při provozní teplotě to reálně odpovídá. Čas do lomu pak odpovídá vlivu předchozího laboratorního žhání. Vzorek byl odebrán z kořene svaru.

Necelistvosti v heterogenních svarech obecně přispívají k tvorbě a růstu creepových kavít a celková životnost je potom určována charakterem jejich vzniku a šíření. Počet těchto kavít a jejich rychlost růstu tedy ovlivní životnost svařovaných spojů. Celá creepová deformace materiálu je obecně popsána ve třech známých oblastech: 1) primární stádium, 2) ustálený stav nebo sekundární stádium, 3) terciální stádium. Pro konstrukční návrh vysokoteplotních komponent pro dlouhodobé aplikace je však sekundární oblast nejdůležitější. Z předchozích experimentů se zjistilo, že se kavity při creepu začínají tvořit v raných stádiích (asi 20% životnosti vzorku) a jejich počet se zvyšuje asi až do 70%.

Odezva AE na celou creepovou zkoušku vzorku D18 je znázorněna na obr. 5. a celkem viditelně ukazuje změny creepového chování sledované oceli. Pro tento popis byl použit parametr signál MAX (obálka) a kumulativní četnost detekovaných hitů na třech prahových úrovních (hits0, hits1, hits2), kde detektory 0 a 1 byly nastaveny na pevnou hodnotu 0,31% a 0,63% rozsahu a detektor 2 byl nastaven na plovoucí práh 200%

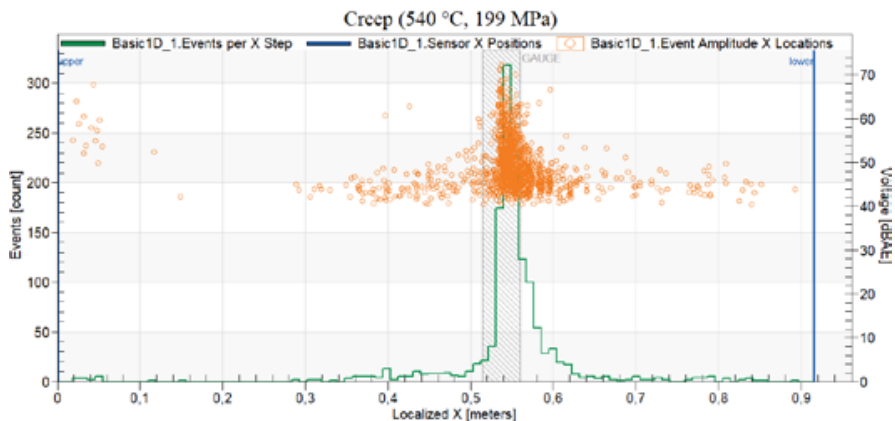
úrovně šumu. Právě z plovoucího prahu (fialová čára) byla vykreslena křivka, která je velmi podobná křivce creepové deformace (černá čára). Sklon křivky se s časem zvyšuje v primárním stádiu, pak dosahuje ustáleného stavu, ve kterém se sklon mění velmi pomalu a nakonec se opět rychle zvyšuje, dokud nedojde k prasknutí. Kontinuální záznam křivky tečení ve všech případech odpovídal očekávanému tří-stupňovému průběhu, ačkoli přesná identifikace přechodu z jednoho stupně do druhého není vždy jednoznačná. Časový průběh obálky signálu na obr. 5 sestává z občasných píků s vysokou amplitudou, které se překrývají se spojitým signálem s nízkou amplitudou, který je velmi podobný šumu pozadí. Liší se však v amplitudě a frekvenčním spektru. MAX signálu v oblasti růstu makro-trhliny roste extrémně a dosahuje až trojnásobku hodnot v primární fázi.



**Obr. 5** Časový průběh MAX signálu AE a kumulativní četnosti hitů AE (na třech hladinách) vč. vykreslení deformační křivky ze vzorku D18

**Fig. 5** Creep strain curve plotted together with MAX signal and cumulative hits at three thresholds during creep test of D18 specimen

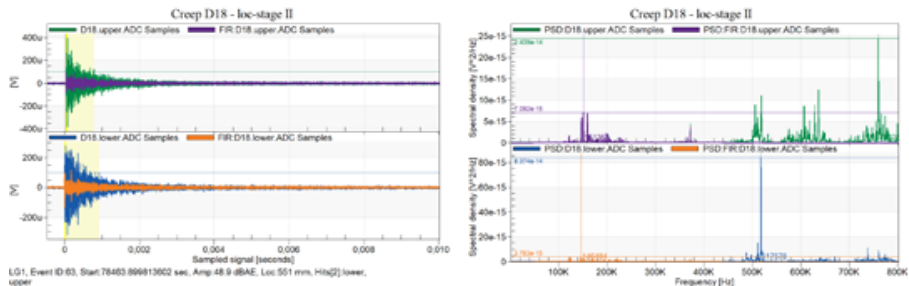
Jedna z hlavních předností metody AE je schopnost lokalizovat aktivní zdroje použitím více snímačů. Nejběžnější přístup k vyhledání zdrojů AE je založen na časové diferenci příchoďů signálu k jednotlivým snímačům. Celková vzdálenost mezi dvěma senzory AE byla 915 mm.



**Obr. 6** Lokalizační mapa událostí z celé zkoušky vč. zobrazení amplitud  
**Fig. 6** Events localization map during the entire creep test including their amplitudes

Lokalizační mapa událostí AE z celé creepové zkoušky je znázorněna na obr. 6. Většina lokalizovaných událostí je koncentrována do měrné části vzorku nebo upínacích čelistí. Amplitudy událostí mimo vzorek se pohybovaly kolem 45 dB<sub>AE</sub>, zatímco na vzorku to bylo v průměru kolem 52 dB<sub>AE</sub>. Pomocí filtračních nástrojů vyhodnocovacího softwaru ZEDO Daemon byla vytvořena v této části vzorku oblast „GAUGE“, která sloužila k vyhodnocování událostí pouze z tohoto místa.

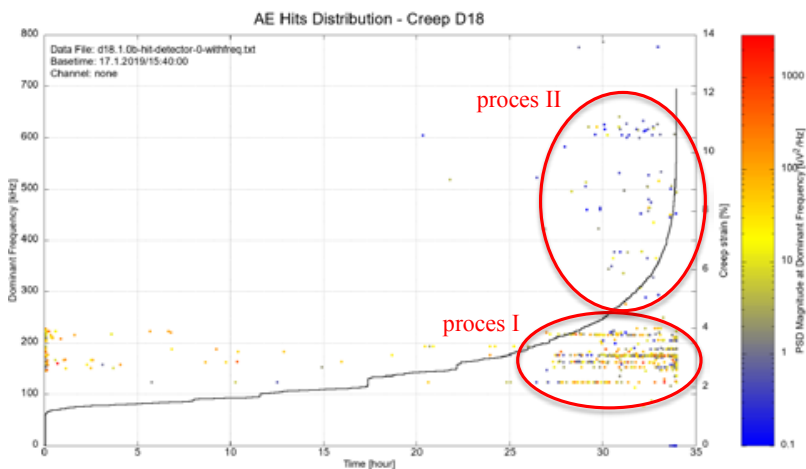
Lokalizované události byly poté podrobeny analýze v časové a frekvenční oblasti podle toho, z jaké časové oblasti pocházely. Tento přístup se používá zejména tam, kde není možné nebo je velmi těžké vyhodnocovat rozdíly v časové oblasti, zatímco ve frekvenční můžeme získat další informace. Nedílnou součástí vyhodnocování byla také filtrace složek spektra, které pocházely z rušivých nebo falešných zdrojů (technologie, pec, pracovní okolí, atp.) – viz např. obr. 7, kde jsou do originálního signálu (zelená / modrá) začleněny signály filtrované (fialová / oranžová) v rozsahu 80 – 400 kHz.



**Obr. 7** Ukázka filtrace lokalizované události v časové / frekvenční oblasti  
**Fig. 7** Example of localized event filtering in time / frequency domain

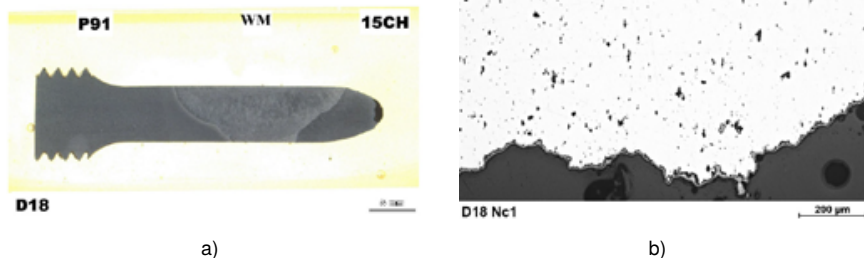
V prvním stádiu převládaly signály s dominantní frekvencí přibližně kolem 220 kHz, signály související s tvorbou a růstem kavit ve druhém stádiu pokrývaly zejména frekvence kolem 125 kHz a nakonec v posledním stádiu vykazovaly nejvyšší hodnoty přesahující 300 kHz, které pravděpodobně souvisely s růstem makro-trhliny. Z hustoty výkonového spektra (PSD) byly pro jednotlivé lokalizované události měrné oblasti vzorku („GAUGE“) určeny jejich dominantní frekvence a zobrazeny v časovém průběhu společně s creepovou křivkou (viz obr. 8). Každý bod v grafu patří jednomu AE hitu (součástí lokalizované události), kde úroveň dosažené FFT amplitudy je zpracována barevnou stupnicí. Z grafu je zřejmé, že hity v poslední fázi se rozdělují do dvou hlavních proudů (oblastí), ve kterých se odehrávají odlišné degradační procesy spojené s růstem makro-trhliny. Nejčastěji jsou zastoupeny frekvence v rozmezí 140 až 220 kHz, které se objevují zejména v primárním a terciárním stádiu. Procesy spojené s růstem makro-trhliny na vyšších frekvencích zabírají velmi malou část.

Jak dokumentují metalografické snímky na obr. 9, k lomu v pásmu částečné překrystalizace TOO oceli 15Ch1M1F dochází zcela běžně, protože je tato ocel oproti P91 pevnostně níže. U testovaného vzorku se vyskytují kavity převážně u lomu (černé skvrny různých velikostí např. na obr. 9b), ale jsou k nalezení také v TOO obou materiálů i ve svarovém kovu.



**Obr. 8** Ukázka filtrace lokalizované události v časové / frekvenční oblasti

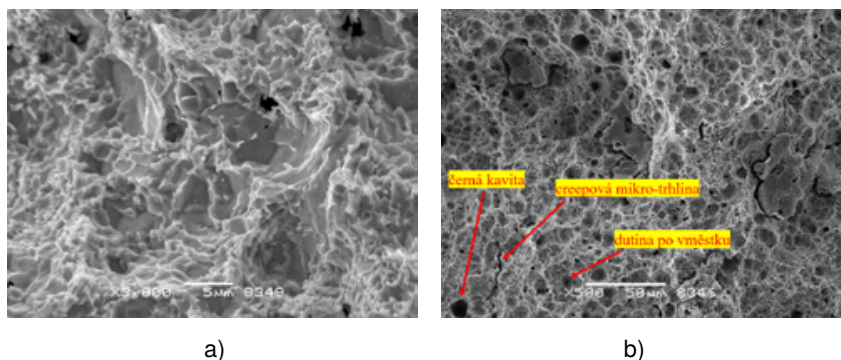
**Fig. 8** Cumulative AE hits and its dominant frequency in test time for specimen D18 (level of achieved FFT amplitude is processed by a color scale)



**Obr. 9** Lom vzorku D18 v TOZ oceli 15Ch1M1F (a) a detail kavitáčního poškození na lomové ploše oceli 15Ch1M1F (b)

**Fig. 9** Creep fractured test specimen D18 in HAZ of 15Ch1M1F (a) and detail of cavitation damage at the fracture of 15Ch1M1F (b)

Lom je transkrystalický s morfologií tvárných důlků. Jsou zde ale i místa s křehkými štěpnými fasetami (hladké plochy uprostřed např. na obr. 10a). Některé dutiny jsou stopy po vměstcích (uvnitř mají stěny jakoby spirálové rýhy) a jiné jsou kavity (ostré černé díry) - dobře vidět je to na obr. 10b - úplně dole vlevo je černá kavita, napravo od ní je creepová mikrotrhlina (černá čára jdoucí po hranici zrn vzhůru), napravo od ní je několik malých ostrých černých kavit.



**Obr. 10** Transkrystalický lom s morfologií tvárných důlků (a) a SEM snímek s různými deformačními mechanismy na vzorku D18 (b)

**Fig. 10** Transcrystalline fracture with dimple morphology (a), SEM micrograph showing the fracture surface of the creep specimen (b)

vzorek je z neexponovaného svarového spoje parovodních trubek z bainitické oceli 15CH1M1F a feriticko-martenzitické oceli P91.

#### 4. Závěr

Článek prezentuje různé způsoby vyhodnocování degradačních procesů na vzorku z neexponovaného heterogenního svarového spoje parovodní trubky z bainitické oceli 15Ch1M1F a feriticko-martenzitické oceli P91 využitím metody AE. Z obr. 5 je zřejmé, že makrotrhlina, která vznikla propojováním kavit a trhlin, začíná růst přibližně od 70% životnosti vzorku. Tento přístup však zatím neposkytuje informace o detekci poškození v počátečních fázích jeho vývoje, aby bylo možné posoudit integritu materiálu a pokud možno zabránit protržení. Frekvenční analýza detekovaných signálů ukázala další možnosti hodnocení degradačních procesů, zejména v konečné fázi creepu. Stále však není prokázáno, jakým mechanismem kavity vznikají. Obecně bylo pozorováno, že kavity často vznikají na hranicích zrn, zejména na těch, které jsou kolmé k tahovému napětí. Celý proces vzniku a propojování kavit jdoucích až k tvorbě finální trhliny je velmi pomalý, na rozdíl od zkoušek při nižších teplotách, proto byla ve 2. stádiu detekována velmi nízká aktivita AE. Bude tedy důležité nalézt další způsoby hodnocení signálu AE, které budou schopny zachytit velmi malé strukturní změny v tomto ustáleném stádiu a pokud možno predikovat blížící se náhlé porušení součásti. Za účelem nalezení vztahu mezi creepovým poškozením a jeho AE odezvou bylo provedeno podrobné metalografické a fraktografické vyhodnocení poškozeného vzorku. Pro ověření získaných výsledků je také nutné navýšit počet úspěšných dlouhodobých zkoušek.

#### 5. Poděkování

Výsledky tohoto příspěvku souvisí s řešením projektu č. FV10645 „Analyzátor kontinuální akustické emise pro diagnostiku erozně-korozního a creepového poškozování potrubních systémů“ podporovaného MPO ČR a projektu FSI-S-17-4428 VUT v Brně, Fakulty strojního inženýrství.

#### Literatura

- [1] Cudek, K., Tasak, E., Ziewiec, A., 2011, “Technology of welding and properties of welded joints of new bainitic and martensitic steels with creep-resistant steels”, *Welding International*, 25(3), pp 172–177.
- [2] Martinsen, K., Hu, S.J., Carlson, B. E., 2015, “Joining of dissimilar materials”, *CIRP Annals*, 64(2), pp 679-699.
- [3] Collini, L., Giglio, M., Garziera, R., 2012, “Thermomechanical stress analysis of dissimilar welded joints in pipe supports: Structural assessment and design optimization”, *Engineering Failure Analysis*, 26(2012), pp 31-49.

- [4] „Diagnostics of New Generation Thermal Power Plants”, 2008, Edited by T. Chmielniak and M. Trela, Polish Academy of Sc. Inst.of Fluid-Flow Machinery, IFFM Publishers, Gdansk, pp 253-338.
- [5] Cicero, S., Gutiérrez-Solana, et. al., 2007, “Structural integrity assessment of different components of a power plant”, *Eng Fail Anal*, 14(2), pp 301-309.
- [6] Lupinc, V., 1981, Creep: Introduction and Phenomenology, in “*Creep and fatigue in high temperature alloys*”, Bressers J. editor, London, Applied Science Publishers.
- [7] Dobrzanski, J., 2004, “Internal damage processes in low alloy chromium–molybdenum steels during high-temperature creep service”, *Journal of Materials Processing Technology*, 157–158, pp 297–303.
- [8] Sklenicka, V., Kucharova, K., Svoboda, M. et al., 2003, “Long-term creep behavior of 9–12%Cr power plant steels”, *Materials Characterization*, 51(1), pp 35–48.
- [9] Sposito, G., Ward, C. et al., 2010, “A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels”, *NDT&E International*, 43.
- [10] Raj, B., Moorthy, V., et al., 2013, “Assessment of microstructures and mechanical behaviour of metallic materials through nondestructive characterization”, *International Materials Reviews*, Taylor & Francis, 48(5), pp 273-325.
- [11] Boehnlein, T., Fox, J., Frock, B., et al., 2004, *Research on Advanced Nondestructive Evaluation (NDE) Methods for Aerospace Structures*, University of Dayton Research Institute, DTIC, Dayton, OH.
- [12] Vinogradov, A., Lazarev, A., Linderov, M. et al., 2013, “Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy”, *Acta Mater*, 61(7), pp 2434-2449.
- [13] Oh, K.H., Jang, J.H., Jung, C.K., et al., 2004, “The Use of Acoustic Emission Method to Evaluate Creep-Fatigue Interaction”, *Key Engineering Materials*, 270-273, pp 491-496.
- [14] Viitanen, L., Ovaska, M., Ram, S. K. et al., 2019, Predicting Creep Failure from Cracks in a Heterogeneous Material using Acoustic Emission and Speckle Imaging, *Physical Review Applied*, 11(2), 1-9.





## HODNOCENÍ KOROZNÍHO NAPADENÍ STĚNY MOKRÉHO ZÁSObNÍKU REAKTORU LVR-15

### EVALUATION OF CORROSION ON SET STORAGE WALL OF LVR-15 REACTOR

Pavel Zahrádka\*, Jan Patera\*

\*Centrum Výzkumu Řež, s.r.o.

Contact: pavel.zahradka@cvrez.cz

#### **Abstrakt**

Článek popisuje metodu hodnocení korozního napadení stěny mokrého zásobníku vyhořelého paliva výzkumného reaktoru LVR-15 v Řeži pomocí videoskopu Mentor Visual iQ. Měření bylo provedeno v aktivním prostředí bazénu vyhořelého paliva napuštěného vodou s obsahem kyseliny borité. K měření byla použita vodotěsná sonda o průměru 6,1 mm s objektivem, který umožňuje 3D fázové měření. K ověření výsledků získaných touto metodou měření byly použity repliky, které jsou snímány každých pět let při odstávce reaktoru. Odebrání replik ze stěny mokrého zásobníku vyžaduje vypuštění bazénu a vyvezení palivo.

Kontrola korozního napadení stěn mokrého zásobníku pomocí videoskopu umožňuje přesnější sledování rozvoje korozních úbytků a zvyšuje tak bezpečnost jeho provozu. Endoskopická metoda není schopna plně nahradit repliky díky své nižší přesnosti, ale je vhodná pro doplnění ročních kontrol reaktoru a jeho zařízení pro získání informací o stavu defektu v kratších časových intervalech.

**Klíčová slova:** videoskop, bazén vyhořelého paliva, 3D měření, měření pod vodou

#### **Abstract**

This paper deals with the evaluation of the wall corrosion in the spent fuel pool of the LVR-15 research reactor in Řež using the Mentor Visual iQ endoscope. The measurement was performed in the active environment of the spent fuel pool filled with water containing boric acid. A waterproof probe with a lens that allows 3D phase measurement was used for measurement. To verify the results obtained by this measurement method, replicas were used, which are taken every five years during shutdown, but taking replicas from the pool wall requires draining the pool and removing fuel.

Inspection of the corrosion attack of the pool wall by means of an endoscope allows monitoring of the development of corrosion losses every year, thus increasing the safety of its operation. Endoscope inspection is not able to fully replace replicas due to its lower accuracy, but it is suitable for complementing annual reactor inspections to obtain information on corrosion development at shorter time intervals.

**Key words:** videoscope, spent fuel pool, 3D measurement, underwater measurement

## 1. Úvod

Rozvoj a využití nových technologií přináší také nové možnosti v oblasti nedestruktivního testování – v posledních několika letech zaznamenaly velký pokrok zejména 3D skenery.

Článek se věnuje jednomu z miniaturizovaných 3D skenerů. Jedná se o videoskop Mentor Visual IQ, jehož 3D skener se nachází na konci 3-6m endoskopické sondy o průměru 6,1 mm. Videoskop se dokáže dostat do obtížně přístupných míst, kde pomocí optického skeneru dokáže vytvořit 3D snímek hledaného defektu a přímo na místě změřit jeho základní rozměry. Nespornou výhodou je, že získaná data je možné později dále analyzovat v jiných specializovaných SW určených pro práci s daty typu point cloud – mračno bodů.

Za pomoci výše zmíněného videoskopu byla provedena kontrola korozního napadení stěn nádrže mokrého zásobníku vyhořelého paliva bez vypuštění vody. Standardně se kontrola stěny bazénu provádí jednou za 5 let při odstávce pomocí replik, kdy je zapotřebí vodu vypustit. Měření videoskopem bylo ovšem prováděno pod vodou, za zvýšené radiace o hodnotě 2-3 Sv/h, v hloubce cca 1,5 m.

## 2. Použité zařízení

Pro měření byl použit videoskop Mentor Visual IQ od firmy GE, doplněný sondou o průměru 6,1 mm s výměnným objektivem označeným XL4TM61105FG, který umožňuje 3D fázové měření. Zorné pole používaného objektivu činí 105° a hloubka ostrosti 7–250 mm. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 25°C až 100°C.

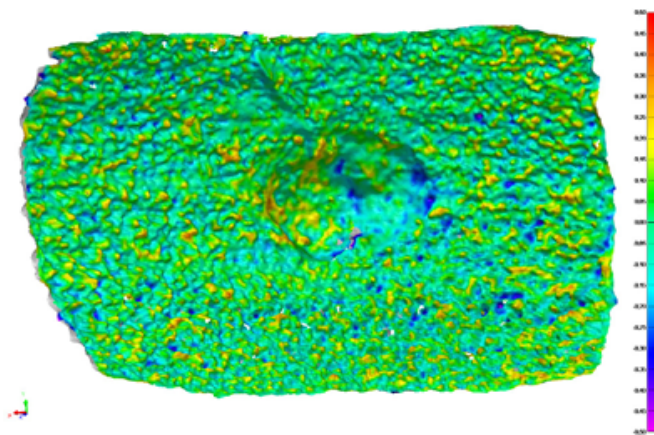


**Obrázek 1:** Videoskop Mentor Visual IQ  
**Figure 1:** Videoscope Mentror Visual IQ

Radiační odolnost sondy výrobce neuvádí, proto bylo nutné sondu testovat experimentálně. Sonda byla připevněna na zaváděcí tyč a vložena do gumového návleku pro snadnější dekontaminaci po experimentu. Poté byla sonda ponořena do bazénu vyhořelého paliva, kde se se zvyšující se radiací postupně rostl i šum obrazu. V hloubce cca 2 m nebylo měření stále negativně ovlivněno vysokým šumem obrazu při dávkovém příkonu 3 Sv/h. Ve větší hloubce výrazně vzrostlo změnění obrazu a mohlo by zde dojít k nevratnému poškození sondy. Měření korozních defektů probíhalo v hloubce 1,5 m. Přesnost 3D měření pod vodou není výrobcem uváděna, a tak bylo zapotřebí její hodnotu ověřit porovnáním odchylek dvou různých snímků téhož místa. Následně bylo možné porovnat snímky z 3D měření s replikami, které byly odebrány během poslední odstávky 9/2017, kdy byl bazén mokrého zásobníku vypuštěný. Pro účely porovnání byly repliky naskenovány Ramenovým skenerem Romer RS4 od firmy Hexagon, který nabízí řádově větší přesnost.

### 3. Postup ověření přesnosti

Přesnost 3D měření byla stanovena porovnáním dvou různých snímků stejného defektu měřeného pod vodou. Sonda videoskopu byla připevněna na zaváděcí tyč, která byla zavěšena na jeřábu, pomocí něhož byla sonda nasměrována k defektu. Podmínkou pro úspěšné zachycení 3D snímku je maximální omezení pohybu sondy. Po najetí zaváděcí tyče do pozice tak bylo nutné vyčkat řádově několik minut na ustálení sondy. Takto získaná data dvou snímků vytvořených v mírně rozdílných pozicích byly proloženy a v 35 tisíci bodech porovnány odchylky vzdálenosti, viz obr. 2 a tab. 1.



**Obrázek 2:** Odchytky porovnání dvou měření stejného defektu  
**Figure 2:** Differences between two measurements of the same defect

Absolutní odchylna	Počet bodů	Podíl odchylek
≤ 0,05 mm	15885	45,6 %
≤ 0,10 mm	26361	75,6 %
≤ 0,15 mm	31091	89,2 %
≤ 0,20 mm	33075	94,9 %
≤ 0,25 mm	33826	97,0 %
≤ 0,30 mm	34215	98,1 %
≤ 0,35 mm	34387	98,6 %
≤ 0,40 mm	34524	99,0 %
<b>Celkem</b>	<b>34861</b>	<b>100,0 %</b>

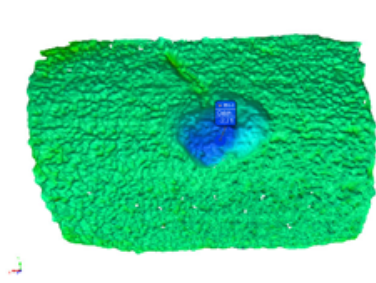
**Tabulka 1:** Odchylny dvou měření pro výpočet přesnosti přístroje

**Table 1:** Deviation of two measurements to calculate instrument accuracy

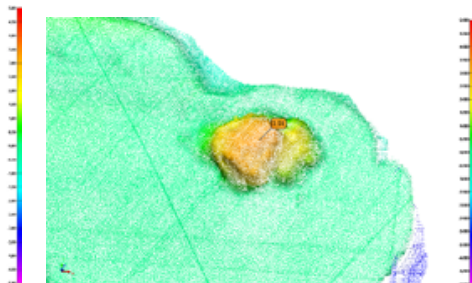
Z naměřených odchylek bylo vypočteno, že přesnost 3D měření použitého videoskopu  $2\sigma$  na vzduchu činí přibližně 0,21 mm. Při měření ve vodě je potřeba tuto hodnotu korigovat indexem lomu vody  $n = 1,33$ , což odpovídá přesnosti  $2\sigma = 0,28$  mm.

Při měření bylo vybráno několik míst pro porovnání s replikami z roku 2017. Obraz naměřený videoskopem byl převrácený tak, že odpovídal tvaru replik, a v důsledku měření ve vodě byl i zmenšený. Rozměry nasnímané pomocí videoskopu byly proto korigovány pomocí  $n = 1,33$ .

Výsledky 3D měření v porovnání s výsledky získaných pomocí replik jsou uvedeny v tabulce 2.



**Obrázek 3:** Videoskop – Defekt B1/1 č. 5  
**Figure 3:** Videoscope – Defect B1/1 č. 5



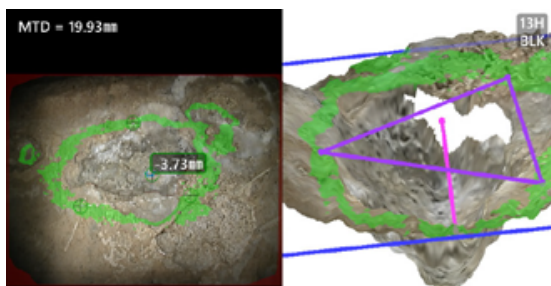
**Obrázek 4:** Replika – Defekt B1/1 č. 5  
**Figure 4:** Replica – Defect B1/1 č. 5

Měřené místo		Hloubka korozních důlků			
Označení	Bod č.	Videoskop (bez korekce) [mm]	Videoskop (s korekcí) [mm]	Replika 2017 [mm]	Odchylka [mm]
<b>B1/1</b>	1	1,58	2,1	2,1	0
...	2	1,50	2,0	1,9	+0,1
...	3	1,31	1,7	1,7	0
...	4	1,28	1,7	1,7	0
...	5	2,71	3,6	3,5	+0,1
<b>B1/2</b>	1	1,82	2,4	2,2	+0,2
...	2	1,75	2,3	2,3	0
...	3	1,31	1,7	1,8	-0,1
<b>B4/1</b>	1	1,85	2,5	2,6	-0,1
...	2	1,53	2,0	1,8	+0,2
...	3	1,93	2,6	2,5	+0,1

**Tabulka 2:** Porovnání 3D měření videoskopem a 3D měření replik

**Table 2:** Comparison of 3D measurement by videoscope and replicas

Z tabulky srovnání obou metod plyne, že naměřené odchylky 3D měření videoskopu nepřesahují vypočítanou přesnost  $\pm 0,3$  mm. Navíc lze základní rozměry defektu odečíst přímo na místě pomocí integrovaných měřicích nástrojů ve videoskopu. Pro přesnější vyhodnocení je ale nutno data zpracovat v dalším SW a korigovat prohnutí 3D snímku vlivem lomu světla ve vodě.

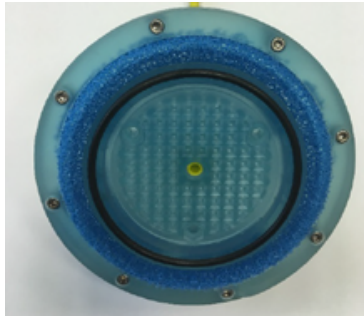


**Obrázek 5:** Měření hloubky defektu pomocí integrovaného měřicího nástroje

**Figure 5:** Defect depth measurement using an integrated measuring tool

#### 4. Jiné možnosti měření defektů

V rámci interního projektu je vyvíjeno zařízení pro odběr replik pod vodou. Prototyp je již vyrobený, obr. 6 a finální zařízení bude dokončeno do konce příštího roku. Zařízení by mělo umožnit provést odběr repliky, tj. otisku povrchu v obtížně dostupných místech pod vodou i při vysoké radiaci. Počítá se i s připevněním odběrového zařízení na manipulátor pro práci uvnitř jaderné technologie. Tak bude možné vytvořit otisk defektu ve stěně bazénu s přesností 0,1  $\mu\text{m}$  bez nutnosti vypouštět vodu. Odebraná replika bude následně naskenována a dále analyzována.



**Obrázek 6:** Prototyp zařízení pro odběr replik  
**Figure 6:** Prototype replica collection device

#### 5. Závěr

Ze srovnávacích měření je zřejmé, že měření 3D videoskopem není schopno plně nahradit současnou kontrolu pomocí replik. Důvodem je výrazně nižší přesnost při měření korozního napadení stěny bazénu. Přesnost videoskopu ve vodě činí  $2\sigma = 0,3$  mm; přesnost laserového skenování na replikách přibližně  $2\sigma = 0,03$  mm. Videoskop má i přesto dostatečnou přesnost k prokázání, že u stávajících korozních důlků nedošlo k výraznému nárůstu jejich velikosti za období jednoho roku. Největší výhodou 3D videoskopu je, že umožňuje měření pod vodou, zatímco odebírání replik lze provádět pouze při vypuštění mokrého zásobníku. Pracujeme však na tom, abychom v budoucnu byli schopni provádět odběr replik pod vodou pro zachování maximální přesnosti měření.

Videoskop je tak možné používat při každoroční kontrole pro zvýšení bezpečnosti provozu výzkumného reaktoru LVR-15, přičemž měření replik s vyšší přesností bude prováděno v periodě 5 let, kdy se počítá s vypuštěním bazénu mokrého zásobníku.

## **Poděkování**

*Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.*

## **Literatura**

- [1] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P. MAREŠ, P., V. *Hodnocení stavu korozního napadení mokrého zásobníku vyhořelého paliva reaktoru LVR-15 v roce 2018.* CVŘ PL-2259/0. Plzeň 2019.







## ZKOUŠENÍ AUSTENITICKÉ OCELI POMOCÍ VYSOKOFREKVENČNÍCH SOND TECHNIKOU PHASED ARRAY HIGH FREQUENCY INSPECTION SOLUTION FOR AUSTENITIC STAINLESS-STEEL WELDS

Petr ŽBÁNEK

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [zbanek@atg.cz](mailto:zbanek@atg.cz)

### **Abstrakt:**

*Austenitická nerezová ocel je používána pro své vhodné mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Tento materiál se používá v ropném, plynárenském a jaderném průmyslu, kde představují ultrazvukové techniky významnou část inspekce v procesu kontroly kvality. Tyto slitiny však velmi často vykazují velký útlum a anizotropní chování z hlediska šíření ultrazvukové vlny. Tyto vlastnosti jsou způsobeny velikostí a orientací zrn, zejména uvnitř vlastního objemu svaru. Konvenční ultrazvukové techniky mají omezené možnosti, zatímco phased array s možností fokusace a tvarování svazku nabízí větší pokrytí zkoušené oblasti a lepší rozlišení. Tento článek si klade za cíl srovnat kvalitu signálu mezi některými konfiguracemi zkoušení a změnami parametrů na vzorcích svarů s vysokým útlumem. Výsledky ukážou, že není vždy nutné provést zkoušení na úkor citlivosti, schopnosti odměřování velikosti indikací a odstupu signálu od šumu.*

## Úvod

Korozivzdorná ocel je vysokolegovaná ocel se zvýšenou odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Korozní odolnost je založena na schopnosti tzv. pasivace povrchu kovu. I když je pasivita korozivzdorných ocelí vůči celkové korozi dosažena v mnoha prostředích, lze se setkat v různých specifických prostředích se vznikem různých lokálních druhů koroze – štěrbínovou, bodovou, mezikrystalovou a korozním praskáním. Proto se kromě chrómu používají i další prvky, které zvyšují korozní odolnost pro daný typ koroze.

Korozivzdorné oceli lze rozdělit podle chemického složení a struktury do tří základních skupin: feritické, martenzitické, austenitické oceli a tzv. přechodové skupiny feriticko-austenitické, martenziticko-austenitické a poloferitické oceli. Ačkoli korozivzdorné oceli obsahují vysoké množství legur, 12 až 30 % chrómu, až 30 % niklu nebo do 24 % manganu a dalších, vždy se jedná o slitinu uhlíku s železem, tj. ocel.

Použití korozivzdorných ocelí je široké, od chemického a potravinářského průmyslu, přes automobilový průmysl, ve stavebnictví i jako architektonický materiál, při výrobě lodí atd.

Svarové spoje všech důležitých konstrukcí, jako jsou tlakové nádoby, potrubí apod. musí být ve výrobní fázi, ale většinou i během provozu, vyzkoušeny aby se snížilo riziko poruchy a prokázala se schopnost konstrukce přenášet provozní zatížení. Radiografické zkoušení je stále hojně používané a je dobře zdokumentované řadou norem a kódů. Navíc je poměrně snadné interpretovat výsledky (samozřejmě i zde je nutný kvalifikovaný a zkušený personál).

Nevýhodnou radiografické zkoušky jsou různá legislativní omezení a hlavně snížení možnosti na konstrukci pracovat pokud zkouška probíhá.

Alternativou k radiografickému zkoušení je zkouška ultrazvukem. Zkouška je ve srovnání s rentgenem rychlá, nepřináší žádná zdravotní rizika a výsledky jsou v podstatě okamžitě k dispozici.

Zkouška austenitických ocelí konvenčním ultrazvukem je popsána v normě ČSN EN ISO 22825. Její provedení je ale poměrně obtížné a to zejména pokud svar vykazuje velký útlum.

### **Problematika zkoušení svarů austenitických ocelí ultrazvukem**

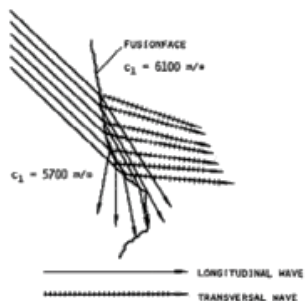
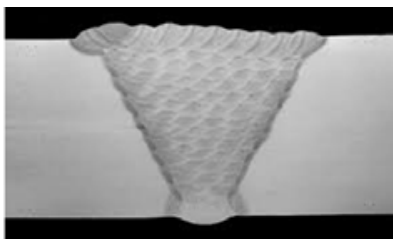
Zkoušení austenitických svarů ultrazvukem bylo vždy spojeno s relativně velkými problémy. Norma ČSN EN ISO 22825 stanovuje 4 stavy, se kterými se lze setkat a uvádí postupy, jakými je možné problematiku řešit.

Prvním stavem je, že jak struktura základního materiálu, tak i svarového kovu jsou jemnozrné. Za těchto podmínek je možné zkoušet prakticky bez omezení a lze

postupovat dle EN ISO 17640. Druhým stavem je, že struktura základního kovu je sice jemnozrná, ale samotný svarový kov je hrubozrný. V tomto případě je sice možné prozvučit základní materiál příčnými vlnami, ale svarový kov už prozvučit nelze. Příčné vlny je tak možné použít pouze k detekci indikací na hranici natavení, ale ne hlouběji ve svarovém kovu. V takovém případě doporučuje norma použít některou z vlnových transformací např. TL nebo LLT techniku. To s sebou ale nese nutnost minimálně dvou zkoušek na jednom svaru a zkouška se prodlužuje a tím samozřejmě prodražuje. Třetím stavem je, že jak základní materiál, tak svarový kov jsou hrubozrné a nelze je prozvučovat příčnými vlnami. Potom lze zkoušení provést pouze podélnými vlnami. Čtvrtým stavem je, že zkouška ultrazvukem není s dostatečným odstupem signálu od šumu vůbec proveditelná, a tak se musí použít jiná NDT metoda (např. radiografická).

V tomto článku je řešený druhý a třetí případ, ke kterým lze z hlediska řešení problému hrubozrnnosti (části) struktury přistupovat stejným způsobem.

### Prozvučitelnost austenitických svarů.

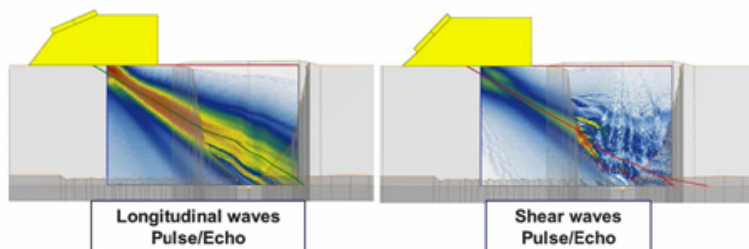


**Obr. 1:** Detail austenitického svaru a lom ultrazvuku na návarové hraně

Nejprve je nutné se podívat, proč jsou vlastně austenitické svary tak obtížně prozvučitelné. Důvodem je značně nepříznivá mikrostruktura tohoto materiálu. Hrubé zrno způsobuje vysoký útlum a šum (snížení SNR). Literatura uvádí pro feritickou ocel na frekvenci 2 MHz útlum řádově 0,01 – 0,1 dB/mm pro podélné vlny (pro příčné 0,02 – 0,3 dB/mm), přičemž pro austenitickou ocel je 0,03 – 0,4 dB/mm (pro příčné 0,1 – 0,5 dB/mm). Rozhodující je i struktura kovu, kde je opět uváděno, že pro tvářenou austenitickou strukturu je hodnota útlumu pro 4 MHz sondu (příčné vlny) cca 0,01 – 0,1 dB/mm zatímco u svarů je to 0,1 – 0,6 dB/mm. Navíc jsou vlastnosti tohoto materiálu silně anizotropní a tak může (zejména na hranici základního a svarového kovu) docházet ke skokovým změnám v rychlosti šíření ultrazvuku. To samozřejmě vede k chybám v odečtu polohy (vlivem změny rychlosti a směru šíření ultrazvukového svazku) a také ke změnám ve způsobu šíření ultrazvukové vlny (změny podélné vlny na příčnou nebo naopak). Chyba v odečtu polohy je udávána až 25%.

Norma EN ISO 22825 tedy v případě materiálu neprozvučitelného pro příčnou vlnu doporučuje přechod na vlnu podélnou. Podélná vlna je mnohem méně ovlivňována

změnami struktury, protože její chování není ovlivňováno rovinou polarizace vzhledem k orientaci zrn, jak je tomu u vlny příčné. Navíc díky vyšší rychlosti podélné vlny dojde i k prodloužení vlnové délky (kterou lze samozřejmě ještě zvýšit snížením frekvence), nicméně tato opatření sice povedou k lepší prozvučitelnosti, ale na úkor jiných parametrů.



**Obr. 2:** Prozvučitelnost pro jednotlivé typy vln

Díky tomu, že svary je nutné většinou zkoušet pod úhlem, tak se použitím podélné vlny nevyhneme přítomnosti vlny příčné, která se bude šířit jinou rychlostí a jiným úhlem (může tvořit i dodatečné vlnové transformace), než je předpokládáno a může způsobovat sporné indikace.

### Optimalizace technik zkoušení

Norma ČSN EN ISO 22825 říká, že po výběru techniky zkoušení pro různé části (pásma) svaru, se musí provést volba a optimalizace metodiky pro každé pásmo. U dvojitých sond lomených podélných vln to znamená, že optimální frekvence, úhel svazku, ohnisková vzdálenost a rozměr měniče sondy se musí vybírat pro každé pásmo samostatně. To v případě konvenčního ultrazvuku může (a pravděpodobně bude) znamenat více směrů prozvučování a tedy několikanásobné opakování zkoušení na daném svaru. Navíc je nutné brát v úvahu všechna omezení, která plynou z použití podélných vln, jako je přítomnost příčné vlny a její transformace, vlnové transformace podélné vlny, změna směru šíření atd.

Pro techniku phased array samozřejmě z fyzikálního hlediska platí stejná omezení, ale technika má možnost volitelné fokusace a navíc 2D zobrazení poskytuje lépe interpretovatelné výsledky. Použití S-skenu navíc může optimalizovat úhly lomu vzhledem ke svaru. Optimalizace SNR může být také dosažena použitím techniky pitch-catch (použitým u dvojitých úhlových sond v konvenčním ultrazvuku) kde se výrazně omezuje šum předsádky.

## Použitelné techniky Phased array zkoušení

Největší výhodou techniky Phased array je značná volnost ve volbě jednotlivých parametrů ultrazvukového skenu, které jsou na rozdíl od konvenčního ultrazvuku pro dané zařízení nastavitelné. Rozhodujícím parametrem pro výběr techniky bude v našem případě odstup signálu od šumu. Vytvářet TCG funkci pro austenitické svary je vzhledem k anizotropii materiálu poměrně obtížné a křivky vytvořené na měrce bez svaru neodpovídají skutečnosti. Velikost výšky ech od jednotlivých reflektorů by nemělo potřebnou vypovídací hodnotu. Odstup signálu od šumu je počítán v podstatě podle metodiky normy EN ISO 12668-3, kde se sice jako referenční úroveň používá 20% FSH, ale víceméně je odstup vyjádřen vztahem:

$$SNR = dB80\%_{\text{šum}} - dB80\%_{\text{vývrt}}$$

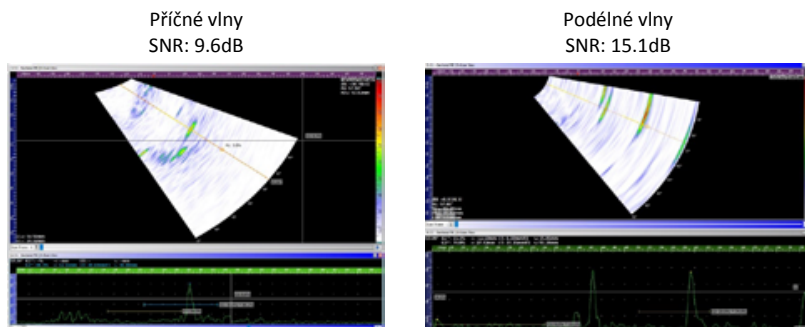
Kde 80% FSH je referenční úroveň. Jinak lze samozřejmě odstup vypočítat podle známého vztahu:

$$SNR = 20 \cdot \log\left(\frac{\%FSH_{\text{indikace}}}{\%FSH_{\text{šum}}}\right)$$

## Výběr parametrů Phased array systému

### Typ vlny

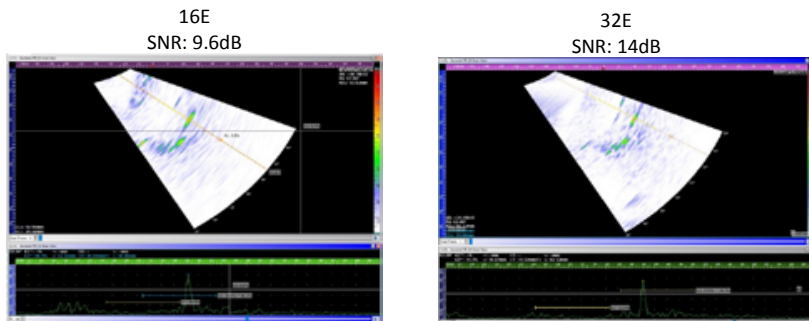
V austenitických svarech je jako dominantní mechanismus vzniku útlumu vždy rozptyl. Obecně platí, že ztráty rozptylem jsou při stejné vlnové délce vždy vyšší pro příčné vlny, než pro vlny podélné. Pro zkoušení feritické struktury jsou běžně používané příčné vlny, protože je jednodušší použít úhlovou sondu příčných vln a zbavit se tak podélné vlny, prozvučitelnost zpravidla není problém a nižší vlnovou délkou (při dané frekvenci) získáme vyšší citlivost a lepší rozlišení. V našem případě ale musí být pro austenitickou ocel použita vlna podélná, což dokumentuje Obr. 3.



Obr. 3: SNR pro podélné a příčné vlny

## Velikost apertury

Velikost aktivní apertury má na phased array sken stejný vliv jako velikost měniče při konvenčním zkoušení. Pokud zvětšíme aktivní aperturu, dostaneme celkově menší rozevření svazku a delší blízké pole, což s sebou nese větší možnosti fokusace resp. dojde ke zvětšení možné oblasti pro fokusaci a rovněž je možné zvýšit intenzitu fokusu. Vliv velikosti apertury je na Obr. 4.

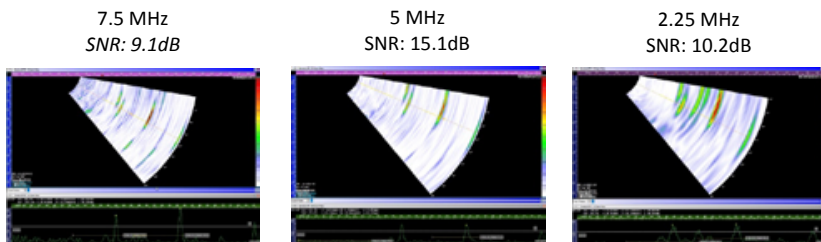


Obr. 4: SNR pro aperturu 16 a 32 elementů

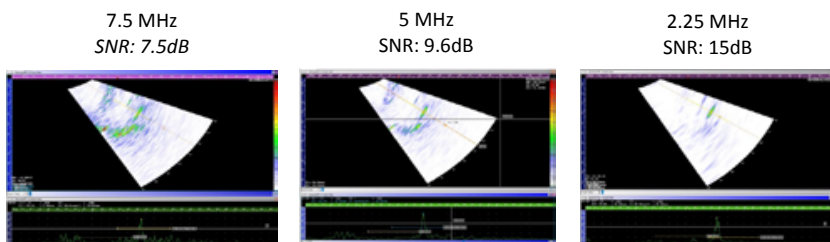
## Frekvence

Frekvence je samozřejmě důležitým parametrem z hlediska délky vlny a tím i prozvučitelnosti materiálu. Obecně platí, že s nižší frekvencí dosáhneme lepšího průchodu vlny materiálem, ale na úkor dalších parametrů. Hlavním parametrem je citlivost, která se s rostoucí délkou vlny snižuje, ale pak také klesá délka blízkého pole a s tím se zhoršují další vlastnosti svazku, jako je maximální délka fokusu a samozřejmě se také mění rozevření svazku. Dále se díky větší vlnové délce zhoršuje celkové rozlišení skenu (na základě hloubkového rozlišení). Otázkou tedy je, jaká frekvence bude optimální. Samozřejmě, že zde má hlavní slovo materiál, který určuje maximální použitelnou frekvenci, ale nelze obecně říci, že nižší frekvence bude znamenat lepší výsledek. Obr. 5 popisuje vliv frekvence pro oba zamýšlené typy vlny na sledovaný parametr odstupe signálu od šumu.

Pro podélné vlny



Pro příčné vlny

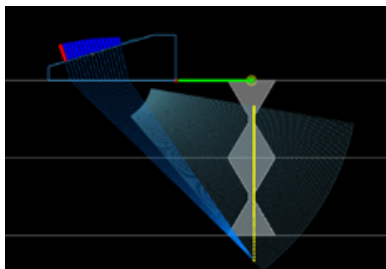


**Obr. 5:** SNR pro podélné a příčné vlny na různých frekvencích

Nejlepšího výsledku jsme v tomto případě dosáhli pro podélnou vlnu při 5 MHz. Jak je ale vidět, že i příčná vlna na frekvenci 2,25 MHz má v podstatě stejný odstup signálu od šumu a pro menší tloušťky (cca 2 – 10 mm) je spíše doporučována pro snazší kalibraci a interpretaci výsledků.

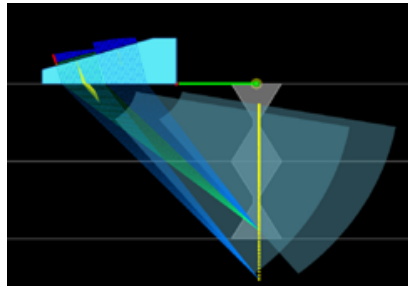
### Konfigurace phased array zkoušení

Zatím byly všechny výsledky získány za pomoci klasické metody pulse echo s běžnou předsádkou s úhlem řezu vhodným k vybuzení příčné nebo podélné vlny na požadovaném rozsahu úhlů.



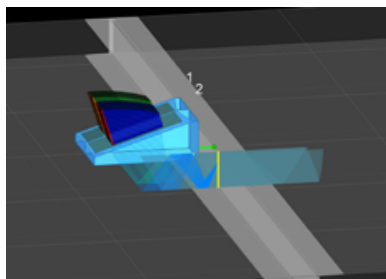
**Obr. 6:** Phased array konfigurace Puls - echo

Co kdybychom se ale pokusili změnit zapojení phased array systému tak, aby se ještě více snížila jeho vlastní šumová složka? Jistého snížení šumové složky můžeme dosáhnout zapojením phased array sondy v pitch-catch režimu, kde jedna skupina měničů bude použita jako vysílací a druhá jako přijímací. Schéma tohoto zapojení je na Obr. 7.



*Obr. 7: Phased array - Tandem*

Tato konfigurace pomůže snížit šum tím, že stejné měniče nejsou používány pro vysílání a pro příjem. Tím se ale nezbavíme šumové složky indukované v samotné předsádce. Určitá, i když malá, část signálu se může v předsádce nevhodně odrazit a vrátit se do přijímacích sond. Abychom tomu zabránili, je možné použít měniče vysílací oddělené nejen na ploše sondy, ale oddělené navzájem akusticky. Výsledkem jsou sondy DLA, tedy Dual Linear Array.



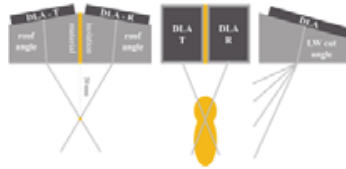
*Obr. 8: DLA Phased array*

### **Princip DLA sond**

DLA sondy jsou dvě 1D lineární phased array sondy, které jsou vůči sobě skloněné o určitý střešový úhel podobně jako je to u dvojitých konvenčních sond. Předsádky mají poměrně malý úhel řezu, cca  $17,5^\circ$  a tím jsou vhodné k vybuzení podélné vlny pod poměrně širokým rozsahem úhlů. Tím je možné vhodně směřovat svazek vůči návarovým hranám. Akustická pole sond se protínají v ohnisku stejně, jako je to u dvojitých sond a stejně tak se i omezuje šum díky tomu, že oblast citlivosti je



omezena do oblasti, kde se protínají akustická pole jednotlivých sond. Předsádky nejsou opatřené tlumícími tělísky, která v tomto případě nejsou zapotřebí.



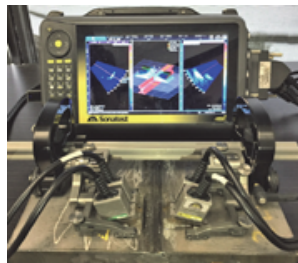
**Obr. 9:** Detail DLA sond

Sondy byly v provedení DAAH (Detachable Active Array Head), a tak je sondy možné použít i k jinému účelu než pouze pro kontrolu svarů austenitických ocelí a rovněž kabel může být použitý ve spojení s jinými DAAH sondami a funguje jako tzv. splitter pro připojení dvou phased array sond do jednoho konektoru, případně může splitter nahradit.



**Obr. 10:** Provedení DLA sond

Zároveň ve spojení se splitterem je možné použít dvě DLA sondy (dva páry) pro kontrolu z obou stran svaru.



**Obr. 11:** Zapojení pro současné zkoušení svaru z obou stran za použití DLA sond

Výhodou DLA sond je, že vzhledem k 1D provedení dokážou dosahovat relativně velkých apertur s použitím menšího množství měničů a tím se jedná o cenově efektivní řešení, protože využívají výhody velkých apertur (menší rozevření svazku, delší blízké pole – větší fokusační vzdálenosti) s minimálními požadavky na přístroj. Nevýhodou je, že na rozdíl od tzv. DMA sond, které využívají 2D pole měničů, které mají dvě aktivní apertury, nejsou parametry svazku plně volitelné, a tak například

fokusační oblast je závislá na předsádce a nikoliv pouze na nastavení přístroje (a množství použitých elementů).

### Měření na vzorcích se svarem

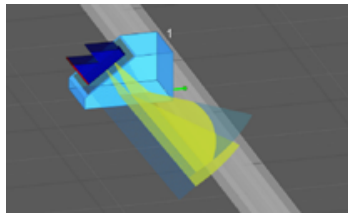
Pro ověření řešení byly použity tupé svary austenitické oceli se spojem typu I a s tloušťkami 7,5 mm, 12,1 mm a 17,5 mm. Všechny vzorky měly průměrnou hodnotu útlumu cca 0,2 dB/mm při 5 MHz pro podélné vlny. Ve svarech jsou boční vývrty s průměry 1 mm, 2 mm a 4 mm a s pravoúhlými drážkami na každé straně svaru délky 6,4 mm a hloubky 1 mm.

Pro zkoušení klasickou pulse-echo technikou a tandemovou technikou byla použita sonda s frekvencí 5 MHz, 32 elementy a roztečí 0,8 mm. Předsádka měla úhel řezu 37° s rozsahem úhlů cca 37° – 77°.

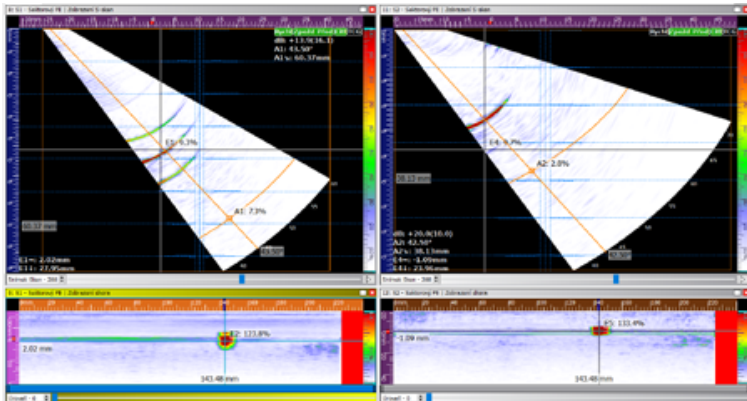
K testu DLA sond byly použity 3 předsádky s různými ohniskovými vzdálenostmi (25 mm, 50 mm a 75 mm), přičemž jako nejlepší se pro dané konfigurace svaru ukázala předsádka s fokusem ve vzdálenosti 50 mm. Použité sondy měly frekvenci 5 MHz, 32 elementů a rozteč 0,8 mm a 2,25 MHz, 20 elementů a rozteč 1,2 mm.

### Technika Pulse – echo

Měření s příčnou vlnou nepřineslo ani v případě nejnižší tloušťky prakticky žádné výsledky. Aktivní apertura sondy byla 32 a 16 elementů a jedinou spolehlivě detekovanou indikací byla drážka na straně sondy, kdy ovšem ultrazvukový svazek nevstupoval do vlastního svarového kovu. Odstup signálu od šumu byl pro tento vzorek v souladu s výše uvedeným vyšší pro aperturu 32 elementů (17,5 dB vs. 14,4 dB)



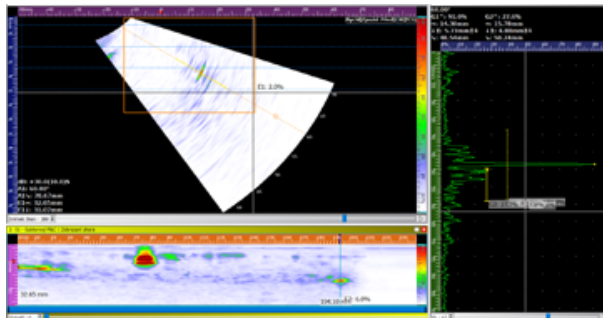
**Obr. 12:** Konfigurace zkoušení při použití apertury 16 a 32 elementů použité pro měření



Obr. 13: Výsledek měření pro aperturu 32 a 16 elementů

## Tandem

V případě tandemu jsou výsledky lepší, ale záleží na tloušťce svaru, kde samozřejmě s rostoucí tloušťkou základního materiálu a tím i svarového kovu rostou útlumové ztráty. V některých případech je ještě možné detekovat indikaci, která je blíže k sondě, a tedy není v ose svaru nebo dále, ale detekce v tomto případě není zaručena.



Obr. 14: Detekce tandemovou technikou.

Indikace označená v C-zobrazení kurzorem odpovídá vývrtu průměru 1 mm z pohledu sondy „za svarem“. Indikace je detekována, ale pouze na relativně malé tloušťce (7,5 mm) a délka indikace neodpovídá reálné délce. Odstup signálu od šumu je v tomto případě pouze 10,4 dB.

## Použití DLA sond

DLA sondy jsou v tomto případě schopné dosáhnout mnohem lepší detekce, kde i indikace za osou svaru jsou detekovány.



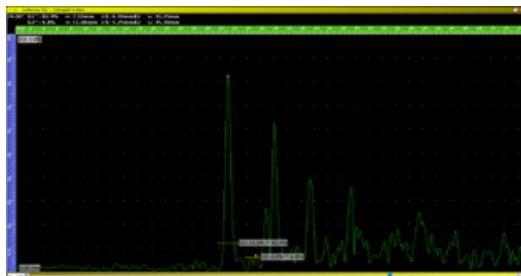
Obr. 15: Detekce indikací pomocí DLA sond

### Výpis naměřených hodnot:

Název	Zobrazení	Typ	Sken 1	Sken 2	$\Delta$ Sken
AN1	2: S1 - Sektorový P&C   Zobrazení shora	Box	-6.50 mm	28.46 mm	<b>34.97 mm</b>
AN2	2: S1 - Sektorový P&C   Zobrazení shora	Box	62.57 mm	79.49 mm	<b>16.92 mm</b>
AN3	2: S1 - Sektorový P&C   Zobrazení shora	Box	174.47 mm	213.05 mm	<b>38.58 mm</b>

Rozměr v případě drážky neodpovídá, nicméně detekce je v případě této indikace v podstatě 100%ní. Zářez z druhé strany svaru nebyl s jistotou detekován v podstatě v žádném testovaném případě, nicméně vždy byl detekován při zkoušce z druhé strany svaru.

Odstup signálu od šumu v případě indikace „za svarem“ je vyhovující a to 21,7dB. I v tomto případě se jedná o tloušťku l svaru 7,5 mm.

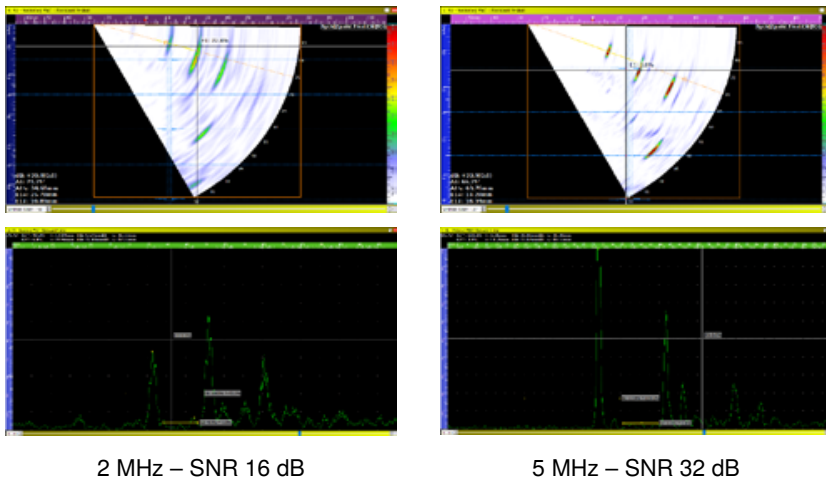


Obr. 16: SNR pro DLA sondy na  $t = 7,5$  mm

### Vliv frekvence při použití DLA sond

Jak už bylo uvedeno výše, nižší frekvence nemusí vždy znamenat lepší výsledek s ohledem na odstup signálu od šumu. Pro měření byly použity sondy s 20ti měniči, ale s roztečí 1,2 mm a tak aktivní apertura je v podstatě stejná jako u 32 měničů a roztečí

0,8 mm. Výsledek dokumentuje následující obrázek, kde je stejná indikace zobrazená pomocí 5 MHz a 2,25 MHz sondy.

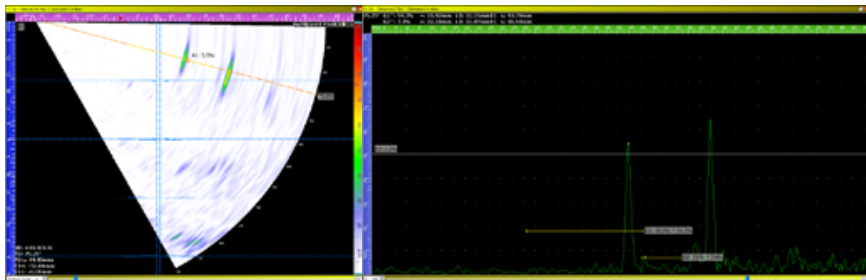


*Obr. 17: Rozdíl v SNR pro 2,25 MHz a 5 MHz pro DLA sondy*

Nevýhodou použití 2 MHz sond je také zhoršení rozlišení v S-skenu a i v C-skenu způsobené větší délkou vlny, což zhoršuje možnost vyhodnocení. Navíc vzhledem ke kratšímu blízkému poli není možné efektivně fokusovat do požadované oblasti a tím dochází vlivem rozevření svazku ke zhoršení schopnosti detekce. Jako vhodnější se tedy jeví sondy s frekvencí 5 MHz, které i navzdory teoreticky horší prozvučitelnosti z důvodu vyšší frekvence vykazují v měření lepší výsledky.

### **Vliv elektronického šumu**

V některých případech může být rozhodující i vliv elektroniky. Horší odstup signálu od šumu nemusí být vůbec kritický pro nízkoútlumové materiály, ale pro materiály s vysokým šumem může být v detekci zásadní. Vlastní elektronický šum systému může zhoršovat celkový výsledek a odstup signálu od šumu pak může překročit kritické hodnoty. Dva různé systémy vybavené podobnými sondami nemusí mít stejné výsledky z hlediska odstupu signálu od šumu. Příkladem je následující zobrazení, kde odstup signálu od šumu dosahuje 17,3 dB. Obdobný systém na stejné indikaci dosáhl 3,9 dB. Vzhledem k tomu, že SNR zhoršoval i tvarové echo z předsádky (které samozřejmě zhoršovalo odečet indikace), bylo použito další „šumové“ echo a v tomto případě dosáhl odstup signálu od šumu hodnoty 9,5 dB, tedy téměř poloviční hodnoty.



**Obr. 18:** SNR na Tloušťce 17,5 mm pro DLA sondy

### **Závěr:**

Použití DLA sond je efektivním nástrojem ke zkoušení austenitických svarů. Řešení kontroly vysoceútlumových materiálů, jako jsou austenitické svary, za pomoci DLA sond prokázalo dobré výsledky z hlediska prozvučitelnosti, rozlišení zobrazení a odstupu signálu od šumu. Vzhledem k Phased array prezentaci dat je možné mnohem efektivněji a snáze rozpoznat indikace reálných nespojitostí od tvarových indikací, ale i zde je na místě vytvoření měřky/modelu reálného svaru, protože i zde je možné se setkat s různými tvarovými indikacemi. Příkladem jsou výše uvedená zobrazení, kde jsou některé indikace zobrazeny několikrát. V tomto případě se jedná většinou o echa odrazů od krycí vrstvy, ale mohou vznikat i transformace na plíživé vlny, transformace vlny příčné na podélnou apod. Měrka je vždy vhodnou a někdy i nutno pomůckou pro správné vyhodnocení.

Další nespornou výhodou použití výše uvedeného řešení je to, že systém není jednoúčelový a jak sondy, tak kabel je možné využít i na jiné aplikace. Pouze předsádky jsou „jednoúčelové“.

### **Citovaná literatura**

- [1] ČSN EN ISO 22825 - Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Zkoušení svarů u austenitických ocelí a slitin niklu. (květen 2019).
- [2] F. Lachance, P. R. (2017). *High Frequency Inspection Solution for Austenitic Stainless-Steel Welds*. Québec, Canada: Sonatest.
- [3] Ginzel, E. (2013). *Phased array ultrasonic technology*. Ontario, Canada: Eclipse Scientific ProductsInc.
- [4] Obraz, J. (1989). *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: SNTL.

# **ABSTRAKTY ABSTRACT'S**







## VYUŽITÍ DIGITÁLNÍ RADIOGRAFIE V PRAXI PRO RŮZNÉ TYPY MATERIÁLŮ A POROVNÁNÍ S FILMOVOU RADIOGRAFIÍ.

### USE OF DIGITAL RADIOGRAPHY IN PRACTICE FOR DIFFERENT TYPES OF MATERIALS AND COMPARISON WITH FILM RADIOGRAPHY.

Šárka JEČMÍNKOVÁ

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [jecminkova@atg.cz](mailto:jecminkova@atg.cz)

#### **Abstrakt:**

*Používání digitální radiografie byl další, nutný krok po filmové radiografii. Digitální radiografie je technologie, která místo filmu využívá elektronické zobrazovací systémy. Jako jeden z hlavních důvodů proč vyvíjet k dokonalosti tuto technologii, je časová úspora. Odpadá zdlouhavé vyvolávání filmů v chemikáliích a je možné převádění snímků do digitální podoby. Dalším kladným bodem této technologie je, že dochází ke snížení radiační dávky během prozařování materiálu.*

*Využití digitální radiografie je možné ve spoustě oborech včetně strojírenství, kde se hojně využívá pro kontrolu jakosti materiálu nedestruktivním testováním.*

*Přednáška prezentuje použití digitální radiografie v praxi, kde bylo zkoušeno a testováno, jaká má tato technologie omezení, jak z hlediska testovaného druhu materiálu, tak i jeho tloušťky.*

*Výstupem těchto testů má být použití digitální radiografie v praxi u zákazníků, kteří by rádi touto technologií zkrátili dobu testování a tím urychlili proces odstávek a zmenšili riziko ozáření pracovníků.*

*Přednáška se dále zabývá snímáním různých druhů materiálů a porovnává kvality digitální a filmové radiografické jakosti snímků. Byly snímány ocelové trubky a kompozitní díly. Místo klasického filmu je použita technologie maticových detektorů.*

*Závěrem těchto testů, bylo stanovení velikosti radiačních dávek a určení polohy zářiče a maticového detektoru pro požadovanou radiografickou jakost digitálních snímků, které zabezpečí dosažení nejvyšší možnou kontrolu kvality za použití této technologie.*

**Klíčová slova:** digitální radiografie, filmová radiografie, jakost radiografických snímků, snímání kompozitních materiálů, maticové detektory

**Abstract:**

*The use of digital radiography was another, necessary step after film radiography. Digital radiography is a technology that uses electronic imaging systems instead of film. One of the main reasons to develop this technology to perfection is time saving. There is no time-consuming development of films in chemicals and it is possible to convert images into a digital form. Another positive point of this technology is that the radiation dose is reduced during the radiation of the material.*

*The use of digital radiography is possible in many fields, including engineering, where it is widely used for material quality control by non-destructive testing.*

*The lecture presents the use of digital radiography in practice, where , limitations of this technology in terms of both the type of material tested and its thickness were tested*

*The outcome of these tests is application of digital radiography in practice for customers who would like to shorten the testing time, thereby speeding up the shutdown or maintenance process and reducing the risk of worker exposure.*

*The lecture also deals with the scanning of various types of materials and compares the quality of digital and film radiographic quality of images. Steel tubes and composite parts were scanned. Matrix detector technology is used instead of classical film.*

*The conclusion of these tests was to determine the size of radiation doses and to determine the position of the emitter and matrix detector for the required radiographic quality of digital images, which will ensure the highest possible quality control using this technology.*

**Keywords:** *digital radiography, film radiography, quality of radiographic images, composite material scanning, matrix detectors*



## **DETEKCE DEFEKTŮ POMOCÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ A AUTOMATICKÉ VYHODNOCENÍ S VYUŽITÍM METOD UMĚLÉ INTELIGENCE.**

### **DEFECT DETECTION BY MACHINE VISION AND AUTOMATIC EVALUATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS.**

**Veronika KADLECOVÁ, Radek SALAČ**

ATG s.r.o.

#### **Abstrakt:**

*S nastupujícím trendem digitalizace a automatizace mnoha částí výrobních procesů roste také poptávka po automatickém vyhodnocování kvality výrobků. K tomuto účelu jsou s výhodou využívány metody strojového vidění neboli zpracování obrazových informací s využitím výpočetní techniky.*

*V oblasti nedestruktivního testování je možné principu strojového vidění využít všude tam, kde je defekt vidět přímo, nebo poskytuje nepřímou vizuální indikaci. Kamerové systémy zprostředkovávající záznam obrazových informací pro následné zpracování jsou v tomto případě začleněny přímo do výrobní linky. Zaznamenaná data mohou být následně v reálném čase, během několika sekund, vyhodnocena pomocí metod umělé inteligence, které jsou pro detekci vad většině případů nejefektivnějším řešením. Celý proces urychluje proces vizuální kontroly výrobků, zvyšuje opakovatelnost, stabilitu a spolehlivost vyhodnocení, snižuje provozní náklady a ve výsledku tak zvyšuje efektivitu celého procesu.*

*Přednáška si klade za cíle seznámit posluchače se základními principy detekce defektů pomocí strojového vidění a automatického vyhodnocování s využitím umělé inteligence, dále s výhodami a nevýhodami takového systému a předestře také příklady aplikací v reálné praxi.*

**Klíčová slova:** NDT, metody umělé inteligence, kamerové systémy, automatické vyhodnocení

**Abstract:**

*With the emerging trend of digitization and automation of many parts of production processes, the demand for automatic product quality evaluation is also increasing. For this purpose are preferably used methods of machine vision which means processing of image information using computer technology.*

*In the area of non-destructive testing, the machine vision principle can be used wherever the defect can be seen directly or wherever it provides an indirect visual indication. In this case, camera systems mediating recording visual information for post-processing are integrated directly into the production line. The recorded data can then be evaluated in real time, using artificial intelligence methods, which are in most cases the most effective solution for defect detection. The whole process speeds up the process of visual inspection, increases repeatability, stability and reliability of evaluation, reduces operating costs and so increases the efficiency of the whole process.*

*This presentation shows the basic principles of defect detection by machine vision and automatic evaluation using artificial intelligence, as well as the advantages and disadvantages of such a system and presents examples of applications in real practice.*

**Keywords:** *NDT, artificial intelligence methods, camera systems, automatic evaluation*



## **RAILWAY ENGINEERING: MAGNETIC PARTICLE TESTING ON WHEEL SET ASSEMBLIES**

**J. KLIPPSTEIN, R. PAWELLETTZ, N. RIESS**

Helling GmbH, Germany

### **Abstract**

*Magnetic particle testing (MPI) is one of the most commonly used inspection methods in non-destructive testing. MPI is being performed on ferromagnetic substrates.*

*During the inspection process the part is being magnetized. Any surface or subsurface discontinuity in the material leads to a magnetic flux leakage and thus to an accumulation of magnetic particles that are clearly visible when exposed to ultraviolet / visible light.*

*MPI is the preferred testing method when it comes to the detection of surface cracks on wheel sets in production and maintenance. In order to identify even the smallest flaws, magnetic particles with a size of 4 - 14  $\mu\text{m}$  are being used. These particles are coated with a fluorescent polymer, and - when excited under UV light – become visible for the human eye and thus very clearly indicating any defects.*

*Whereas magnetic particle testing on railway axles that have already been stripped of wheels, break discs etc. is relatively easy and can be performed with a fairly simple set up, it is much more time consuming and costly to test fully assembled wheel sets. A positive approach can be to (indirectly) magnetize railway axles with a 180° segment coil in a fully integrated system for semi-automatic magnetic particle inspection.*



## DETEKCE SLABÝCH SIGNÁLŮ AE SROVNATELNÝCH SE ŠUMOVÝM POZADÍM

### DETECTION OF WEAK AE SIGNALS COMPARABLE WITH BACKGROUND NOISE

Václav KOULA\*, Jan ŠIFNER\*, Martin DRÁB\*\*, Jiří SAMEK\*

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

\*\*FJFI, ČVUT v Praze

Contact e-mail: koula@dakel.cz

#### **Abstrakt**

*Prahová detekce je standardní metodou využívanou při vyhodnocování měření AE. Ukazuje se ale, že pokud se zaměříme na anomálie šumu měřeného signálu, může nám to přinést důležité informace k pochopení procesů probíhajících v materiálu. Jde zejména o měření při indentačních testech a creepových zkouškách. Při těchto experimentech jsme kompletně vzorkovali signál frekvencí 15 MHz při zesílení cca. 100 dB. V šumu se ukrývá velké množství událostí, které jsou specifické pro jednotlivé fáze zkoušek.*

*Je pravdou, že ve srovnání s prahovou detekcí produkuje kontinuální záznam obrovské množství dat. Jejich zpracování je možné jen díky neustále rostoucím možnostem výpočetní techniky. Při zpracování jsou s výhodou využívány techniky strojového učení.*

**Klíčová slova:** akustická emise, AE, indentace, creep, šumová analýza

#### **Abstract**

*Threshold detection is a standard method for evaluating AE measurements. However, if we focus on the anomalies of the measured signal noise, it allows us to gain unknown information important to understand the processes that may be in the material. These are mainly measurements during indentation tests and creep. In these experiments we completely sampled the signal at 15 MHz at and total gain of approx. 100 dB. The noise hides a large number of events that are available for each test phase.*

*It is true that continuous recording produces huge amounts of data compared to threshold detection. Their processing is possible only thanks to the ever-increasing possibilities of computer technology. Machine learning techniques are preferably used in the processing.*

**Key words:** AE, indentation, creep, noise analysis



## **ČSN EN 12681-1:2018 - VÝZNAM A DŮLEŽITOST REVIZE EN 12681:2003, POZNÁMKY A KOMENTÁŘE K ČESKÉMU PŘEKLADU**

## **ČSN EN 12681-1:2018 - IMPORTANCE OF EN 12681:2003 REVISION, NOTES AND COMMENTS ON THE CZECH TRANSLATION**

**Pavel MAŘÁNEK; Václav JANDURA**

ATG s.r.o.

Contact e-mail: maranek@atg.cz

### **Abstrakt:**

*Standard EN 12681-1: 2017 Slévárenství – Radiografické zkoušení – Část 1: Filmové techniky – nahradil standard EN 12681: 2003 Slévárenství – Radiografické zkoušení. Byla to očekávaná změna. Cílem tohoto příspěvku je ukázat, proč je revize tak důležitá, jaké jsou významné změny v novém standardu, a také poukázat na úroveň a problémy českého překladu tohoto standardu.*

**Klíčová slova:** Slévárenství; standard; radiografické zkoušení; revize; změny; překlad

### **Abstract:**

*Standard EN 12681-1: 2017 Founding – Radiographic testing – Part 1: Film techniques replaced standard EN 12681: 2003 Founding – Radiographic examination. It was expected change. Aim of this text is to show why the revision is so important, what are significant changes in the new standard and as well point out level and problems of Czech translation of this standard.*

**Key words:** Founding; standard; radiographic testing; revision; changes; translation



## POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ PŘÍPUSTNOSTI ISO NOREM S RUSKÝMI STANDARDY

### COMPARISON OF ADMISSIBILITY CRITERIA OF ISO STANDARDS WITH RUSSIAN STANDARDS.

Josef NEUGEBAUER

ČNDT OS 10

Contact e-mail: os10@cndt.cz

#### **Abstrakt**

*Při práci se NDT pracovník setkává s různými požadavky (kritérii) pro hodnocení nalezených indikací.*

*Pro NDT v podmínkách české energetiky se operátor řídí požadavky, které jsou uvedeny v dokumentech NTD A.S.I. (Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů).*

*Tento článek si klade za cíl provést srovnání požadavků ISO norem s ruskými standardy. Ruské standardy rozdělují zkoušení na výrobní, montážní a provozní. Tyto standardy jsou používány při hodnocení výsledků zkoušení v energetických provozech ČR.*

*Tento článek se ovšem nezabývá podrobným výčtem odchylek a shod ve všech NDT metodách. Jde jen o obecné srovnání hodnotících požadavků v těchto dvou odlišných systémech. Článek zároveň přináší přehled aktuálně platných ruských standardů týkajících se energetických provozů.*

**Klíčová slova:** kritéria přípustnosti, ruské standardy, ISO normy, energetika, NTD A.S.I.

#### **Abstract**

*During NDT activities the NDT personnel encounters various requirements (criteria) for evaluating the indications found.*

*For NDT in the Czech energetics sector, the operator follows the requirements set out in NTD A.S.I. (Normatively technical documentation of the Association of Mechanical Engineers).*

*This article aims to compare the requirements of ISO standards with Russian standards. Russian standards divide testing into manufacturing, assembly and operational. These standards are used in the evaluation of test results in the Czech Republic power plants.*

*However, this article does not deal with a detailed list of deviations and matches in all NDT methods. It is only a general comparison of the assessment requirements in these two different systems. The article also provides an overview of the current Russian standards related to energy operations.*

**Key words:** acceptance criteria, the Russian standards, ISO standards, energetics, NTD A.S.I.





## PŘESNÁ LOKALIZACE ÚNIKŮ NA POTRUBÍ POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE

### PRECISE LOCATION OF LEAKAGES IN PIPELINES BY ACOUSTIC EMISSION

Zdeněk PŘEVOROVSKÝ, Josef KROFTA, Milan CHLADA, Jan KOBER

Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 1402/5, 182 00 Praha 8

[zp@it.cas.cz](mailto:zp@it.cas.cz)

#### **Abstrakt**

Spolehlivá lokalizace míst úniků plynného či kapalného média na potrubí pomocí akustické emise (AE) je důležitým podkladem pro hodnocení stavu konstrukce při aplikaci kritéria LBB (Leak Before Break – únik před porušením). Standardní metody lokalizace spojitých náhodných signálů AE, způsobených úniky (viz ISO18081:2016), nejsou v důsledku vlnové disperze, změn rychlosti šíření apod. nejen dostatečně spolehlivé, ale mnohdy ani realizovatelné. V takových případech je efektivním prostředkem zpracování signálu AE pomocí časové reverzace (TR). TR umožňuje prostoro-časovou fokusaci vln a tím i mnohem přesnější lokalizaci libovolných zdrojů AE než ostatní techniky. Po lokalizačních testech AE zdrojů na tlustých i tenkých deskách, diskutovaných např. v [1], jsme aplikovali TR techniky také na rozměrné parovodní potrubí (4140x245x37,5 mm), aby se prokázala užitečnost této techniky v reálných průmyslových podmínkách, zahrnujících i silný rušivý šum od proudící tekutiny. Úniky byly simulovány zdrojem náhodného šumu emitovaného piezoelektrickými měniči. Tyto zdroje signálu byly překryty intenzívními signály reprodukcí šumové pozadí při elektrárenském provozu (průtok potrubím). Směs obou šumů byla detekována AE snímači umístěnými na 0,4 m dlouhých zvukovodech přivařených k testovanému potrubí. Dostatečně dlouhé signály ze dvou snímačů byly nahrávány, časově převráceny a pak vysílány zpět na základě reciproké TR procedury. Simulované „zdroje“ úniku byly lokalizovány pomocí maxima vzájemných korelací. K přesnému určení polohy zdrojů je nutné skenovat povrch trubky v okolí předběžně hrubě zjištěné lokality. Ke skenování může být použit např. skenovací laserový interferometr nebo přesný numerický model konstrukce.

[1] Z. Převorovský, J. Krofta, J. Kober, M. Chlada: Lokalizace zdrojů spojitě akustické emise pomocí časové reverzace signálů. 47. Mezinárodní konference DEFEKTOSKOPIE / NDE for Safety, Chomutov, 7.-9. 11. 2017, pp. 343-355.

**Klíčová slova:** Akustická emise, lokalizace úniků na potrubí, časová reverzace signálu

## **Abstract**

*Reliable location of leakages in pipelines by AE is important problem in structural health monitoring (SHM) as a base of LBB (Leak Before Break) criteria. Due to wave dispersion in pipes, velocity or geometry changes, etc. are standard AE source location procedures not reliable, especially in a case of continuous random AE signals generated by leakages. Effective tool in such situation is Time Reversal (TR) signal processing [1], which results in space - time wave focusing and enables more precise source location (up to 1 mm) than other techniques. After AE source location tests on various plates, reported in [1], we applied TR technique on large steam pipeline (4140 x 245 x 37.5 mm) to prove its practical use under real industrial conditions including large medium streaming noise. Leakages were simulated with random noise signals emitted by piezoelectric transducers. AE signals were recorded during the real leaks on power plant. Those signals were overlapped with other more intensive signals reproducing real large background noise on power plant (water flow in the pipe). Noise mixture was detected by AE transducers mounted on 0.4 m long waveguides welded to the tested pipe. Long signals from two transducers were recorded time reversed and rebroadcast back using reciprocal TR method. Maximum of their cross-correlation denotes the leakage source position on structure surface. More detailed surface scanning around roughly pre-localized source was necessary to precise localization. Scanning can be realized e.g. by scanning laser interferometer or numerically in a perfect computer model of the structure.*

*[1] Z. Prevorovsky, J. Krofta, J. Kober, M. Chlada: Localization of continuous acoustic emission sources using time reversal procedure. 47<sup>th</sup> Internat. Conf. "DEFKOTOSKOPIE / NDE for Safety", Chomutov, 7-9 November 2017, pp. 343-355.*

**Keywords:** *Acoustic Emission, location of leakage on pipeline, signal time reversal*



## VÝVOJ MAGNETIZÉRU S DVOUKANÁLOVÝM GAUSSMETREM PRO ZKOUŠENÍ TVAROVĚ SLOŽITÝCH DÍLŮ

### DEVELOPMENT OF A MAGNETIZER WITH TWO-CHANNEL GAUSSMETER FOR TESTING OF COMPLEX SHAPED PARTS

Miroslav ROXER

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [roxer@atg.cz](mailto:roxer@atg.cz)

#### **Abstrakt:**

*Ačkoli je princip magnetické práškové metody (MT) známý desítky let, v posledních letech zaznamenává skok v oblasti navýšeného výkonu a možností regulace. Společně s rostoucí dostupností výkonové elektroniky a metod umělé inteligence je nasnadě jejich využití také v této části defektoskopie.*

*Přednáška prezentuje vývojový projekt spolufinancovaný Technologickou Agenturou České Republiky, jehož je společnost ATG hlavním příjemcem. Projekt je realizován ve spolupráci s Fakultou elektrotechnickou Českého vysokého učení technického v Praze. Jeho výstupem má být prototyp zařízení s více zdroji elektromagnetického pole, jejichž působení lze variabilně kombinovat. Další součástí je unikátní způsob vyhodnocení měření intenzity magnetického pole, který slouží jako zpětná vazba pro nastavení zkušební receptury. Nastavení stroje s více zdroji elektromagnetického pole je komplexní optimalizační úloha, která přesahuje možnosti operátora a složitost nastavení běžné kombinované magnetizace (například kombinace cirkulární a podélné magnetizace). Problém řeší evoluční optimalizační algoritmus. Přednáška naznačuje i řešení automatického vyhodnocení MT indikací pomocí metod umělé inteligence, které společnost ATG řeší nad rámec vývoje magnetizéru. Poptávka po automatickém vyhodnocení je nepřehlédnutelná.*

**Klíčová slova:** magnetická prášková metoda (MT), kombinovaná magnetizace, automatické vyhodnocení indikací

#### **Abstract:**

*Although the principle of magnetic particle testing (MT) is known for decades, in last years it registers a significant step in terms of higher power and possibilities of the current-control. Hand in hand with growth in availability of power electronics and methods of artificial intelligence it is worth to apply them in this branch of non-destructive testing.*

*The presentation shows a development project co-financed by Technology Agency of the Czech Republic, of which ATG is a principal acceptor. The project is realized in cooperation with Faculty of Electrical Engineering of Czech Technical University in Prague. Its output shall be a prototype of a magnetizer with number of electromagnetic field sources, which influence can be variably combined. Next part is a unique way of measurement of magnetic field intensity, which serves as a feedback for creating the test setup. Setting the machine with number of sources of electromagnetic field is a complex optimization task, which exceeds possibilities of a human operator and complexity of setting of a usual combined magnetization parameters (e.g. combination of circular and longitudinal magnetization). The problem is solved by evolutionary optimization algorithm. The presentation also chalks out the solution of automated evaluation of MT indications using the methods of artificial intelligence, which is ATG company solving additional to the magnetizer development. Call for the automated evaluation is strong.*

**Keywords:** magnetic particle testing (MT), MPI, combined magnetization, automatic evaluation of indications



## OVĚŘENÍ A LOKALIZACE DEFEKTŮ (TRHLIN) NA TRUBKÁCH KOTLE S POUŽITÍM METODY MAGNETICKÉ PAMĚTI MATERIÁLU

### VERIFICATION AND LOCALIZATION OF DEFECTS (CRACKS) AT BOILER WATERWALL TUBES USING MAGNETIC MEMORY METHOD

Václav SVOBODA<sup>1</sup>, Lubomír GAJDOŠ<sup>1</sup>, Jiří JANOVEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic

<sup>2</sup>Czech Technical University in Prague, Department of Material Engineering, Praha 2,  
Czech Republic  
[svoboda@preditest.cz](mailto:svoboda@preditest.cz)

#### **Abstrakt:**

*Príspevek popisuje aplikaci metody MPM na trubkách membránové stěny kotle. V první fázi bylo provedeno ověření inspekce MPM na vzorku trubek odebraných z kotle po jejich poškození během servisu. Souběžně s identickým vzorkem bez vady a vzorkem obsahující defekty (trhliny) byly porovnávány výsledky inspekce MPM.*

*Výsledky byly ověřeny ultrazvukovou kontrolou. Během druhé etapy byla použita metoda MPM na poškozené části membránové stěny, kde byla použita technologie laserového svařování. Touto technikou byly identifikovány zóny koncentrace napětí (SCZ) v oblastech trhliny přes základní stěnu trubky. Byl identifikován postup propagace trhlín a byl proveden teoretický výpočet napětí dle lomové mechaniky, čímž byla prokázána podmínka růstu trhlín.*

**Klíčová slova:** ultrazvuk membránové stěny

#### **Abstract:**

*Contribution consists of application of MMM method on waterwall tubes of boilers. Verification of MMM inspection was provided in first stage on specimen of tubes taken from boiler after their damage during service. Paralell to identical tube without defect and containing defect were compared results of MMM inspection.*

*Results were verified by ultrasonic inspection. During second etap MMM method was used on damaged parts of waterwall tube, where laser welding technology was applied. By this technique the stress concentration zones were identified in areas of through wall crack. The course of cracks was identified and theoretical stress strain calculation was done to prove crack growth condition.*

**Key words:** ultrasound, waterwall tube



# SKUTEČNÁ FYZIKÁLNÍ PŘÍČINA ZŘÍČENÍ LÁVKY PŘES ŘEKU VLTAVU V PRAZE - TROJI

## THE REAL PHYSICAL CAUSE OF THE FAILURE OF THE PEDESTRIAN BRIDGE OVER THE VLTAVA RIVER IN PRAGUE – TROJA

Václav SVOBODA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Preditest Ltd., Pod Višňovkou 1662/23, 14000 Praha 4, Czech Republic

[svoboda@preditest.cz](mailto:svoboda@preditest.cz)

### **Abstrakt:**

*Pěší lávka přes řeku Vltavu v Praze – Troji byla po schválení projektu postavena v roce 1985. Uvedený příspěvek se zabývá dílče historií provozu lávky v následujících letech a posléze rozborem příčin, které vedly k jejímu zhroucení počátkem prosince 2017, tj. po 32 letech. Na základě provedených diagnostických měření na zbytcích havarované konstrukce metodou Magnetické paměti materiálu a následnými materiálovými analýzami, byly zjištěny základní příčiny degradace aplikované předepjaté výztuže (předepsaná ocelová lana umístěná v betonovém loži), které vedly ke ztrátě pevnostní únosnosti v daném časovém období 32 let.*

**Klíčová slova:** NDT testování, Rozvoj defektů, MMM metoda

### **Abstract:**

*Pedestrian bridge planned over the river Moldau in Prague – Troja, was built in 1985. This contribution deals with history of the bridge for pedestrians in the 32 years of service until the failure in December 2017. The reasons of failure were investigated by NDT methods on the remaining parts of the pedestrian bridge. For this inspection, Metal Magnetic Memory Method and material analysis were used. On the base of those methods, degradation of pre-stressed ropes was investigated. By the metallography analysis were determined the reasons, which caused final total failure of the pedestrian bridge.*

**Key words:** NDT testing, MMM method



## **RILUMINATI – A NEW METHOD FOR EARLY DETECTION OF FATIGUE CRACKS**

**Yuriy YAREMENKO**

MR Chemie GmbH

yaremenko@mr-chemie.de

### **Abstract**

*RILUMINATI – new method patented by BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - Federal Institute for Materials Research and Testing) for early detection of fatigue cracks under continuous monitoring during operation or laboratory tests of dynamically loaded spacial welded structures or parts made of carbon steels. The method is based on 2 layers application: fluorescent indicator and protecting one. Both of them rip at the beginning stage of fatigue crack formation. Thanks to bottom layer fluorescence, incipient crack opening behavior can be localized and instantly visualize under UV exposure.*

*We hope that coatings media further improvement will allow us in future to extend its application to various testing materials, weather-exposed structures and will facilitate norms development for this innovative method.*

**Key words:** *fatigue cracks, method*



## ASME ANDE-1:2020 – NOVINKY SOUVISEJÍCÍ S VYDÁNÍM VERZE 2020 A VÝHLED ZAHÁJENÍ KVALIFIKACE V ČESKÉ REPUBLICCE

### ASME ANDE-1:2020 – NEWS RELATED TO NEW VERSION 2020 AND PROSPECT OF QUALIFICATION IN THE CZECH REPUBLIC

Tomáš ZAVADIL

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [zavadilt@atg.cz](mailto:zavadilt@atg.cz)

#### **Abstrakt**

*ASME ANDE-1 je nový nezávislý kvalifikační předpis z produkce ASME, který si klade za cíl zajistit způsobilost NDT personálu k výkonu své činnosti pro tlaková zařízení v jaderném i nejaderném průmyslu na základě prokazování praxe přímým prokázáním všech relevantních dovedností. ATG je prvním členem komise ASME pro tvorbu tohoto standardu, který není registrován jako právnická osoba v USA a aktivně se podílí přímo na tvorbě tohoto standardu. ASME ANDE-1 během let 2015 až 2019 prošlo značným posunem. S verzí 2020 bude ASME ANDE-1 podporovat kvalifikaci všech 6 základních metod NDT (MT, PT, RT, UT, VT) pro jaderný průmysl a výrobu tlakových zařízení a tím umožní aktivní zařazení standardu do výběru kvalifikačních předpisů, podle kterých může být NDT personál zaměstnavatele kvalifikován. Tento příspěvek nabízí souhrn poznatků o tomto kvalifikačním systému, novinky pro verzi 2020 i výhled pro kvalifikaci na území ČR.*

**Klíčová slova:** ASME, ANDE-1, kvalifikace personálu, nezávislá kvalifikace

#### **Abstract**

*ASME ANDE-1 is a new qualification standard from ASME, that aims to enhance the proficiency of NDT personnel for pressure equipment in both nuclear and conventional BPV industry via performance-based experience demonstration of all relevant skills. ATG representative is the first member of the ASEM committee not being a representative of US organization directly involved to the creation of this document. ASME ANDE-1 went through significant development during years 2015 to 2019. With version 2020 the ASME ANDE-1 should be ready to support basic 5 methods (MT, PT, RT, UT, VT) for nuclear and BPV industry and y that allows active integration of the standard to the portfolio of qualification standards by which the NDT personnel of the Employer may be qualified. This contribution is providing a summary of this qualification system, news for year 2020 and expectations for qualification in the Czech Republic.*

**Key words:** ASME, ANDE-1, personnel qualification, independent qualification





**OVĚŘENÍ ZPŮSOBILOSTI SUBDODAVATELŮ NDT  
PRO VELKÉ FIRMY POMOCÍ MEZILABORATORNÍHO  
ZKOUŠENÍ ZPŮSOBILOSTI**

**PROFICIENCY ASESMENT OF NDT SUPPLIERS FOR  
CORPORATIONS VIA INTERLABORATORY PROFICIENCY  
TESTING**

**Tomáš ZAVADIL, Zbyněk ZAVADIL**

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [zavadilt@atg.cz](mailto:zavadilt@atg.cz)

**Abstrakt**

*Na rozdíl od malých společností velké společnosti a korporace outsourcují dodávky podsestav či celých procesů a mezi ně často spadá i proces NDT. Neboť proces NDT má za cíl zajistit odpovídající kvalitu výrobku, musí tyto organizace zajistit, že subdodavatelé procesu NDT jsou plně způsobilí k jejímu výkonu. Zkoušení způsobilosti NDT laboratoří podle normy ISO 17043 si za 8 let existence normy získalo renomé nezávislého ověření způsobilosti dodavatele. Ve standardním módu však pro velké korporace nemusí zajišťovat dostatečnou míru ověření. Neakreditovaný přístup vycházející z normy ISO 17043 umožňuje korporacím řešení na míru, kde mohou nastavit svoje vlastní pravidla, jak zkoušení způsobilosti realizovat - a to vše pod záštitou akreditovaného poskytovatele zkoušení způsobilosti, který tento systém zorganizuje dle požadavků.*

**Klíčová slova:** zkoušení způsobilosti, ISO 17043, způsobilost subdodavatelů, MDT laboratoř

**Abstract**

*Large companies and corporations are frequently outsourcing the whole processes often including the NDE special process. Because the NDE process focuses on ensuring adequate quality of the product, therefore the organizations needs to ensure that the NDE process suppliers are fully proficient. Proficiency testing of NDE labs acc. to ISO 17043 received reputation of independent assessment of proficiency. Yet the standard approach may not provide sufficient verification for the corporations that need to make sure that the laboratory can handle the service correctly acc. to their specific requirements. Specific approach may be then established for the corporations to set their own rules how the proficiency testing should be assessed to satisfy their requirements.*

**Key words:** proficiency testing, ISO 17043, proficiency of subcontractors, NDE laboratory



# URČENÍ TEPELNĚ INDUKOVANÝCH ZMĚN STRUKTURY MATERIÁLU POMOCÍ SOND PHASED ARRAY ASSESSMENT OF HEAT-INDUCED MICROSTRUCTURE CHANGES BY PHASED ARRAY PROBES

Tomáš ZAVADIL, Petr ŽBÁNEK

ATG s.r.o.

Contact e-mail: [zavadilt@atg.cz](mailto:zavadilt@atg.cz)

## **Abstrakt**

*Průmyslová zařízení jako jsou tlakové nádoby a potrubí jsou vystavovány vysokým provozním teplotám a tlakům. Tepelně indukované změny mikrostruktury jako přehřátí či tečení vedou k degradaci materiálových vlastností použité oceli, které mohou mít fatální následky. Je proto žádoucí nalézt nedestruktivní techniku umožňující včasnou detekci míst se změněnou mikrostrukturou. Ultrazvukové zkoušení dokáže reagovat na materiálové vlastnosti oceli a pomocí srovnávacího měření určit odchylky od dodaného stavu, naráží však na problém vysoké nejistoty měření a tím pádem i nízké citlivosti v počátečních stádiích degradačního procesu. Prezentovaná aplikace sond Phased Array umožňuje efektivní snížení nejistoty měření a dosažení vysoké citlivosti při zajištění jednoduché manipulace během inspekce při odstávkách, která je klíčovým parametrem aplikovatelnosti dané techniky do průmyslové praxe.*

**Klíčová slova:** ultrazvukové zkoušení, phased array, mikrostruktura, tečení

## **Abstract**

*Pressure vessels and pressure piping are often exposed to high temperatures and pressures. Thermally induced changes of microstructure due to creep cause degradation of material properties of steel, that may have fatal consequences. It is therefore desirable to find a non-destructive technique that allows timely detection of areas with changed microstructure. Ultrasonic testing is able to react on changes of material properties of steel and detect deviations from as-delivered condition, but it faces high measurement uncertainty and due to that low sensitivity in early stages of the degradation process. Presented application of phased array probes allows effective drop of measurement uncertainty and significant improvement of sensitivity. This goes along with easy manipulation for on-site inspections during shut-downs, that is a key parameter for applicability of the technique in industrial practice.*

**Key words:** ultrasonic testing, phased array, microstructure, creep



Název	<b>Defektoskopie 2019 / NDE for Safety 2019</b>
	Sborník 49. mezinárodní konference
Editor	Pavel MAZAL, Luboš PAZDERA
Vydal	Vysoké učení technické v Brně ve spolupráci s Českou společností pro NDT, z.s.
Tisk	Betis s.r.o. Praha Areál VÚ, Podnikatelská, 190 11 Praha Běchovice
Vyšlo	listopad 2019
Vydání	první
Náklad	200

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

**ISBN 978-80-214-5799-7**



FOUR NDT, CM AND SHM EVENTS  
IN ONE WEEK IN THE MIDDLE  
OF THE EUROPE

EUROPEAN  
**NDT&CM2021** PRAGUE, CZECH REPUBLIC  
OCTOBER 4-8, 2021

*BETTER CM & NDT – WARRANTY OF QUALITY, RELIABILITY AND SAFETY*

ORGANISER'S



**GUARANT**  
INTERNATIONAL

PARTNER'S

**EF** European Federation for  
Non-Destructive Testing  
**NDT**

**NDT***net*

[www.endtcm21.com](http://www.endtcm21.com)



**TECH** MAGAZÍN  
TECHNICKÁ VĚSTA, ÚNĚŠŤ A PRAHA

ISBN 978-80-214-5799-7