
**DIAGNOSTIKA KONTAKTNĚ ZATÍŽENÝCH POVRCHŮ S
VYUŽITÍM VYBRANÝCH POSTUPŮ ZPRACOVÁNÍ
SIGNÁLU AKUSTICKÉ EMISE**

Školitel: Doc.Ing. Pavel Mazal CSc

Ing. Jiří Dvořáček

OBSAH

1	ÚVOD	4
1.1	Historie aplikace metody akustické emise na Ústavu konstruování	4
1.2	Základní princip akustické emise	5
1.3	Aplikace AE při studiu chování ložiskových materiálů	8
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	12
2.1	Vymezení řešené problematiky	12
2.2	Předběžný cíl disertační práce	12
3	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	26
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	27
6	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	28
7	ZÁVĚR	34
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	35
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	36
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	36

1 ÚVOD

Defekty v zatěžovaných strukturách a materiálech mohou být detekovány řadou metod nedestruktivního testování - metody využívající rentgenové paprsky, napětřová 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 měření 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 uvolňování části materiálem akumulované energie. Uvolněná energie se transformuje na napětřový 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 napětřové 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].

1.1 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.

1.2 Základní princip akustické emise

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],

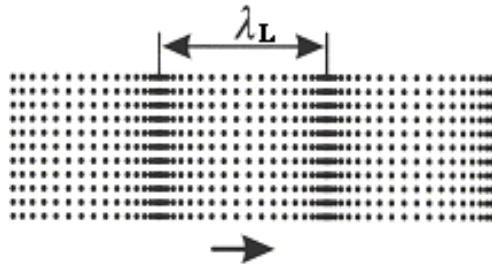
E, G – modul pružnosti v tahu resp. smyku [Pa],

ρ – hustota [kg/m^3],

ν – Poissonovo číslo [-].

Rychlost šíření podélného vlnění v pevném prostředí je

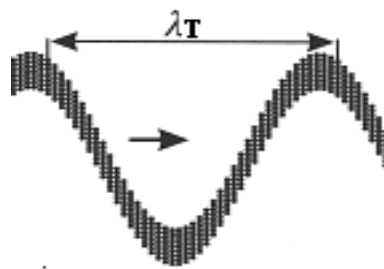
$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (1.1)$$



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

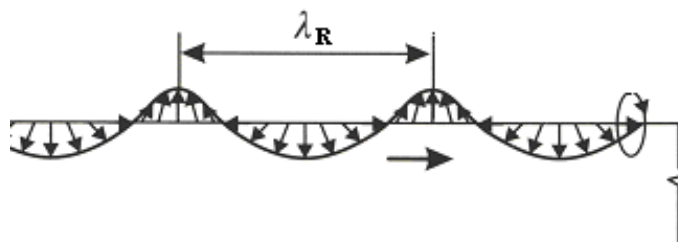
$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad (1.2)$$



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

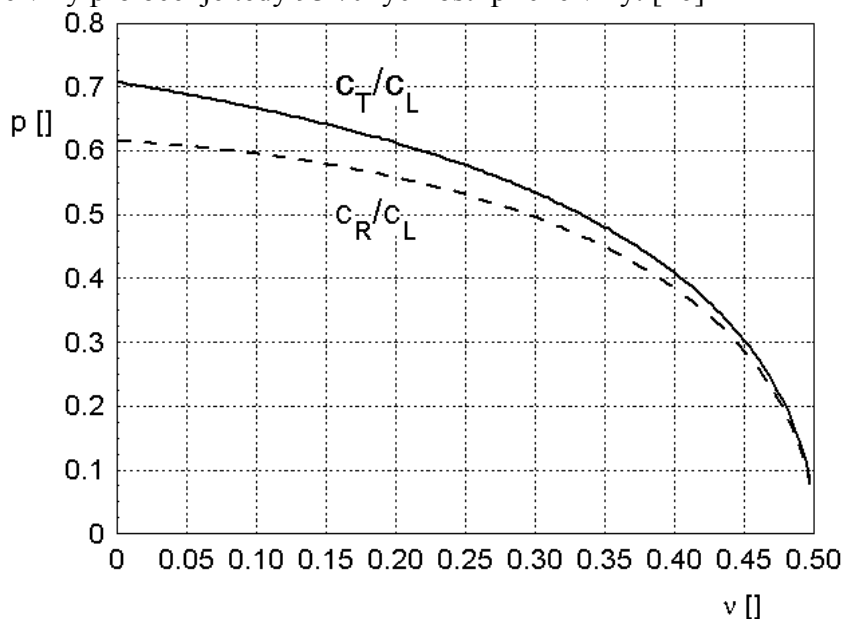
$$c_R \cong \frac{0,87 + 1,2 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.3)$$



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 longitudinální 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 (ν 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 ν .

Vztah mezi modulem pružnosti v tahu E a modulem pružnosti ve smyku G , je dán přes Poissonovo číslo ν 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.

1.3 Aplikace AE při studiu chování ložiskových materiálů

1.3

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 přeruší. 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 akustické emise.

-Analyzátor AE 10C (obr. 5a) 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. 5b) jsou moderní 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

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

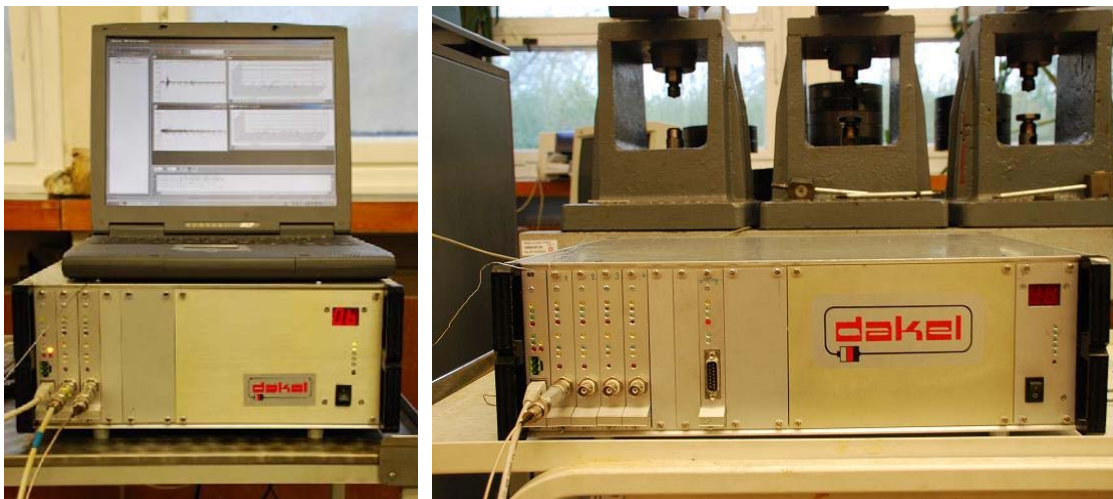
Univerzální měřicí a diagnostický systém DAKEL-XEDO[®] (obr. 6) byl vyvinut firmou ZD Rpety-Dakel. Systém XEDO byl navržen především pro průmyslové použití, ale již během zkušebních testů se dobře osvědčil i při laboratorních měřeních.



a) AE 10C

b) AED FTA 4 a FTA 16

Obr5. Analyzátoři akustické emise



a) 2 + 1 kanál

b) 4 + 1 kanál

Obr.6 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. 7) zaznamenává pouze parametry cnt, 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. 8).



Obr. 7 Zjednodušená zařízení pro detekci kontaktního poškození



Obr. 8 Přístroj pro kontinuální záznam signálu AE – Dakel IPL

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.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1 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.

2.2 Předběžný cíl disertační práce

Předběžným cílem je navrhnout systém sledování a vyhodnocování stavu kontaktně zatížených povrchů a zjišťování stupně jejich poškození metodou akustické emise. V současné době není znám jednotný systém vyhodnocování zkoušek odolnosti materiálů proti kontaktní únavě s využitím akustické emise. Stávající studie v této oblasti přinášejí poznatky z konkrétních aplikací, přičemž popis použitých metod je platný převážně jen pro tyto aplikace.

Výstupem řešení je několik dílčích cílů:

- nalezení parametru AE, který by co nejlépe charakterizoval vznikající poškození a doplnil tak metodiku aplikace AE pro zkoušky kontaktní únavy
- modifikace experimentální stanice Axmat s umístěním vlnovodů a snímacích čidel.
- zvolení vhodné měřicí aparatury vybavené software pro sledování AE, vibrací, teploty a zátěžné síly.
- návrh zkušebního uzlu pro zkoušky sestav axiálních ložisek.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

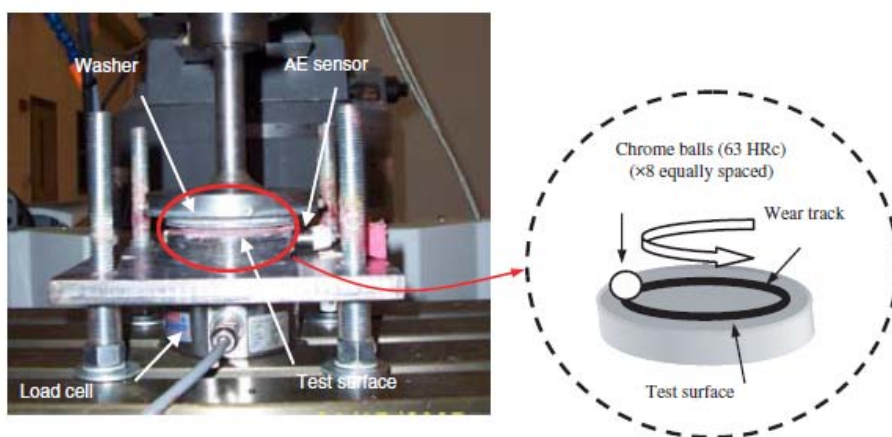
V této části práce je proveden rozbor několika odborných článků vztahujících se k řešené problematice.

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. 9, 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.



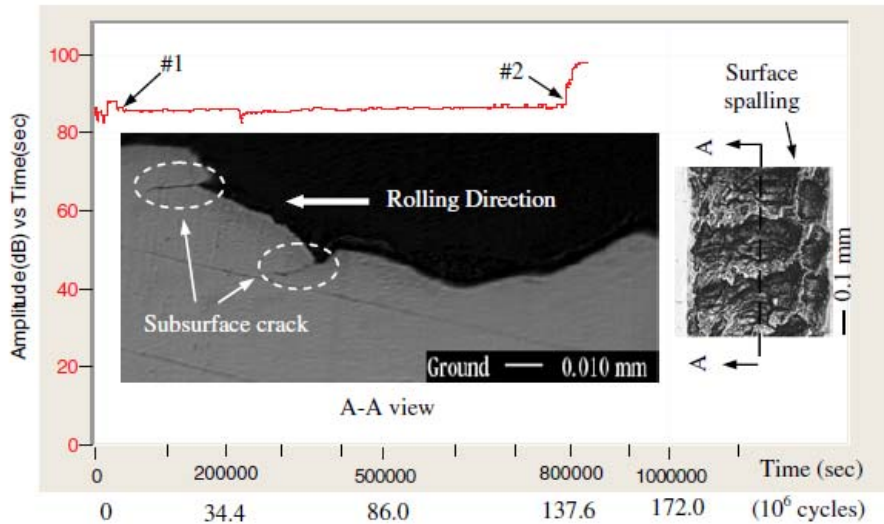
Obr. 9 Uspořádání experimentálního zařízení [4]

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.

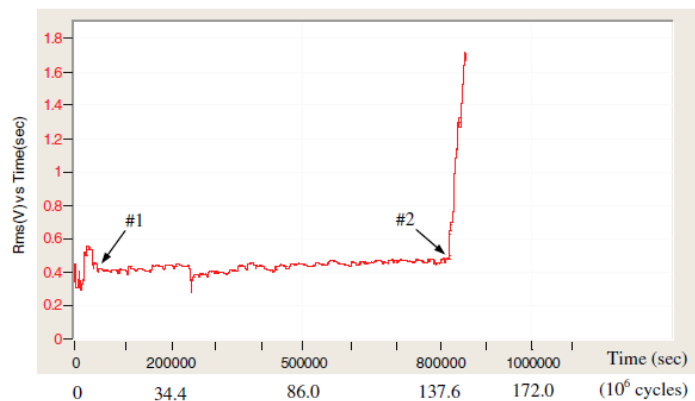
Výsledky

Signály AE byly velmi citlivé na kontaktní únavu což je zřejmé z obr. 10 až 13. V článku jsou grafy závislosti parametrů signálu pro 3 vzorky. Jako příklad uvádím zjištěné výsledky na vzorku G3 (obr.10 až 13). Mezi body 1 a 2 je signál AE relativně stabilní. Referenční bod 1 v každém grafu představuje konec fáze iniciace poškození a tzv. stabilizaci signálu. Kolísání signálu před bodem 1 je způsobeno

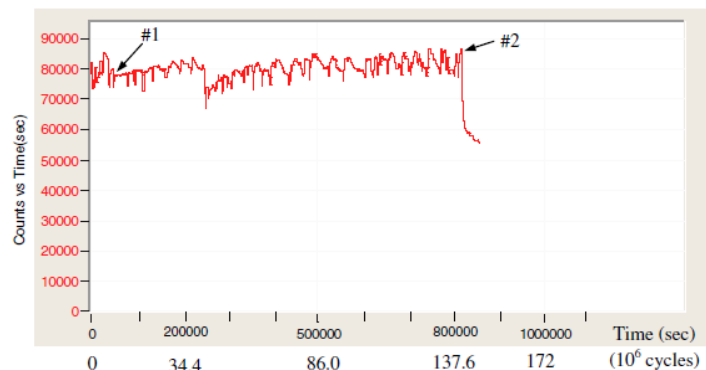
převládajícími elastickými deformacemi, při současném rozvoji plastických deformací. Bod 2 představuje čas, který charakterizuje tzv. katastrofickou událost, vzorek je poškozen a experiment je zastaven.



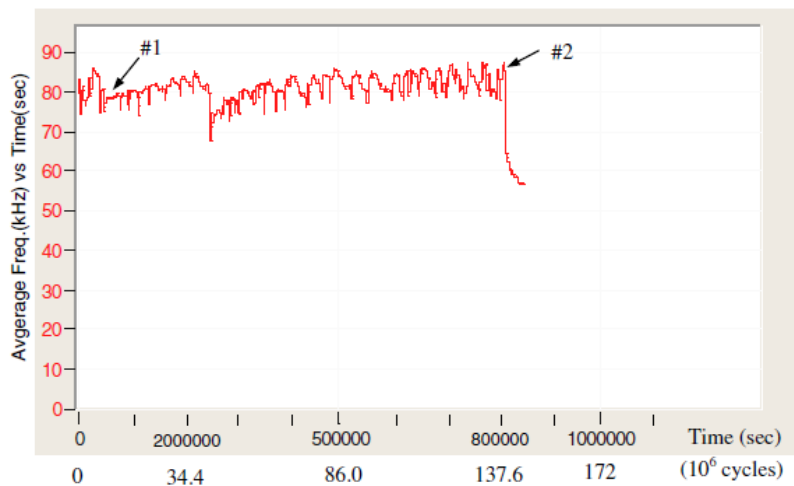
Obr.10 AE amplituda vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.11 AE RMS vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.12 AE counts vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]



Obr.13 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]

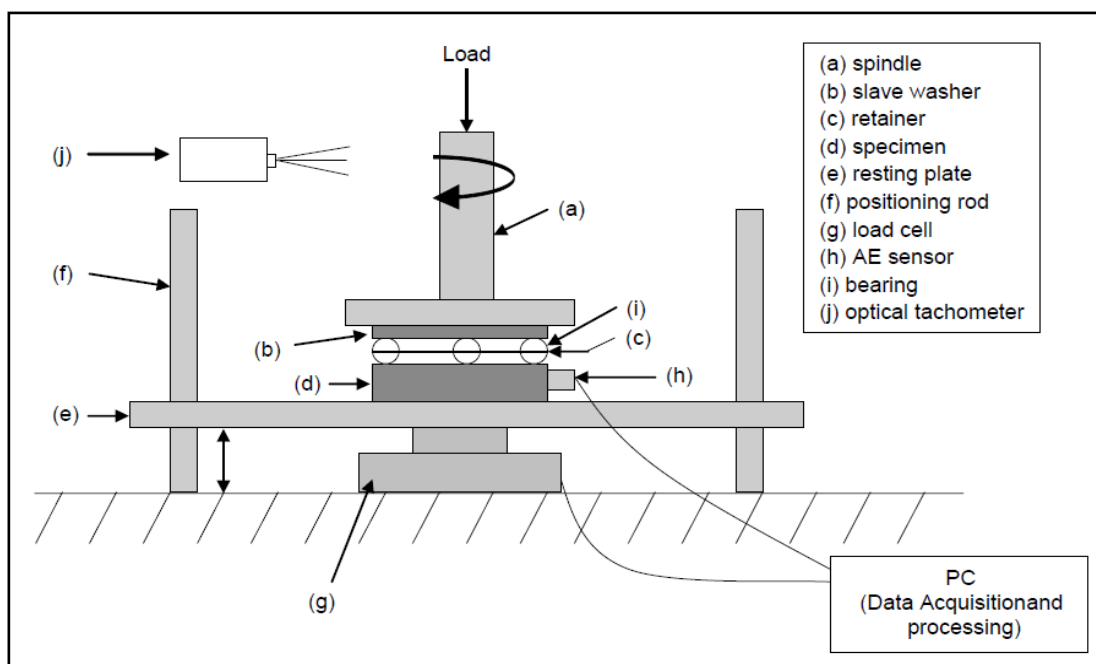
V článku autor popisuje význam vlastností povrchu (textura, mikrotvrdot, zbytková napětí, mikrostruktura) na odolnost proti kontaktní únavě. Speciálně se zaměřuje na vliv tzv. bílé vrstvy na únavový život. K zjišťování odolnosti povrchu je využito sledování signálu AE. Analyticky je stanoven Hertzův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

Experiment

Zkušební zařízení simuluje axiální valivé ložisko viz obr. 14. 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	



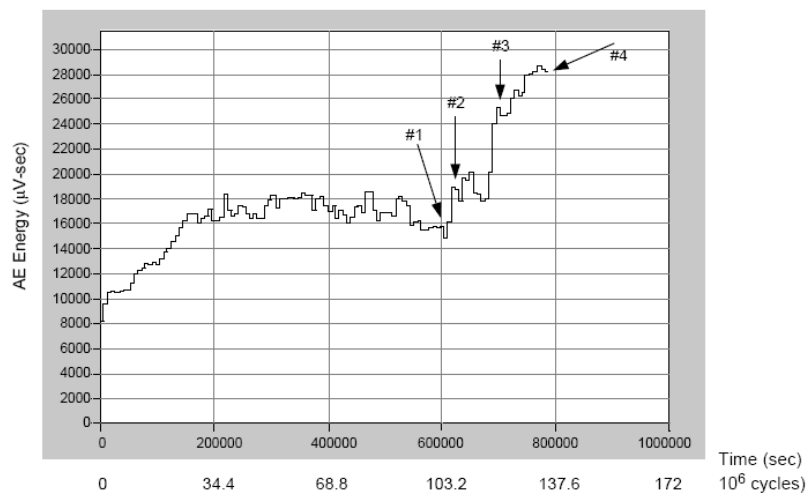
Obr.14 schéma RCF testovací stanice se snímačem AE s parametry zkoušky [5]

Výsledky:

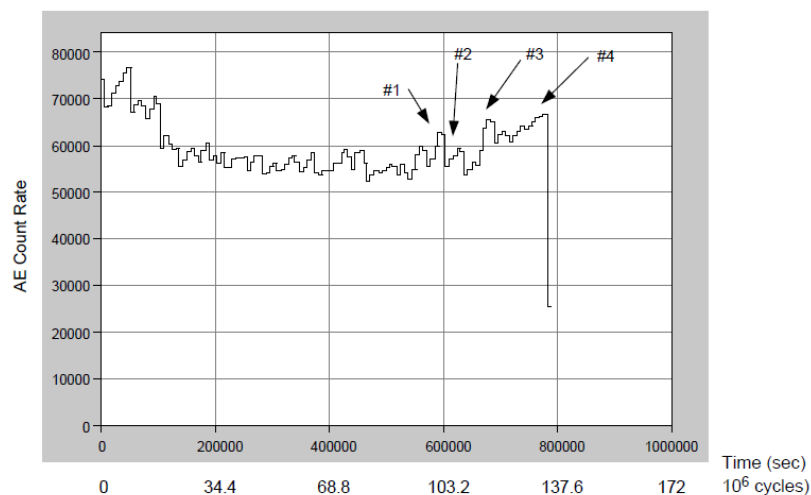
V grafech uvedených na obr. 15 až 17 jsou uvedeny závislosti jednotlivých parametrů signálu AE na čase. V grafech jsou patrné významné úseky vyznačené body 1 až 4. V bodu 1 končí relativně klidový stav.

SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

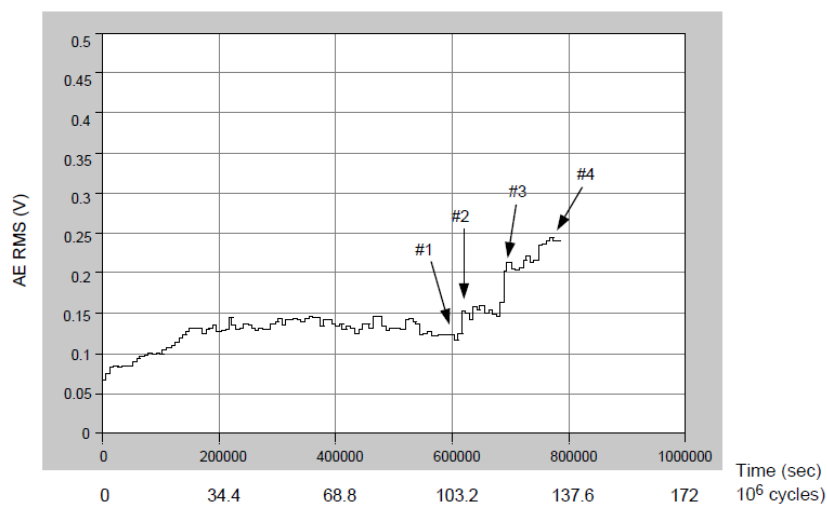
V úseku, který odpovídá bodu 2 a 3 dochází k šíření trhlin a vzniku pittingů. Oblast masivního rozvoje poškození (spallingu) je vymezena úsekem mezi body 3 a 4.



Obr.15 Parametr AE energie vs. čas/cykly/ [5]



Obr.16 Parametr AE counts vs. čas/cykly/ [5]



Obr.17 Parametr AE RMS vs. čas/cykly/ [5]

Závěr

Testovací systém je poměrně jednoduchý a nenáročný, důležité je nastavení prahové hodnoty signálu (threshold), 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.

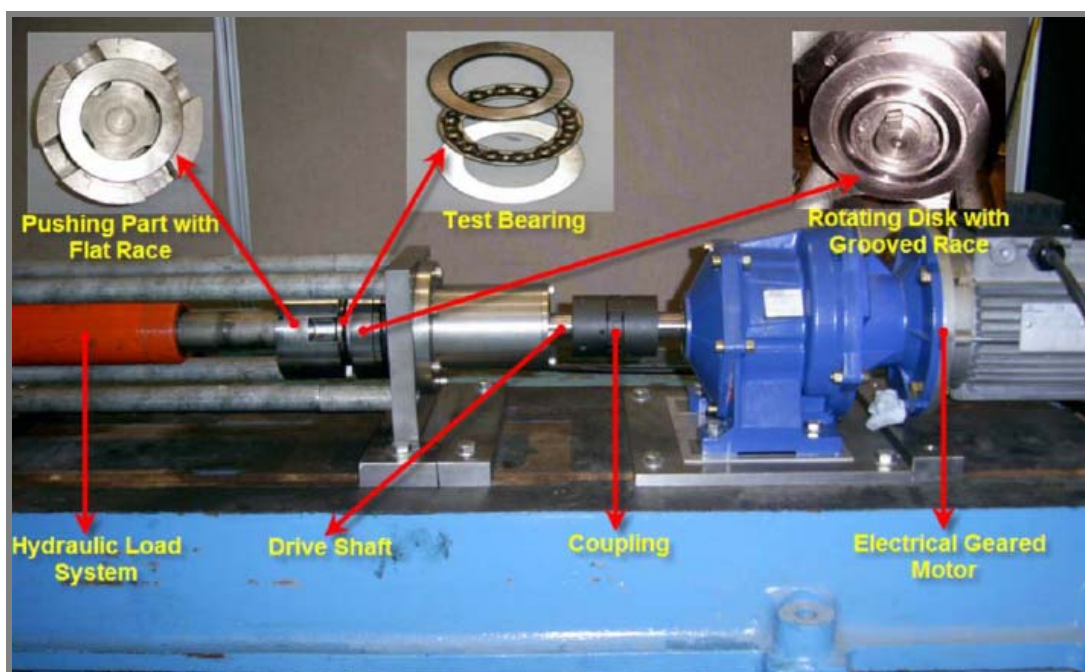
Vliv bílé vrstvy je rozporuplný, někteří autoři posuzují její vliv pozitivně, jiní naopak jej považují za zanedbatelný. Zde bylo zjištěno, že vzorky bez bílé vrstvy vykazují vyšší odolnost proti kontaktní únavě.

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. 18.



Obr. 18 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.

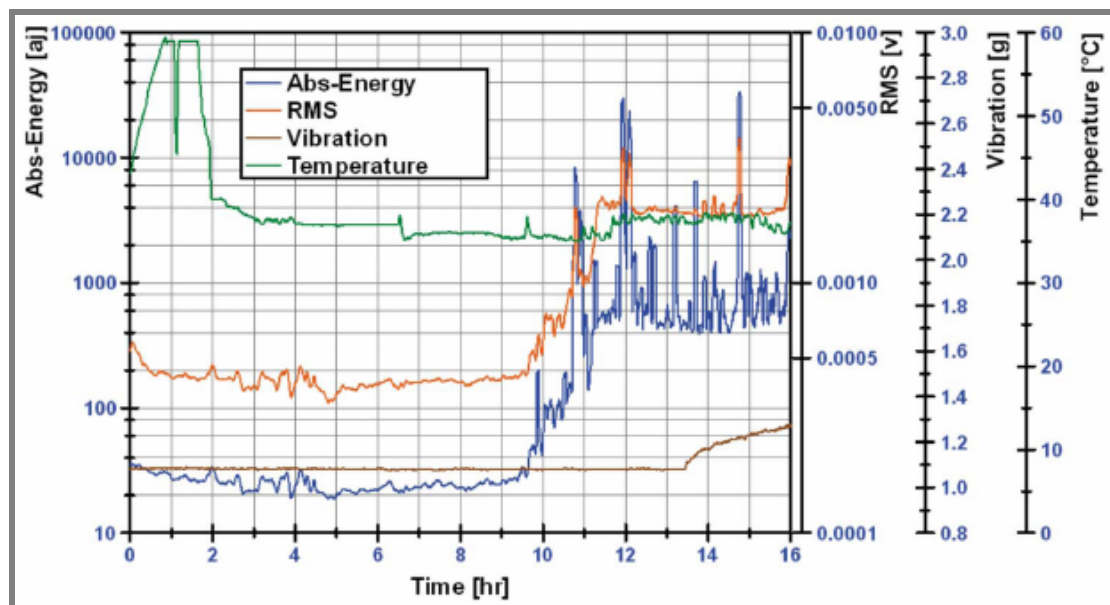
Výsledky

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. 19. 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. 19 Průběh zkoušky se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [7]

Obr. 20 zobrazuje vzniklé poškození po 16 hodinách měření, ve vyjeté dráze plochého kroužku jsou názorně vidět tři oblasti pittingu.



Obr. 20 Výsledné poškození testovaného kroužku [7]

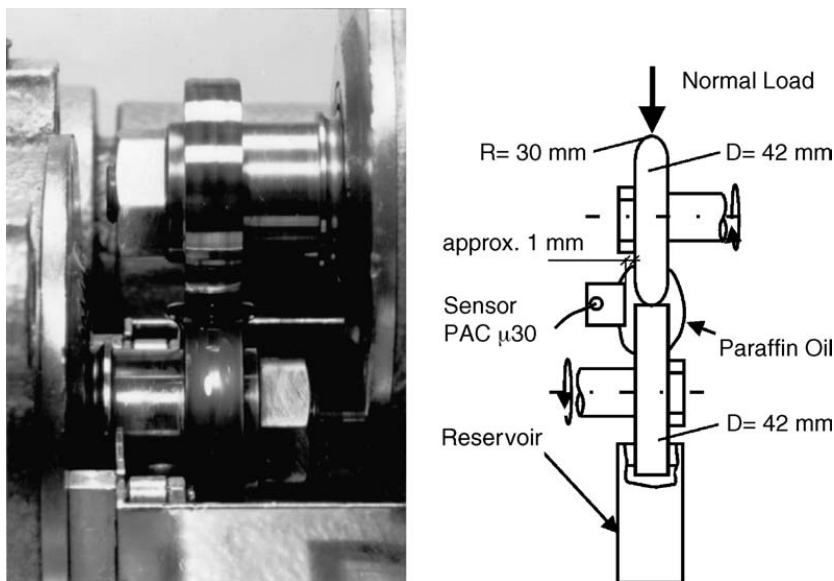
Závěr

Výkyvy signálu AE okolo 4. h zkoušky jsou připisovány vzniku prvních podvrchových 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.

strana
21

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. 21. 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. 21 Experimentální zařízení pro zjišťování opotřebení [8]

Výsledky

Při experimentu byl použit jako základní vyhodnocovací parametr energie signálu AE podle 3.2

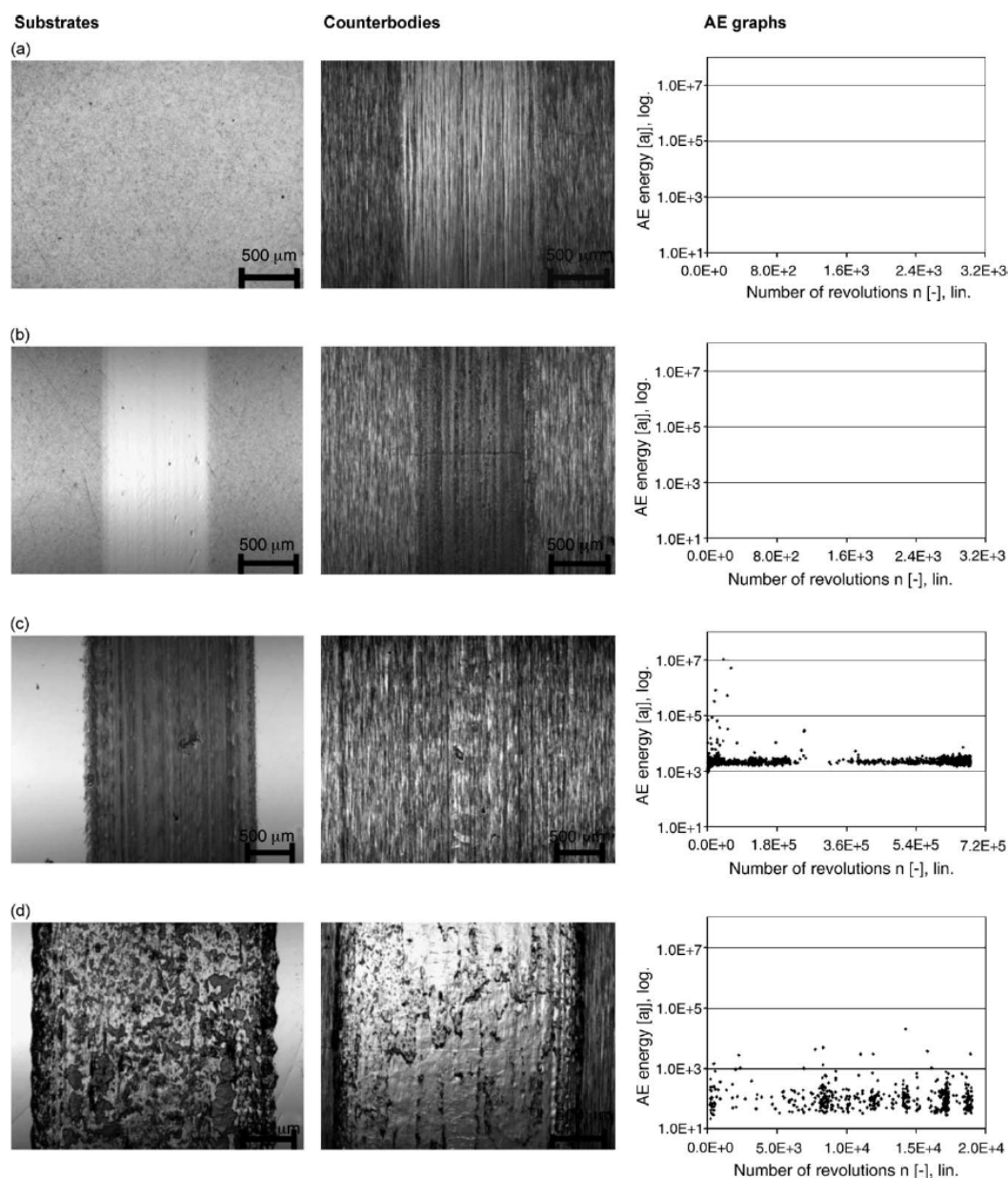
$$E = \frac{1}{R} \int_{t=0}^{t^*} A(t)^2 dt \quad (3.2)$$

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 mm^2

Zhodnocení

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



Obr. 22 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.

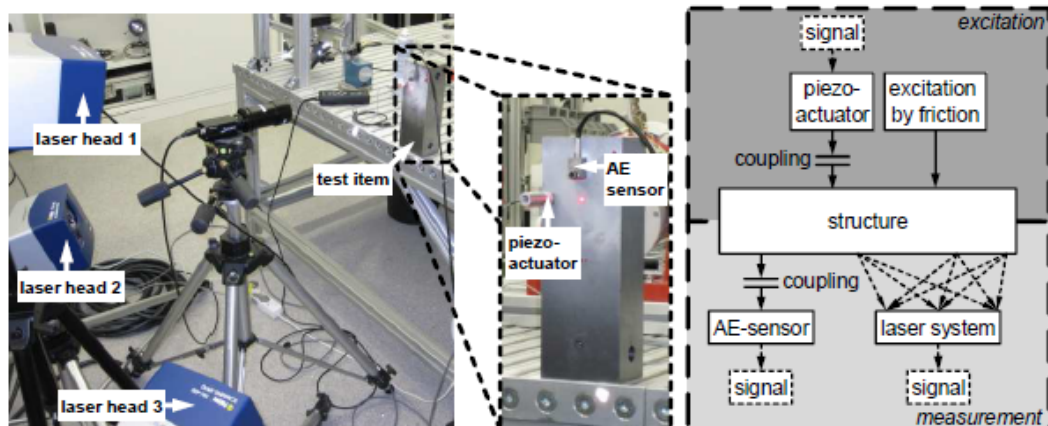
Nižší náklady zvláště u životnostních testů, protože není nutné přerušovat testy z důvodu vizuální kontroly zkoušených povrchů.

Umožňuje detekovat počátek poškození povrchu.

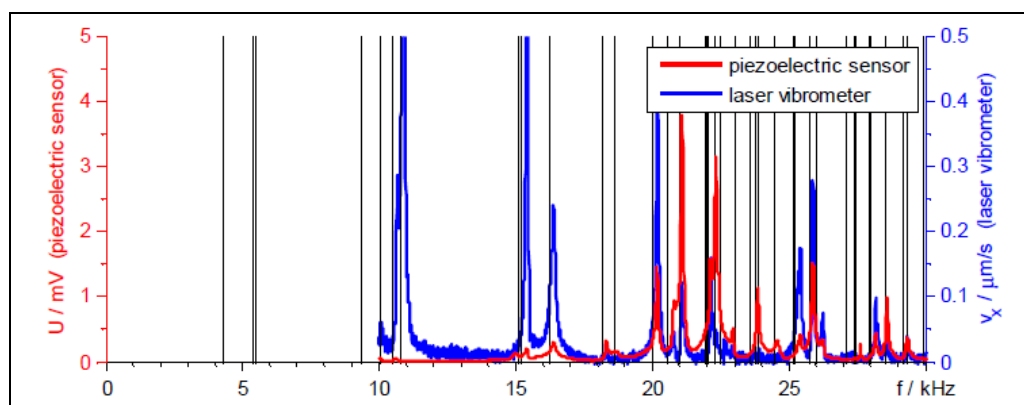
Potvrzuje tezi, že pomocí AE lze popsat vliv i zdánlivě nepodstatných změn z hlediska vlastností povrchu, případně provozních podmínek.

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.23



Obr.23. Fotografie zkušebního zařízení s detailem zkušebního uzlu a schématem experimentu[9]

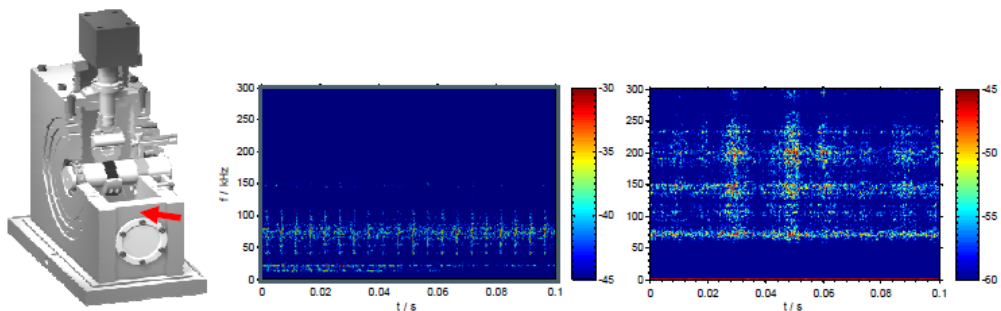


Obr.24 Porovnání spekter získaných laserovým vibrometrem a piezoelektrickým snímačem[9]

Z obr. 24 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. 25



Obr. 25 spektrogram poškozeného valivého elementu a kluzného ložiska se smíšeným třením[9]

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].

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Z provedené rešerše vyplývá, že metoda sledování akustické emise při zkouškách kontaktní únavy přináší výrazně přesnější popis jednotlivých fází procesu poškozování funkčních povrchů. Dokáže rovněž citlivě posoudit vlivy úprav povrchů na odolnost proti kontaktnímu poškozování, ať již ve fázi přípravy těchto povrchů, tak i ve fázi jejich konečné úpravy. AE je nedestruktivní metoda zkoušení, která dokáže detekovat aktivní vady v materiálu včetně určení místa vzniku této vady.

Výhody využití AE při monitorování zkoušek kontaktní únavy na zařízeních Axmat

- Vynikající odezva již na velmi malá poškození v porovnání s ostatními používanými diagnostickými metodami.
- Jako jeden z hlavních parametrů nejčastěji užívaný při popisu změn probíhajících v procesu poškozování se jeví RMS – střední kvadratická hodnota 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 parametrů jako jsou například RMS, ASL, či Count, které se používají v časové oblasti záznamu testovacích zkoušek

Nevýhody využití AE při monitorování zkoušek kontaktní únavy na zařízeních Axmat

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

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Cílem disertační práce je 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. Lze očekávat, že při řešení práce budou zjištěny nové poznatky při sledování únavového opotřebení zejména při režimech blížících se reálným provozním podmínkám např. bude možno provést zkoušky materiálů používaných na vačky zatěžované proměnlivě.

Dílčí cíle disertační práce

- 1) Zkušební zařízení – Modernizace zkušebního zařízení, návrh hydraulického způsobu zatěžování se snímáním zatěžné síly s možností předdefinování zatěžovacích cyklů
- 2) Měřicí vybavení - Výroba a ověření funkčnosti nových prvků (vlnovodů) pro vhodnost snímání zvolenou aparaturou (HW).
- 3) Spolupráce s dodavatelem měřicí aparatury na vývoji a modifikacích software pro snímání a vyhodnocování získaných dat.
- 4) Experimentální testování – Provedení ověřovacích experimentů na stanicích Axmat na klasických vzorcích a na axiálních ložiscích při stávajícím uspořádání zkušebního uzlu
- 5) Vývoj sady upínacích elementů pro rozšíření variability zkoušených typorozměrů ložisek

Výsledek – vývoj zkušebního zařízení s těmito parametry

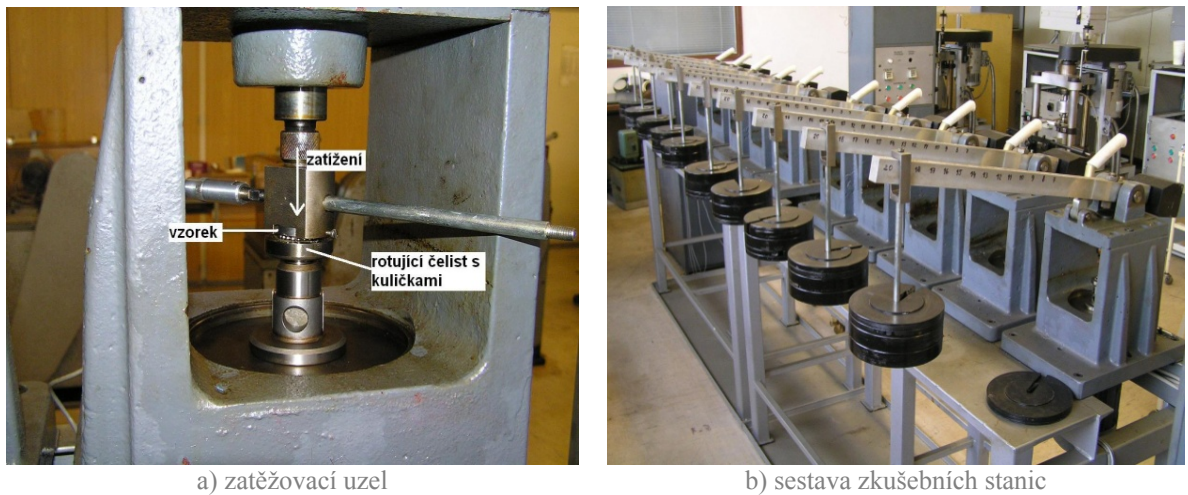
- Proměnlivé zatížení
- Proměnlivé otáčky
- Snímání AE, teploty, vibrací, zatížení, a otáček v průběhu experimentu
- Variabilita zkušebního uzlu

Přínos

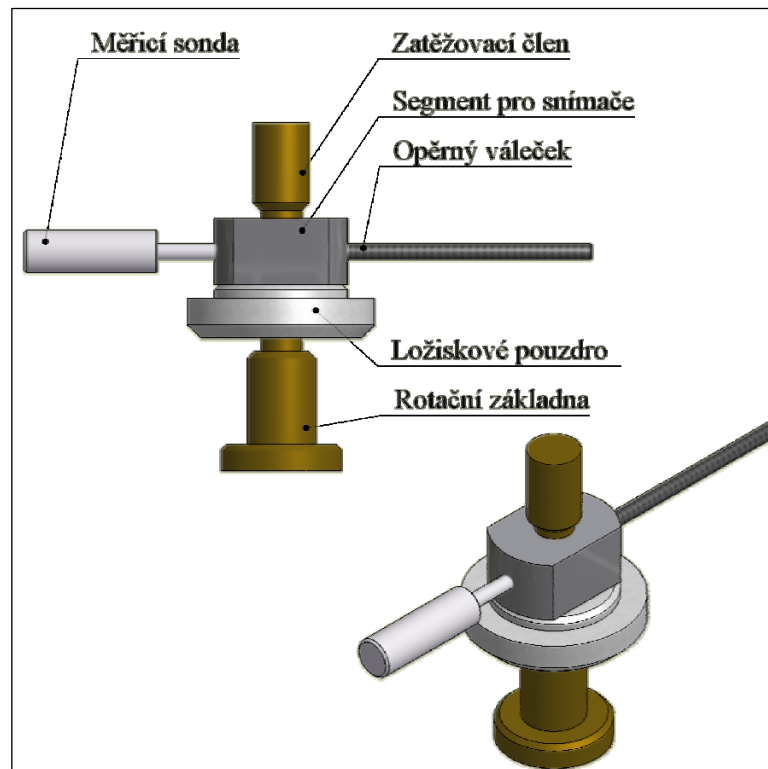
- Unikátní zařízení svého druhu
- Možnost zkoušení reálných funkčních uzlů
- Komplexní experimentální nástroj pro in-situ sledování experimentu
- Na základě získaných poznatků bude možné vypracovat postupy měření s obecnou platností

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době jsou splněny body 3 a 4, částečně 2 a 5.
Zkoušky jsou prováděny na stanicích Axmat v laboratořích kontaktní únavy ÚK.
Obr. 26.



Obr. 26 Stanice Axmat v laboratoři kontaktní únavy ústavu konstruování FSI VUT v Brně



Obr. 27 Zkušební uzel stanice Axmat.

Obr. 27 zobrazuje zkušební uzel experimentální testovací stanice Axmat, na které je možné testovat kruhové vzorky (nejrůznější materiály, nejčastěji však ložiskové materiály) a při použití vhodné úpravy uchycení i některé typy axiálně zatížených ložisek.

Souběžně probíhá spolupráce s firmou Viditech na modifikacích software určeného pro měření vibrací a teploty na stanicích Axmat, u kterého je nezbytné vypracovat možnosti vhodných výstupů získaných dat pro následné porovnávání s daty získanými metodou AE.

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 fy 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

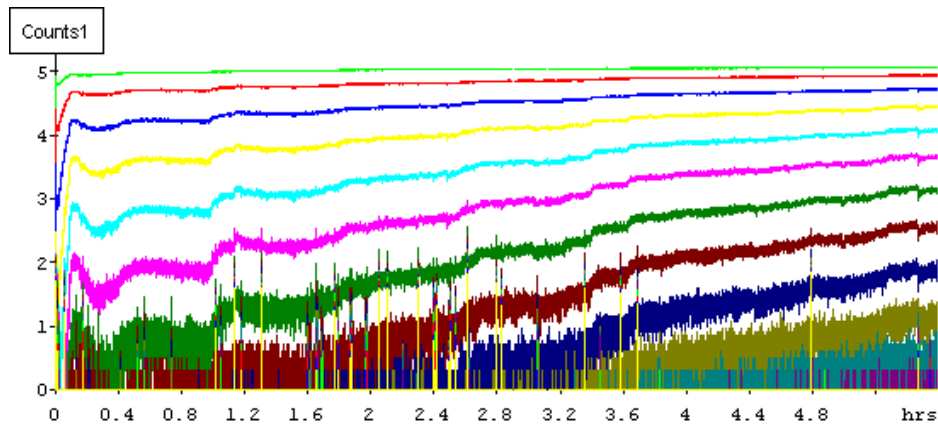
4. fáze Nová dvojice byla podrobena stejnému režimu jak ve 3. fázi s tím, že byly přehozeny zkušební uzly mezi dvěma stanicemi, aby se vyloučil jejich možný vliv na zkoušku

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

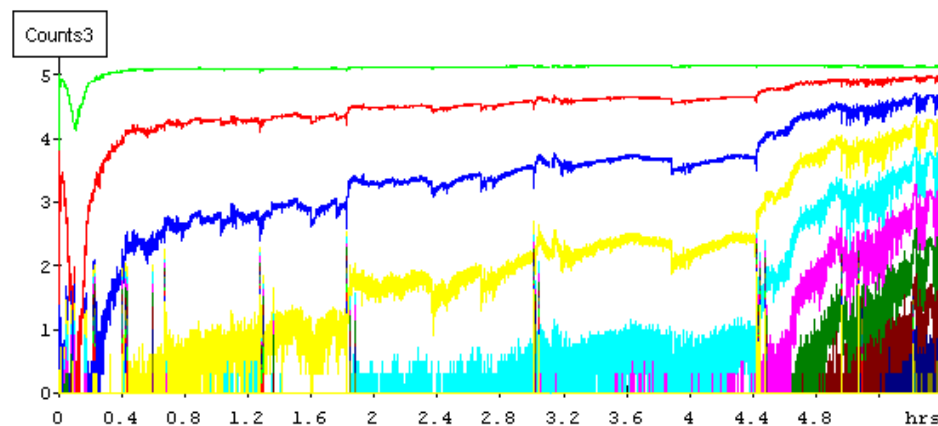
Závěry

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. 28



1.6.07 ložiska serie 2, záběhová část 1, stanice 4 - replika



1.6.07 ložiska serie 2, záběhová část 1, stanice 5 - originální

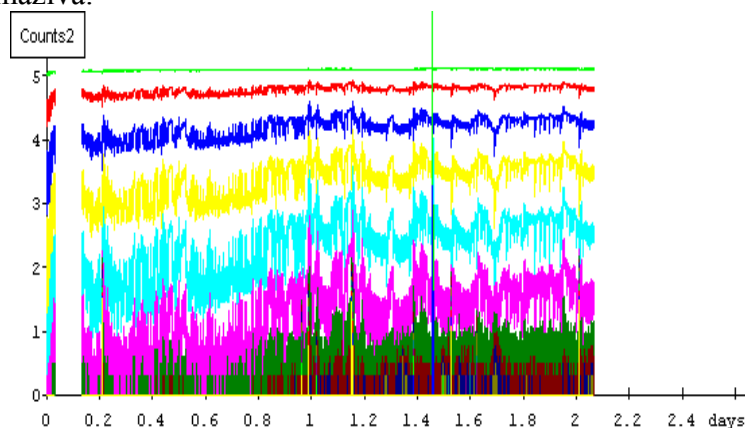
Obr.28 Záznam signálu akustické emise při záběhu ložiska JTWT a Sachs

2. fáze

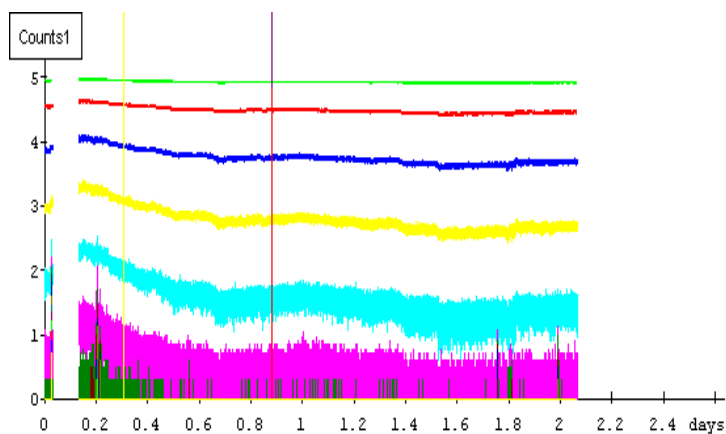
Při tomto režimu zkoušení se udržel rozdíl teplot, tzn. ložisko Sachs vykazovalo teplotu o cca 5 st. C vyšší. Maximální teplota byla naměřena na úrovni cca 95 stupňů. Lze konstatovat, že se ustálila i úroveň snímané akustické emise.(obr 29) Ložisko Sachs vykazovalo nižší úroveň signálu akustické emise, 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.



1.-3.6.07 ložisko 2 - originál, všechny hladiny, pokračování po záběhu



1.-3.6.07 ložisko 2 - replika, část 2, všechny hladiny (navazuje na záběh)

Obr. 29 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 fy 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 srovnatelné vlastnosti při zvolených režimech zkoušky.

Ložisko JTWT 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 st. C vyšší provozní teplotu

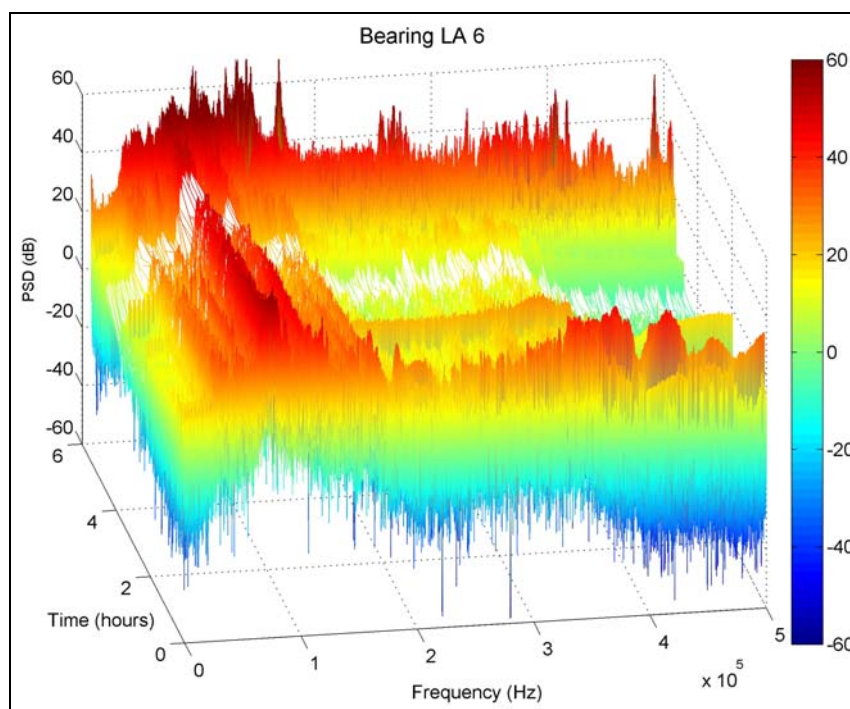
Poznámka

Pro přesné ověření funkce obou ložisek, by bylo nutné upravit zkušební stanice tak, aby simulovaly skutečný provozní režim tzn. zapínání a vypínání ložiska, proměnnou vypínací sílu apod.

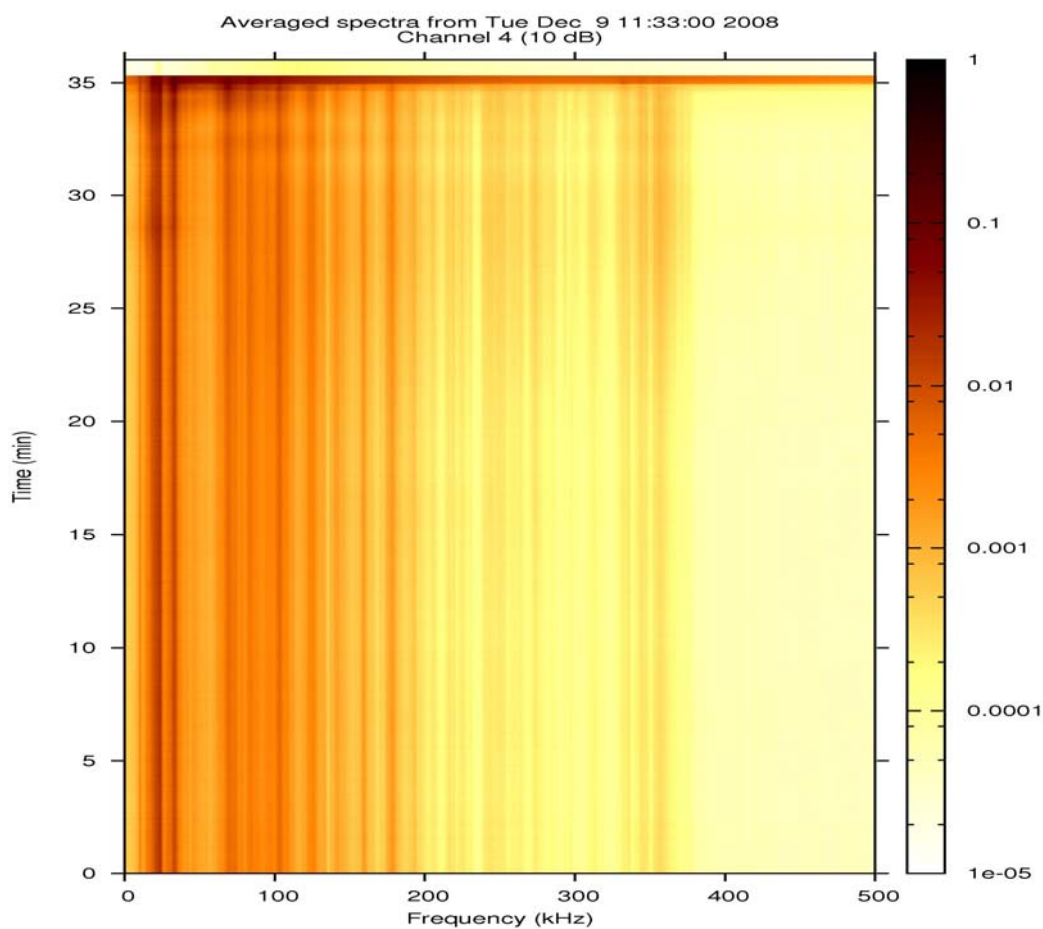
Zkoušky na vzorcích Axmat

Další experimenty probíhaly na klasických Axmatových vzorcích, kde byly získány zajímavé průběhy akustické emise, které budou dále vyhodnocovány.

Příklad základního záznamu zkoušky ložiska z analyzátoru IPL je na obr. 30, kde na ose x jsou frekvence signálu [kHz], na ose y je doba zkoušky [min] a míru intenzity signálu [dB] znázorňuje barevná škála. Tento konkrétní záznam neobsahuje počáteční záběh.



Obr.30 Intenzita signálu v závislosti na čase



Obr. 31 Ukázka záznamu signálu AE získaného analyzátozem IPL

Pokud provedeme řezy rovnoběžné s časovou osou, jsme schopni získat průběh určitých vybraných (například špičkových) frekvencí signálu v závislosti na čase průběhu zkoušky. Obr. 31.

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce popisuje 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 současném stavu řešení. Část cílů je již splněna a tím je dán předpoklad úspěšného vyřešení cíle disertační práce.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Podélná vlna	6
Obr. 2	Příčná vlna	6
Obr. 3	Povrchová vlna	7
Obr. 4	Relativní rychlosti šíření p příčné vlny k podélné a povrchové k podélné v závislosti na Poissonově čísle ν .	7
Obr. 5	Analyzátory akustické emise	10
Obr. 6	Analyzátory akustické emise XEDO	10
Obr. 7	Zjednodušená zařízení pro detekci kontaktního poškození	11
Obr. 8	Přístroj pro kontinuální záznam signálu AE – Dakel IPL	11
Obr. 9	Uspořádání experimentálního zařízení [4]	13
Obr. 10	AE amplituda vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	14
Obr. 11	AE RMS vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	14
Obr. 12	AE counts vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	14
Obr. 13	AE frekvence vs. čas/cykly/ u vzorku G3 [4]	15
Obr. 14	Schéma RCF testovací stanice se snímačem AE s parametry zkoušky [5]	16
Obr. 15	Parametr AE energie vs. čas/cykly/ [5]	17
Obr. 16	Parametr AE counts vs. čas/cykly/ [5]	17
Obr. 17	Parametr AE RMS vs. čas/cykly/ [5]	17
Obr. 18	Testovací stanice s detaily jednotlivých částí. [7]	19
Obr. 19	Průběh zkoušky se všemi sledovanými parametry v závislosti na čase [7]	20
Obr. 20	Výsledné poškození testovaného kroužku [7]	21
Obr. 21	Experimentální zařízení pro zjišťování opotřebení [8]	22
Obr. 22	Výsledky zkoušky	23
Obr. 23	Fotografie zkušebního zařízení s detailem zkušebního uzlu	24
Obr. 24	Porovnání spekter získaných laserovým vibrometrem a piezoelektrickým snímačem[9]	24
Obr. 25	Spektrogram poškozeného valivého elementu a kluzného ložiska se smíšeným třením[9]	25
Obr. 26	Stanice Axmat v laboratoři kontaktní únavy Ústavu konstruování FSI VUT v Brně	28
Obr. 27	Zkušební uzel stanice Axmat.	28
Obr. 28	Záznam signálu akustické emise při záběhu ložiska JTWT a Sachs	30
Obr. 29	Záznam signálu AE během zkoušky u ložiska SACHS (nahore) a JTWT (dole)	31
Obr. 30	Intenzita signálu v závislosti na čase	32
Obr. 31	Ukázka záznamu signálu AE získaného analyzátozem IPL	33

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AE	-	akustická emise
ASL	-	průměrná hodnota amplitudy signálu akustické emise
Axmat	-	experimentální zkušební stanice pro axiálně zatížené vzorky
Counts	-	počty překmitů přes nastavené prahové úrovně
Duration	-	doba trvání události
FFT	-	Fast Fourier Transform
Hits	-	počet překmitů přes nastavené prahové úrovně
Pitting	-	kontaktní poškození povrchu
Spalling	-	vydrolení kontaktního povrchu

c	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost šíření vlnění – index značí druh vlnění
F	N	radiální zatížení
n	$\text{ot}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost otáčení hřídele
RMS	mV	střední kvadratická hodnota signálu
R_z	μm	drsnot povrchu určená největší výškou profilu
E, G	Pa	modul pružnosti v tahu resp. smyku
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	hustota [kg/m^3],
v		Poissonovo číslo

10 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-transaction 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