

---

**VÝVOJ NOVÉ GENERACE ZAŘÍZENÍ S POKROČILOU  
DIAGNOSTIKOU PRO STANOVENÍ KONTAKTNÍ  
DEGRADACE.**

Školitel: Doc. Ing. Pavel Mazal CSc.,

Ing. Jiří Dvořáček

---

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem hydraulického způsobu zatěžování zkušebních vzorků a axiálních ložisek s možností programovatelného nastavení síly a délky zatěžovacích cyklů při zkouškách kontaktní únavy. Jsou navrženy úpravy konstrukčních prvků (vlnovodů) pro snímání signálu akustické emise zvolenou aparaturou, včetně modifikací software pro snímání získaných dat. Na popsanych experimentech je ověřena funkčnost zařízení na kruhových zkušebních vzorcích a na axiálních ložiscích. Součástí práce je návrh nové metodiky identifikace počátečních stádií kontaktní únavy s využitím kombinace diagnostických metod.

Klíčová slova: kontaktní únava, akustická emise, Axmat, vibrace

## **ABSTRACT**

The thesis proposes a method of hydraulic loading of specimens and thrust bearings with programmable settings severity and duration of load cycles during contact fatigue tests. They are designed structural adjustment elements (waveguides) to capture the acoustic emission signal selected apparatus, including the modification of software to capture the data. At the described experiments is verified functionality of the circular test specimens and axial bearings . Part of this work is to propose a new methodology for identifying early stages of contact fatigue using a combination of diagnostic methods.

Keywords: contact fatigue, acoustic emission, Axmat, vibration



**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>6</b>
2.1	Základní princip akustické emise	6
2.2	Rozbor odborných článků	10
2.3	Aplikace metody akustické emise v laboratořích Ústavu konstruování	27
<b>3</b>	<b>ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>30</b>
4.1	Vymezení řešené problematiky	30
4.2	Cíl disertační práce	30
<b>5</b>	<b>METODY PŘÍSTUPU A NÁVRH ZPŮSOBU ŘEŠENÍ</b>	<b>31</b>
5.1	Experimentální zařízení.	31
5.2	Experimentální metody	35
5.3	Experimentální materiál	40
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>44</b>
6.1	Zkoušky spojkových ložisek	44
6.2	Zkoušky vlivu přísad do maziv	47
6.3.	Vliv dynamického zatěžování na signál AE	50
6.4	Porovnání signálu AE, vibrací a teploty ve vztahu k úrovni kontaktního poškození při zkouškách plochých vzorků	52
6.5	Návrh metodiky pro identifikaci poškození axiálních ložisek s využitím metody akustické emise	59
6.5.1	Příprava experimentu	59
6.5.2	Experimentální aparatura	60
6.5.3	Realizace zkoušky	61
6.5.4	Sběr dat a on-line analýza	62
6.5.5	Vyhodnocení naměřených parametrů	64
6.5.6	Analýza poškození	65
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>70</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>72</b>

## 1 ÚVOD

---

Defekty v zatěžovaných strukturách a materiálech mohou být detekovány řadou metod nedestruktivního testování - metody využívající rentgenové paprsky, napětěová měření, zviditelnění povrchových defektů pomocí barevných kontrastních látek, metody využívající vířivé proudy, ultrazvukové přenosy, odrazy apod. Také metoda akustické emise (AE) patří k technikám nedestruktivního testování. Na rozdíl od řady jiných nedestruktivních metod je akustická emise pasivní kontrolní metodou, která může prověřovat celou objemovou strukturu konstrukce. Nevýhodou této metody je skutečnost, že detekuje pouze aktivní poruchy. Pojem aktivní poruchy znamená změny struktury, které v průběhu šíření vysílají elastické vlny. Tedy diskontinuita (geometrická nespojitost), která nemění tvar, nemůže být touto metodou registrována. Aby vznikla akustická emise, musí být struktura zatěžována (např. mechanickou silou, teplem, změnou struktury, fázovou přeměnou atd.).

Pod pojmem akustická emise (AE) rozumíme fyzikální jev, při kterém dochází v důsledku dynamických procesů, stimulovaných vnějšími nebo vnitřními silami k uvolnění části materiálem akumulované energie. Uvolněná energie se transformuje na napětěový impuls, který se šíří materiálem a při dosažení povrchu se mění na takový mód vlnění, jenž odpovídá geometrické konfiguraci a rozměrům objektu. Složka vlnění kolmá k povrchu může být detekována snímačem AE.

K náhlému uvolnění energie uvnitř materiálu dochází z důvodu fázových transformací, dislokačních mechanismů v průběhu nukleace a rozvoje plastické deformace, vzniku a šíření trhlin, mikropraskání strukturních částic apod. Průchodem napětěové vlny materiálem se část uvolněné energie mění na teplo, část vyvolává na povrchu Rayleighovu vlnu a zbytek energie se vrací do materiálu prostřednictvím odražené vlny. Povrchová vlna je vhodným snímačem zachycována a přeměněna na elektrický signál. Tento signál je vyhodnocován a přiřazován ke skutečným fyzikálním zdrojům. Ke vzniku signálu dochází také z důvodu tření, koroze, úniků kapalných a plyných látek, při výrobních procesech apod. Metodou AE nazýváme metodu detekce akustické emise, následné elektronické zpracování detekovaného signálu AE a vyhodnocení parametrů detekovaného signálu. První systematické práce v této oblasti jsou datovány do 50-tých let 20tého století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera [1].

Problematikou aplikace metody akustické emise se v základním i aplikovaném výzkumu v současné době intenzivně zabývá celá řada špičkových pracovišť.

Předložená práce se zaměřuje na spolehlivé detekování prvotního poškození při kontaktní únavě metodou akustické emise, které není možné konvenčními metodami (např. sledováním vibrací). Zároveň je identifikován vhodný parametr AE, který dokáže defekt daného typu spolehlivě detekovat.

V práci je navržena metodika pro identifikaci poškození axiálních ložisek s využitím metody akustické emise.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Základní princip akustické emise

3.2

---

Termín akustická emise je používán pro popis jevů, při kterých vlivem náhlého uvolnění energie z lokálního zdroje uvnitř materiálu vznikají mimo jiné elastické vlny, které se šíří z místa vzniku sledovaným materiálem či strukturou. Základní příčinou akustické emise je tedy lokální náhlé uvolnění "akumulované" energie vlivem napěťových či tepelných polí v materiálu.

Akustickou emisí (AE) jsou nazývány elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem způsobujícím vznik elastických napěťových vln (např. klepnutím).

Defekt v materiálu může být v důsledku lokálního či globálního napětí zdrojem elastických vln. Snímač akustické emise detekuje elastické vlny přicházející z jednotlivých zdrojů poruch. Energie uvolněná vlivem dislokačního pohybu je obvykle příliš malá, aby mohla být detekována současnou technikou. Větší množství dislokací resp. jejich lavinové uvolnění vytvoří dostatečně velké množství energie, která může být detekována.

Akustická emise využívá detekci elastických vln generovaných při náhlých deformacích namáhaných materiálů a detekuje mikroskopická posunutí. Signály akustické emise jsou vytvářeny náhlou deformací místa materiálu pod mechanickým napětím. Emise signálu je spojena s koncentrací mechanického napětí.

Toto napětí může být pozorováno jako (vektorové) pole, které má výchylku a směr v libovolném bodě materiálu. Při namáhání materiálu napětím do určité meze vznikají v materiálu pouze vratné deformace. Když je napětí dostatečně velké (lokálně dosahuje plastického stavu struktury), vznikají ve struktuře nevratné deformace. Obě napětí vytvářejí akustickou emisí. Příčinou těchto napětí jsou např. vlivy mechanického zatížení, tlaku vyvolaného plynem či kapalinou, teplotního namáhání apod [2].

Vlivem zatěžování struktury vzniká lokální napětí. Po uvolnění naakumulované energie vznikne trhlinka, která je zdrojem šíření elastické vlny. Předpokládá se, že od místa vzniku trhliny se šíří kulová vlna, která při dosažení povrchu materiálu vytvoří povrchovou vlnu. Snímač (obvykle piezoelektrický) umístěný na povrchu vzorku zaznamená příchod vlnění. Akustická kulová vlna šířící se ze zdroje akustické emise je po cestě modifikována vlivem rozptylu, odrazů a útlumu až k povrchu. Další změna tvaru signálu probíhá vlivem přeměny mechanického vlnění na elektrickou energii uvnitř těla snímače. Vlastní zaznamenaný signál akustické emise je v poslední fázi upraven elektrickou cestou – zesílen, filtrován apod. Tedy signál od stejného zdroje akustické emise zaznamenaný rozličným způsobem a na rozličném místě může mít rozličný tvar.

V mikroskopickém popisu může být materiál uvažován jako soustava částic, které jsou vzájemně spojeny elastickým svazkem. Např. při úderu do jednoho konce tyče je vlivem pohybu a nárazů částic tento pohyb přenesen na druhý konec tyče. Uvedený pohyb je nazýván elastickou vlnou. Vlivem nárazů částic vzniká tlumení, tedy mění se amplituda vlny. Pohybuje-li se částice ve směru pohybu vlny je pohyb vlny longitudinální (podélný), je-li pohyb částice kolmý na směr vlnění je pohyb transversální (příčný).

Při šíření vlny prostředím se jeho částice rozkmitávají v různém směru vzhledem ke směru postupu vlny. Vlny akustické emise mohou být také tvořeny více než jedním typem vlnění [3]:

- *podélná* vlna (P), u které částice kmitají ve směru postupující vlny. Šířit se může v tuhém, kapalném i plynném prostředí. Zvláštním případem je podpovrchová vlna.

V následujících rovnicích značí

$c$  – rychlost šíření vlnění – index značí druh vlnění [m/s],

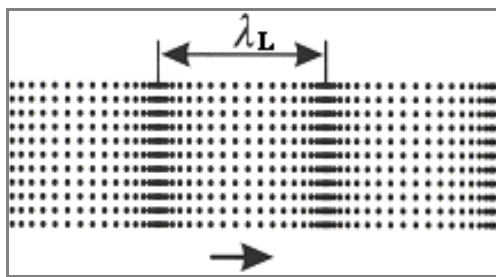
$E, G$  – modul pružnosti v tahu resp. smyku [Pa],

$\rho$  – hustota [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\nu$  – Poissonovo číslo [-].

Rychlost šíření podélného vlnění v pevném prostředí je

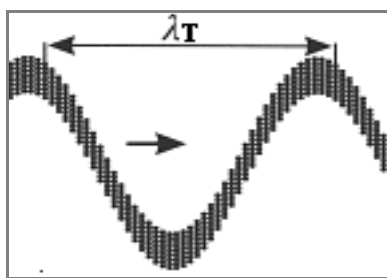
$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (1.1)$$



Obr. 1 Podélná vlna

- *příčná* vlna (T nebo S), u které částice kmitají kolmo ke směru postupující vlny. Šířit se může jen v tuhém prostředí. Rychlost šíření je dána rovnicí

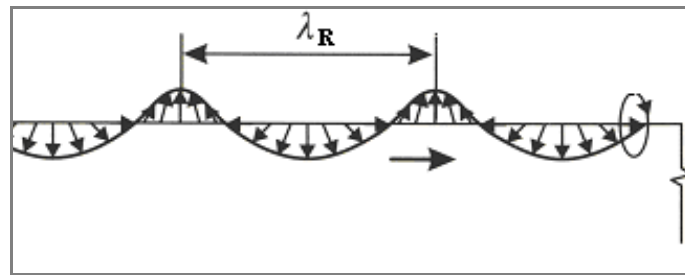
$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad (1.2)$$



Obr. 2 Příčná vlna

- *povrchová* vlna (R - Rayleigh) se vyskytuje pouze na povrchu vzorku. Jde o zvláštní druh příčné vlny, kdy příčná síla na částice je větší než podélná, čímž vzniká pohyb částic po eliptické dráze. Podélná složka povrchové vlny s hloubkou ubývá rychleji než složka příčná. V hloubce rovnající se délce příčné vlny povrchová vlna prakticky zaniká. Rychlost vlny je dána rovnicí

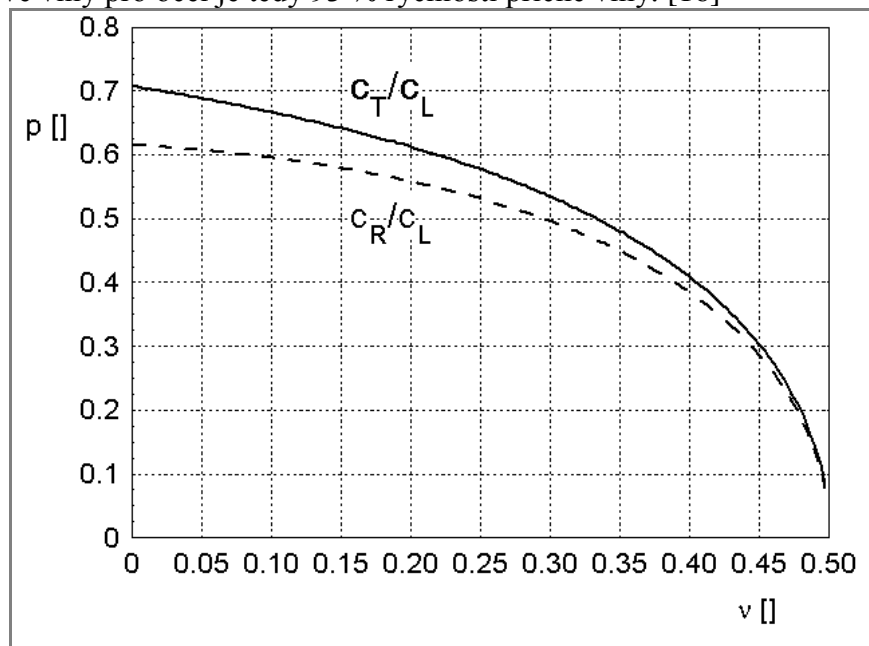
$$c_R \cong \frac{0,87 + 1,2 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.3)$$



Obr. 3 Povrchová vlna

- *desková vlna L* - (Lamb) se může nacházet v deskách, tedy materiálech jejichž tloušťka je oproti ostatním rozměrům zanedbatelná (částice se pohybuje elipticky, ale existuje v celém objemu vzorku). Rychlost vln je závislá na šířce desky a frekvenci vlnění. Zde rozlišujeme fázovou a skupinovou (grupovou) rychlost.
- *čárová vlna* je pozorována při nízkých frekvencích u materiálů prutového tvaru, tedy s průřezem zanedbatelným vzhledem k délce, jako jednoduchá longitudální vlna.

Z rovnic (1.1), (1.2), (1.3) a z obr. 4 je zřejmé, že rychlost šíření podélného vlnění je vyšší než rychlost příčné a ta je vyšší než rychlost šíření povrchového vlnění. Např. pro ocel ( $\nu$  je 0.28) je rychlost šíření podélné vlny 55 % rychlosti podélné vlny a rychlost šíření povrchové vlny 51 % rychlosti podélné vlny. Rychlost povrchové vlny pro ocel je tedy 93 % rychlosti příčné vlny. [16]

Obr. 4 Relativní rychlosti šíření  $p$  příčné vlny k podélné a povrchové k podélné v závislosti na Poissonově čísle  $\nu$ .

Vztah mezi modulem pružnosti v tahu  $E$  a modulem pružnosti ve smyku  $G$ , je dán přes Poissonovo číslo  $\nu$  vztahem

$$G = \frac{\nu \cdot E}{2 \cdot (\nu + 1)} \quad (1.4)$$

Rychlost příčné vlny pro obvyklé materiály (Poissonovo číslo 0,2) je přibližně polovina rychlosti podélné vlny. Rayleigh vlna se šíří rychlostí asi o 10 % pomalejší než je rychlost vlny příčné.

Uvedené vztahy a druhy vlnění dle rov. (1.1), (1.2) a (1.3) jsou jen základní. Praktické situace jsou mnohem komplikovanější. Uvedené vztahy platí pro homogenní materiály. Rychlost šíření vlnění může také závislá na jiných parametrech např. frekvenci a tvaru sledované struktury. Na frekvenci jsou závislé zejména deskové vlny. Rychlost šíření podélných, příčných a povrchových vln lze v oblasti ultrazvuku, tj. od 20 kHz do 50 MHz, považovat za nezávislé na frekvenci.

Vlny jsou obecně charakterizovány periodou a amplitudou. Často amplituda klesá až do hodnoty rovnovážné pozice. Vlny akustické emise jsou charakterizovány zejména rychlostí jejich šíření a vlnovou délkou. Každý typ akustické vlny se pohybuje různou rychlostí závislejší na materiálu. Samovolné vytváření akustické emise je výsledkem mnoha různých mechanismů probíhajících v materiálu a to jak napěťových tak i deformačních vlivů. Jedním z užitečných mechanismů, které metoda akustické emise používá, je vznik elastické vlny při pohybu špičky trhliny. Každá změna trhliny vytvoří elastickou vlnu.

Elastická vlna může dosáhnout mnoha změn při pohybu v materiálu. Oslabení, resp. pozvolné "zeslabování" vlnové energie, způsobuje změny vlny. Elastické vlny jsou zeslabovány vlivem jednak geometrického rozprostření a jednak útlumových vlastností prostředí. Ihned po vzniku vlny jsou její čela tvarována a začínají se rozprostírat od zdroje.

## 2.2 Rozbor odborných článků

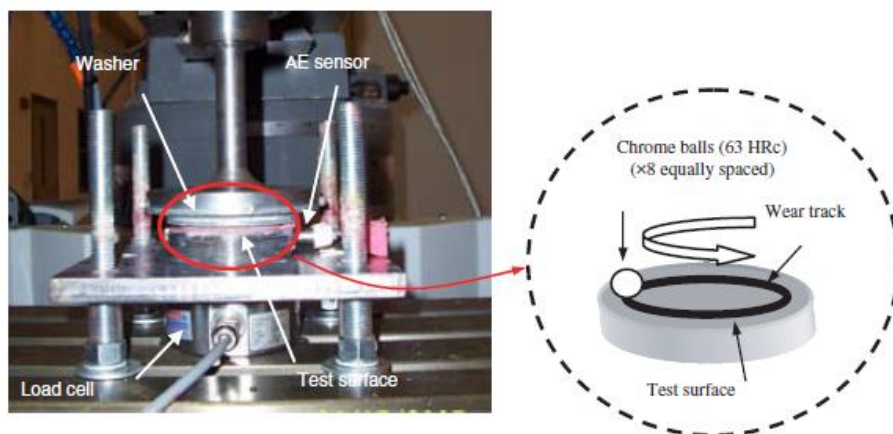
V této části práce je zpracován přehled nejvýznamnějších příspěvků z oblasti aplikace akustické emise na hodnocení stavu kontaktně zatěžovaných povrchů.

WARREN A.W.; GUO, Y.B Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces. In. *International Journal of Fatigue*, Volume 29, Issue 4, April 2007, p. 603 - 614. [4].

Článek se zabývá stanovením odolnosti součástí s broušeným povrchem proti kontaktní únavě. Konstatuje, že všechny vlivy broušených povrchů na kontaktní únavu, nejsou dosud zcela popsány, V této práci jsou popsány experimenty se vzorky z oceli AISI 52100, které byly kontaktně zatěžovány a mazány. Byl měřen signál AE, který je obecně velmi citlivý na únavové porušování.

### Experiment

Ke zkouškám je využito upravené frézky Bridgeport obr. 5, experiment může probíhat při frekvenci otáčení až do 4000/min, zatížení je realizováno přes podložku na 8 kuliček o průměru 5.56 mm vyrobených z chromové oceli. Kuličky jsou uloženy v nylonové kleci. Maximálně dosažitelný kontaktní tlak je 4.6 GPa. Kontakt je mazán plastickým mazivem na bázi lithiových mýdel.



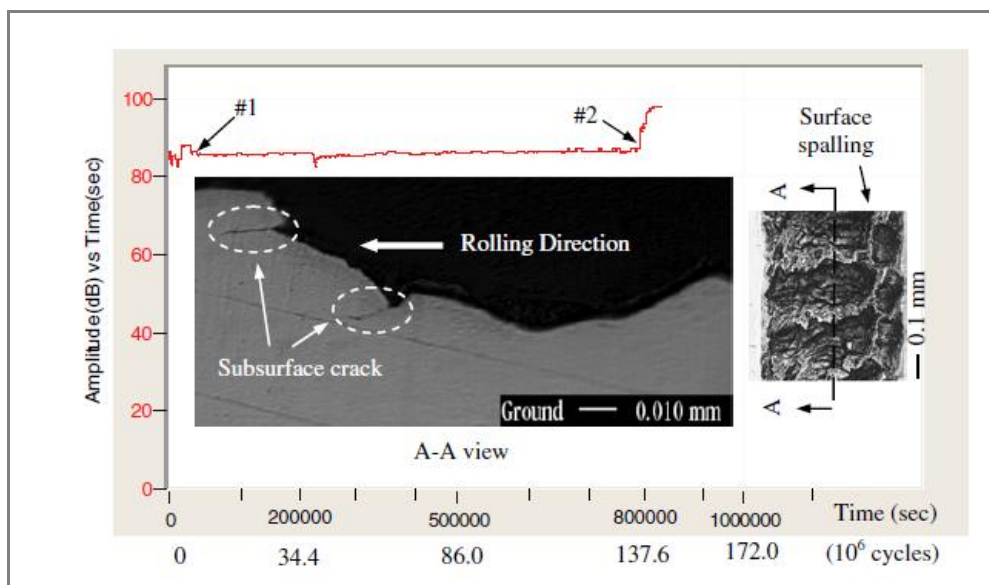
Obr. 5 Uspořádání experimentálního zařízení [4]

Během experimentu je sledována a vyhodnocována akustická emise. Sledované parametry signálu v závislosti na čase, resp. počtu cyklů jsou: counts, amplituda, RMS a energie signálu.

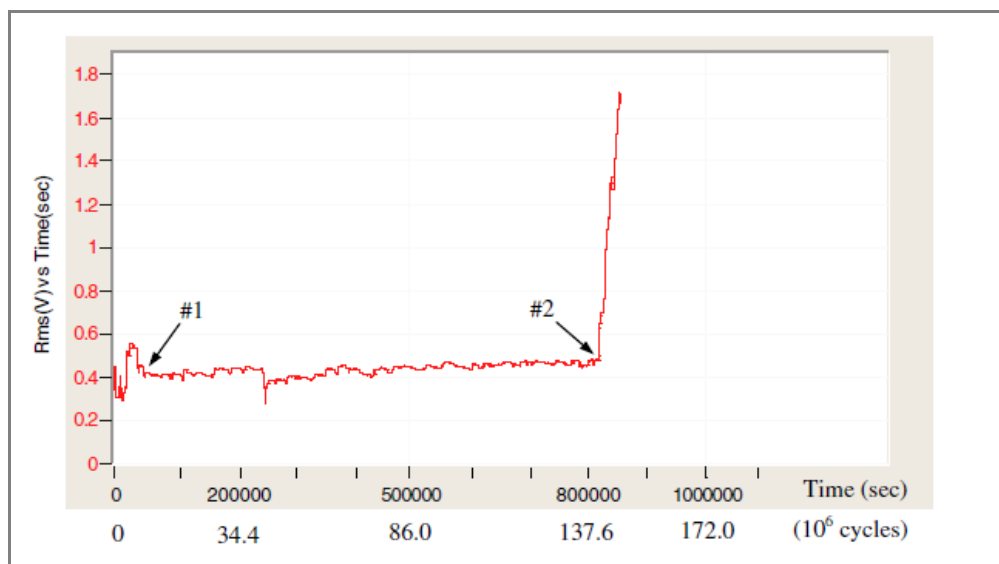
### Výsledky

Signály AE byly velmi citlivé na kontaktní únavu což je zřejmé z obr. 6 až 9. V článku jsou grafy závislosti parametrů signálu pro 3 vzorky. Jako příklad uvádím zjištěné výsledky na vzorku G3 (obr.6 až 9). Mezi body 1 a 2 je signál AE relativně stabilní. Referenční bod1 v každém grafu představuje konec fáze iniciace poškození

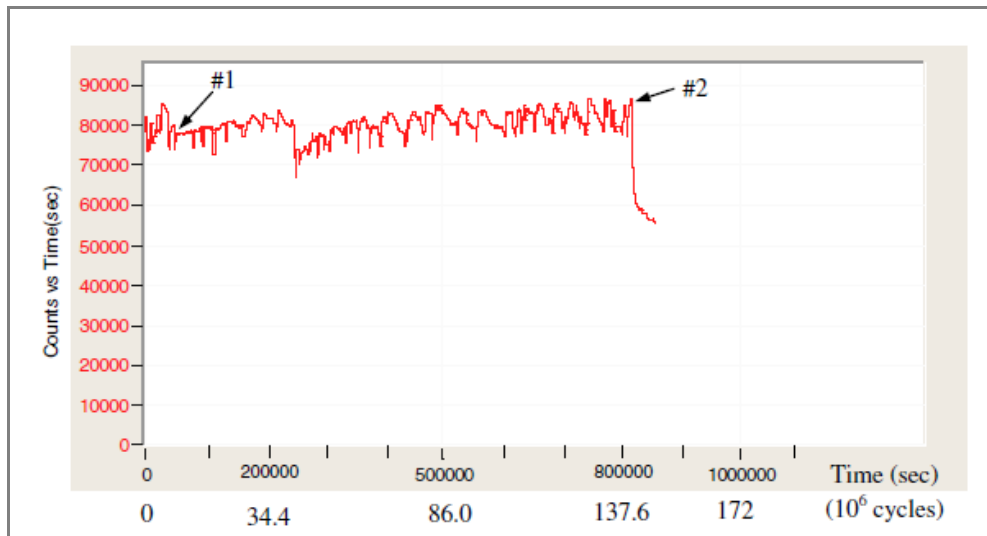
a tzv. stabilizaci signálu. Kolísání signálu před bodem 1 je způsobeno převládajícími elastickými deformacemi, při současném rozvoji plastických deformací. Bod 2 představuje čas, který charakterizuje tzv. katastrofickou událost, vzorek je poškozen a experiment je zastaven.



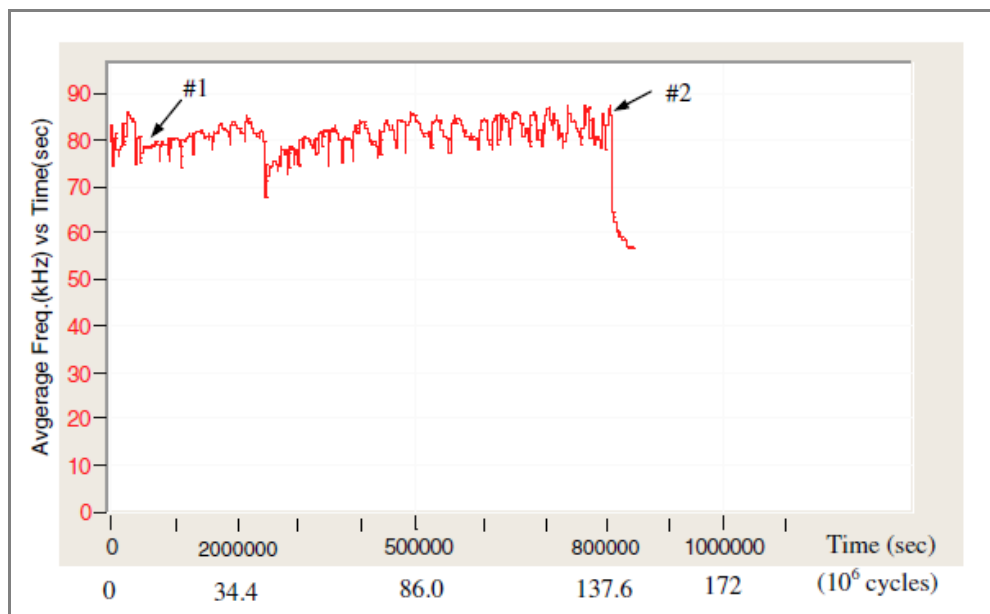
Obr.6 AE amplituda vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.7 AE RMS vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.8 AE counts vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.9 AE frekvence vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]

**Závěr.**

Parametry signálu AE – counts, RMS, absolutní energie jsou vhodné a citlivé pro sledování kontaktní únavy.

Velké rozpětí životnosti i v počtech cyklů je způsobeno konkrétními vlastnostmi broušeného povrchu. Shearing /usmýknutí/ je dominantní mechanismus vzniku trhliny. S poklesem aktivity signálu AE souvisí ukončení procesu vzniku trhlin.

GUO, Y.B.; DALE,.; SCHVACH, W. An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique, In: *International Journal of Fatigue*, 27 , 2005 , p. 1051 – 1061. [5]

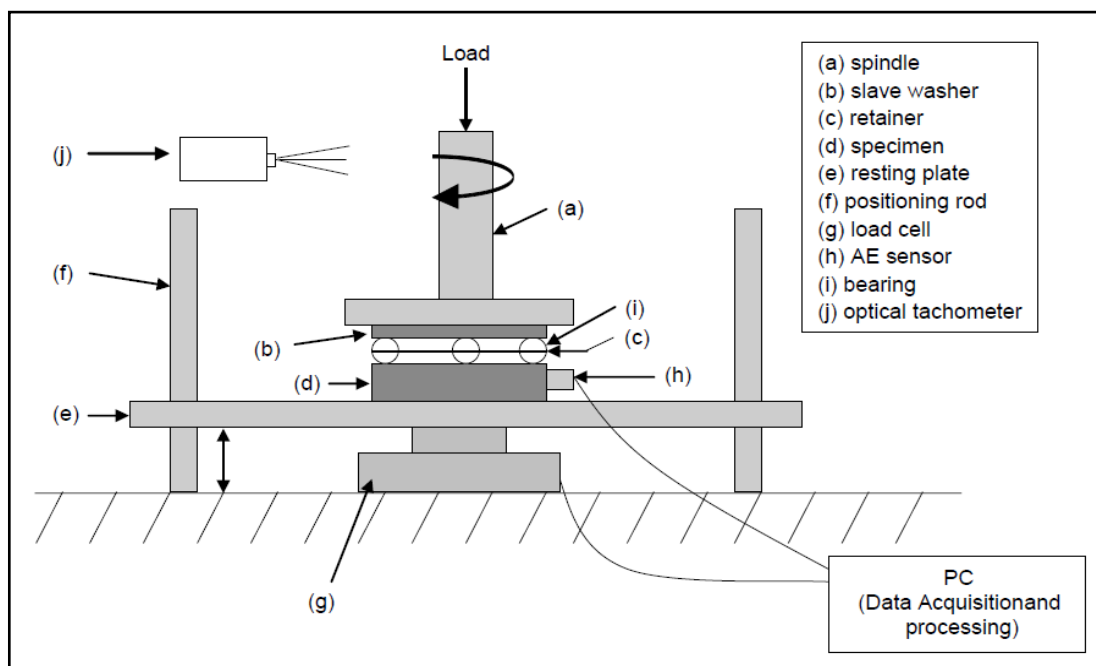
V článku autor popisuje význam vlastností povrchu (textura, mikrotvrdość, zbytková napětí, mikrostruktura) na odolnost proti kontaktní únavě. Speciálně se zaměřuje na vliv tzv. bílé vrstvy na únavový život. K zjišťování odolnosti povrchu je využito sledování signálu AE. Analyticky je stanoven Hertzův tlak a provedena analýza kinematiky metodou okamžitého středu otáčení. [6]

### Experiment

Zkušební zařízení simuluje axiální valivé ložisko viz obr. 10. Otáčky a počet cyklů byly sledovány pomocí optického bezkontaktního otáčkoměru. Parametry zkoušky:

#### RCF testing parameters

Operating parameters	Test specimen	Slave washer
Applied load	1334.4 N	
Peak Herzian pressure	3.68 GPa	3.25 Gpa
Spindle speed	2580 rpm	
Lubricant	Lithium grease complex	

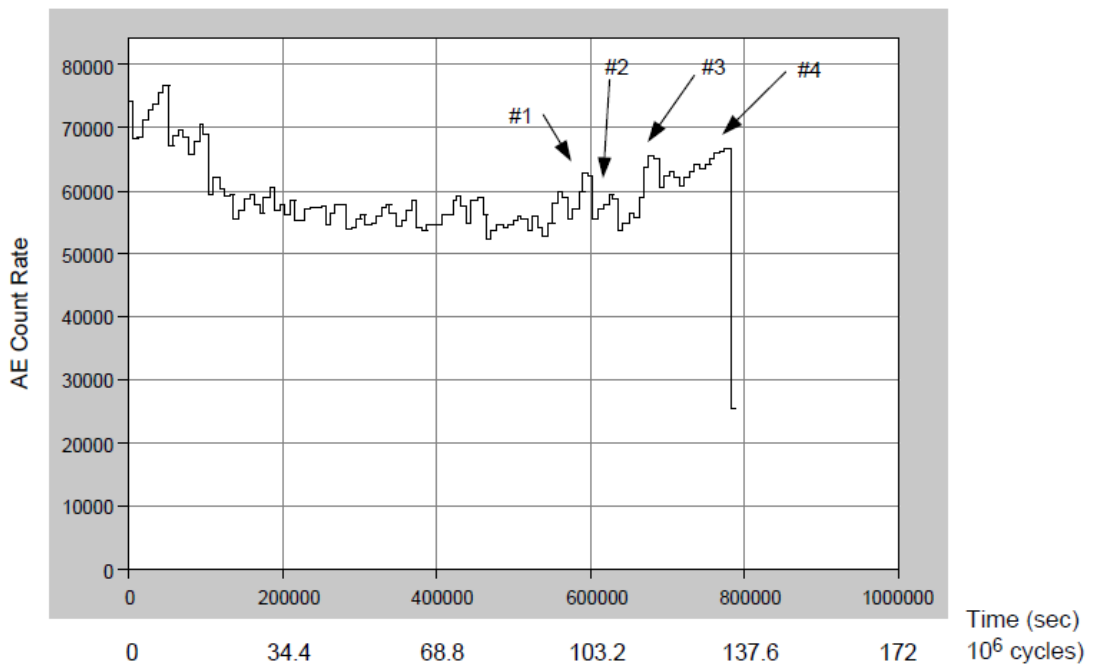
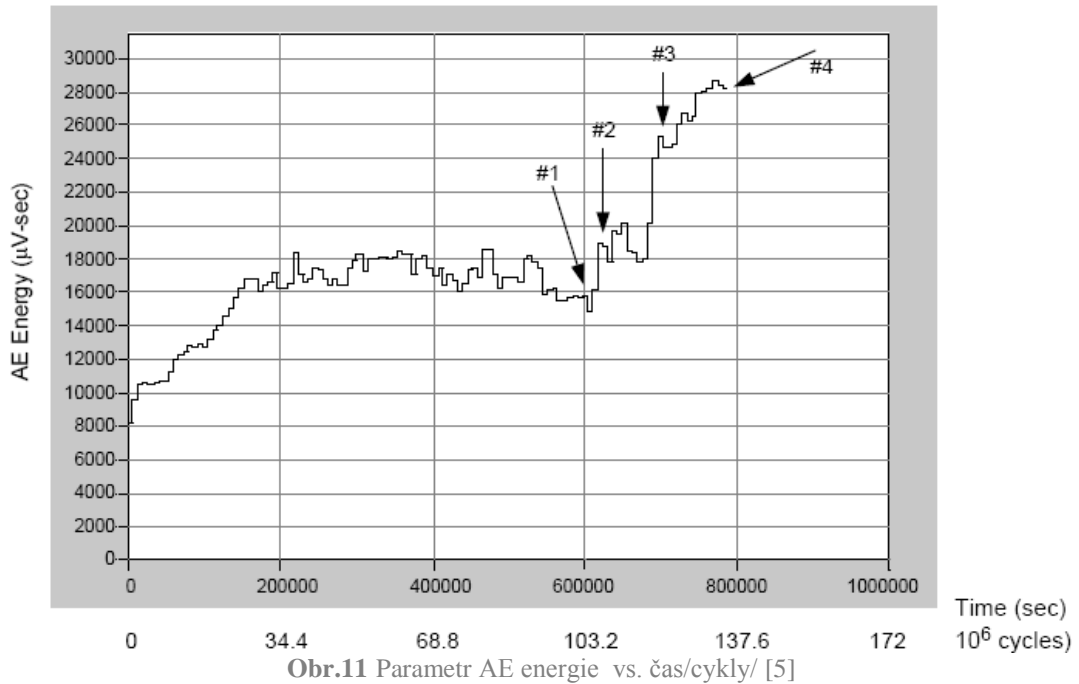


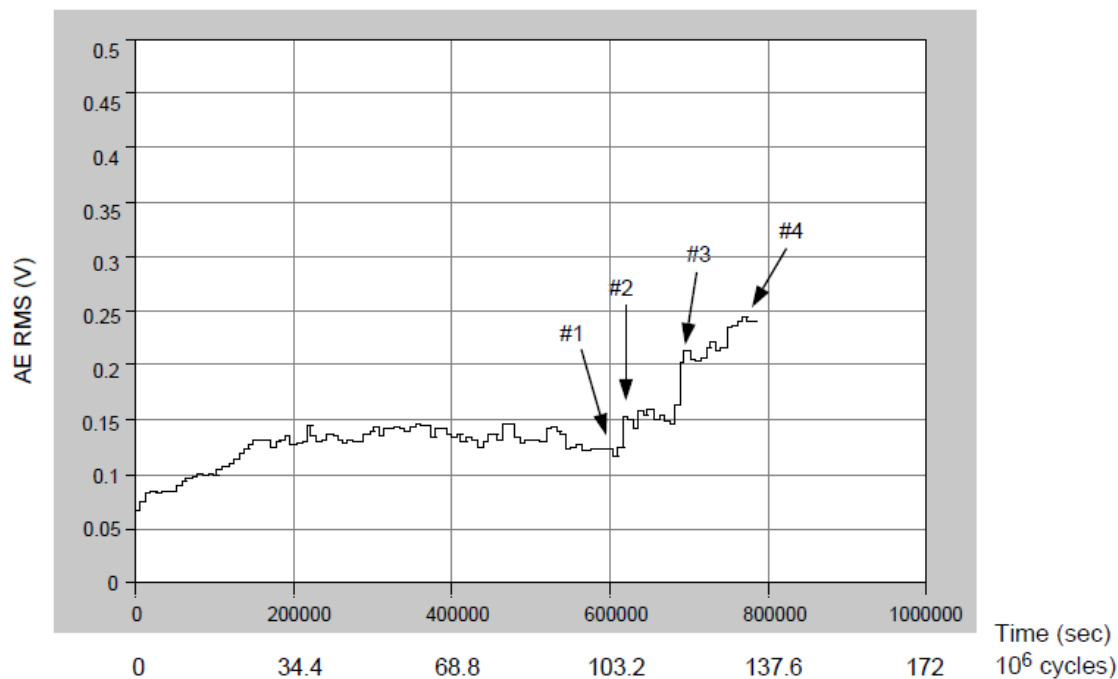
Obr.10 Schéma RCF testovací stanice se snímačem AE s parametry zkoušky [5]

### Výsledky:

V grafech uvedených na obr. 11 až 13 jsou uvedeny závislosti jednotlivých parametrů signálu AE na čase. V grafech jsou patrné významné úseky vyznačené body 1 až 4. V bodu 1 končí relativně klidový stav.

V úseku, který odpovídá bodu 2 a 3 dochází k šíření trhlin a vzniku pittingů. Oblast masivního rozvoje poškození (spaningu) je vymezena úsekem mezi body 3 a 4.





Obr.13 Parametr AE RMS vs. čas/cykly/ [5]

### Závěr

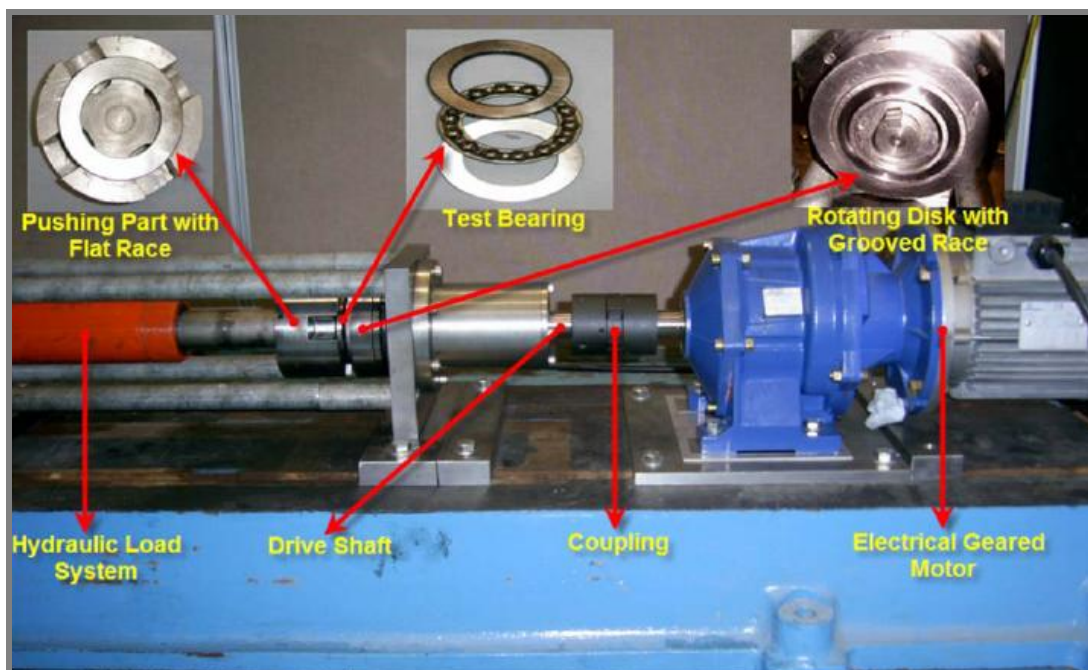
Testovací systém je poměrně jednoduchý, důležité je nastavení prahové hodnoty signálu /treshold/, které významně ovlivňuje citlivost sledování akustické odezvy. Parametry signálu AE – energie, RMS a amplituda jsou velmi citlivé pro sledování vzniku a rozvoje trhlin. Sledování počtu překmitů /counts/ není tak jednoznačné. Vliv bílé vrstvy je rozporuplný, někteří autoři posuzují její vliv pozitivně, jiní naopak jej považují za zanedbatelný. Zde bylo zjištěno, že vzorky bez bílé vrstvy vykazují vyšší odolnost proti kontaktní únavě.

ELFORJANI, M.; MBA, D. Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: *Journal of vibration and acoustics-transactions of the ASME*. Volume: 130, Issue: 4, p. 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002. [7]

V článku je popsáno využití akustické emise jako nástroje pro detekci vzniku a rozvoje kontaktního poškození na vzorcích ložiskových materiálů. Pro sledování zkušebního uzlu byly souběžně použity vibrační akcelerometry.

### Experiment

Experiment byl zaměřen na identifikaci vzniku a rozvoje mikrotrhlin v materiálu ložisek, zvláště pak v monitorování šíření podpovrchových trhlin, až do vzniku viditelných poškození na povrchu stykových ploch. Jedním z cílů měření bylo identifikovat poškození u pomaloběžných strojů, proto byla zvolena frekvence otáčení 72 ot/min. Testované ložisko včetně testovací stanice jsou zobrazeny na obr. 14.



Obr. 14 Testovací stanice s detaily jednotlivých částí. [7]

Zkoušeným prvkem je jednořadé axiální kuličkové ložisko s označením SKF 51210, jehož jeden vnější kroužek byl nahrazen plochým kroužkem axiálního válečkového ložiska SKF 81210 stejných rozměrů.

Pro snímání byly použity čtyři snímače akustické emise (PICO) s operačním rozsahem 200-750 kHz a dva termočlánky. Analyzátor AE zaznamenával události vzorkovacích frekvencí 2 MHz a ostatní parametry (counts, rms, průměrná hladina signálu, maximální amplituda a absolutní energie) Měření doplňoval jeden akcelerometr umístěný na speciálním pouzdru pro měření vibračního zrychlení v axiálním směru.

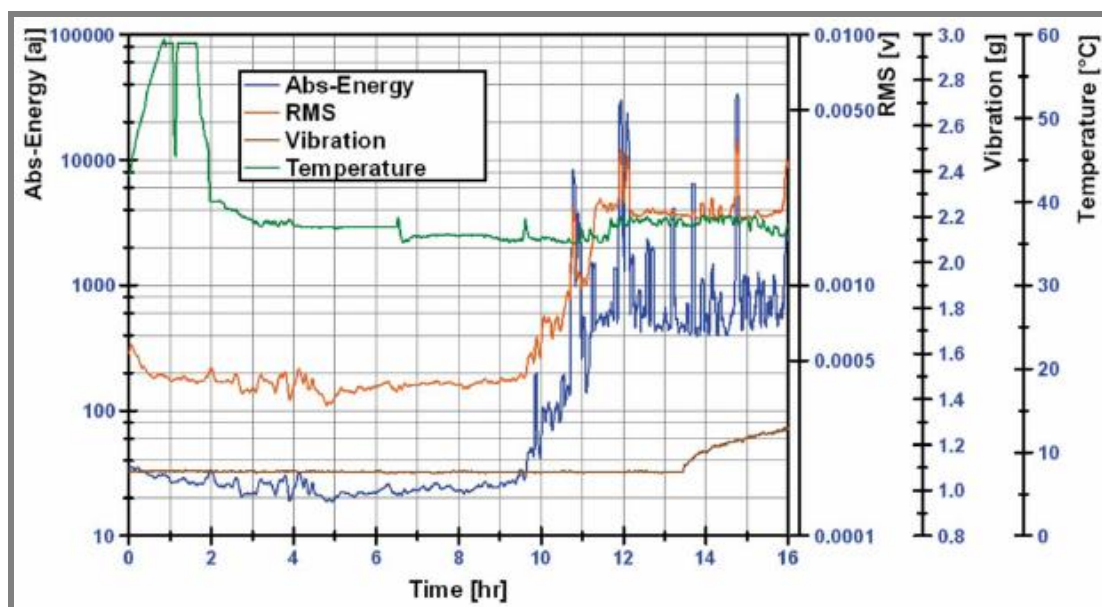
## Výsledky

Jedním z výstupů v tomto článku byla snaha o lokalizaci místa vzniku poškození dráhy plochého kroužku. Proto byly na zadní stranu testovaného kroužku symetricky nalepeny čtyři snímače AE a pomocí Hsu-Nielsenova zdroje se testovalo relativní zeslabení signálu [dB] v závislosti na vzdálenosti zdroje AE od jednotlivých snímačů.

Kromě tradičních parametrů AE byla zaznamenávána i hodnota míry kontinuálního kolísání a průměrná hodnota amplitudy AE označená jako ASL [dB] vypočtená z RMS [mV/100]. Průběh celé zkoušky je zobrazen v grafu na obr. 15. Zkouška probíhala 16 hodin, při kterých už bylo viditelné poškození dráhy. Z průběhu grafu je patrný pozvolný nárůst RMS a absolutní energie asi od deváté hodiny zkoušky, zatímco vibrace poukázaly na zhoršení povrchu až ve 13,5h. Zajímavý průběh ukázalo měření teploty, jejíž hodnoty byly enormně vysoké v záběhovém stavu první dvě hodiny zkoušky. Vysoké špičky AE aktivity od 10. h do 16. h jsou přisuzovány procesu vzniku a šíření nových výrazných poškození na povrchu testovaného kroužku.

Hodnota abs. energie byla stanovena podle vztahu 3.1

$$ASL = 20 \log_{10}(1,4 * RMS) \quad (3.1)$$



Obr. 15 Průběh zkoušky se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [7]

Obr. 16 zobrazuje vzniklé poškození po 16 hodinách měření, ve vyjeté dráze plochého kroužku jsou názorně vidět tři oblasti pittingu.



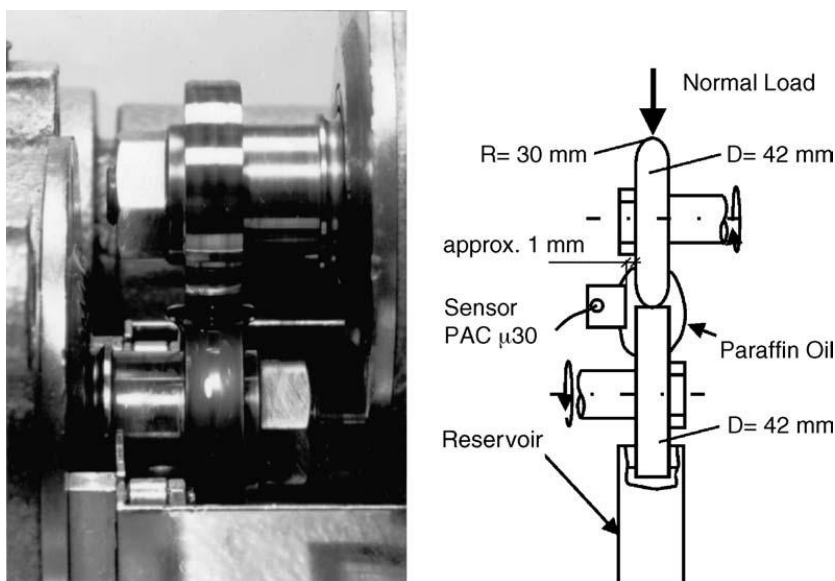
Obr. 16 Výsledné poškození testovaného kroužku [7]

### **Závěr**

Výkyvy signálu AE okolo 4. h zkoušky jsou připisovány vzniku prvních podpovrchových trhlin, které se ale postupně rozválcují a tak dojde k poklesu AE. V obou proběhlých měřeních je tento moment prvním výskytem poškození. Provedená měření prokázala spolehlivě závislost zvýšení AE aktivity na rozvíjejícím se poškození. Metoda AE se dále ukázala více citlivá než metoda vibračního měření.

LOHR, M.; SPALTMANN, D.; BINKOWSKI, S.; SANTER, E.; WOYDT, M. In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction In: *Wear* 260 (2006) p. 469–478 [8]

V příspěvku je popsána zkouška odolnosti válcových vzorků upravených DLC povlakem a vzorků bez povlaku. Základním materiálem byla chromová ocel 100Cr6. Byly prováděny testy bez přítomnosti maziva a s parafínovým olejem. Zkušební stanice a uspořádání experimentu viz obr.17. Mezi testovanými povrchy byl zajištěn definovaný prokluz. In situ byla sledována AE. Součinitel tření u DLC vrstev byl menší než 0.01 za prokluzu. Hertzův tlak byl 1.5 až 2.3 MPa. Zatěžovací síla má velikost 1180N a působí radiálně.



Obr. 17 Experimentální zařízení pro zjišťování opotřebení [8]

### Výsledky

Při experimentu byla použita jako základní vyhodnocovací parametr energie signálu AE podle 3.2

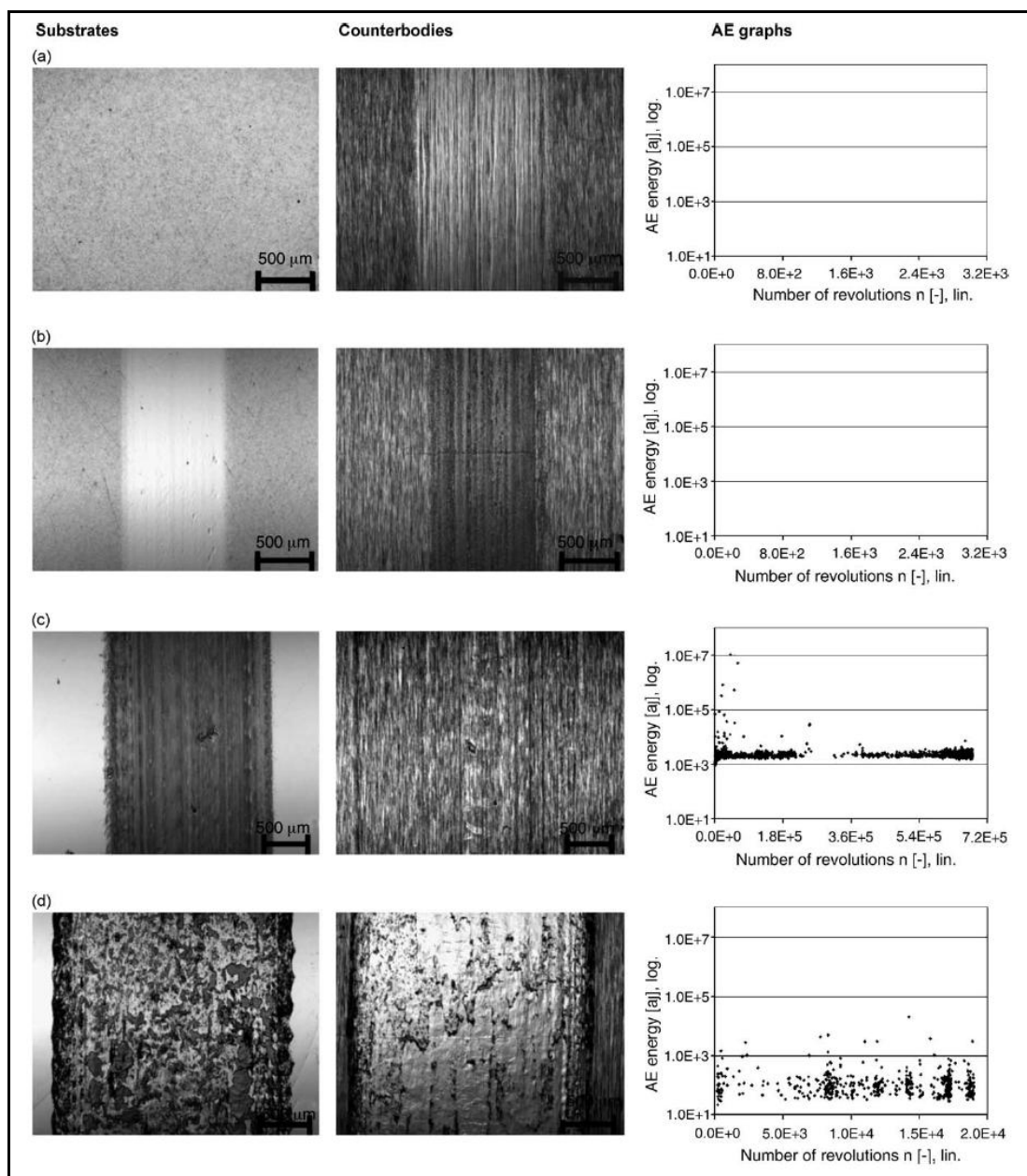
$$E = \frac{1}{R} \int_{t=0}^{t^*} A(t)^2 dt \quad (3.2)$$

kde  $R = 10 \text{ k}\Omega$  je odpor předzesilovače,  $t$  čas v s,  $A$  amplituda ve V, prahová hodnota (threshold) je 61 dB.

Při zkoušce byla nastavena mez odpovídající spallingu většímu než  $1 \text{ mm}^2$

### Zhodnocení

Experiment ukázal možnost využití AE (parametru energie AE), pro stanovení míry poškození kontaktně zatížených povrchů



Obr. 18 Výsledky zkoušky (a)– mazáno povlakováno, (b) – nemazáno povlakováno

© - mazáno nepovlakováno (d)- nemazáno nepovlakováno

1. sloupec - vzorek jemně leštěný
2. sloupec - protikus hrubě leštěno [8]

### Hlavní výhody

Možnost monitoringu in-situ vzdálených míst.

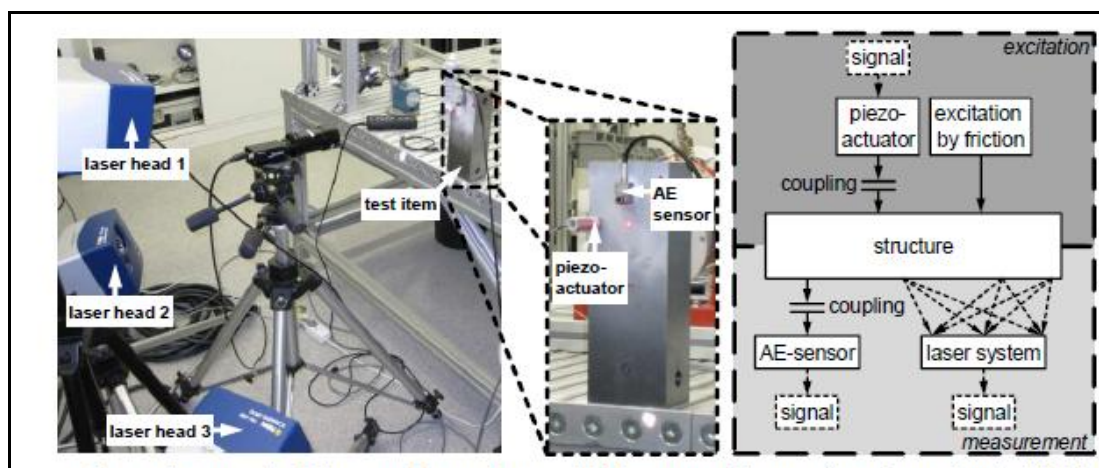
Nižší náklady zvláště u životnostních testů, protože není nutné přerušovat testy z důvodu vizuální kontroly zkoušených povrchů.

Umožňuje detekovat počátek poškození povrchu.

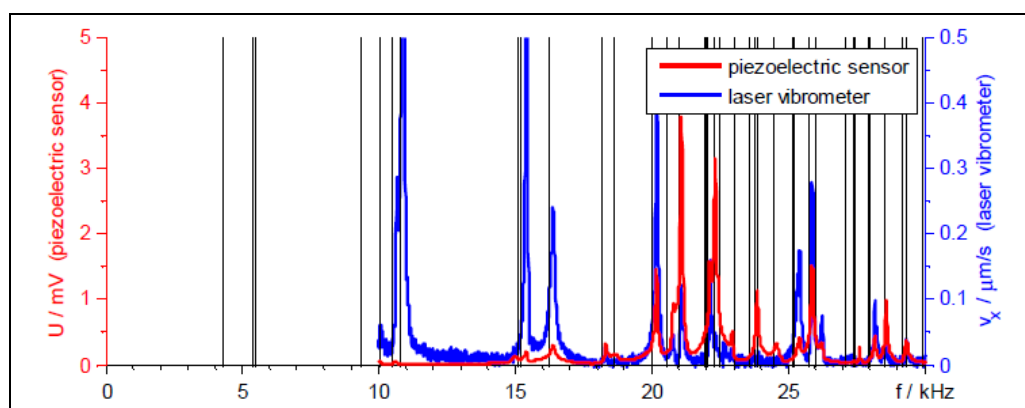
Potvrzuje tezi, že pomocí AE lze popsat vliv i zdánlivě nepodstatných změn z hlediska vlastností povrchu, případně provozních podmínek.

ALBERS, A.; SCHELL, J.; DICKERHOF, M.; HESSENAUER, B. Validation of AE-signals recorded with conventional Equipment using 3D-Scanning-Laser-Vibrometer, In *Int.Conf.on EWGAE 2010 Vienna, 2010* [9]

Tento článek popisuje metodu AE s důrazem na význam sledování signálu nejen v časové ale i ve frekvenční oblasti. Porovnává frekvenční spektrum získané FFT transformací signálu snímaného laserovým vibrometrem a piezoelektrickým AE senzorem. Uspořádání experimentu viz obr.19



Obr.19. Fotografie zkušebního zařízení s detailem zkušebního uzlu a schématem experimentu[9]

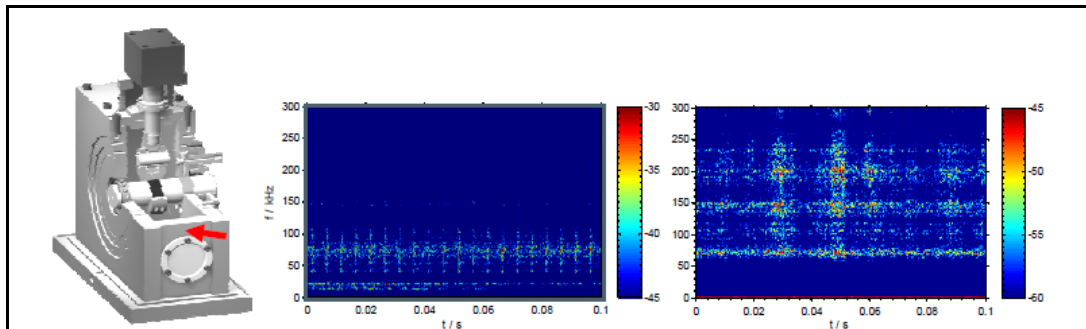


Obr.20 Porovnání spekter získaných laserovým vibrometrem a piezoelektrickým snímačem[9]

Z obr. 20 plyne, že vlastní frekvence, při kterých jsou patrné nárůsty signálu jsou v podstatě srovnatelné mezi sebou. Svislé čáry představují vlastní frekvence získané z modální a harmonické analýzy vzorku pomocí MKP.

### Závěr

Spektrální výsledky potvrzují, že laser-vibrometr a AE snímač poskytují srovnatelné výsledky. Buzení piezo-actuatorem odpovídá zkouškám vzorků v kontaktu se třením. Je potvrzeno, že podobnost signálu získaného oběma metodami, platí zejména pro nižší frekvence cca do 70 kHz. Hustota vlastních frekvencí se zvyšuje se zvyšující se frekvencí a z toho vyplývá, že přesnější popis detekovaného signálu lze získat využitím spektrogramu, kde se sleduje signál nejen v časové, ale i frekvenční oblasti. Barva určuje amplitudu signálu v dB. Obr. 21



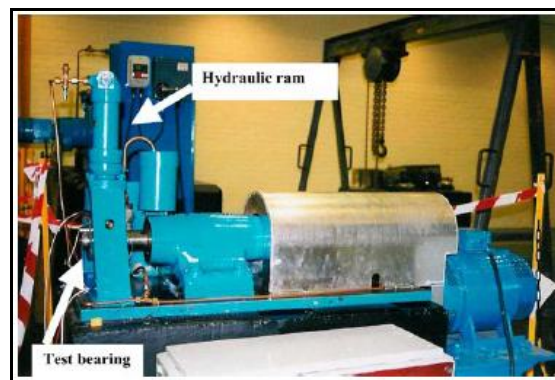
Obr. 21 Spektrogram poškozeného valivého elementu a kluzného ložiska se smíšeným třením[9]

ABDULLAH M. AL-GHAMD, MBA, D A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. In. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 20, Issue 7, October 2006, Pages 1537-1571, ISSN 0888-3270, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.10.013>. [19]

Al-Ghamd a Mba diskutují aplikaci metody AE na hodnocení stavu valivého ložiska a porovnání s konvenční metodou hodnocení na základě měření vibrací. Zabývají se také problematikou interpretace a klasifikace výsledků získaných metodou AE.

### Experiment

Pro výzkumné účely se používají vzorky ložisek s uměle vytvořeným poškozením s různou geometrií a rozměry. Použité experimentální zařízení je na obr. 22. Zkoušené ložisko je uloženo mezi dvěma podpůrnými a zatěžováno hydraulickým válcem. Zařízení také umožňuje tvorbu umělých poškození ložiska.

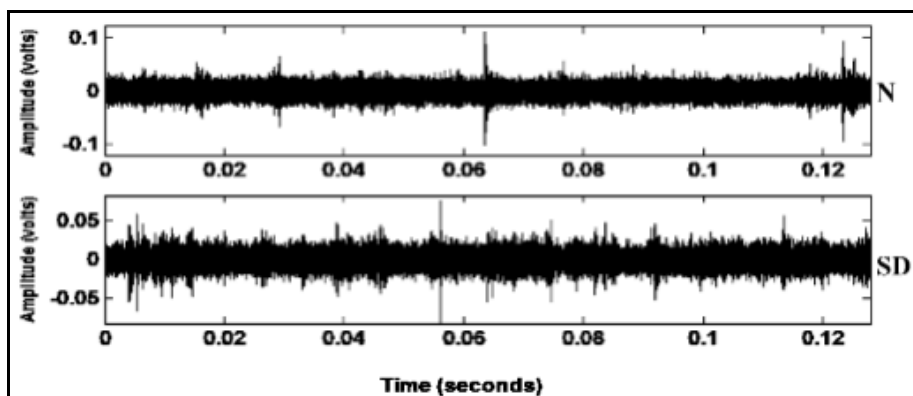


Obr. 22 Testovací zařízení[19]

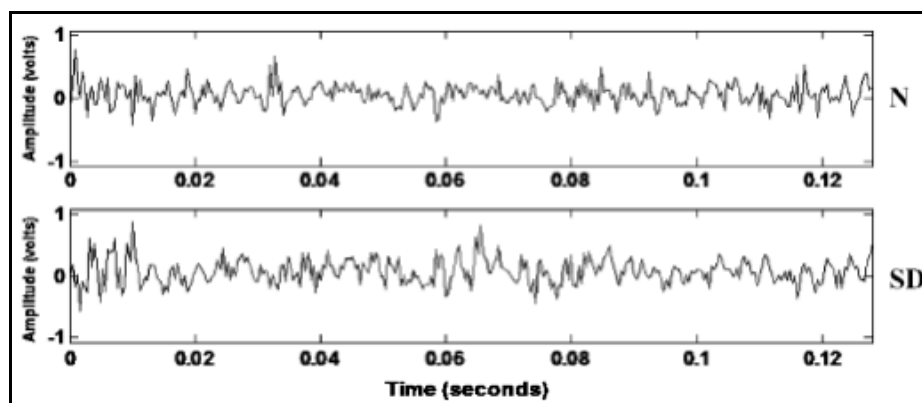
Cílem autorů je identifikace přítomnosti poškození na ložisku a hodnocení míry poškození. Za tímto účelem jsou porovnávány výsledky získané metodou AE a měření vibrací.

## Výsledky

Porovnání použitých metod lze ilustrovat na následujících obrázcích 23,24.



Obr. 23 Časová odezva signálu AE pro nepoškozené ložisko (N) a málo poškozené ložisko (SD) [19]



Obr. 24 Časová odezva signálu vibrací pro nepoškozené ložisko (N) a málo poškozené ložisko (SD) [19]

## Závěr

Z grafů je patrné, že signál AE vykazuje přítomnost amplitudových špiček při průchodu poškození kontaktem. V amplitudové odezvě vibrací se malé poškození výrazněji neprojevuje a není tedy možné jej detekovat. Lze tedy prokázat včasnější detekci poškození při použití metody AE oproti měření vibrací. Metodou AE lze získat také indikaci velikosti poškození a lze tak sledovat rozvoj poškození v průběhu života ložiska, což je další nedosažitelný problém při měření vibrací.

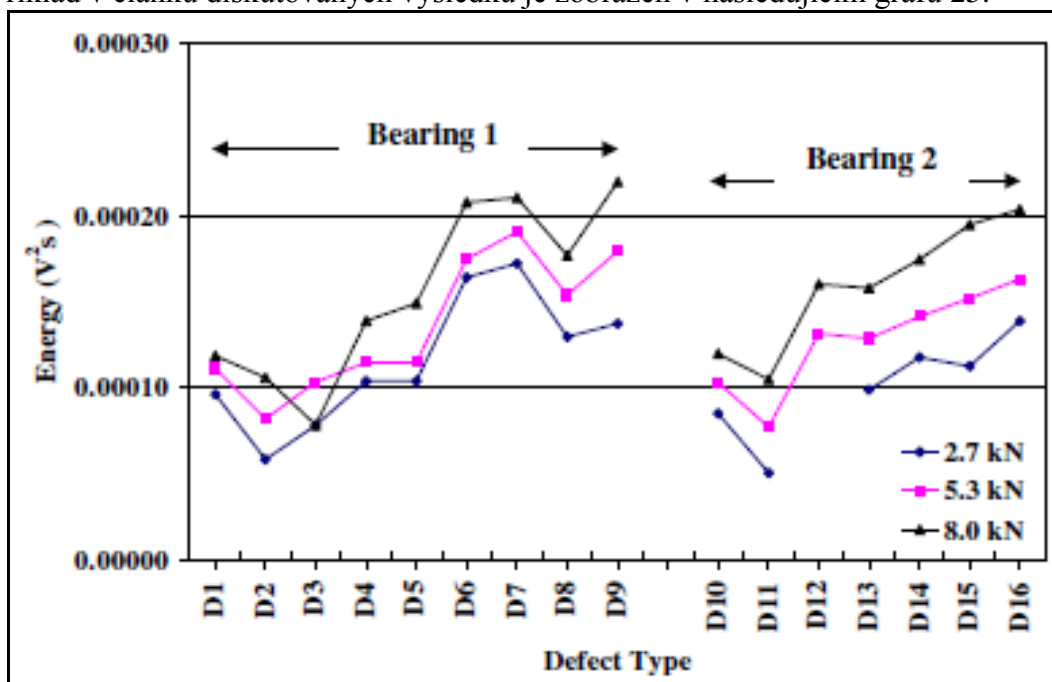
SAAD AI-DOSSARY, R.I. RAJA HAMZAH, D. MBA, Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing, In. *Applied Acoustics*, Volume 70, Issue 1, January 2009, Pages 58-81, ISSN 0003-682X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.01.005>. [20]

Al-Dossary et. al. se zabývá výzkumem vztahu mezi signálem akustické emise a velikostí uměle vytvořených poškození s definovanou geometrií u radiálních valivých ložisek a navazuje na výzkum zmíněný v předchozím rozboru příspěvku.

### Experiment

V článku je popsáno experimentální zařízení pro vytváření umělých poškození na vnitřním i vnějším kroužku testovaného ložiska, které je podobné koncepcce jako v předchozím případě. Cílem výzkumu bylo nalezení korelace mezi vybranými parametry akustické emise a velikostí poškození ložiska. Dále byl sledován vztah mezi trváním přechodových rázů v signálu akustické emise a geometrií poškození. Na zkoušeném ložisku byla progresivně měněna délka a šířka poškození. Byl sledován signál akustické emise při různém zatížení a rychlostech otáčení.

Příklad v článku diskutovaných výsledků je zobrazen v následujícím grafu 25.

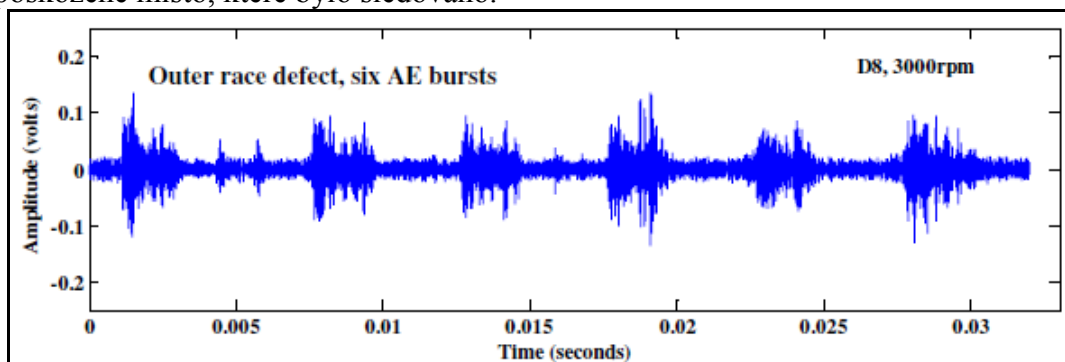


Obr. 25 AE energie pro různé zatížení a velikost poškození při konstantních otáčkách 1500 min<sup>-1</sup>[20]

### Výsledky

Z grafu je patrné, že energie akustické emise vzrůstá s rostoucí velikostí poškození. Lze si však také povšimnout, že u vzorku 1 dojde k poklesu energie AE při poškození označeném D8. Tento jev je vysvětlován tak, že signál AE je velmi závislý na orientaci poškození. V případě poškození označeného D8 došlo k prodloužení defektu při zachování šířky oproti předchozímu případu, což se při daných otáčkách ložiska projevilo pozitivně. Podobné chování bylo sledováno taktéž u dalších testovaných vzorků.

Na obr.26 je ukázka časové odezvy signálu akustické emise s přechodem přes poškozené místo, které bylo sledováno.



Obr. 26 Přebodové rázy v signálu AE při průchodu poškození (vnější kroužek, 300 RPM) [20]

Ve sledovaném úseku bylo vyhodnocováno trvání jednotlivých rázů v signálu. Dále se také hodnotila frekvence opakování rázů, kdy se potvrdilo, že odpovídá příslušné chybové frekvenci ložiska. V článku je dále diskutován posun v chybové frekvenci ložiska v případě, že dochází k prokluzu klece s valivými elementy, což je ilustrováno nestejně dlouhými časovými intervaly mezi měřenými rázy v signálu AE.

### **Závěr**

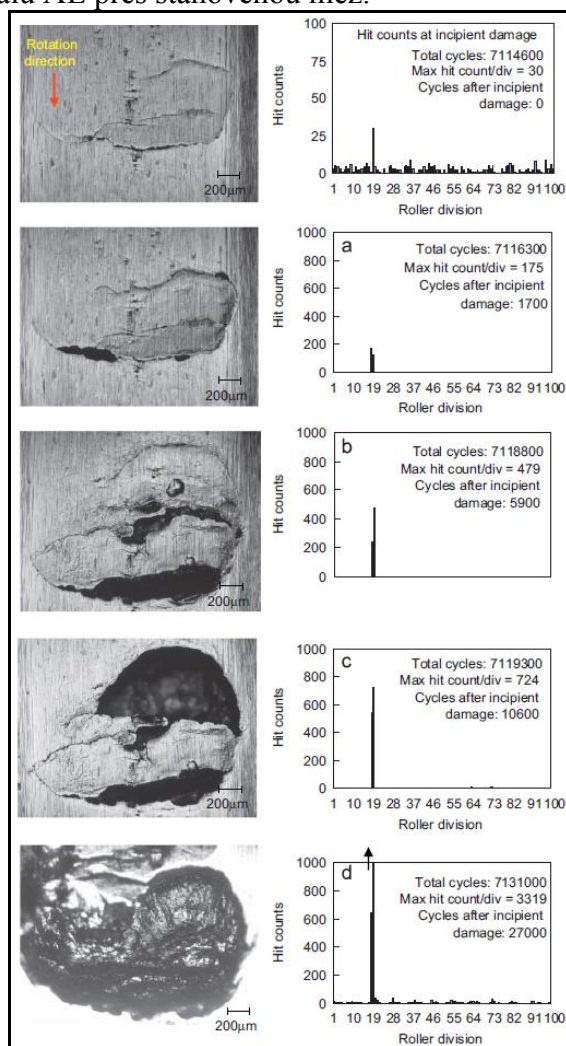
Ve výsledku se autorům podařilo potvrdit, že z odezvy signálu akustické emise lze odvodit velikost detekovaného poškození.

RAHMAN Z.; OHBA H.; YOSHIOKA T.; Takashi YAMAMOTO T, Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission. In. *Tribology International*, Volume 42, Issue 6, June 2009, p. 807-815, ISSN 0301-679X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2008.10.014>. [21]

Rahman et. al. testuje použití AE k detekci prvotního poškození kontaktních povrchů a k následnému sledování rozvoje poškození v průběhu životnosti vzorku.

### Experiment

Testování je realizováno na kontaktu dvou válců, z nichž jeden má zaoblenou kontaktní plochu. Oproti předchozím případům je k detekci poškození využíván počet překmitů signálu AE přes stanovenou mez.



Obr. 27 Vztah mezi počtem „countů“ AE a rozvojem poškození kontaktního povrchu od iniciace trhliny[21]

### Závěr

Z obr. 27 vyplývá, že počet překmitů je vhodným parametrem pro detekci prvotního poškození ložiska, což autoři konstatují v závěru příspěvku. Nicméně neprovádí porovnání s měřením vibrací.

Další vybrané práce, které souvisejí s řešeným tématem:

Práce řešící novinky v přístrojovém a programovém vybavení [10], [11].

Práce řešící nové principy zpracování signálu [12].

Práce popisující poznatky při zkouškách axiálních ložisek [13], [14], [15].

---

### **2.3 Historie aplikace metody akustické emise na Ústavu konstruování**

Historie aplikace metody akustické emise na Ústavu konstruování se datuje od poloviny 90-tých let 20. století. První analyzátor AE 10C byl vyroben Ing. Františkem Duškem přestavbou staršího vibrodiagnostického zařízení firmy Bruel & Kjaer. Následně byly zkonstruovány analyzátory AED FTA 4 a 16 a byl pořízen první analyzátor Dakel XEDO. V tomto období byla převážná část aplikací metody AE zaměřena na hodnocení únavového poškození kovových a keramických materiálů. Okrajově byla řešena problematika lokalizace poškození. Několik prací se věnovalo identifikaci rozvoje korozního poškození.

Přibližně od roku 2004 byly zahájeny aplikace metody AE v oblasti kontaktního poškození materiálu a od roku 2007 byly zahájeny práce na identifikaci poškození ložisek.

Současné vybavení laboratoře kontaktní únavy analyzátory akustické emise viz. kap.5.2.

### 3 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Rešerše byla zaměřena na vybrané aplikace akustické emise při sledování stavu kontaktně zatěžovaných ploch. Byla potvrzena vysoká citlivost této metody pro zachycení minimálních změn povrchu vzorků, případně funkčních ploch ložiska [5].

V některých člancích je diskutován vztah mezi snímáním vibrací a signálu akustické emise [7, [19]. Je konstatováno, že záznam signálu AE poskytuje zásadně přesnější informace o stavu zatěžovaných vzorků příp. ložiska.

Rovněž lze usuzovat podle úrovně sledovaného signálu AE na rozsah uměle vytvořeného poškození[20], nebo velikost pittingu[21].

Z provedené rešerše vyplývá, že je velmi důležité, jaký typ poškození má být metodou akustické emise detekován. Podle předpokládaného typu poškození je nutné použít vybrané parametry AE citlivé na jeho konkrétní druh tj. například abrazivní opotřebení lépe detekuje parametr energie signálu[8], pitting spíše počet překmitů (counts) [21].

V příspěvku [5] je zdůrazněn význam nastavení měřicí aparatury (prahové hodnoty – treshold) na citlivost sledování signálu AE.

#### Výhody využití AE při monitorování zkoušek kontaktní únavy

- Vynikající odezva již na velmi malá poškození v porovnání s ostatními používanými diagnostickými metodami.
- hlavní parametry používané při popisu změn probíhajících v procesu poškozování jsou counts, RMS – střední kvadratická hodnota signálu, absolutní energie signálu
- AE je schopna detekovat poruchy axiálních ložisek.
- Citlivost na celou řadu faktorů ovlivňujících zkoušku (zatížení, rychlost otáčení, drsnost povrchu, druh maziva, a jiné).
- Možnost používání zrychlených zkoušek.
- In-situ zkoušení bez nutnosti kontrolovat stav povrchu při zastavení stanice.

Velmi důležitým poznatkem je informace o možnosti nalezení i jiných parametrů AE, než standardně běžně užívaných, v závislosti na druhu experimentu

#### Nevýhody využití AE při monitorování zkoušek kontaktní únavy

- Signál obsahuje řadu nežádoucích šumů, které je nutno odfiltrovat.
- Každé měření je unikátní, nelze je opakovat.
- Nutnost kvalifikované obsluhy

Z výše uvedeného vyplývá, že chybí ucelená metodika pro aplikaci AE na zkoušky odolnosti materiálů proti kontaktní únavě a vhodné zkušební zařízení. Je nutné analyzovat vhodnost metody AE, respektive jejích jednotlivých parametrů pro detekci prvotního poškození a pak sledování jeho rozvoje.

To by mělo pak velký význam pro praktické využití v náročných aplikacích, kde není přípustné vyšší poškození kontaktních povrchů z hlediska funkce součásti, hluku apod. V rešerši je obvykle hodnoceno uměle vytvořené poškození, nebo nejsou uvedena srovnání s dalšími metodami. Chybí komplexnější pohled na danou problematiku.

## 4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

4

### 4.1 Vymezení řešené problematiky

Pro diagnostiku kontaktně zatížených povrchů se využívá poměrně široké spektrum měřicích metod (termografická měření, vibrační metody, sledování akustické emise a jiné). Diagnostickými metodami a postupy je možné určit změny povrchu kontaktně zatěžovaného vzorku. Vymezení problematiky disertační práce se týká využití AE jako nástroje pro identifikaci počátku vzniku a rozvoje kontaktního poškození materiálů využívaných nejen v ložiskovém průmyslu, případně kompletních ložisek, či funkčních celků. AE je nedestruktivní metoda zkoušení, při které lze odhalit vznikající poškození dříve, než je tomu u ostatních používaných metod měření. Současně se sledováním AE je průběžně monitorována teplota a vibrace.

### 4.2 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je navrhnout metodiku pro identifikaci počátečních stádií kontaktní únavy s využitím akustické emise. Zároveň připravit komplexní experimentální nástroj pro zjišťování odolnosti materiálů, případně jednoduchých funkčních celků proti kontaktní únavě s využitím moderních metod sledování stavu zatěžovaných povrchů. Současně sestavit systém monitorování a vyhodnocování stavu kontaktních ploch pro zjišťování míry stupně poškození metodou akustické emise. Souběžným sledováním teploty a vibrací určit vzájemné vazby mezi sledovanými veličinami pro uvedený způsob testování.

#### Dílčí cíle disertační práce

- 1) Návrh hydraulického způsobu zatěžování zkušebních vzorků a axiálních ložisek s možností programovatelného nastavení síly a délky zatěžovacích cyklů
- 2) Příprava nových konstrukčních prvků (vlnovodů) pro snímání signálu akustické emise zvolenou aparaturou, včetně modifikací software pro snímání získaných dat.
- 3) Provedení série experimentálních zkoušek pro prověření funkčnosti zařízení na kruhových zkušebních vzorcích a na axiálních ložiscích.
- 4) Vývoj sady upínacích elementů pro rozšíření variability zkoušených rozměrů ložisek
- 5) Vypracování nové metodiky identifikace počátečních stádií kontaktní únavy s využitím kombinace diagnostických metod.

#### Přínos

- Unikátní zařízení svého druhu
- Možnost zkoušení reálných funkčních uzlů
- Komplexní experimentální nástroj pro in-situ sledování experimentu
- Návrh metodiky pro identifikaci poškození axiálních ložisek s využitím metody akustické emise

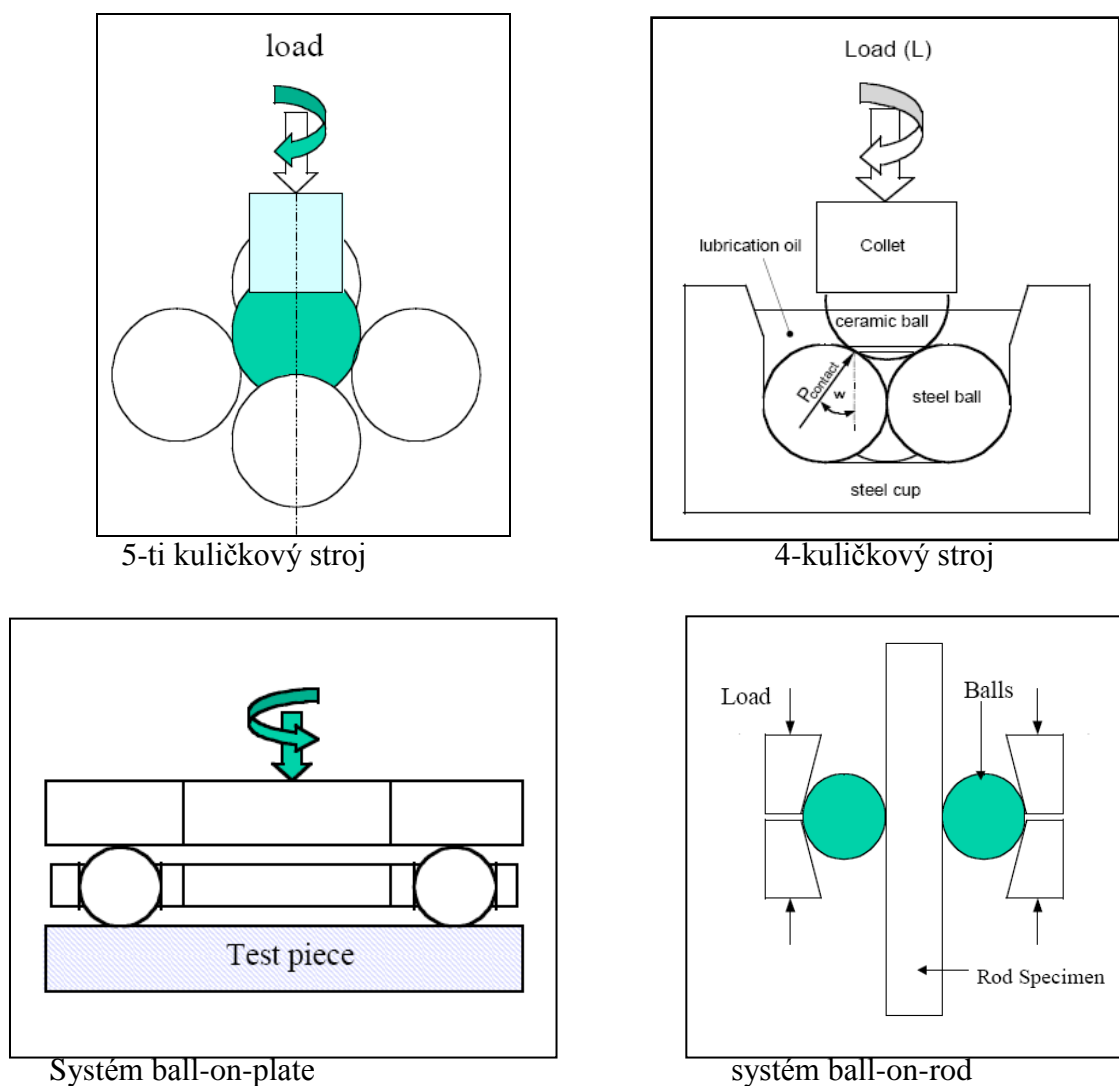
## 5 METODY PŘÍSTUPU A NÁVRH ZPUSOBU ŘEŠENÍ

### 5.1 Experimentální zařízení.

Pro provedení potřebných experimentů je nutné navrhnout a realizovat zařízení, které umožní cyklické zatěžování vzorků. Rovněž umožní testování různých druhů materiálů, vzorky budou jednoduché a levné na výrobu. Experimenty budou sledovány pomocí snímačů teploty, vibrací a akustické emise s možností on-line vzdáleného sledování stavu zkoušky.

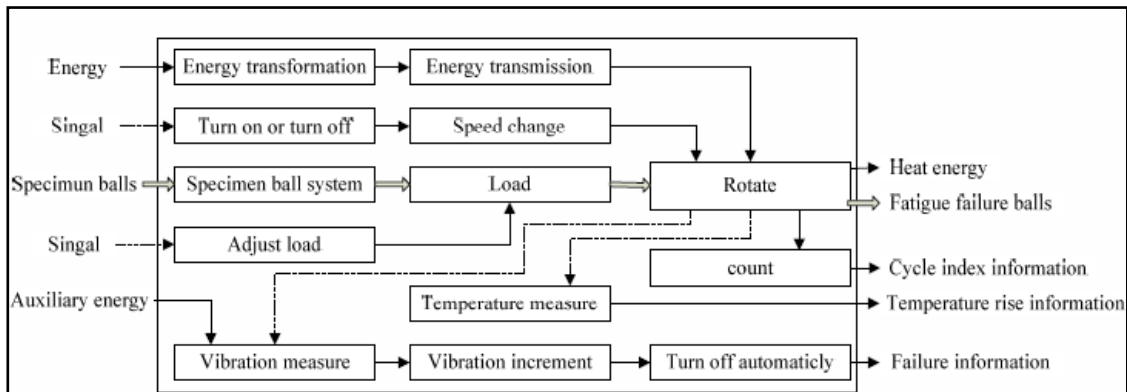
#### 6.1.1 Technický návrh zkušebního zařízení

V technické praxi se lze setkat s několika základními principy testování odolnosti materiálů proti kontaktní únavě. Obr.28.



Obr.28 Základní principy RCF testovacích systémů[17]

Sofistikovaný přístup při návrhu zkušební stanice, který byl použit při specifikaci vlastností a parametrů stanice je uveden v [17]. V dalším textu je tento způsob návrhu popsán podrobněji.



Obr.29 Funkční diagram stanice RCF[18]

Na obr.29 je uveden příklad návrhu uspořádání zkušební RCF (Rolling contact fatigue) stanice podle [18], s tím, že zůstává neřešen jak systém zkoušení, tak i způsob zatěžování, snímání a vyhodnocování jednotlivých veličin. Podrobněji jsou rozpracovány možné varianty podle obr.30

		Function					
		1	2	3	4	5	6
		Specimum ball system	Driving device	Measurement device of number of turns	Loading device	Temperature measure	Vibration measurement
a	One ball ssystem	Belt transmission	Belt transmission	Photoelectric sensor	Weights load	Expansion thermometer	Displacement sensor
b	Two balls ssystem	Gear transmission	Gear transmission	Laser sensor	Spring load	Resistance thermometer	Speed sensor
c	Three balls ssystem	Chain transmission	Chain transmission	Code device	Hydraulic load	Thermocouple	Acceleration transducer

Obr. 30 Rozklad možných variant zkušební stanice[18]

Na základě variant zajištění jednotlivých bloků RCF stanice je vytvořena základní matrice možných řešení obr. 31, která jsou podrobena hodnocení váženými průměry z hlediska pokrokovosti, přesnosti, spolehlivosti, tech. života, technologičnosti, ceny, bezpečnosti a ochrany životního prostředí viz obr. 32

Principle solutions		The six kinds of function					
		1	2	3	4	5	6
Part Function No.	a	1a°	2a°	3a°	4a°	5a°	6a°
	b	1b°	2b°	3b°	4b°	5b°	6b°
	c		2c°	3c°	4c°	5c°	6c°

Obr. 31 Matrice možných řešení[18]

Navržená řešení:

Projekt 1: 1a-2a-3b-4b-5c-6c

Projekt 2: 1b-2b-3a-4a-5a-6b

Projekt 3: 1a-2c-3c-4c-5b-6a

Evaluation	Performance		Project 1			Project 2			Project 3		
		%	Good	6	0.48	Good	6	0.48	Good	6	0.48
0.08	Advanced level	%	Good	6	0.48	Good	6	0.48	Good	6	0.48
0.14	Precision	%	General	5	0.7	Good	6	0.84	Bad	3	0.42
0.13	Reliability	%	General	5	0.65	General	5	0.65	General	5	0.65
0.15	Stationarity	%	Good	6	0.9	Bad	3	0.45	Bad	3	0.45
0.07	Life	%	Bad	3	0.21	General	5	0.35	General	5	0.35
0.06	Technology	%	Good	6	0.36	Bad	3	0.18	General	5	0.3
0.10	Operation	%	General	5	0.5	General	5	0.5	General	5	0.5
0.06	Cost	%	General	5	0.3	Bad	3	0.18	General	5	0.3
0.15	Safety	%	Good	6	0.9	Good	6	0.9	Good	6	0.9
0.06	Environmental protection	%	General	5	0.3	General	5	0.3	Bad	3	0.18
Weighted value	Performance name	unit	Index	Score	Value	Index	Score	Value	Index	Score	Value
Weighted summation is 1	Absolute evaluation		Project 1	52	5.3	Project 2	47	4.83	Project 3	46	4.53
	Relative evaluation		1	0.52	0.53	2	0.47	0.483	3	0.46	0.453

Obr. 32 Hodnotící tabulka[18]

Z tabulky na obr.32 vychází jako nejlepší návrh kombinace podle projektu 1.

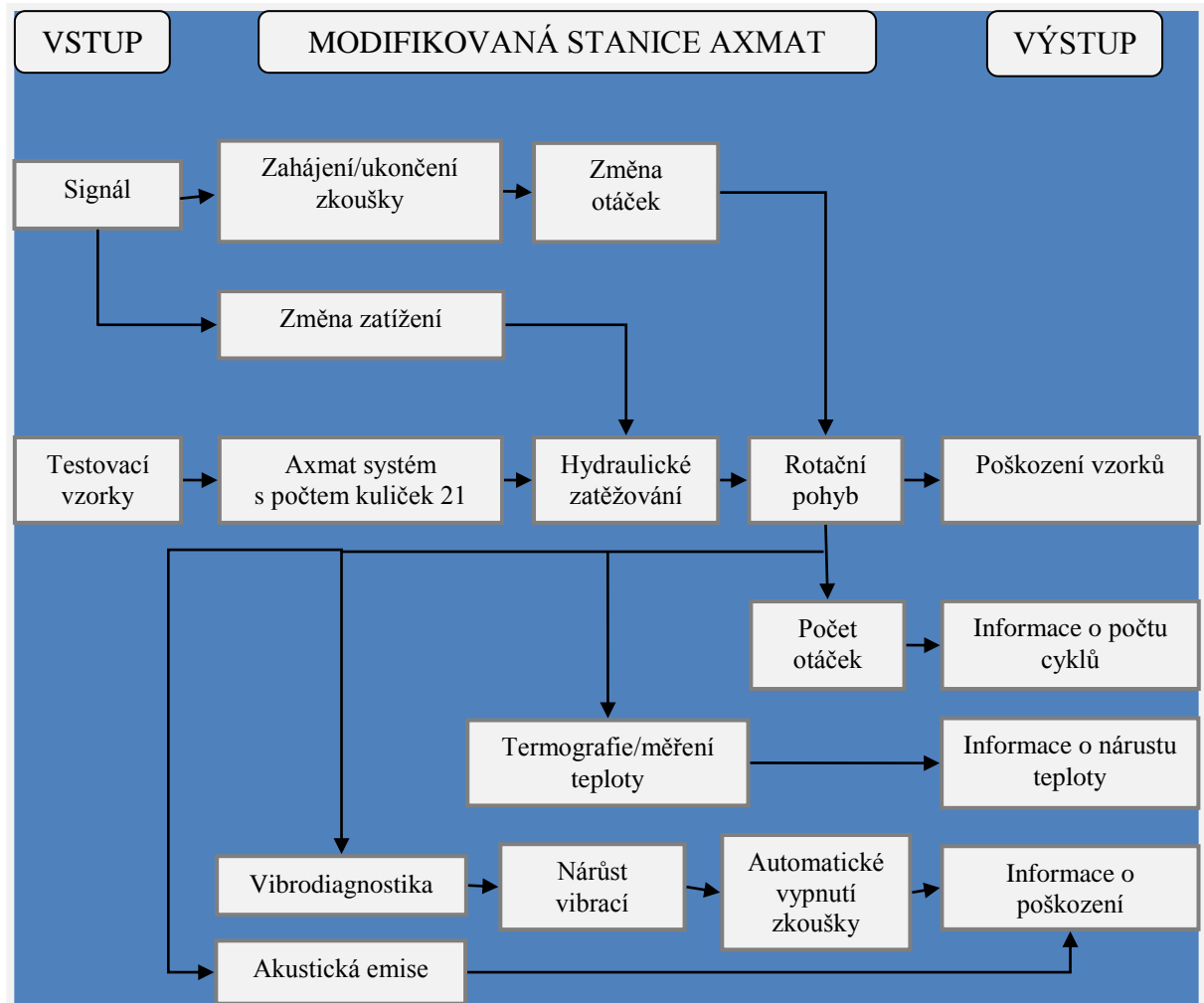
### Parametry zkušebního zařízení

Závěry z výše uvedeného řešení byly využity při návrhu blokového schéma modifikované stanice Axmat. Obr.33

Vzhledem k tomu, že některé základní vlastnosti stanice jsou dané a vyhovující, bylo hlavní úsilí při její úpravě věnováno zvýšení užitečných vlastností. Je vyřešeno hydraulické zatěžování s možností programovat zatěžovací cyklus. Je vyřešena úprava zkušebního uzlu tak, aby bylo zajištěno spolehlivé snímání vibrací, teploty a akustické emise.

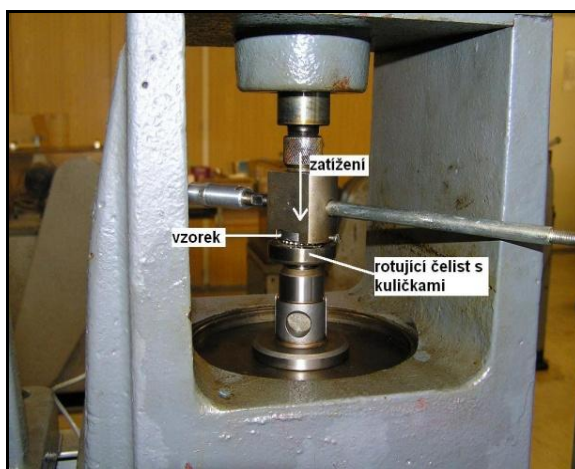
Základní technické parametry:

	Před rekonstrukcí	Po rekonstrukci
Max. napětí v kontaktu	staticky skokově do 5000 MPa	dynamicky 0až 5000MPa
Otáčky	trvale 1380 1/min	plynule 0 až 1380 1/min
Sledování vibrací	analogově	digitálně
Sledování AE	omezeně	neomezeně
Sledování teploty	ne	ano
Řízení experimentu	ručně	vzdáleně



Obr.33 Stanice Axmat - blokové schéma

Sestava stanic Axmat v laboratořích kontaktní únavy ÚK. Obr. 34.

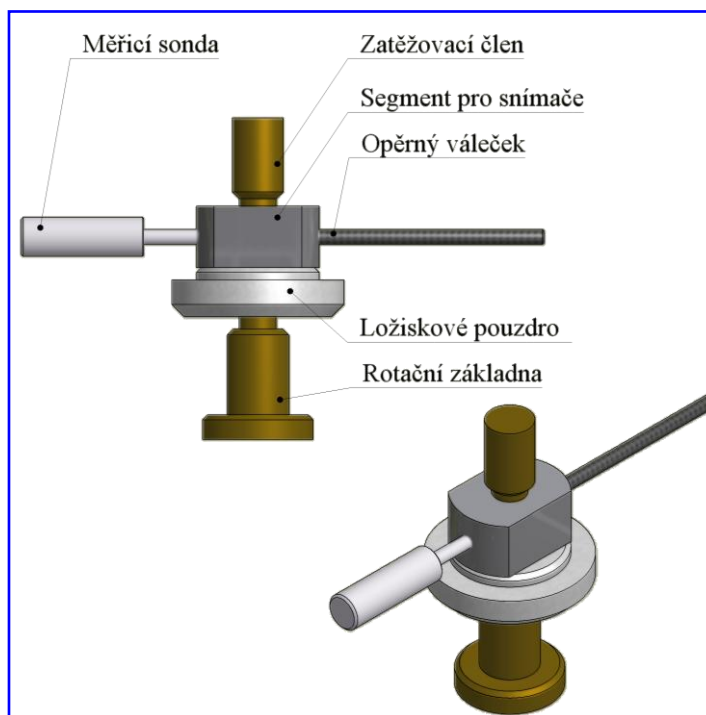


a) zatěžovací uzel



b) sestava zkušebních stanic

Obr. 34 Stanice Axmat v laboratoři kontaktní únavy ústavu konstruování FSI VUT v Brně



Obr. 35 Zkušební uzel stanice Axmat.

### System zatěžování

Při konstrukčním návrhu systému zatěžování byly zvažovány 2 varianty řešení:

- a/ hydraulický systém
- b/ pneumatický systém

### Hydraulický systém:

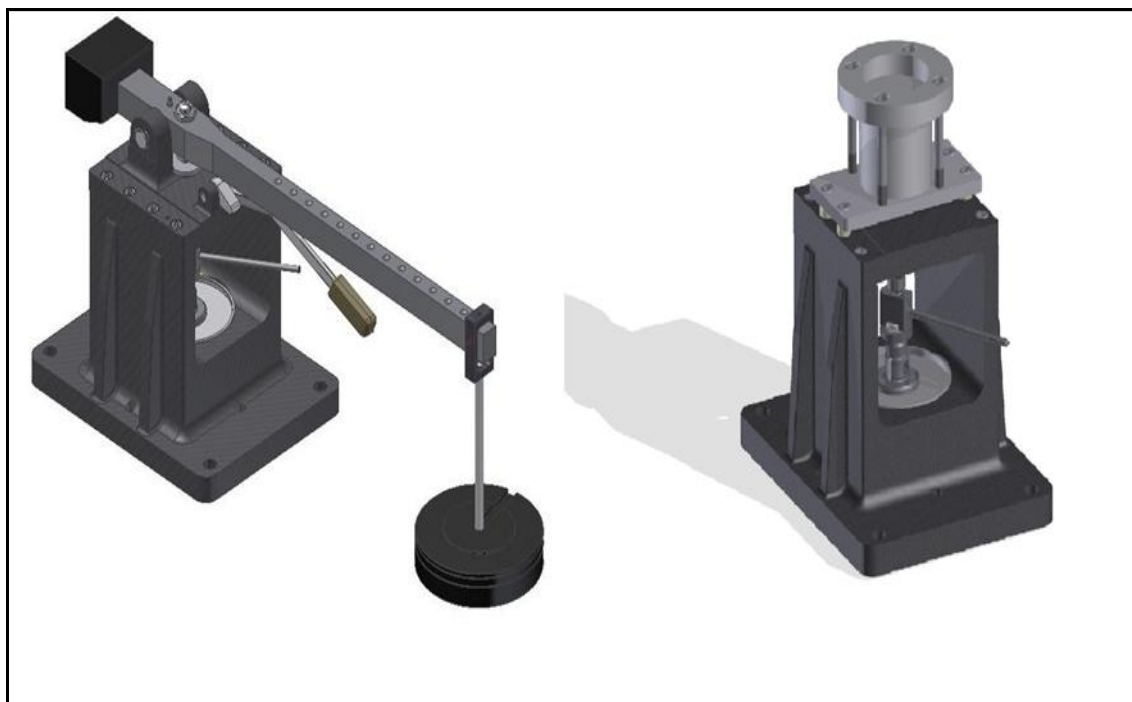
VÝHODY	NEVÝHODY
Přenos energie na velké vzdálenosti	Citlivost na netěsnosti
Nestlačitelnost média má za následek velký výkon při malých rozměrech	Médium citlivé na nečistoty, nebezpečí vzniku požáru, znečištění prostředí
Snadná a plynulá regulace	Vysoké pořizovací náklady
Malé opotřebení	Citlivost na změnu teploty
Vysoká účinnost	
Přesnost	

### Pneumatický systém:

VÝHODY	NEVÝHODY
Dostupnost média - vzduch	Stlačitelnost média – problematické dosažení rovnoměrných pohybů
Možnost využití v prostředí s nebezpečím požáru	Čistota média – úprava vzduchu
Vysoké rychlosti	Hlučnost

Nízké pořizovací náklady jednotlivých komponent v porovnání s hydraulickými	Vyšší provozní náklady ve srovnání s hydraulickým obvodem
Malé nároky na údržbu	Riziko koroze z důvodu vylučování vody v systému
Využití v režimech vyžadujících vysokou míru čistoty	Problémové dosažení malých plynulých rychlostí
Možnost akumulace vzduchu v tlakových nádobách	
Nezávislost na změně teploty	

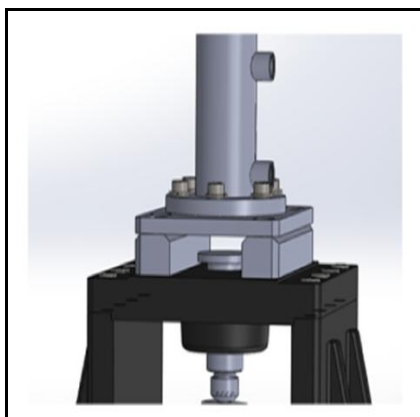
Z výše uvedeného srovnání byla zvolena varianta hydraulického zatěžování. Byla navržena a realizovaná úprava horního víka stanice pro upevnění hydraulického válce obr.42, 43, 44. Návrhový výkres sestavy je v příloze 1. Rovněž byl navržen a realizován hydraulický obvod. Obvod tvoří hydrogenerátor poháněný elektromotorem, který čerpá kapalinu z nádrže do řídicích prvků jako je redukční ventil, který ovládá prostřednictvím změny tlaku sílu na pístu hydromotoru a rozvaděč, kterým se řídí směr pohybu pístu hydromotoru. Prostřednictvím redukčního ventilu se upravuje průtok kapaliny a tím i rychlost pohybu pístu.



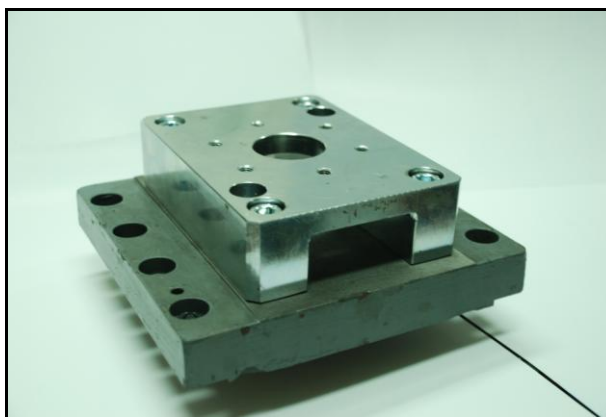
a) původní verze

b) nová verze

Obr. 42 Model stanice Axmat

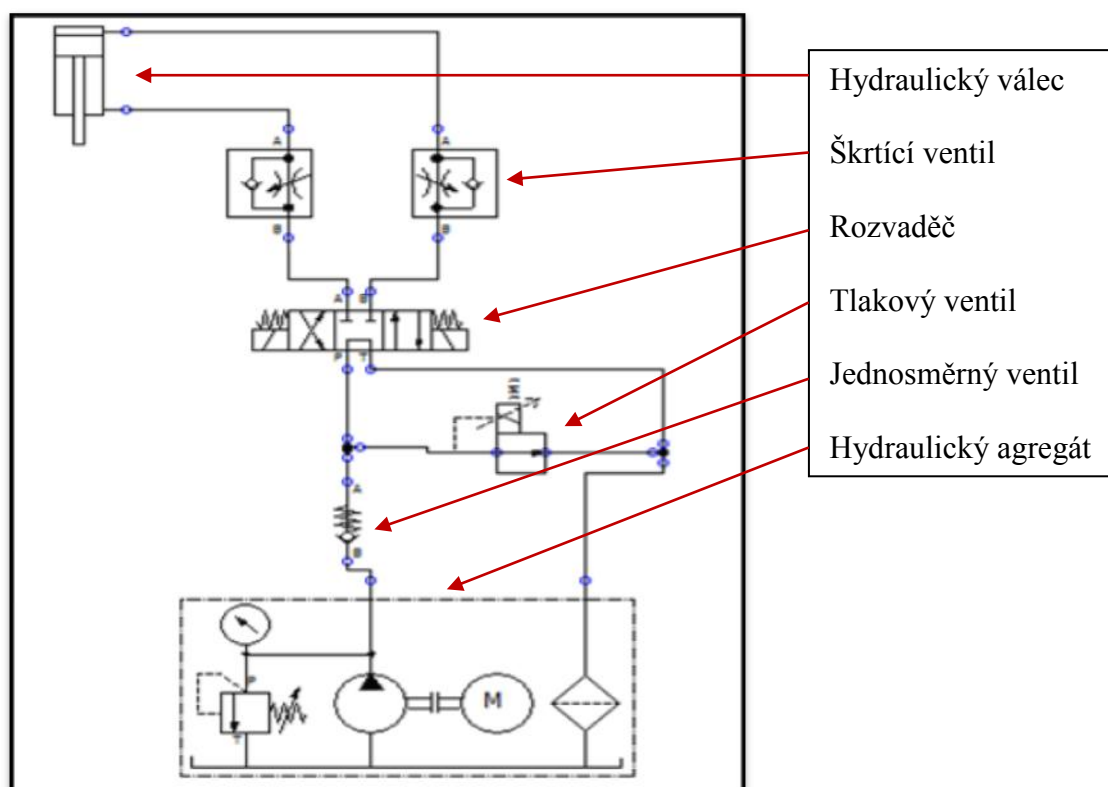


Obr. 43 Model nástavby pro hydraulické zatěžování



Obr. 44 Nové víko stanice s přípojovacím modulem

Schema hydraulického obvodu viz. obr. 45.



Obr. 45 Schéma hydraulického zatěžování

Použité komponenty:

Prvek	Označení	Cena
Hydraulický válec	HM1.240x22/50 321A110	2533,00
Proporcionální tlakový ventil	RE06M17T2V1F0	34978,62
Hydraulický rozvaděč	D1VW008CNJW	4015,71
Škrticí ventil	FM2DDKV	2392,95
Jednosměrný ventil	RHV12LREDCF	397,78
Přípojovací deska	SPD22B910	1203,90

## 5.2 Experimentální metody

Významnou příčinou ztráty rozhodujících vlastností všech typů ložisek je vznik bodového kontaktního poškození tzv. pittingu na některém z jejich prvků. Kontaktní poškození vzniká cyklicky se opakujícími procesy v povrchové vrstvě materiálu při vzájemném dynamickém namáhání dvou těles. Poškození povrchových vrstev se projeví vznikem mikrotrhlin v místech maximálního smykového napětí, postupným oddělováním porušených povrchových vrstev a vznikem jamek na povrchu. Toto únavové opotřebení zpočátku způsobuje snížení funkčních vlastností poškozené součástky, avšak postupně může vzniklý povrchový defekt vytvořit ohnisko únavového lomu, který se postupně může rozšířit na celý průřez dílce.

Zkoušení kontaktní únavové životnosti je realizováno na řadě různých typů zařízení, jejichž společným rysem je odvalování přesně definovaného povrchu známých mechanických vlastností po povrchu zkušební vzorku tvaru válce, disku apod. Mechanický princip experimentálních zařízení je poměrně jednoduchý, zátěžná síla se běžně vyvozuje pomocí zavěšených závaží - je tedy zřejmé, že vlastní zařízení jsou poměrně jednoduchá, spolehlivá a vyžadují pouze minimální údržbu. Mnohem problematičtější je ovšem identifikace jednotlivých stádií poškození materiálu. Standardně je způsob identifikace založen pouze na sledování vibrací systému. V upínací hlavě je snímač vibrací soustavy a po zahájení zkoušky nastaví obsluha mezní hodnotu, při jejímž dosažení se činnost stanice přerušuje. Po překročení této úrovně následuje vizuální kontrola zkušební tělesa a v případě, že pitting není nalezen, zkouška pokračuje s nastavenou vyšší úrovní vibrací. Je zřejmé, že spolehlivost zachycení počáteční etapy vzniku pittingu je velmi nízká. Dalším faktorem, který značně ovlivňuje přesnost těchto měření, je také existence stádia

záběhu – po spuštění nového vzorku je úroveň vibrací vyšší, po srovnání povrchu (tedy po záběhu) se vibrace sníží a je tedy velmi obtížné správně odhadnout vhodné nastavení úrovně vibrací pro vypnutí.

Princip zkušební stanice Axmat spočívá v odvalování kuliček v kruhové dráze po povrchu zkušební vzorku diskového tvaru. Volitelnou osovou silou je kruhový zkušební vzorek (pevně uchycený v horní čelisti zařízení) přitlačován svoji rovinnou plochou proti vrstvě 21 kuliček uložených v kruhové oběžné dráze rotujícího opěrného kroužku. Rotující kuličky jsou postupně vtlačovány do povrchu vzorku, na kterém postupně vzniká kruhová stopa, ve které postupně vzniká kontaktní poškození - pitting. Vzhledem k tomu, že přitlačná síla působí v axiálním směru, nazývá se toto zařízení Axmat. Zařízení poměrně dobře simuluje stav v reálném valivém uložení (zejména axiálním), navíc umožňuje i vyhodnocování vlivu maziva atd. [2.3]

Součástí sestavy zkušebních stanic je diagnostická jednotka, která vyhodnocuje signály ze snímačů vibrací umístěných v horní pevné upínací čelisti (viz výše). V případě vzniku pittingu v kontaktní oběžné dráze vyvolá zvýšení vibrací systému a při dosažení nastavené úrovně je příslušná zkušební stanice automaticky vypnuta. Nedostatky v popisu procesu kontaktního poškozování zásadním způsobem odstraňuje použití techniky snímání AE.

Z hlediska snímání signálu AE je situace poměrně příznivá, neboť kruhový vzorek je upevněn v nepohyblivé upínací čelisti, z jejíhož povrchu je signál snímán. Před snímačem tedy signál přechází pouze přes jedno rozhraní.

### **Vybavení laboratoře**

V současné době jsou v laboratoři ÚK k dispozici tato zařízení na sledování a vyhodnocování signálu akustické emise.

-Analyzátor AE 10C (obr. 36a) je relativně jednodušší zařízení, které umožňuje snímání základních parametrů signálu AE (count, event) a je schopné dělit signál do deseti energetických hladin, z nichž 9 je omezeno shora i zdola a desátá hladina nemá omezení. Celkový dynamický rozsah je 40 dB. Zařízení je řízeno PC-AT.

-Analyzátoři AED FTA 4 a 16 (obr. 36b) jsou stavebnicové systémy pro snímání a zpracování signálu AE se 4, příp. 16 identickými snímacími kanály, z nichž každý je kontrolován vlastním 16 bitovým mikroprocesorem. Amplitudová a časová distribuce signálu je dána až do 255 hladin. Je možné sledovat obálkové parametry – dobu trvání události AE, délku rise time, počty překmitů, maximální amplitudu, energii signálu atd.

-Analyzátoři XEDO, několik typů – 2,4,8 kanálů

Tato informace je částečně zpracována na základě podkladů poskytnutých výrobcem zkušební techniky a webové prezentace.

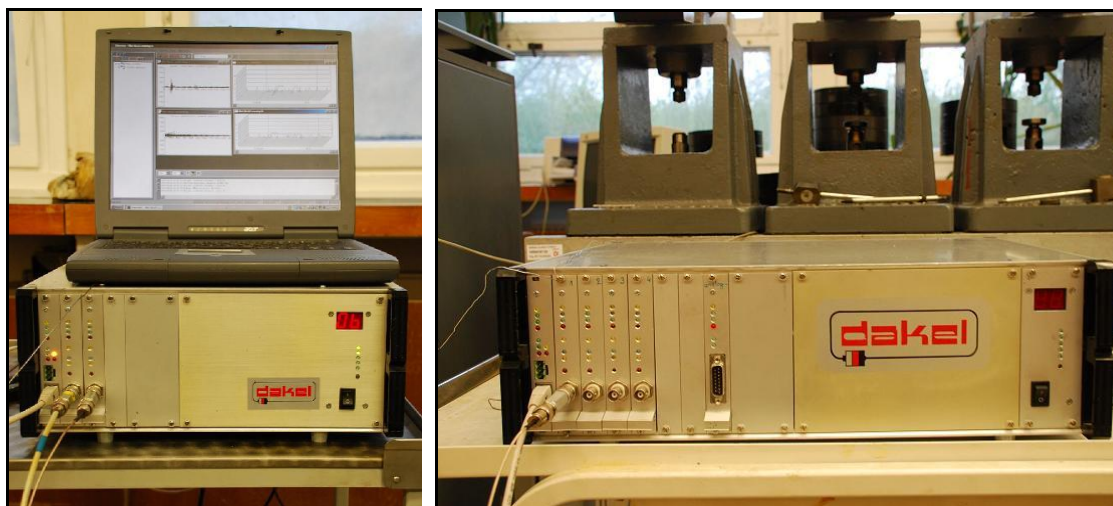
Univerzální měřicí a diagnostický systém DAKEL-XEDO<sup>®</sup> (obr. 37) byl vyvinut firmou ZD Rpety-Dakel. Systém XEDO byl navržen především pro průmyslové použití, ale již během zkušebních testů se dobře osvědčil i při laboratorních měřeních.



a) AE 10C

b) AED FTA 4 a FTA 16

Obr.36. Analyzátoři akustické emise



a) 2 + 1 kanál

b) 4 + 1 kanál

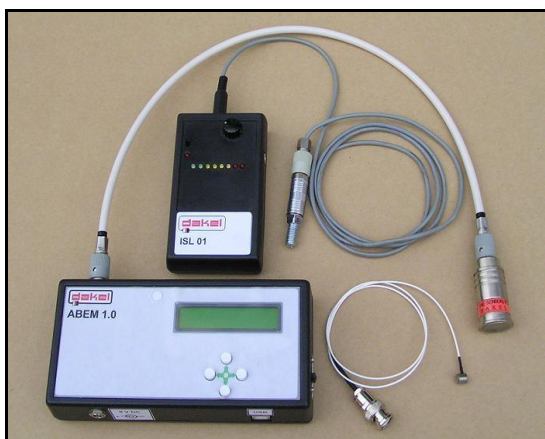
Obr.37 Analyzátoři akustické emise XEDO

#### -Analyzátoři ABEM a ISL

První výsledky aplikace sofistikovaných analyzátorů AE v oblasti detekce kontaktního poškození ukázaly možnost využití jednodušších jednoúčelových zařízení, které sledují a zaznamenávají pouze omezený rozsah dat. Cena těchto zařízení je výrazně nižší a zejména velikost datových souborů je pouze zlomkem velikosti souborů standardních. Tato skutečnost je velmi významná u dlouhodobých zkoušek ložisek.

Zařízení ABEM (obr. 38) zaznamenává pouze parametry count, RMS a FP, které jsou dostatečné pro identifikaci vzniku kontaktního poškození. Ke zpracování textových souborů s naměřenými daty je možné použít běžné soubory typu Excel apod. Identifikátor ISL pouze vyhodnocuje aktuální úroveň signálu AE formou barevných LED diod.

Pracoviště FSI VUT v Brně využívá i nově vyvinutý systém Dakel IPL (obr. 39).



Obr. 38 Zjednodušená zařízení pro detekci kontaktního poškození



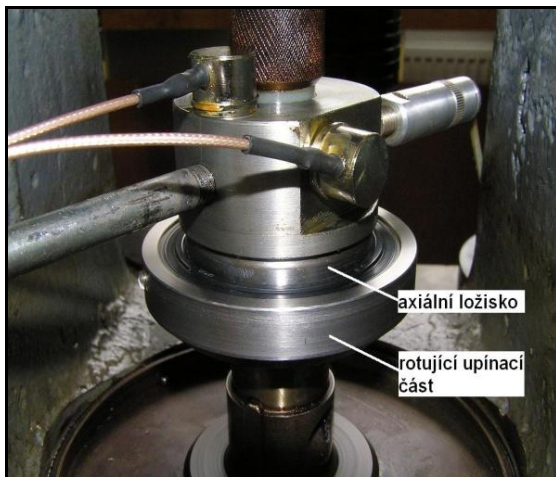
Obr. 39 Přístroj pro kontinuální záznam signálu AE – Dakel IPL

Systém DAKEL-IPL umožňuje 12-bitové synchronní kontinuální vzorkování 4 kanálů frekvencí 2 MSample/s a nepřetržitě ukládání navzorkovaných dat do paměti PC. Analogová část měřicích kanálů je odvozena od systému XEDO. Komunikace s PC a přenos dat je zajišťován rozhraním USB 2.0. Data jsou na disk ukládána rychlostí kolem 16 MB/s, což představuje zhruba 56 GB na hodinové měření a celková doba měření je v podstatě omezena jen kapacitou diskového prostoru, který je schopen pracovat nepřetržitě na alespoň takovéto rychlosti ukládání.

On-line lze na monitoru sledovat obálku maximálních amplitud všech kanálů zároveň s nastavitelnou úrovní časové komprese, což umožňuje nastavení zesílení měřicích kanálů a orientační sledování průběhu měření. Po ukončení měření umožňuje zpracování naměřených dat program Dakel UI, jehož výstupem jsou například výpis jednotlivých emisních událostí dle požadovaných detekčních prahů a to i v podobě binárních souborů pro zpracování ve vyhodnocovacím programu DaeShow. Tento krok lze opakovat s různě volenými prahovými úrovněmi nebo použít komplexnější algoritmy detekce emisních událostí, které umožňují eliminovat nepřesnosti vznikající prahovou detekcí EU a tím zvýšit např. přesnost lokalizace emisních zdrojů. Jeden z dalších výstupů je průběh parametru Count a to až pro 256 prahů ze vstupního rozsahu. Dále je možné grafické znázornění vývoje frekvenčních spekter pro jednotlivé kanály s průběhem signálu pomocné veličiny, graf vývoje frekvenčního spektra v zadaných časech, vývoj energie signálu na vybraných frekvencích v čase.

Kompletně zaznamenaný signál rovněž umožní využití moderních matematicko-statistických metod zaměřených na identifikaci emisních zdrojů.

Z uvedeného výčtu je zřejmé, že pracoviště ÚK disponuje v současnosti moderním přístrojovým vybavením, které umožňuje využití metody sledování AE při celé řadě aplikací, včetně zkoušek odolnosti materiálů proti kontaktní únavě.



a) celková sestava

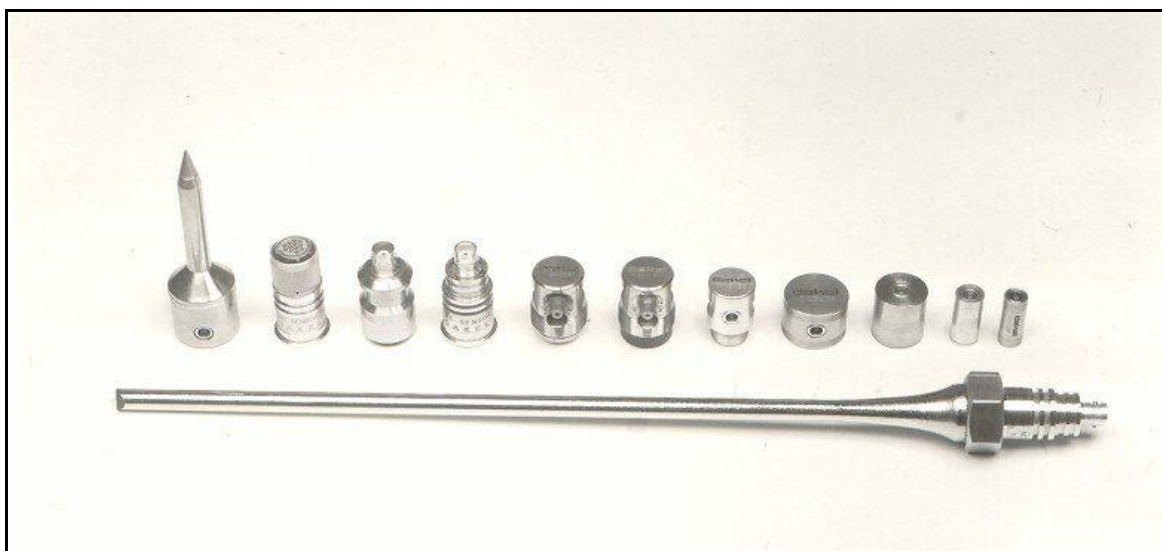


b) rozložený zkušební uzel.

Obr. 40 Zkušební uzel stanice Axmat při zkouškách axiálních ložisek

Pro zkoušky **axiálních ložisek** jsou využívány upravené stanice Axmat (obr. 40). Princip a postup zkoušky zůstává shodný se zkouškami kontaktní únavy materiálu. Pouze diskový vzorek byl nahrazen axiálním ložiskem. Pro stanice byly zkonstruovány nové upínací části přizpůsobené zkoušenému typu ložiska.

Ke sledování signálu akustické emise z povrchu zkoušených vzorků je vyvinuta celá řada snímačů včetně sady příslušenství pro jejich uchycení. Obr. 41



Obr. 41 Vybrané typy snímačů akustické emise

## Jednotka pro měření vibrací



Obr. 46 Přístroj pro sledování vibrací ViDiTech ATW08Pt

Zařízení pro snímání signálu akustické emise nedisponuje možnostmi pro vypnutí zkušební stanice. Je však třeba vyřešit vypnutí zařízení v případě významného poškození testovaného vzorku, protože zkouška probíhá nepřetržitě. Za tímto účelem je navržena modernizace stávajícího analogového okruhu vypínání za okruh řízený digitálně. Jako vhodné zařízení se jeví použití průmyslového analyzátoru vibrací Viditech 2000 RV viz. obr. 46. Přístroj VTD umožňuje připojení až dvou dvoukanalových snímačů vibrací a dvou teplotních snímačů. Pro měření je použit snímač ViDiTech ATW08Pt s integrovaným teplotním senzorem. Snímač vibrací pracuje s nastavitelnou citlivostí od 10mV/g do 5000mV/g. Zařízení je vybaveno integrovaným procesorem, který provádí analýzu měřeného signálu. Analýza je zpracovávána ve frekvenčním pásmu 2 až 1 000 Hz pro hodnocení celkové hodnoty rychlosti vibrací a také v pásmu 2 až 5 000 Hz, kde se zpracovává hodnota zrychlení vibrací. Zařízení je vybaveno také technologií pro sledování kondice sledovaného vzorku, kdy algoritmus provádí trendování hodnot vibrací po dobu provozu. Uživatel si pak může nastavit meze jednotlivých vyhodnocovaných parametrů, po jejichž překročení zařízení vypne sledovaný stroj. Další výhodou uvedeného zařízení je, že je možné se vzdáleně připojit a sledovat on-line, popřípadě si vyžádat analýzy z přístroje. Lze také provést nastavení přístroje, např. změnu vypínacích mezí apod. To vede ke zjednodušení obsluhy i zvýšení komfortu v průběhu experimentu.

Pro potřeby stanice Axmat bylo nutné sériově řešený přístroj modifikovat. Firma Viditech úzce spolupracuje s Ústavem konstruování na vývoji svých zařízení v závislosti na požadavcích vyplývajících z experimentů.

### 5.3 Experimentální materiál

Při plánování experimentů bylo hlavní úsilí zaměřeno na ověření funkčnosti zařízení a nalezení parametru, který by v praxi dokázal odlišit rozdílnou kvalitu stavu funkčních ploch.

Experimenty byly rozděleny do 4 samostatných oblastí:

- 6.1. Zkoušky spojkových ložisek
- 6.2. Zkoušky vlivu přísad do maziv
- 6.3. Vliv dynamického zatěžování na signál AE
- 6.4. Porovnání signálu AE, vibrací a teploty ve vztahu k úrovni kontaktního poškození při zkouškách plochých vzorků

### 6. VÝSLEDKY

V této kapitole jsou popsány a vyhodnoceny 4 typy experimentů, jejímž hlavním cílem bylo ověřit funkčnost zařízení, měřících řetězců a vyhodnocovacích metod. Výsledky jsou zároveň podkladem pro zpracování metodiky pro zkoušení axiálních ložisek, viz kap. 6.5.

#### 6.1 Zkoušky spojkových ložisek

Na stanicích byly provedeny experimenty, které měly za úkol ověřit vhodnost zařízení v laboratoři ÚK pro zkoušení axiálních ložisek s využitím AE.

**Předmět zkoušky:**

4 ks spojková ložiska Sachs 3151000121

4 ks spojková ložiska dodaná firmou JTWT Advance Industry group Co., Ltd

**Druh zkoušky:**

Zkoušky byly prováděny na upravených stanicích Axmat, byla vyrobena dvojice přípravků pro uchycení ložisek. Ložiska byla zatěžována staticky různými silami, při konstantních otáčkách. Při zkoušce byly sledovány vibrace, teplota a snímána akustická emise.

**Parametry zkoušky:**

Zátěžná síla 400 až 5000 N

Otáčky 1380 1/min

Doba zkoušky max. 50000 min

**Průběh zkoušek**

**1 fáze:** V této etapě, bylo porovnáváno chování obou ložisek při zvyšujícím se zatížení, Zátěžná síla se měnila stupňovitě tak, aby odpovídala vypínací síle na ložisku cca 400 až 1400 N

**2. fáze:** Ložiska byla stupňovitě přetížena až do vypínací síly 5000 N a ponechána při tomto zatížení cca 10 dnů v trvalém provozu

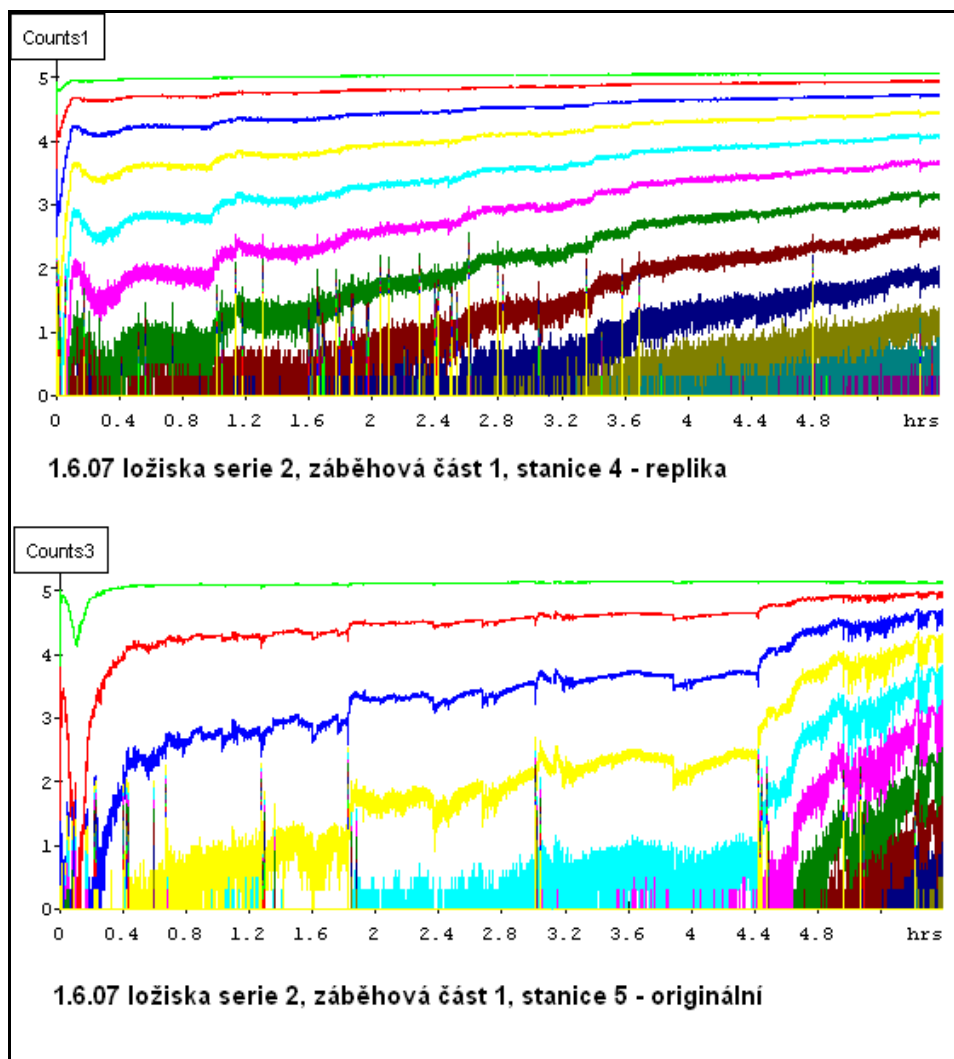
**3. fáze:** Další dvojice ložisek byla vystavena po cca 30 min záběhu maximálnímu zatížení 5000 N po dobu 20 dnů

**4. fáze:** Nová dvojice byla podrobena stejnému režimu jak ve 3. fázi s tím, že byly přehozeny zkušební uzly mezi dvěma stanicemi, aby se vyloučil jejich možný vliv na zkoušku

**5. fáze:** Při předchozích zkouškách se projevíly problémy s mazáním ložisek dodaných firmou JTWT, takže bylo provedeno přemazání tohoto ložiska doporučeným mazivem a provedena zátěžová zkouška podle 3. fáze

## Závěry

**1. fáze:** Lze konstatovat, že v této fázi se obě ložiska chovala srovnatelně, pouze ložisko Sachs vykazovalo o cca 5 stupňů vyšší provozní teplotu. Max. teplota při zatížení 1400 N byla 60° C. Akustická emise v případě ložiska JTWT byla výraznější, ložisko bylo vlivem výrobních nepřesností hlučnější. Tato skutečnost se projevila i ve zvýšené úrovni snímaných vibrací. Obr. 47

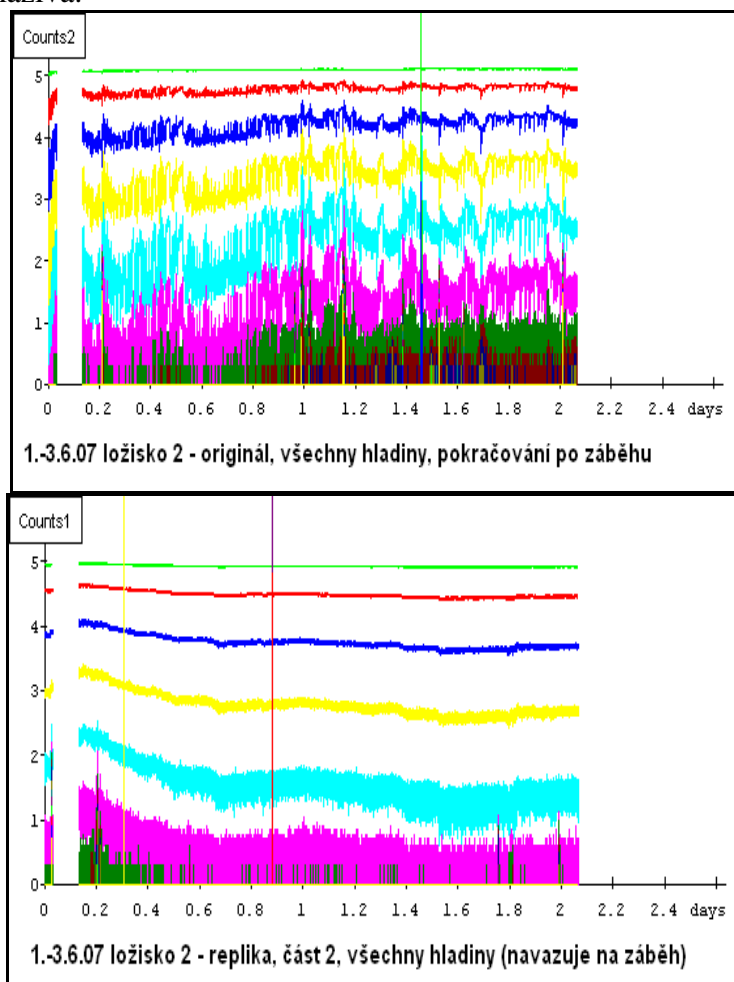


Obr.47 Záznam signálu akustické emise při záběhu ložiska JTWT a Sachs

**2. fáze:** Při tomto režimu zkoušení se udržel rozdíl teplot, tzn. ložisko Sachs vykazovalo teplotu o cca 5 st. C vyšší. Maximální teplota byla naměřena na úrovni cca 95 stupňů. Lze konstatovat, že se ustálila i úroveň snímané akustické emise (obr 48) Ložisko Sachs vykazovalo nižší úroveň signálu akustické emise, nicméně se v průběhu zkoušky objevily opakovaně emisní události významnější úrovně než v případě ložiska JTWT. Toto ložisko vykazovalo vyrovnanější chod bez tak výrazných emisních událostí.

Po zkoušce byla ložiska rozebrána a podrobena prohlídce pod mikroskopem. Stav oběžných drah obou ložisek byl opět srovnatelný, nesoucí stopy po rozválcovaných

drobných defektech, nemajících vliv na funkci ložiska. U ložiska Sachs byl objeven pitting na oběžné dráze vnitřního kroužku. Ložisko JTWT bylo po zkoušce téměř bez plastického maziva.



Obr. 48 Záznam signálu AE během zkoušky u ložiska SACHS (nahore) a JTWT (dole)

**3. fáze:** Výsledky z této části zkoušky potvrdily předchozí závěry s tím rozdílem, že na žádném z ložisek nebyl na funkčních plochách nalezen po zkoušce defekt

**4. fáze:** Při této zkoušce byl vyloučen vliv zkušebních stanic, protože byly opět zjištěny stejné závěry s tím, že se opět projevil problém s mazáním ložiska JTWT.

**5. fáze:** Po konzultacích s firmou Fuchs bylo ložisko JTWT přemazáno plastickým mazivem RENOLIT DURAPLEX EP 2 a podrobena zátěžnému režimu. Zkouška trvala při maximálním zatížení nepřetržitě cca 30 dnů s tím, že nedošlo k poškození ložiska a po jeho rozebrání bylo zjištěno, že obsahuje dostatečné množství maziva.

### Shrnutí

Při porovnávání chování obou typů ložisek lze konstatovat, že mají odlišné vlastnosti při zvolených režimech zkoušky.

Ložisko JJWT vykazuje mírně zvýšenou základní hladinu akustické odezvy, což je způsobeno pravděpodobně nižší geometrickou přesností funkčních ploch.

Ložisko JWTV vykazovalo problém s mazáním, který byl odstraněn změnou maziva.

Ložisko Sachs má při zkouškách o cca 5°C vyšší provozní teplotu.

Z výsledků je zřejmé, že při použití akustické emise na sledování stavu ložisek je dosaženo podstatně přesnějších výsledků

Pomocí parametru counts je možné provést porovnání ložisek. Nastavená citlivost jednotlivých hladin byla u obou ložisek stejná a z výsledků vyplývá, že ložiska méně přesná, případně s defektem mají vyšší hodnoty tohoto parametru. Na základě výsledků byla provedena inspekce vzorků, kde byl tento závěr potvrzen.

## 6.2 Zkoušky vlivu přísad do maziv

Na stanicích byly provedeny experimenty, které měly za úkol ověřit vliv přísad do maziv na kontaktní únavu a zjistit citlivost metody sledování AE na zkoušeném vzorku při aplikaci aditiv do maziva. Zároveň se ověřovala vhodnost parametru AE pro detekci vzniku pittingu

### **Předmět zkoušky:**

Plochý vzorek Axmat mat. E295 (1.0050)

Plastické mazivo Mogul LV3

Přísada Metanova F1.5

### **Druh zkoušky:**

Zkoušky byly prováděny na upravených stanicích Axmat, na klasických vzorcích. Ložiska byla zatěžována staticky, při konstantních otáčkách. Při zkoušce byly sledovány vibrace, teplota a snímána akustická emise.

### **Parametry zkoušky:**

Zátěžná síla 5000 N

Otáčky 1380 1/min

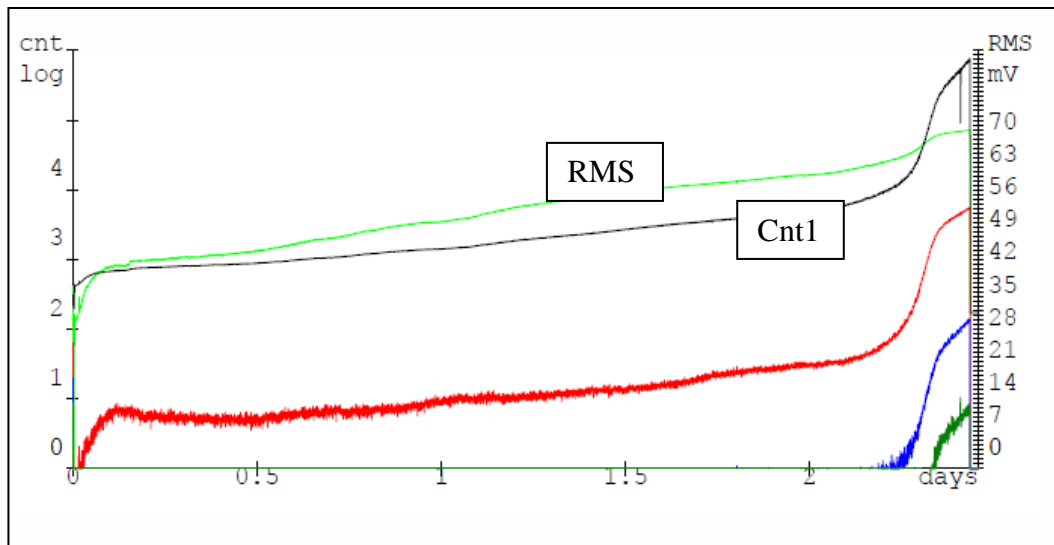
Doba zkoušky – do vzniku pittingu

### **Průběh zkoušek**

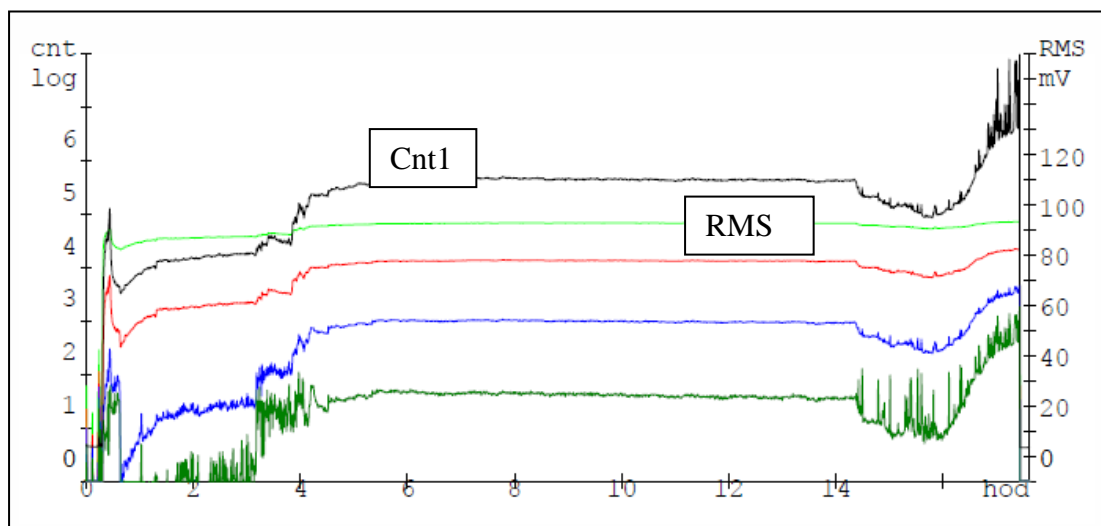
Záměrně byl použit vzorek z oceli (E295), která svými vlastnostmi není vhodná pro strojní uzly vystavené kontaktnímu zatěžování.

Na záznamu zkoušky kontaktu mazaného plastickým mazivem bez aditiva je patrný trvalý nárůst emisních událostí vyjádřených jak počtem countů, tak průběhem RMS, viz obr.49 Během zkoušky nebyly zaznamenány klasické fáze kontaktního poškozování, nedošlo k ustálenému režimu.

Záznam zkoušky s použitým aditivem Metanova F1.5 ukazuje na jeho pozitivní vliv. Obr. 50.V záznamu je patrná prodleva, kdy nedochází ke vzniku nových emisních událostí, experiment probíhá v ustáleném režimu.



Obr.49 Záznam zkoušky bez aditiva

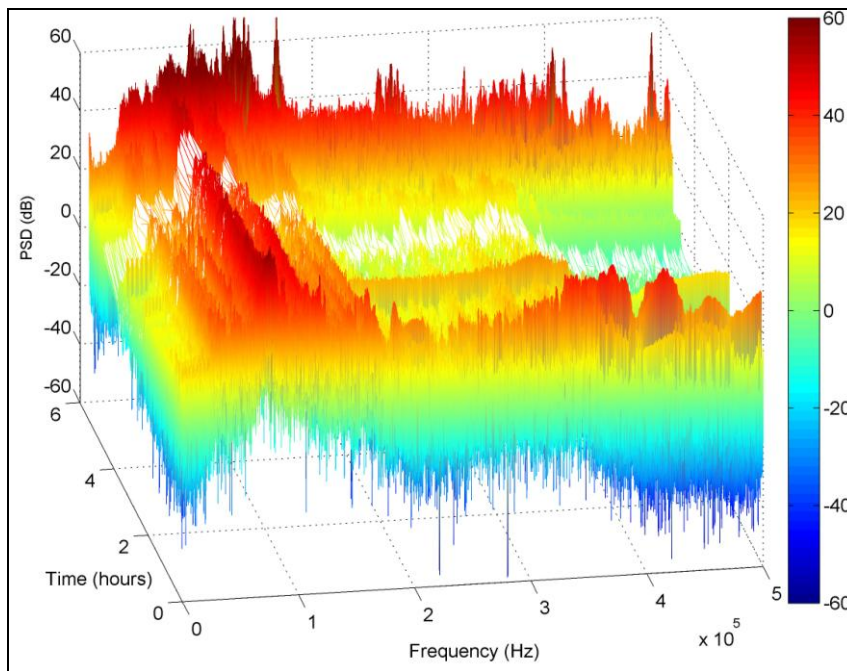


Obr.50 Záznam zkoušky s aditivem

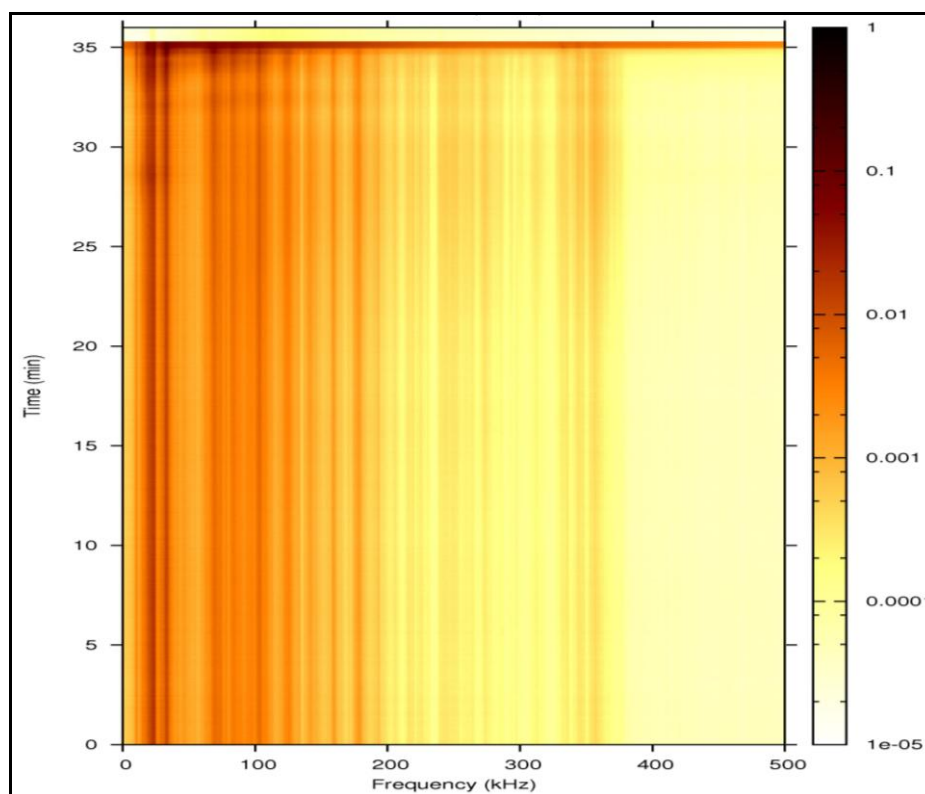
**Ukázka pokročilých metod zpracování signálu akustické emise**

Příklad základního záznamu zkoušky z analyzátoru IPL je na obr. 51, kde na ose x jsou frekvence signálu [kHz], na ose y je doba zkoušky [min] a míra intenzity signálu [dB] znázorňuje barevná škála. Tento konkrétní záznam neobsahuje počáteční záběh.

Pokud provedeme řezy rovnoběžné s časovou osou, jsme schopni získat průběh určitých vybraných (například špičkových) frekvencí signálu v závislosti na čase průběhu zkoušky. Obr. 52.



Obr.51 Intenzita signálu v závislosti na čase



Obr. 52 Ukázka záznamu signálu AE získaného analyzátořem IPL

### Shrnutí

Zkouška prokázala schopnost metody AE rozlišit rozdíly v chování kontaktních ploch při stejných zatěžovacích podmínkách, jen s dílčí změnou – v tomto případě aplikací aditiva. Snímač vibrační změnu v režimu zkoušky nezaznamenal.

### 7.3.Vliv dynamického zatěžování na signál AE

Tento druh zkoušky byl zaměřen na sledování odezvy signálu akustické emise při dynamickém zatěžování zkušebního vzorku. Rovněž byl hledám parametr AE na kterém se změny projeví nejvíce

#### Předmět zkoušky:

Plochý vzorek Axmat mat. 37Cr4(1.7034)

Plastické mazivo Mogul LV3

#### Druh zkoušky:

Zkoušky byly prováděny na upravených stanicích Axmat, na klasických vzorcích. Vzorky byly zatěžovány dynamicky, při konstantních otáčkách. Při zkoušce byly sledovány vibrace, teplota a snímána akustická emise.

#### Parametry zkoušky:

Kontaktní napětí 1/  $\sigma_{\text{Hertz}} = 4500/4000$  MPa

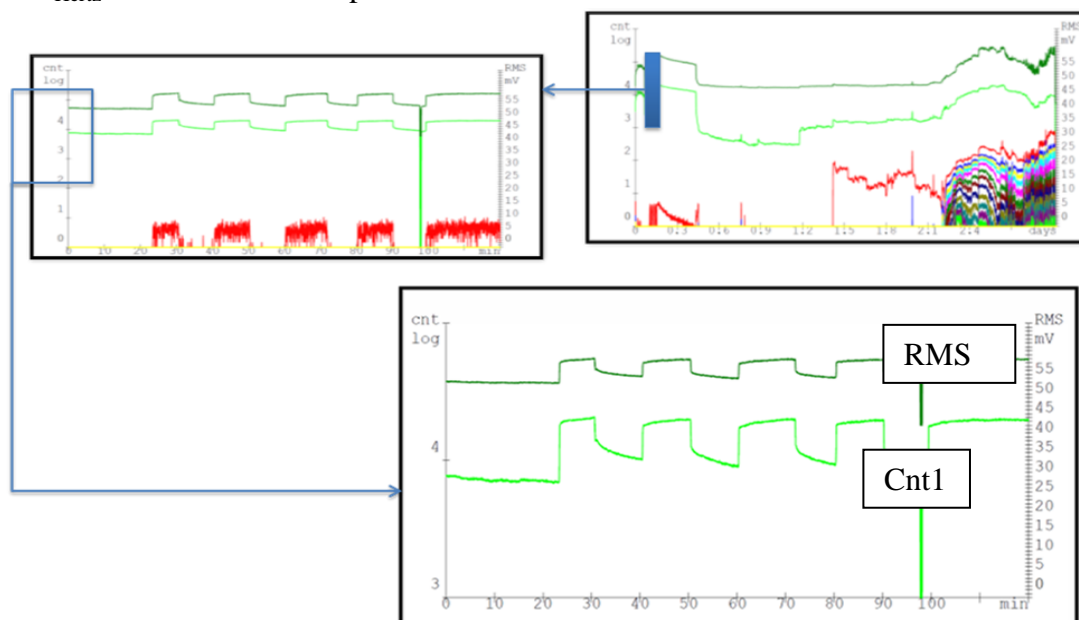
2/  $\sigma_{\text{Hertz}} = 5000/4500$  MPa

Otáčky 1380 1/min

Doba zkoušky – do vzniku pittingu

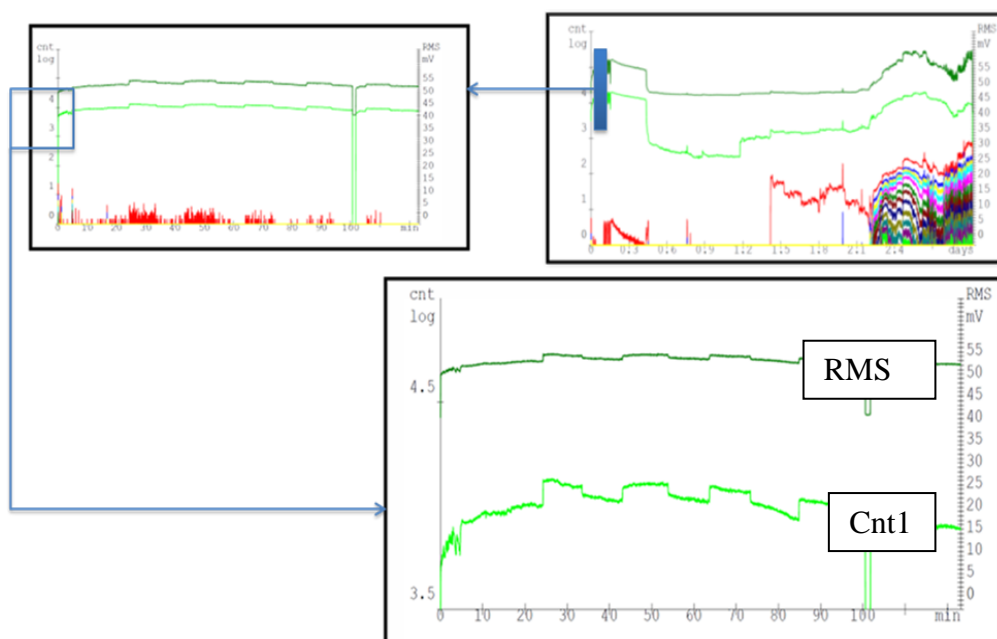
#### Průběh zkoušek

1/  $\sigma_{\text{Hertz}} = 4500/4000$  MPa po 10 min



Obr. 53 Záznam zkoušky 4500/4000 MPa

2/  $\sigma_{\text{Hertz}} = 5000/4500 \text{ MPa}$  po 10 min



Obr. 54 Záznam zkoušky 5000/4500 MPa

### Shrnutí

Záznamy ze zkoušky jsou prezentovány na obr. 53 a obr. 54. Z grafů je zřejmé, že metoda sledování signálu AE při zkouškách kontaktní únavy při dynamickém zatěžování poskytuje velmi podrobné údaje o chování zkušebního uzlu.

V obou grafech jsou patrné významné změny v počtu emisních událostí v závislosti na hodnotě kontaktního napětí. Zároveň je znatelný rozdíl v emisní odezvě při různých hodnotách kontaktního napětí.

Zajímavé je i pozorování celkových trendů v počtu emisních událostí, zvláště v prodlevách při nižším kontaktním tlaku

Experiment prokázal citlivost sledování AE při dynamickém zatěžování, kde zejména parametr počet překmitů poskytuje spolehlivé informace o stavu kontaktních ploch.

### 7.4 Porovnání signálu AE, vibrací a teploty ve vztahu k úrovni kontaktního poškození při zkouškách plochých vzorků

Hlavním cílem experimentu je porovnání záznamu teploty, vibrací a akustické emise při zkoušce kontaktní únavy, nalezení korelace mezi úrovní poškození a odezvou ve sledovaných parametrech.

#### Předmět zkoušky:

Plochý vzorek Axmat mat. 37Cr4(1.7034)  
Plastické mazivo Mogul LV3

**Druh zkoušky:**

Zkoušky byly prováděny na upravených stanicích Axmat, na klasických vzorcích. Vzorky byly zatěžovány při konstantních otáčkách. Při zkoušce byly sledovány vibrace, teplota a snímána akustická emise. Byl proveden metalografický rozbor a popis rozsahu poškození

**Parametry zkoušky:**

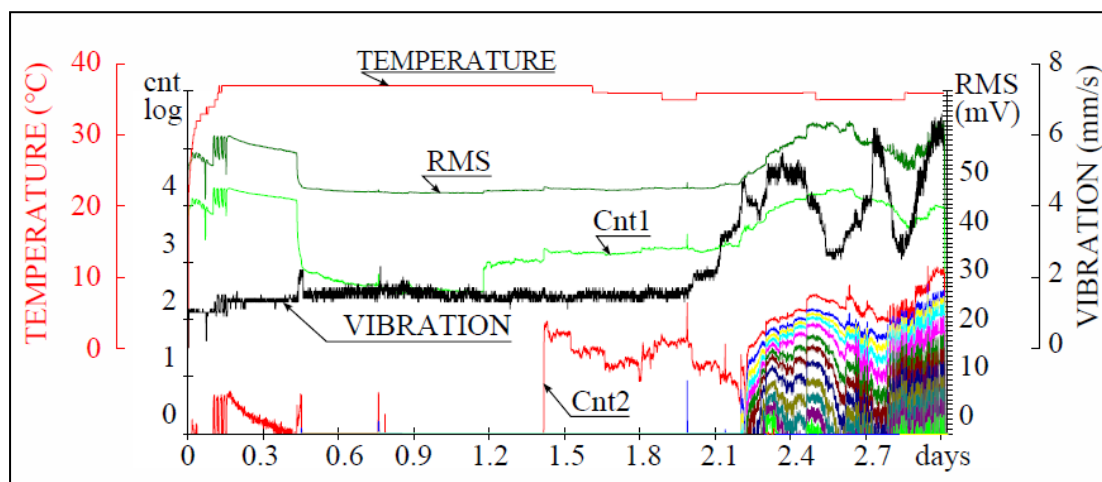
Kontaktní napětí 5000/4500 MPa s prodlevou 5min - záběh, staticky 5000 MPa

Otáčky 1380 1/min

Doba zkoušky – do vzniku pittingu

**Průběh zkoušek**

Vzorek byl podroben záběhu a následně zatížen staticky. Zkouška probíhala až do vypnutí zařízení snímačem vibrací, který detekoval vznik pittingu. Záznam zkoušky včetně všech sledovaných parametrů je na obr. 55. Stav kontaktní stopy na vzorku po zkoušce je na obr. 56



Obr. 55 Záznam všech sledovaných parametrů

**Experimentální technika**

Metalografický výbrus byl připraven běžnými technikami – lisováním za tepla, broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami. Struktura vzorků v naleptaném stavu byla pozorována na metalografickém mikroskopu Olympus GX 71 při použitém zvětšení objektivu 50x a dokumentována digitální kamerou DP 11 (celkové zvětšení při dokumentaci bylo cca 500x).

K měření tvrdosti v průřezu vzorku dle Vickerse HV1 byl použit automatický mikrotvrdoměr LM 247AT fy LECO vybavený softwarem pro automatické měření AMH 2000. Povrchová tvrdost vzorku dle Rockwella HR byla měřena na tvrdoměru firmy LECO, typ LR-3E.

Pozorování a dokumentace defektů na disku bylo provedeno na analytickém rastrovacím elektronovém mikroskopu PHILIPS XL-30.

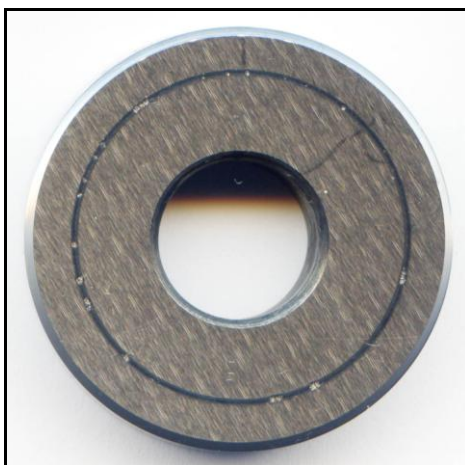
## Výsledky analýz

### Metalografické hodnocení

Mikrostruktura v podpovrchové oblasti v blízkosti drážky a dále ve středu vzorku je dokumentována na obr. 57 a 58. Mikrostruktura v celém průřezu je v podstatě shodná, je tvořena popuštěným martenzitem a jemnými komplexními karbidy, zřejmě typu M<sub>3</sub>C, tj. (FeCr)<sub>3</sub>C.

Naměřená tvrdost na čele vzorku byla v rozsahu 60,2-60,3 HRC, tvrdost v průřezu vzorku 731 HV1.

Zjištěné hodnoty odpovídají ložiskové oceli 37Cr4(1.7034)



Obr. 56 Vzorek Axmat po zkoušce

### Analýza poškození

Na obr. 59a,b je zobrazeno počáteční stádium poškození, které je specifické trvalou (plastickou) deformací v kontaktní stopě. V odezvě signálu AE je pozorovatelný významný nárůst emisních událostí v hladině Cnt1 po cca 1,2 dne zkoušky. Ostatní parametry /teplota, vibrace/ tento stav nezaznamenaly. Na obr. je vidět významné zvrásnění před čelem trhliny, které odpovídá postupující plastické deformaci.

Významné defekty se objevují souběžně s nárůstem emisních událostí v hladině Cnt2 po cca 1,4 dnu. Tato situace odpovídá defektu zaznamenanému na obr. 60a,b

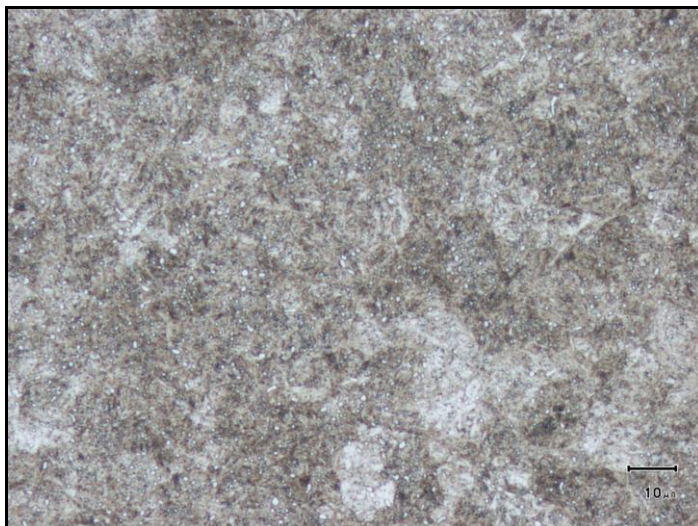
Současně dochází k rozšiřování kontaktní plochy obr. 61.

Výrazné defekty jsou dále dokumentovány na obr. 62. Jedná se o únavové poškození tribologické stopy s odtržením základního materiálu a trvalou deformací povrchu v okolí defektu (spalling). Tento stav nastal po cca 2,2 dni zkoušky a je charakteristický dramatickým nárůstem jak emisních událostí, tak i zvýšením parametru RMS a hodnoty vibrací obr. 55.

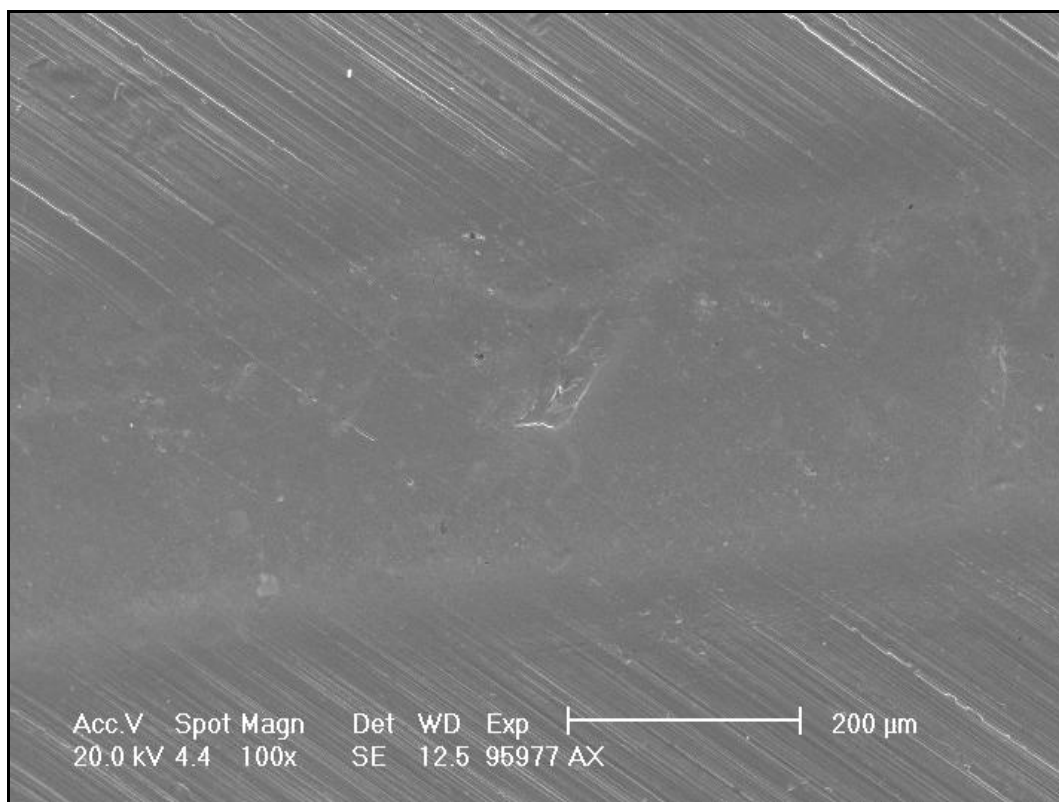
V případě defektu na obr. 63a byl dále identifikován poškozený povrch vedle tribologické stopy (detail na obr. 63b). Lze předpokládat, že toto poškození vzniklo při přípravě vzorku broušením.



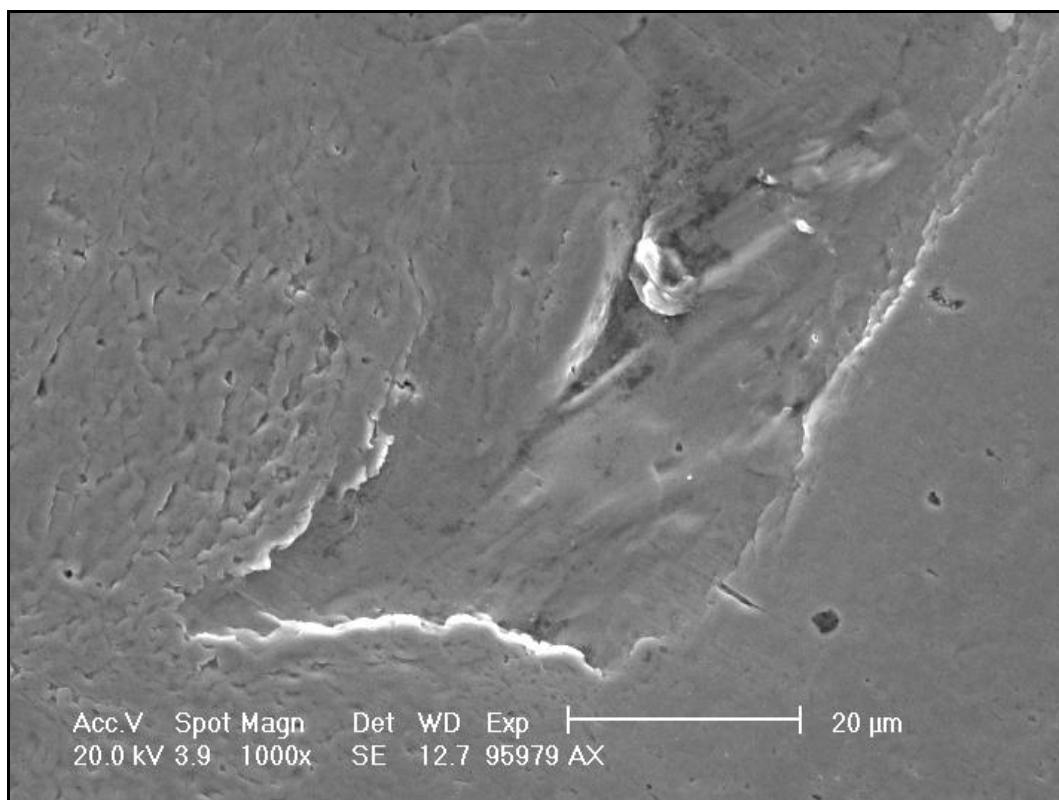
Obr. 57 Vzhled mikrostruktury vzorku – povrch



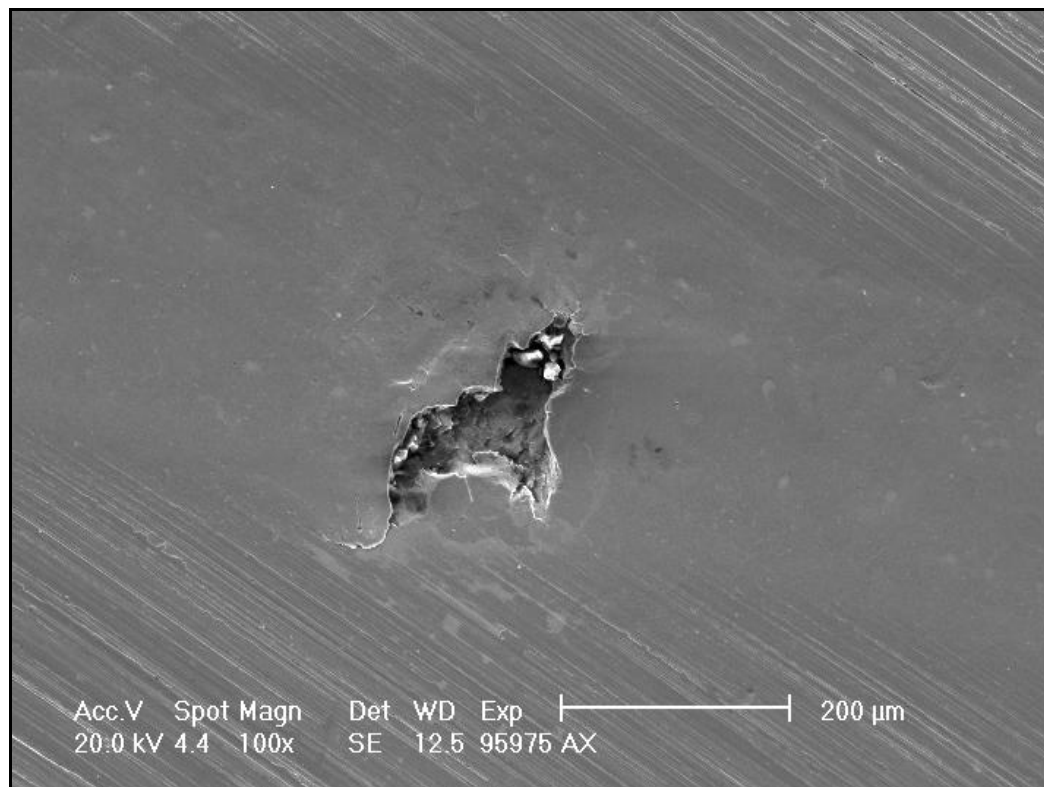
obr. 58 Vzhled mikrostruktury vzorku – střed uvnitř



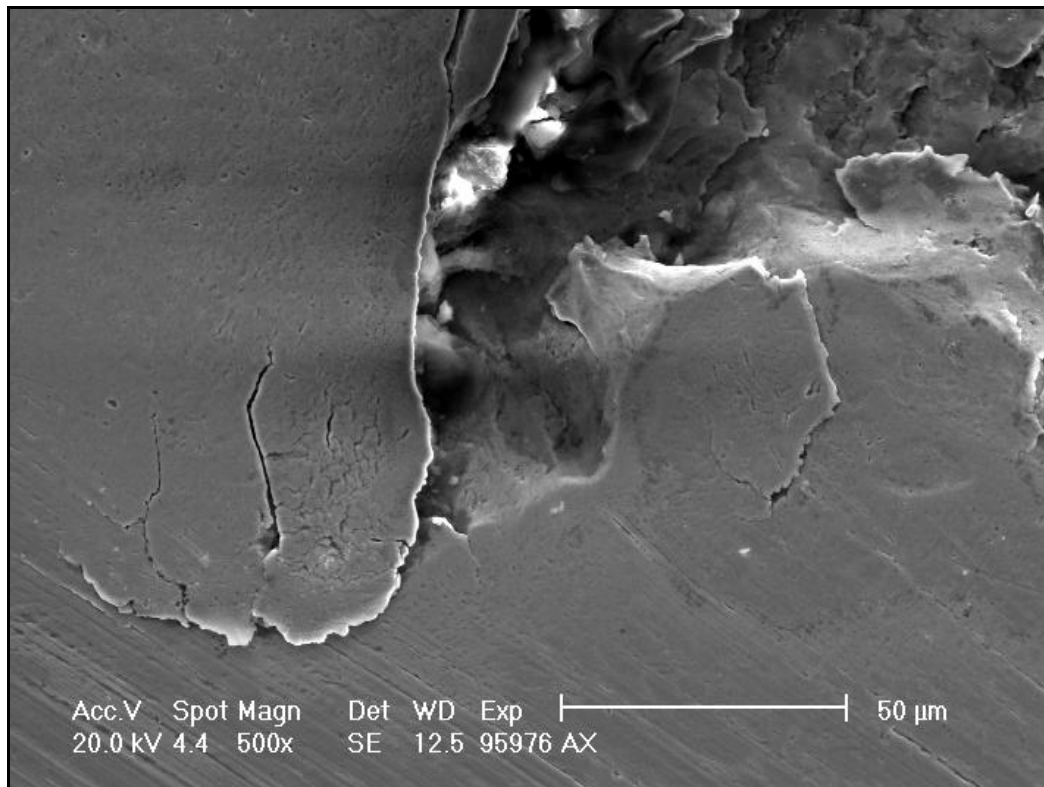
Obr.59a Počáteční stádium vzniku pittingu 100x zvětšeno



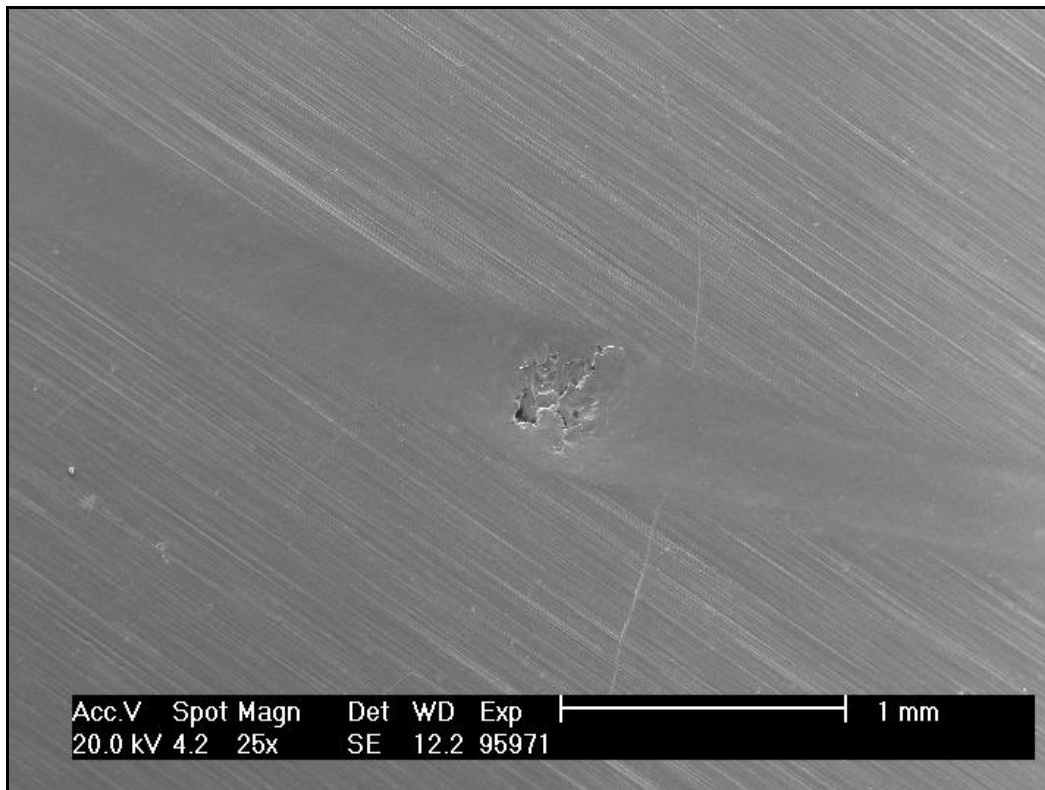
Obr.59b Počáteční stádium vzniku pittingu 1000x zvětšeno



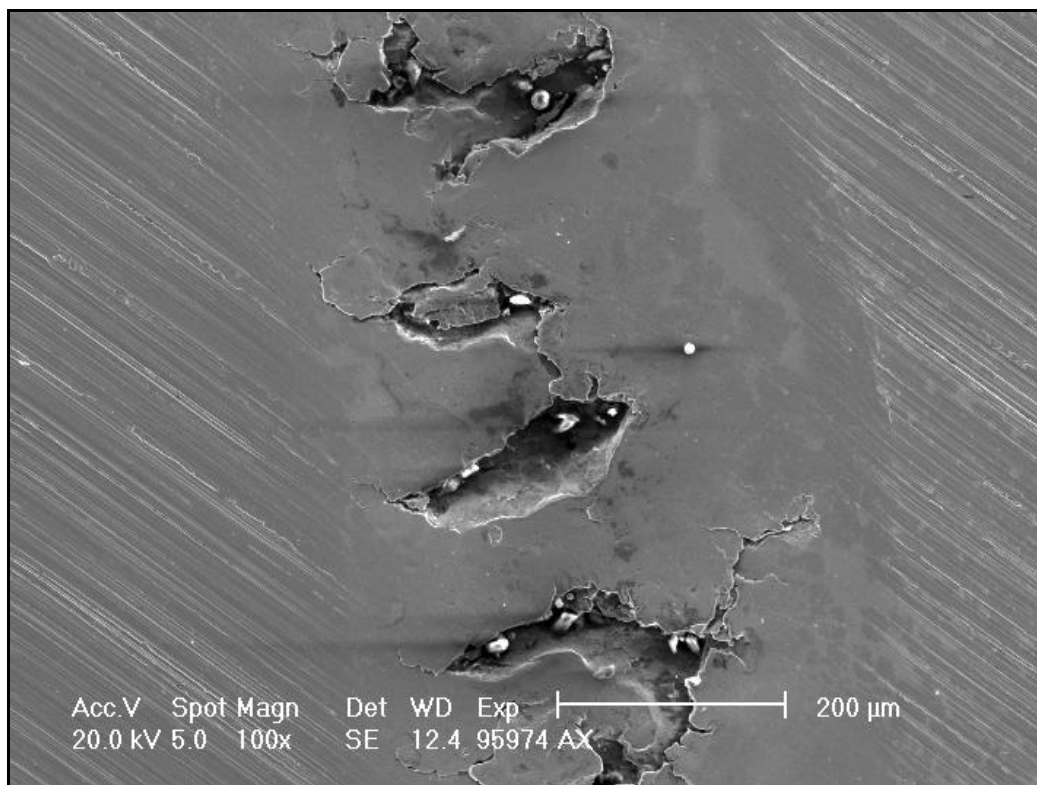
Obr. 60a Rozvinutý pitting 100x zvětšeno



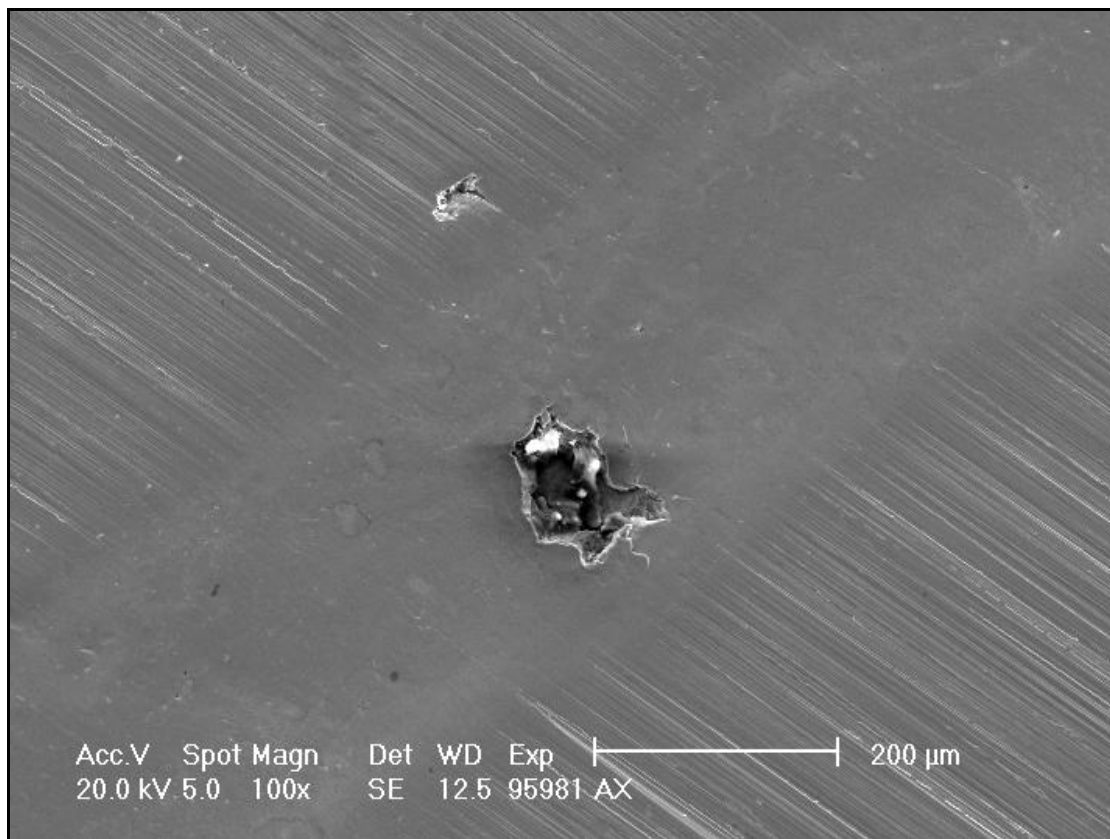
Obr. 60b Rozvinutý pitting 500x zvětšeno



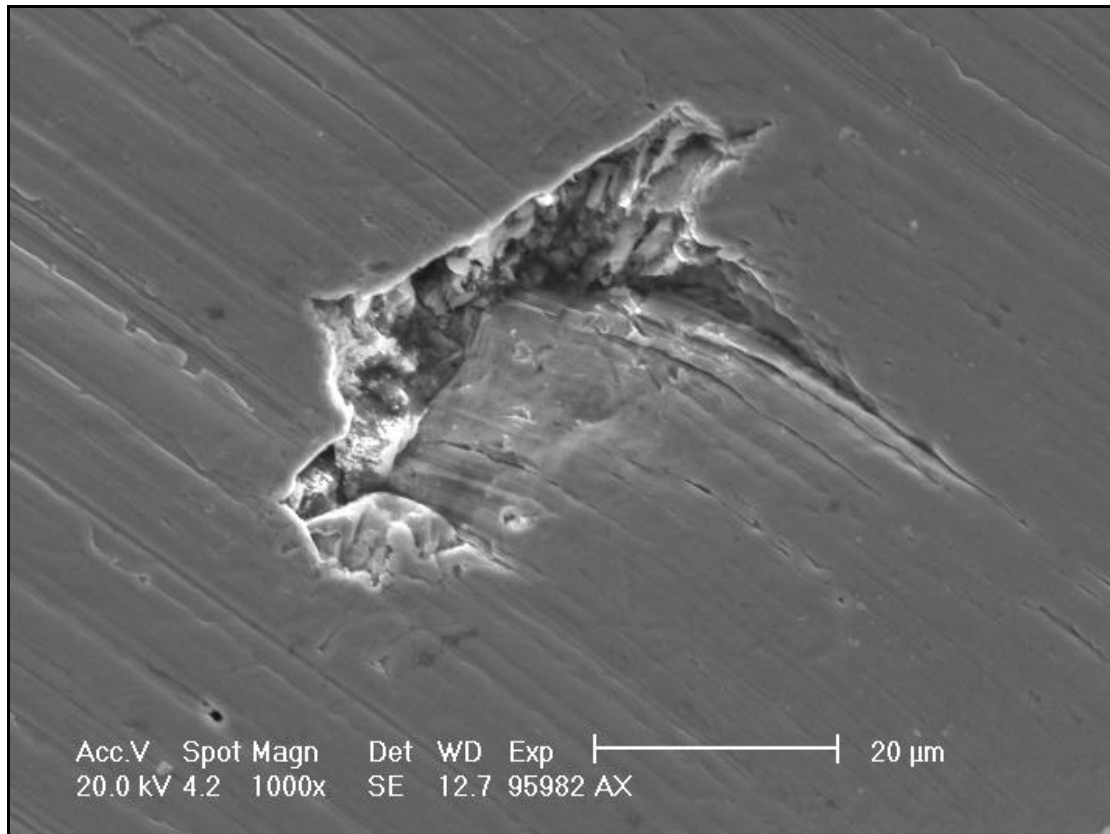
Obr. 61 Rozšíření stopy v místě defektu



Obr.62 Spalling- počáteční fáze



Obr.63a Pitting a defekt mimo kontaktní stopu 100x zvětšeno



Obr.63b Defekt mimo kontaktní stopu 1000x zvětšeno

### **Shrnutí**

Experiment prokázal významný kvalitativní posun při popisu chování kontaktních ploch v průběhu jejich poškozování pomocí AE. Z obr. 55 je zřejmé, že použití akustické emise při sledování experimentu přispěje zásadně k přesnému popisu dějů při kontaktním poškozování. Nejvýznamněji se změny kvality povrchu projeví v nárůstu emisních událostí v jednotlivých hladinách. Ostatní sledované parametry zaznamenají změny až ve stadiu vzniku rozvinutého poškozování /teplota, vibrace/

## **6.5 Návrh metodiky pro identifikaci poškozování axiálních ložisek s využitím metody akustické emise**

Cílem metodiky je zdokumentování postupu přípravy zkoušek, vlastního zkoušení axiálních ložisek a návrhu analýzy získaných dat. Metodika má sloužit ke standardizování metody akustické emise k diagnostice axiálních ložisek při trvanlivostních zkouškách.

### **6.5.1 Příprava experimentu**

#### **Volba typu zkoušky**

Na volbě typu zkoušky závisí použití měřicí aparatury a jejího nastavení. Obecně lze rozčlenit zkoušení ložisek na stanicích Axmat do třech typů zkoušek:

**Trvanlivostní zkoušky** patří mezi standardně zavedené postupy jak stanovit životnost ložiska s 90% přesností. Při těchto zkouškách se vychází ze serie cca 20-ti ložisek. Trvanlivost ložiska lze rozdělit na trvanlivost vypočtenou (základní určena výpočtem) a trvanlivost skutečnou, která je dána dobou až do vzniku poškozování (pittingu).

**Zkrácené zkoušky vlivem změny vstupních parametrů.** Do této skupiny je možné zahrnout zkoušky ovlivněné vstupními podmínkami zkoušek. Mezi tyto podmínky patří zejména velikost a stálost zatížení ložiska. Z těchto důvodů se jeví jako nutnost možnost plynulé změny zatěžování.

**Zkoušky s uměle vytvořeným poškozením** jsou vhodným nástrojem pro analýzu vzniku a rozvoje poškozování. Tyto zkoušky přispívají k simulaci poškozování vzniklého v průmyslových podmínkách. Jednou ze specifických podmínek může být i změna geometrie styku valivých těles.

Volba typu zkoušky závisí na požadavcích objednatele z průmyslové praxe. Stanice jsou vybaveny pro testování ložisek standardně s náplní plastického maziva, s možností rozšíření na systém mazání prostřednictvím cirkulace oleje.

### **Volba ložiska**

Při volbě ložiska je nutné předem znát rozměrové možnosti stanice, případně je nutná výroba upínacích prvků pro konkrétní typ ložiska. Dále je nutné zvolit vhodný způsob upnutí snímačů.

### **Příprava ložiska**

Před zkouškou je nutné provést kontrolu ložiska, zda nemá zjevnou výrobní vadu. V případě zkoušení ložiska bez náplně maziva od výrobce, je nutné ložisko vymýt a namazat adekvátním množstvím předepsaného plastického maziva. V případě olejového mazání je nutno zajistit požadované množství předepsaného maziva s certifikátem kvality

### **Uměle vytvořené poškození ložiska**

Pokud je ze strany zadavatele požadavek na zrychlenou zkoušku ložiska, je možné po dohodě přistoupit k vytvoření uměle definovaného poškození. Vytvoření takového poškození jako iniciátoru pro rozvoj kontaktní únavy (přirozené poškození) je předmětem zrychlených zkoušek. Poškození je možné vytvořit ještě před zahájením experimentální zkoušky, nebo až po záběhu ložiska, kdy následně vzniká možnost porovnání signálu před a po umělém poškození. Pro zrychlené zkoušky je tedy doporučeno provádět prvně záběh nepoškozeného ložiska.

### **Zatížení zkoušeného ložiska**

Velikost zatížení je závislá na typu a velikosti zkoušeného ložiska. Příslušné maximální dynamické zatížení je udáváno výrobcem a je uvedeno v katalogích výrobců. Zvolení velikosti zatížení závisí na požadované délce zkoušení.

### **Volba snímačů a jejich upevnění**

Snímání signálu AE a signálu vibrací je realizováno z povrchu ložiska a z upevňovacího přípravku. Mezi snímač AE a snímáný povrch je nutné nanést vhodné vazebné prostředí, doporučené jsou speciální AE pasty, či ultrazvukové gely. Upevnění snímače AE na povrchu stanice je realizováno prostřednictvím kyanoakrylátového lepidla, které má dobré vlastnosti pro přenos signálu AE, nebo prostřednictvím magnetického snímače, opět s přítomností vazebného prostředí mezi snímačem a povrchem stanice. Snímáný povrch musí být zbaven nečistot a zbytků maziva.

## **6.5.2 Experimentální aparatura**

### **Zkoušky životnosti axiálních ložisek**

Ústav konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně disponuje laboratořemi pro experimentální zkoušky ložisek a ložiskových materiálů (laboratoř kontaktní únavy).

Při vhodném nastavení otáček a zatěžovací síly včetně nadefinování jejího cyklování, mohou tyto zkoušky simulovat reálné provozní podmínky. Vedle dlouhodobých zkoušek je možné provádět také zrychlené zkoušky způsobené změnami vstupních podmínek, jako jsou zvýšení zatížení, změna geometrie stykových ploch, množství maziva, nebo uměle vytvořené poškození. Stanice Axmat jsou ovládány řídicím rozvaděčem, který umožňuje zapnutí a vypnutí stanic, zaznamenává dobu zkoušky, monitoruje hladiny vibrací a teploty a při překročení nastavených limit zkoušku automaticky zastaví.

### Popis experimentální stanice Axmat

Popis stanice Axmat je podrobně uveden v kap. 6.2

Snímání signálu AE je prováděno jak z povrchu zkoušeného ložiska skrze vlnovod, tak i z povrchu upínacího přípravku. Na povrchu jsou připevněny magnetické snímače nebo snímače MIDI přilepené kyano-akrylátovým lepidlem.

Zatížení na ložisko je vyvozováno hydraulickým válcem, zatěžující síla přechází přes *váleček* a *pouzdro*, v němž je ložisko umístěno. Mezi dotykové plochy snímačů a ložisko je nanášeno vazebné prostředí. [1]

### Popis použité aparatury

Pro vyhodnocování zkoušek je použit analyzátor: AE XEDO 4kanál. Karta analyzátoru XEDO obsahuje 10. bitový A/D převodník se vstupním rozsahem po zesílení  $\pm 2400 mV$ . Signál je zaznamenáván pomocí parametrů AE (Counts, RMS, Events), které jsou digitálně zpracovány v hradlovém poli. Současně je výstup z A/D převodníku přiveden na vstup signálového procesoru, kde je možné vzorkovat signál AE s frekvencemi 1, 2, 4 nebo 8 MHz. Frekvenční rozsah aparatury je vymezen od 100 kHz do 800 kHz.

Snímače AE je možné použít v celé řadě nabízených položek, která je dostupná na stránkách výrobce (DAKEL). Pro zaznamenávání signálu AE je využíván software *Daemon*, pro vyhodnocování časových průběhů signálu software *Daeshow* a pokročilé analýzy zejména ve frekvenční je vhodné řešit v prostředí *Matlab*.

## 6.5.3 Realizace zkoušky

### Příprava a nastavení měření AE

Zařízení použité při měření musí být kalibrováno dle EN 13477-2 a výsledky kalibrace musí být zdokumentovány. Po zapojení všech prvků měřicího řetězce přichází ověření detekce signálů – ze snímačů a nastavení prahových hodnot měřených veličin. Detekce signálu souvisí s nastavením celkového zesílení a následně i prahů jednotlivých veličin. Pro ověření detekce signálu je doporučeno použít simulačního zdroje (Hsu-Nielsen-Source).

### Nastavení Counts

Nastavení hladiny šumu okolí do oblasti detekce první hladiny *Counts*. Tato mez se stanovuje před zapnutím zkoušky ložiska a je stanovena z důvodů porovnatelnosti hladin signálu šumu a signálu generovaným diagnostikovaným objektem. Mez detekce se nastavuje celkovým zesílením, přičemž v potaz je také

nutné vzít přítomnost předzesilovače obsaženého ve snímači, případně zapojení předzesilovače ke snímači, který ve většině případů dosahuje hodnoty 35 dB.

### **Detekce signálu**

Pro ověření detekce signálu je vhodné volit simulační zdroj (Hsu-Nielsen-Source). Ve sledovaném parametru *Counts* by měl být hit signálu AE zaznamenán všemi hladinami. Poloha zkouškové detekce signálu je závislá na komplexnosti stanice (průmyslového zkoušeného uzlu). Pokud je to možné, je vhodné volit místo detekce v blízkosti snímače AE, pro případ stanice je tomu povrch stanice a vlnod. Způsob provedení detekčního hitu je dán normou. Norma udává použití dvou velikostí tuhy 0,5mm a 0,35mm s tvrdostí 2H a délkou 3mm. [2, 3]

### **Count a Trendy**

*Count* a *Trendy* se obvykle nastavují kolem hodnot 150 % a 300 %. Je možné rovněž zvolit jiné meze, ale doporučuje se ponechat mezi nimi dvojnásobný rozdíl. Položky intervalu měření a průměrování je vhodné ponechat v základním nastavení.

### **Vzorkování**

Doporučené hodnoty *Rychlost*, *Paměť* a *Pretrigger* jsou zvoleny v závislosti na požadované délce a kvalitě vzorku a korespondují s algoritmem pro zpracování navzorkovaných událostí v prostředí *Matlab*. Periodu je nutné volit s ohledem na předpokládanou délku měření, při dlouhodobých zkouškách je nutné zvolit maximální možnou hodnotu (60 000 ms). Volba, kdy je vzorek navzorkován, závisí na *Nastavení Triggeru*, zde je doporučeno volit možnost *Prahový* a velikost adekvátní s nastavením detekce prahů hitů událostí AE (Události).

### **Detekce hitu**

Parametry určující začátek a konec detekce hitu události AE je možné nastavit na stejnou velikost, přičemž počáteční nastavení se doporučuje v rozmezí od 200 % do 300 % rozsahu a po spuštění zkoušky lze tyto prahy případně zkorigovat, aby nedocházelo k zahlcení, či k jejich nedostatečnému počtu.

### **Ukládání**

Do volby ukládání je doporučeno nastavit všechny sledované parametry AE.

## **6.5.4 Sběr dat a on-line analýza**

### **Měření AE: XEDO**

Podrobné ovládání programu Daemon je popsáno v manuálu, který je součástí instalace aplikace DAKEL na řídicím počítači. Před zahájením měření je nutné uložit konfiguraci do připraveného adresáře. Označení složky s daty je doporučeno volit jako *rok měsíc den* startu zkoušky (např. 20130726). Správně vytvořenou adresářovou strukturu a nově vytvořené soubory je dobré zkontrolovat v operačním systému. Před ztrátou dat vlivem náhlých výpadků el. energie, či jiných nepředvídatelných problémů, je žádoucí zvolit ukládání všech naměřených hodnot každou hodinu v nabídce *Pravidlo příponové strategie*.

### **Start zkoušky a analýza snímaných parametrů**

Samotné spuštění zkoušky je zahájeno až po volbě ukládání (manuál SW Daemon). Zatížení působící na ložisko je doporučeno aktivovat až po roztočení ložiska (startu stanice). V prvních minutách zkoušky je nutné zkontrolovat detekci a intenzitu sledovaných parametrů AE (hity událostí AE, počet Counts, eventuelně parametr RMS). V případě, že je některý parametr příliš utlumen, nebo je naopak signál zahlcen, musí být celkové zesílení signálu, nebo příslušný práh korigovány za chodu.

Kontrolní panel stanice je výhodné nastavit na citlivost 20 dB, aby bylo zaručeno vyvarování se zastavení stanice v případě náhlých výkmitů během rozjezdu. Nastavení citlivosti vypnutí stanice je zohledněno typem zkoušky (ovlivnění vstupními podmínkami zkoušky).

### **Kontrola snímaných parametrů**

Zvláště během dlouhodobých zkoušek je nutné periodicky kontrolovat snímané parametry a stav veškerého měřicího zařízení. V případě výpadků aparatury, či výskytu jiného problému, je nutné případnou část měřicího řetězce obnovit (restart). Periodické kontroly je nutné zaznamenávat buď elektronicky, nebo lépe do spisové podoby. Stejně tak je nutné zaznamenávat zjištěné problémy, nebo změny vstupních podmínek (zatěžující síla, změna mazání apod.) s údajem aktuálního času a celkové doby zkoušky (počítadlo kontrolního panelu).

### **Ukončení zkoušení**

Ukončení zkoušky je ovlivněno nastavením citlivosti vibračního snímače od kontrolního panelu. V případě překročení nastavené hodnoty je stanice vypnuta. Stejně tak je stanice vypnuta v případě zvýšené hodnoty teploty nad stanovenou mez. Pokud dojde k samovolnému vypnutí stanice, je nutné prostudovat záznam ze snímaných parametrů a ověřit nárůst signálu, či přítomnost náhlých energetických výkyvů. V případě, že se v záznamu neobjevuje nic výrazného, co by poukazovalo na přítomnost poruchy ložiska, a ani kontrola protočením ložiska ručně nevykazuje známky poškození, je přistoupeno k opětovnému spuštění a pokračování ve zkoušce. Náhodný výpadek může být způsoben neočekávanými vlivy, jako je: výpadek proudu, náhodný ráz způsobený vnějšími okolnostmi apod. Zde je tedy nutné dobře prostudovat historii záznamu AE a správně posoudit zda došlo k poškození ložiska. Pokud záznam obsahuje energetický nárůst, případně zvýšenou teplotu, je přistoupeno k zastavení ukládání snímaných parametrů, vyjmutí ložiska a jeho prohlídce.

### **Doplňkové měření**

Jako základní komparátor stavu ložiska lze použít speciální snímač vibrací a teploty od kontrolního panelu stanice a v případě překročení nastavených mezí je stanice automaticky vypnuta. Pro uchování historie zkoušky (záznamu) je žádoucí použít aparaturu umožňující kontinuální záznam sledovaných parametrů vibrací a teploty. Stanice Axmat je touto aparaturou vybavena a lze ji použít jako doplňkovou metodu pro posouzení stavu ložiska.

### 6.5.5 Vyhodnocení naměřených parametrů

Norma ČSN EN 13554 považuje za minimální výsledky zkoušky grafická znázornění: počet nespojitých signálů AE (hitů) v závislosti na čase (případně zatížení), dále zobrazení průběhu energie signálu AE, či jeho amplitudy v závislosti na čase (případně zatížení). Třetím požadavkem je lokalizace v případě, že ji je možné provést. Stanice Axmat neumožňuje lokalizaci zdroje emisních událostí dle detekce příchodu hitu události AE.

#### Vyhodnocení signálu AE v programu *DaeShow*

Parametry AE, které lze výhodně vyhodnotit v programu *DaeShow*, jsou následující: počet překmitů přes nastavené prahové úrovně *Counts*, energii signálu *RMS* a *Count* (ve dvou hladinách). Dalšími parametry jsou počet a vlastnosti hitů událostí AE (událostí), které lze výhodně filtrovat dle jejich vlastností. Tyto parametry lze zobrazit jak ve formě histogramu, tak i v součtové křivce. Analýza signálu ve frekvenční oblasti je v tomto programu značně obtížná a lze zobrazovat pouze jednotlivé události a ty vzájemně porovnávat.

#### Export a analýza signálu AE v prostředí *Matlab*

Program *DaeShow* umožňuje exportovat měření v podobě binárních dat. V dialogu lze vybrat požadovaná data pro časovou a frekvenční analýzu zaznamenaných hitů AE.

Pro zpracování digitalizovaného signálu v prostředí *Matlab* byly vyhledány a upraveny algoritmy obsažené ve třech M-filech (*bench*, *benchload*, *hdrload*).

#### Analýza vyhodnocení průběhu parametrů AE

Po vykreslení průběhů parametrů AE ve formě grafů, následuje detailní analýza signálu. Tato analýza spočívá v porovnávání záznamů z časové i frekvenční oblasti. V časové oblasti bylo ověřeno, že se průběh zkoušky skládá z několika základních etap.

První etapou je záběh ložiska - je to doba začínající prvním spuštěním ložiska a trvající po dobu, při kterém energie signálu AE dále rovnoměrně neklesá. Tato doba se liší v závislosti na podmínkách provozu, a proto ji nelze v provozních podmínkách přesně dopředu stanovit.

Druhou etapou zkoušky je ustálený stav, ve kterém se mohou začít objevovat energetické výkyvy signálu charakterizující změny probíhající vlivem kontaktní únavy. Tyto signály mohou přímo poukázat na změny s provozním stavem ložiska jako je problém s mazáním, zvýšené tření a vznik pittingu. Jaký charakter má průběh druhé etapy do jisté míry značně závisí na provozních podmínkách určujících samotnou délku zkoušky.

Třetí a poslední etapou zkoušky je nárůst signálu, který je identifikátorem prudkého zvýšení rozvoje poškození. V této etapě se mohou opakovaně vyskytovat i energetické výkyvy, avšak jsou souběžně doprovázeny stabilním nárůstem signálu. viz obr.55.

### 6.5.6 Analýza poškození

Výsledné poškození ložiska je možné detailněji zkoumat až po jeho demontáži. Prvním krokem je zbavení ložiska zbytku maziva např. technickým benzínem. Poté je ložisko rozebráno. Po detailní prohlídce kroužků a kuliček jsou vyznačena místa s poškozením a tato místa jsou podrobena zkoumání pod mikroskopem.

Výsledné poškození zdokumentované snímky, případně i analýzami chemického složení je nutné zkompletovat s technickou zprávou, která musí obsahovat hlavní položky zkoušení (datum, typové označení ložiska, druh mazání, zatížení a další potřebné údaje). Pod hlavičkou s hl. hodnotami následuje zapsaný průběh zkoušení obsahující všechny změny vstupních parametrů (výpadek, změna zatížení, atd.) a pravidelné kontroly stavu měřicího zařízení s udanou aktuální dobou zkoušky. Takto ucelený a souvislý dokument je doplněn rozbohem grafických výsledků zkoušky a tvoří výslednou zprávu zkoušky.

## 8 ZÁVĚR

V práci jsou uvedeny vybrané informace z problematiky experimentálního testování materiálů ložisek. Prostudovaná aktuální literatura byla zaměřena především na popis způsobů zkoušení a vyhodnocování odolnosti ložiskových materiálů proti kontaktní únavě metodou AE a vibračními metodami. Je popsán způsob vyhodnocování záběhu a počátku poškození. Práce obsahuje informace o parametrech ovlivňujících odolnost materiálů proti kontaktní únavě.

Práce kromě úvodu do problematiky, stavu poznání s analýzou poznatků a vymezení cílů práce poskytuje také informace o výsledcích provedených experimentů.

Zkoušky prokázaly schopnost metody AE rozlišit rozdíly v chování kontaktních ploch při stejných zatěžovacích podmínkách, jen s dílčí změnou – např. aplikací aditiva. Rovněž byla prokázána schopnost využití metody AE při zkouškách axiálních ložisek.

Metoda sledování signálu AE při zkouškách kontaktní únavy při dynamickém zatěžování poskytuje velmi podrobné údaje o chování zkušebního uzlu. Při vyhodnocení signálu AE patrné významné změny v počtu emisních událostí v závislosti na hodnotě kontaktního napětí. Zároveň je znatelný rozdíl v emisní odezvě při různých hodnotách kontaktního napětí. Zajímavé je i pozorování celkových trendů v počtu emisních událostí, zvláště v prodlevách při nižším kontaktním tlaku.

Pomocí experimentů byla prokázána citlivost sledování AE při dynamickém zatěžování, kde zejména parametr počet countů poskytuje spolehlivé informace o stavu kontaktních ploch.

Experiment prokázal významný kvalitativní posun při popisu chování kontaktních ploch v průběhu jejich poškozování pomocí AE. Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že použití akustické emise při sledování zkoušky přispěje zásadně k přesnému popisu dějů při kontaktním poškozování. Nejvýznamněji se změny kvality povrchu projeví v nárůstu emisních událostí v jednotlivých hladinách. Ostatní sledované parametry zaznamenají změny až ve stadiu vzniku rozvinutého poškození.

Na základě rešerše a výsledků zkoušek je navržena metoda pro plánování a vyhodnocení experimentů v oblasti kontaktní únavy.

Během realizace experimentů a jejich vyhodnocování se objevila celá řada námětů a témat pro další výzkum.

Cíle dizertační práce jsou splněny.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOPEC, B.; a kol. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, vydání první, CERM, s.r.o. Brno, 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
- [2] OTHSU, M. Source mechanism and waveform analysis of AE in concrete. In: *Journal Acous. Emiss.* 1, 1982, p 103.
- [3] WEAVER, D.L. Experimental studies of diffuse waves for source characterisation, In: *Journal Acous. Emiss.* 4, April 1985, p 54.
- [4] WARREN A.W.; GUO, Y.B Acoustic emission monitoring for rolling contact fatigue of superfinished ground surfaces .In: *International Journal of Fatigue*, Volume 29, Issue 4, April 2007, p. 603 - 614 .
- [5] GUO, Y.B.; DALE,.; SCHVACH, W. An experimental investigation of white layer on rolling contact fatigue using acoustic emission technique, In: *International Journal of Fatigue*, 27 , 2005 , p. 1051 – 1061.
- [6] GOHAR, R.; RAHNEJAT, H. Fundamentals of Tribology, *Imperial College Press*, 2008
- [7] ELFORJANI, M.; MBA, D. Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in slow speed rolling element bearing with acoustic emission. In: *Journal of vibration and acoustics-transactions of the ASME*. Volume: 130, Issue: 4, p. 14, ASME, USA, 2008, ISSN 1048-9002.
- [8] LOHR, M.; SPALTMANN, D.; BINKOWSKI, S.; SANTER, E. ; WOYDT, M. In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction In: *Wear* 260 (2006) p. 469–478
- [9] ALBERS, A.; SCHELL, J.; DICKERHOF, M.; HESSENAUER, B. Validation of AE-signals recorded with conventional Equipment using 3D-Scanning-Laser-Vibrometer, In *Int.Conf.on EWGAE 2010* Vienna, 2010
- [10] VALLEN H.; VALLEN J.; THENIKL T. New developments in the field of AE systems, sensors & software, In *Int.Conf.on EWGAE 2010* Vienna, 2010
- [11] VALLEN, J.; VALLEN, H. Latest improvements on Freeware AGU-Vallen-Wavelet, In *Int.Conf.on EWGAE 2010* Vienna, 2010
- [12] BARAT,.; V. BORODIN,.; Y. KUZMIN, A. Intelligent AE signal filtering methods. In *Int.Conf.on EWGAE 2010* Vienna, 2010
- [13] HORT, F.; MAZAL, P.; VLASIC, F. Monitoring of Acoustic Emission Signal of Loaded Axial Bearings In *Int.Conf.on EWGAE 2010* Vienna, 2010
- [14] RAHMAN, M.Z.; OHBA, H.; YAMAMOTO, T.; YOSHIOKA, T. A study on incipient damage monitoring in rolling contact fatigue process using acoustic emission. In: *TRIBOLOGY TRANSACTIONS*, Volume: 51, Issue: 5, p. 543 – 551, STLE, JAPAN, 2008, ISSN 1040-2004
- [15] ROGERS, L. M. Detection of incipient damage in large rolling element bearings. In: *ADVANCED MATERIALS RESEARCH*, Volume: 13-14, Pages: 37 – 44, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND, 2006, online at <http://www.scientific.net>
- [16] OBRAZ J. ; Zkoušení materiálu ultrazvukem, *SNTL*, 1989
- [17] WERESZCZAK, A etct, Rolling contact fatigue of ceramics 2006

- [18]ZHOU,J etct. Devise of the RCF test rig for Ceramic Bearing Ball by Design Methodology. In: Applied Mechanics and Materials, Volume: 44-47, Pages:1773-1776, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND,2011
- [19]ABDULLAH M. AL-GHAMD, MBA, D A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size. In. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 20, Issue 7, October 2006, Pages 1537-1571, ISSN 0888-3270
- [20]SAAD Al-DOSSARY, R.I. RAJA HAMZAH, D. MBA, Observations of changes in acoustic emission waveform for varying seeded defect sizes in a rolling element bearing, In. *Applied Acoustics*, Volume 70, Issue 1, January 2009, Pages 58-81, ISSN 0003-682X,
- [21]RAHMAN Z.; OHBA H.; YOSHIOKA T.; Takashi YAMAMOTO T, Incipient damage detection and its propagation monitoring of rolling contact fatigue by acoustic emission. In. *Tribology International*, Volume 42, Issue 6, June 2009, p. 807-815, ISSN 0301-679X,

**10. PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE**

MAZAL, P., DVOŘÁČEK, J., PETRÁŠ, J. Akustická emise při kontaktním zatěžování litiny s tepelně zpracovaným povrchem. In *Kvalita a spolehlivost' strojov.* Nitra, Slovenská poľnohospodárska univerzita. p. 112 - 115. ISBN 80-7137-37.

MAZAL, P.; PAZDERA, L.; DVOŘÁČEK, J. Application of acoustic emission method in contact damage identification. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS & PRODUCT TECHNOLOGY.* 2011. 41(1). p. 140 - 152. ISSN 0268-1900.

MAZAL, P., DVOŘÁČEK, J., PETRÁŠ, J. Rozvoj metody a techniky akustické emise v Ústavu konstruování VUT v Brně. In *38. konference KČMS.* Bratislava, Technická univerzita v Bratislavě. p. 113 - 116. ISBN 80-227-097.

PAZDERA, L.; MAZAL, P.; SMUTNÝ, J.; DVOŘÁČEK, J. Signal Analysis in Acoustic Emission Method Time Frequency Tools. In *9. Slovenska konferenca z mednarodno udeležbo "Uporaba sodobnih neporusitvenih metod v tehniki".* 2008. Slovinsko, Ljubljana, CIP. 2008. p. 13 - 22. ISBN 978-961-90610-6-0.

MAZAL, P.; DVOŘÁČEK, J.; ZYKOVÁ, L. The comparison of AE data acquisition at Axmat and Rmat contact fatigue testing stands. In *Defektoskopia 2007.* Bratislava, NDB a SSNDT. 2007. p. 5 - 11. ISBN 978-80-968724-7-3.

DVOŘÁČEK, J., PETRÁŠ, J. The phase of contact damage and its description by help of acoustic emission. In *EWGAE 2000 24th European conference on Acoustic Emission Testing.* Senlis, Francie, CETIM. p. 119 - 123. ISBN 2-85400-496-5.

DVOŘÁČEK, J., MAZAL, P. Zkušenosti se sledováním akustické emise v laboratořích Ústavu konstruování VUT FSI Brno. In *Využitie akustických metód pri hodnotení vlastností materiálov 2000.* Žilina -SR, EDIS. p. 9 - 12. ISBN 80-7100-730-7.

*Insight GB – (IF) – Bearings diagnostics with help of AE - v procesu přípravy*

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b>	Podélná vlna	8
<b>Obr. 2</b>	Příčná vlna	9
<b>Obr. 3</b>	Povrchová vlna	9
<b>Obr. 4</b>	Relativní rychlosti šíření p příčné vlny k podélné a povrchové k podélné v závislosti na Poissonově čísle $\nu$ .	10
<b>Obr. 5</b>	Uspořádání experimentálního zařízení [4]	11
<b>Obr. 6</b>	AE amplituda vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	12
<b>Obr. 7</b>	AE RMS vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	12
<b>Obr. 8</b>	AE counts vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	13
<b>Obr. 9</b>	AE frekvence vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	13
<b>Obr. 10</b>	Schéma RCF testovací stanice se snímačem AE s parametry zkoušky [5]	14
<b>Obr. 11</b>	Parametr AE energie vs. čas/cykly/ [5]	15
<b>Obr. 12</b>	Parametr AE counts vs. čas/cykly/ [5]	15
<b>Obr. 13</b>	Parametr AE RMS vs. čas/cykly/ [5]	16
<b>Obr. 14</b>	Testovací stanice s detaily jednotlivých částí. [7]	17
<b>Obr. 15</b>	Průběh zkoušky se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [7]	18
<b>Obr. 16</b>	Výsledné poškození testovaného kroužku [7]	19
<b>Obr. 17</b>	Experimentální zařízení pro zjišťování opotřebení [8]	20
<b>Obr. 18</b>	Výsledky zkoušky	21
<b>Obr. 19</b>	Fotografie zkušebního zařízení s detailem zkušebního uzlu a schématem experimentu[9]	22
<b>Obr. 20</b>	Porovnání spekter získaných laserovým vibrometrem a piezoelektrickým snímačem[9]	22
<b>Obr. 21</b>	Spektrogram poškozeného valivého elementu a kluzného ložiska se smíšeným třením[9]	23
<b>Obr. 22</b>	Testovací zařízení[19]	23
<b>Obr. 23</b>	Časová odezva signálu AE pro nepoškozené ložisko (N) a málo poškozené ložisko (SD) [19]	24
<b>Obr. 24</b>	Časová odezva signálu vibrací pro nepoškozené ložisko (N) a málo poškozené ložisko (SD) [19]	24
<b>Obr. 25</b>	AE energie pro různé zatížení a velikost poškození při konstantních otáčkách 1500 min <sup>-1</sup> [20]	25
<b>Obr. 26</b>	Přechodové rázy v signálu AE při průchodu poškození (vnější kroužek, 300 RPM) [20]	26
<b>Obr. 27</b>	Vztah mezi počtem „countů“ AE a rozvojem poškození kontaktního povrchu od iniciace trhliny[20]	27
<b>Obr. 28</b>	Základní principy RCF testovacích systémů[17]	31
<b>Obr. 29</b>	Funkční diagram stanice RCF[18]	32
<b>Obr. 30</b>	Rozklad možných variant zkušební stanice[18]	32
<b>Obr. 31</b>	Matrice možných řešení[18]	32
<b>Obr. 32</b>	Hodnotící tabulka	33
<b>Obr. 33</b>	Stanice Axmat - blokové schéma	34

<b>Obr. 34</b>	Stanice Axmat v laboratoři kontaktní únavy ústavu konstruování FSI VUT v Brně	34
<b>Obr. 35</b>	Zkušební uzel stanice Axmat	35
<b>Obr. 36</b>	Analyzátory akustické emise	37
<b>Obr. 37</b>	Analyzátory akustické emise XEDO	37
<b>Obr. 38</b>	Zjednodušená zařízení pro detekci kontaktního poškození	38
<b>Obr. 39</b>	Přístroj pro kontinuální záznam signálu AE – Dakel IPL	38
<b>Obr. 40</b>	Zkušební uzel Axmat při zkouškách axiálních ložisek	39
<b>Obr. 41</b>	Vybrané typy snímačů akustické emise	39
<b>Obr. 42</b>	Model stanice Axmat	41
<b>Obr. 43</b>	Model nástavby pro hydraulické zatěžování	41
<b>Obr. 44</b>	Nové víko stanice s připojovacím modulem	41
<b>Obr. 45</b>	Schéma hydraulického zatěžování	42
<b>Obr. 46</b>	Přístroj pro sledování vibrací	43
<b>Obr. 47</b>	Záznam signálu akustické emise při záběhu ložiska JTWT a Sachs	45
<b>Obr. 48</b>	Záznam signálu AE během zkoušky u ložiska SACHS (nahore) a JTWT (dole)	46
<b>Obr. 49</b>	Záznam zkoušky bez aditiva	48
<b>Obr. 50</b>	Záznam zkoušky s aditivem	48
<b>Obr. 51</b>	Intenzita signálu v závislosti na čase	49
<b>Obr. 52</b>	Ukázka záznamu signálu AE získaného analyzátozem IPL	49
<b>Obr. 53</b>	Záznam zkoušky 4500/4000 MPa	51
<b>Obr. 54</b>	Záznam zkoušky 5000/4500 MPa	51
<b>Obr. 55</b>	Záznam všech sledovaných parametrů	52
<b>Obr. 56</b>	Vzorek Axmat po zkoušce	53
<b>Obr. 57</b>	Vzhled mikrostruktury vzorku – povrch	54
<b>Obr. 58</b>	Vzhled mikrostruktury vzorku – uvnitř	54
<b>Obr. 59a</b>	Počáteční stádium vzniku pittingu 100x zvětšeno	55
<b>Obr. 59b</b>	Počáteční stádium vzniku pittingu 1000x zvětšeno	55
<b>Obr. 60a</b>	Rozvinutý pitting 100x zvětšeno	56
<b>Obr. 60b</b>	Rozvinutý pitting 500x zvětšeno	56
<b>Obr. 61</b>	Rozšíření stopy v místě defektu	57
<b>Obr. 62</b>	Spalling- počáteční fáze	57
<b>Obr. 63a</b>	Pitting a defekt mimo kontaktní stopu 100x zvětšeno	58
<b>Obr. 63b</b>	Defekt mimo kontaktní stopu 1000x zvětšeno	58

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>AE</b>	-	akustická emise
<b>ASL</b>	-	průměrná hodnota amplitudy signálu akustické emise
<b>Axmat</b>	-	experimentální zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky
<b>Counts</b>	-	počty překmitů přes nastavené prahové úrovně
<b>Duration</b>	-	doba trvání události
<b>FFT</b>	-	Fast Fourier Transform
<b>Hits</b>	-	počet překmitů přes nastavené prahové úrovně
<b>Pitting</b>	-	kontaktní poškození povrchu
<b>Spalling</b>	-	vydrolení kontaktního povrchu
<b>c</b>	$\text{m.s}^{-1}$	rychlost šíření vlnění – index značí druh vlnění
<b>F</b>	N	radiální zatížení
<b>n</b>	$\text{ot.s}^{-1}$	rychlost otáčení hřídele
<b>RMS</b>	mV	střední kvadratická hodnota signálu
<b>R<sub>z</sub></b>	$\mu\text{m}$	drsnot povrchu určená největší výškou profilu
<b>E, G</b>	Pa	modul pružnosti v tahu resp. smyku
<b><math>\rho</math></b>	$\text{kg. m}^{-3}$	hustota [ $\text{kg/m}^3$ ],
<b>v</b>		Poissonovo číslo

