



VYSOKÉ UČENÍ TECHICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM VLIVU MAZIV NA TRVANLIVOST VALIVÝCH KONTAKTŮ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF LUBRICANTS ON ROLLING CONTACT
LIFE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÁCLAV ŠEMBERA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LIBOR NOHÁL

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Šembera

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimentální studium vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktu

v anglickém jazyce:

Experimental Study of the Effect of Lubricants on Rolling Contact Life

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provést a vyhodnotit zkoušky trvanlivosti ložiskových materiálů mazaných vybranými mazivy a určit jejich vliv na trvanlivost valivého kontaktu. Při zkouškách budou využity nejmodernější přístupy NDT pro detekci počátečních stádií kontaktní únavy.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázku).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

1. Kopec B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukcí. CERM Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4
2. MILLER, Ronnie K; HILL, Eric v; MOORE, Patrick O. Acoustic emission testing. 3rd ed. Columbus : American Society for Nondestructive Testing, 2005. 446 s. ISBN 15-711-7106-1.7
3. Harris, T. A and Kotzalas M. N., Advanced Concepts of Bearing Technology, Fifth edition, Taylor & Francis, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Libor Nohál

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je shrnout stav současného poznání v oblasti kontaktní únavy, maziv a detekce kontaktní únavy využitím metody akustické emise. V experimentální části jsou provedeny zkoušky trvanlivosti valivých kontaktů pro standardní plastické mazivo a mazivo s EP přísadami s okrajovým využitím metody akustické emise. Vliv maziv na trvanlivost valivých kontaktů je vyhodnocen základní trvanlivostí L_{10} určené užitím Weibullova rozdělení.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to summarize the art of state in the area of the contact fatigue, lubricants and detection of the rolling contact fatigue exploiting the acoustic emission method. In the experimental part of this bachelor's thesis are performed the rolling contact testing for the standard grease and the lubricant with EP additives by marginal exploiting the acoustic emission method. The effect of the lubricants on the rolling contact life is evaluated by basic rating life L_{10} stated by using Weibull distribution.

KLÍČOVÁ SLOVA

Valivý kontakt, trvanlivost valivého kontaktu, kontaktní únava, pitting, maziva, metoda akustické emise

KEYWORD

Rolling contact, rolling contact life, rolling contact fatigue, pitting, lubricants, acoustic emission method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEMBERA, V. *Experimentální studium vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Libor Nohál.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci „Experimentální studium vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Libora Nohála s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 22.5.2014

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Liboru Nohálovi za jeho vedení, odborné rady a cenné připomínky, především při provádění zkoušek. Dále bych chtěl poděkovat rodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Poškození valivých kontaktů	13
2.1.1 Výrobní degradace	13
2.1.2 Provozní degradace	13
2.1.3 Kontaktní únava	16
2.1.4 Zkušební zařízení pro zkoušky kontaktní únavy	17
2.2 Maziva	20
2.2.1 Plynná maziva	20
2.2.2 Kapalná maziva	20
2.2.3 Plastická maziva	21
2.2.4 Tuhá maziva	22
2.2.5 Aditiva maziv	22
2.3 Metoda akustické emise	23
2.3.1 Přenosová trasa akustické emise	23
2.3.2 Citlivost akustické emise	24
2.3.3 Aplikace akustické emise při detekci poškození valivého kontaktu	24
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
4 MATERIÁL A METODY	27
4.1 Zkušební těleso	27
4.2 Zkušební stroj	28
4.3 Zkoušená maziva	29
4.4 Měřicí aparatura	30
5 VÝSLEDKY	31
5.1 Mazivo MOGUL LV3	32
5.2 Mazivo METANOVA F1.5	34
6 DISKUZE	35
7 ZÁVĚR	36
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	39
10 SEZNAM OBRÁZKŮ	40
11 SEZNAM TABULEK	41
12 SEZNAM PŘÍLOH	42

1 ÚVOD

Proč jsou v technické praxi důležitá maziva? Touto otázkou se lidstvo zabývá již tisíce let. Již staří Egypťané používali kolem roku 1400 před n.l. zvířecí tuk nebo olivový olej smíšený s vápencovou moučkou k mazání svých bojových vozů. Další důkaz nezastupitelné role maziv nám podávají staří Číňané, kteří již v 8. století před n. l. užívají mazacích účinků směsi rostlinných olejů a olova ke snížení tření. I takto krátký historický výčet nám plně odpovídá na položenou otázku. Odpověď je zcela prostá, totiž vždy se jedná o snížení tření, s ním spojené energetické náročnosti a zejména opotřebení kontaktních ploch. [1], [6]

Vlivem maziv na kontaktní plochy se detailně zabývá vědní disciplína zvaná tribologie. Tribologie je věda o vzájemném působení povrchů při jejich relativním pohybu. Uplatňuje se tedy všude tam, kde dochází ke vzájemnému pohybu dvou kontaktních ploch. Bez nadsázky lze konstatovat, že téměř žádný pohyblivý styk dvou ploch bez tření neexistuje.

Při opakovaném kontaktu dvou nekonformních ploch, například odvalování kuliček v oběžných drahách kroužků ložiska či záběru boků zubů ozubených kol, dochází k únavovým jevům v povrchových vrstvách souhrnně označovaných jako kontaktní únava. Kontaktní únava je značně nepříznivý jev a naším úkolem je co možná nejvíce jej minimalizovat. V současné době jsou hlavní hybnou silou ve výzkumu kontaktní únavy a vlivu maziv, tepelného zpracování a povlaků na životnost kontaktních ploch významní výrobci ložisek, protože v případě dodržení všech provozních podmínek je kontaktní únava jediným možným procesem, který způsobí defekt valivého kontaktu.

Zkoušet celá ložiska je časově a finančně značně náročné, proto se v praxi často užívají zkoušky na modelových zkušebních tělesech typu kulička, váleček, disk nebo plochý vzorek. Tyto zkoušky se provádějí za účelem zjištění trvanlivosti materiálů a získání podkladů pro hodnocení materiálů z hlediska únavové pevnosti. Na základě výsledků zkoušek trvanlivosti můžeme hodnotit kvalitu materiálu a vliv tepelného zpracování na jeho trvanlivost. Další důležitou funkcí zkoušek trvanlivosti je získání informací o vlivu maziv na trvanlivost valivých kontaktů. Dle zkoušek trvanlivosti můžeme posuzovat kvalitu maziv, případně vhodnost jejich použití pro daný účel. Pomocí zařízení pro zkoušky trvanlivosti lze také provádět zkoušky povlaků.

Pro detekci pittingu, který je hlavním projevem kontaktní únavy, při zkouškách trvanlivosti valivých kontaktů je standardně užívána vibrodiagnostika. Pokud hladina vibrací překročí stanovenou úroveň, je zkouška přerušena. Pro precizaci zachycení počátku vzniku pittingu je využívána i metoda akustické emise. Jedná se o jednu z metod nedestruktivního zkoušení materiálu založenou na principu šíření elastické napětíové vlny v materiálu. [4]

Cílem této práce je rešeršním způsobem shrnout stav současného poznání v oblasti kontaktní únavy a jejího zkoušení, maziv a akustické emise, dále experimentálně vyhodnotit vliv maziv na trvanlivost valivých kontaktů.

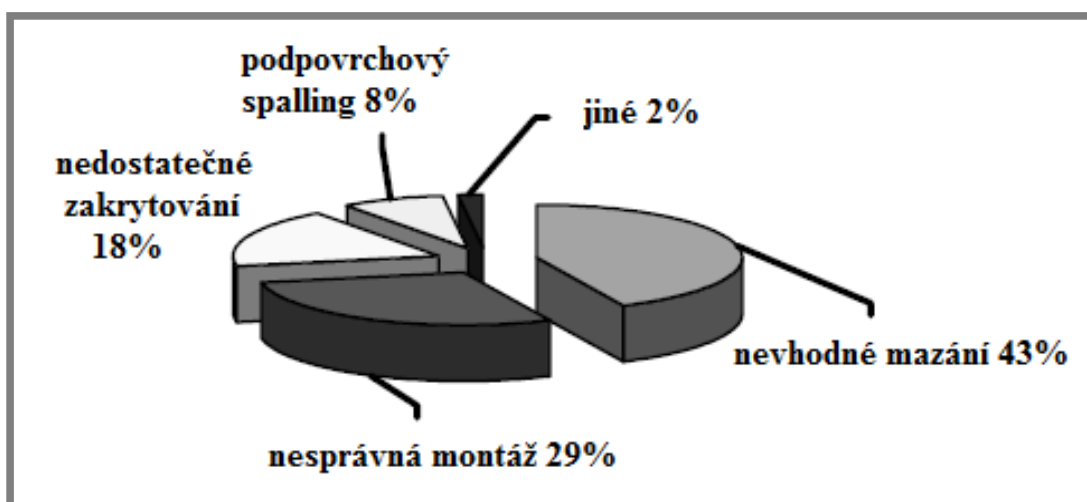
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

2.1 Poškození valivých kontaktů

2.1

Uložení pohyblivých součástí všech strojů je realizováno ložisky. Tato uložení jsou vystavena provozním podmínkám. Jedná se o tepelné, chemické a zejména napěťové účinky, jejichž projevem jsou změny ve struktuře použitých materiálů. Důsledkem těchto změn je postupné zhoršování vlastností materiálu valivých kontaktů, které mohou ohrozit spolehlivost součásti, případně celého stroje. V krajním případě mohou vést až k úplné ztrátě funkce či selhání stroje. Souhrnně je tento jev nazýván degradací. Faktorů, které ovlivňují degradační proces valivých kontaktů je celá řada. Mezi nejvýznamnější řadíme druh a vlastnosti vzájemně působících povrchů, přítomnost maziva, charakteristiky relativního pohybu a zatížení. Obr. 1 uvádí četnost poruch valivých ložisek dle HARRISE. [2]



Obr. 1 Frekvence výskytu jednotlivých poruch valivých ložisek [2]

2.1.1 Výrobní degradace

2.1.1

Výrobní degradace úzce souvisí se zvoleným typem technologie výroby. Při výrobě dochází k poměrně velkému ovlivnění vlastností materiálu. Tyto změny pak mají za následek snížení trvanlivosti materiálu. Hlavními činiteli způsobujícími výrobní degradaci jsou vlastnosti materiálu, především jeho metalurgická kvalita a přítomnost vměstků, dokončovací operace obrábění, tepelné zpracování, skladování a montáž. [2]

Projevem nesprávné technologie výroby mohou být vrypy, povrchové důlky, nedokončená místa, případně porezita. [9]

2.1.2 Provozní degradace

2.1.2

Do této skupiny poškození valivých kontaktů řadíme poruchy, které vznikají při vlastním provozu, tedy nesprávným zatížením, nevhodným mazáním nebo při práci v korozním prostředí.

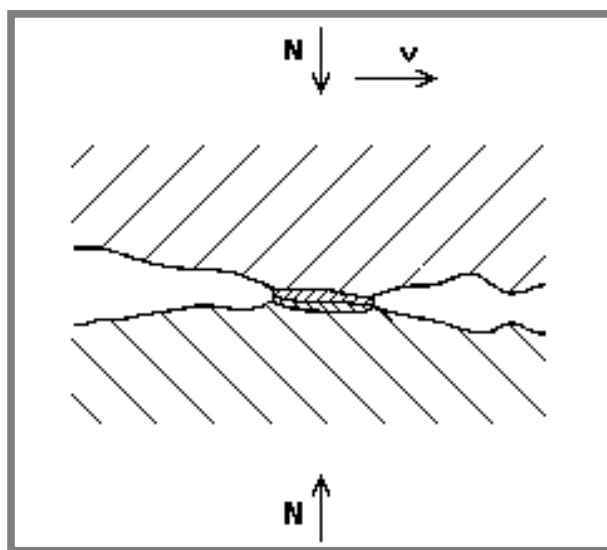
K provozní degradaci dochází působením provozních činitelů, jako jsou napětí, teplota, vliv prostředí aj. Její vznik je charakteristický několika mechanismy.

Mezi nejčastější řadíme zkřehnutí materiálu (vodíková křehkost), únavové a creepové poškození, nadměrné opotřebení, odlupování povrchu, otláčení, lomy (fretting), případně trhliny. V praxi docházíme k závěru, že všechny tyto mechanismy působí současně. Kombinací degradačních mechanismů vznikají různá opotřebení valivých kontaktů, která mají za následek snížení jejich trvanlivosti. [2]

Opotřebení můžeme dělit dle typu mechanismu vzniku na [5], [8], [14]:

- Adhezivní opotřebení

Zásadní roli hraje nerovnost povrchů při relativním pohybu dvou těles. Pohyb těchto těles nenastává na celé stykové ploše, ale pouze na určitých částech, jak ukazuje obr. 2.



Obr. 2 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [14]

- Abrazivní opotřebení

Je způsobeno vzájemnou interakcí povrchů nebo povrchu s abrazivním médiem. Charakteristickým rysem tohoto typu opotřebení jsou rýhy vzniklé na povrchu.

- Erozivní opotřebení

Typické pro erozivní opotřebení je nerovnoměrné porušení povrchu, objevuje se zvlnění a prohlubeniny. Mechanismus vzniku je podobný abrazivnímu opotřebení.

- Kavitační opotřebení

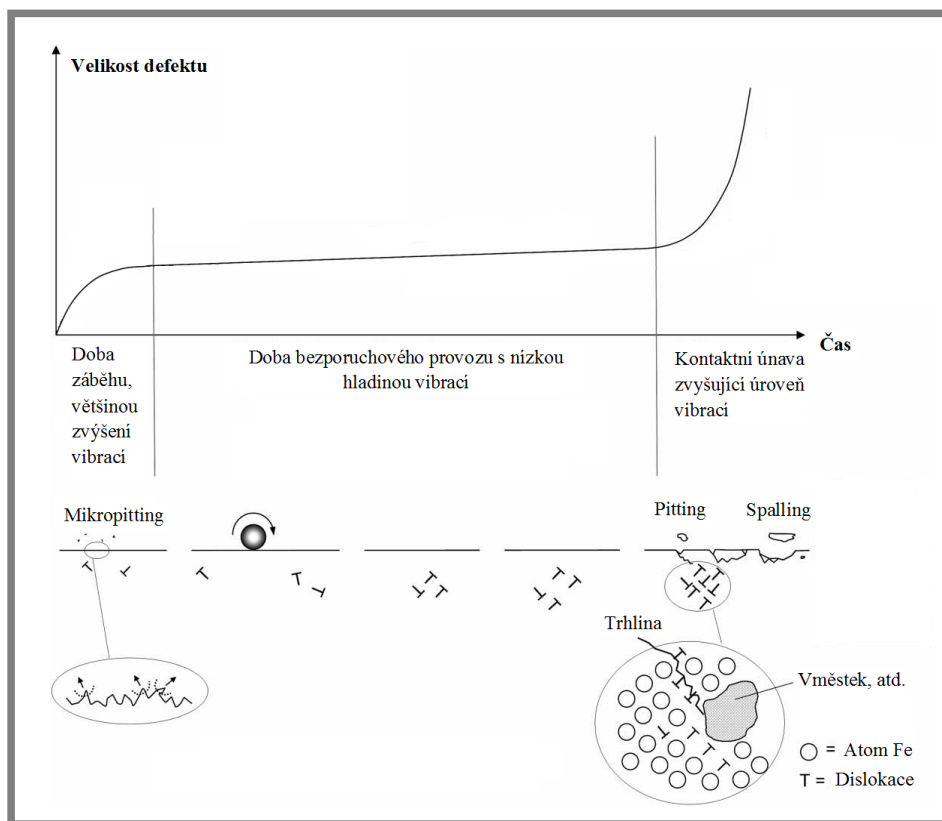
Projevuje se u valivých kontaktů pracujících v kapalinách, příkladem může být ložisko v pračce či čerpadle. Základním rysem je vznik poškození v oblasti zanikání kavitačních bublin v kapalině.

- Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení se vyskytuje všude tam, kde součást koná kmitavý pohyb, tečný na směr zatížení. Tento typ opotřebení se projevuje ve většině aplikací valivých kontaktů.

- Únavové opotřebení

Nazývá se též jako kontaktní únava. Vzniká v místech, kde na stykový povrch opakovaně působí velké tlakové zatížení na velmi malou plošku. Kontaktní únavu popisují charakteristické důlky na povrchu součásti, vzniklé lokálním překročením plasticity, nukleací a šířením trhlin pod povrchem a konečným vytržením nebo vydrolením kusu materiálu z povrchu, jak ukazuje obr. 3. Tento jev je nazýván termínem pitting. [14] Ukázka pittingu na valivém tělese je na obr. 4.



Obr. 3 Postupná tvorba pittingu pod povrchem [11]



Obr. 4 Pitting na valivém tělese [15]



Obr. 5 Spalling na valivém tělese [15]

V literatuře se objevuje pojem spalling. Jak lze pozorovat na obr. 5, jedná se o odlupování většího množství objemu povrchu než u pittingu za působení tlaku a opakovaného smykového napětí. Spalling se obvykle projevuje u součástí povrchově zpracovaných, tedy tvrzených cementací, nitridací či povrchově kalených. Únavové trhliny se šíří pod povrchem tvrzené vrstvy, která se postupně prolamuje a poté náhle odloupne. [14]

Pitting a stejně tak spalling může vznikat i na povrchu tělesa, tento mechanismus je způsoben zejména nečistotami z okolního prostředí, které vytvoří na povrchu vtisk, případně rýhu, která se stane iniciátorem trhliny.

2.1.3 Kontaktní únava

Ke kontaktní únavě (RCF) dochází v povrchových vrstvách při opakovaném styku dvou nekonformních povrchů. Styk kontaktních těles je realizován vzájemným dotykem v bodě, na přímce nebo po křivce. Protože povrchy těles se stýkají v malé plošce, vznikají velmi vysoké lokální kontaktní tlaky. Při čistém valení jsou hlavní napětí tlaková. Smyková napětí dosahují svého maxima v jisté hloubce pod povrchem. V těchto místech vznikají a dále rostou trhlinky, které pronikají na povrch a vedou k vytrhávání či vydrolování malých objemů materiálu. Takto se tvoří jamky, které souhrnně označujeme pittingem. Mezi hlavní parametry mající vliv na kontaktní únavovou pevnost patří Hertzovo napětí, počet cyklů, kvalita a tvrdost povrchu, teplota a přítomnost maziv. [2]

Z historického hlediska je studium kontaktní únavy poměrně novou vědní disciplínou, nicméně rozvoj nových materiálů, ekonomické požadavky a extrémní pracovní podmínky posunuly tuto vědní disciplínu do popředí. Základy zkoumání kontaktní únavy jako vědy položili Buckingham, Talbourdet a zejména Hertz. Právě posledně jmenovaný, Heinrich Hertz, publikoval roku 1865 svou teorii elastického kontaktu pro bodový nebo přímkový styk dvou těles a tím vytvořil teoretický model pro popis kontaktní únavy, dnes známý jako Hertzova teorie. [1]

Dle Hertzovy teorie lze vypočítat tvar a rozměry dotykové plochy, maximální tlak, rozložení tlaku v dotykových plochách, případně deformace obou těles. Bohužel Hertzova teorie nemá obecnou platnost. Existuje celá řada předpokladů, které upravují její platnost. Zde uvádím některé z nich [1], [3]:

- a) Dotýkající se tělesa jsou součástí nekonečných poloprostorů.
- b) Tělesa jsou lineárně pružná, platí Hookův zákon.
- c) Materiál dotýkajících se těles je homogenní a izotropický.
- d) V bodě dotyku jsou známy hodnoty okamžitých poloměrů zakřivení.
- e) Velikost zatížení nepřekračuje mez pružnosti.
- f) Síly vyvolávající deformace jsou spolu rovnoběžné, kolmé na rovinu dotyku.
- g) V dotykové ploše se přenášejí jen normálová tlaková napětí, což dovozuje zanedbat vliv tangenciálních sil na uvažovanou plochu.

Z výčtu omezujících předpokladů je jasné, že analytický výpočet kontaktní únavy je možný pouze ve značně zjednodušených případech. Pro určení kontaktní únavy se používá experimentálních zkoušek na zkušebních zařízeních.

2.1.4 Zkušební zařízení pro zkoušky kontaktní únavy

Jak již bylo uvedeno, určit přesný teoretický výpočet kontaktní únavy je značně komplikované. Je velmi složité zohlednit všechny vstupní parametry a dodržet předpoklady omezující Hertzovu teorii. Proto se v praxi používají zkušební zařízení, která mohou sloužit k ověření výsledků teoretických výpočtů, případně k získání výsledků úplně nových.

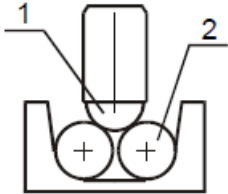
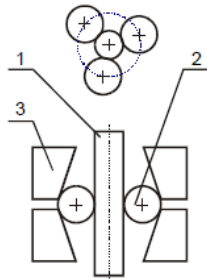
Již v úvodu byly nastíněny aplikace, pro které má smysl tato zkušební zařízení používat. Jedná se hlavně o určení kontaktní únavové pevnosti, porovnání vlastností materiálů v kombinaci s mazivy pro daný účel použití, posouzení vlivu tepelného zpracování na kontaktní únavovou pevnost a zkoušky povlaků.

Ačkoliv existuje mnoho modifikací zkušebních zařízení pro zkoušky trvanlivosti, v zásadě pracují na stejném principu. Vždy je na zkušební těleso vyvinut velký kontaktní tlak, toho se dosahuje minimalizací dotykových ploch a zároveň zvýšením zatížení. Minimalizace dotykových ploch je realizována tím, že na zkušebním vzorku není vytvořena oběžná dráha pro valivá tělesa. Valivá tělesa, například kuličky nebo disky, působí na povrch zkušebního vzorku na malé plošce, tím je velmi zkrácena doba trvání zkoušky.

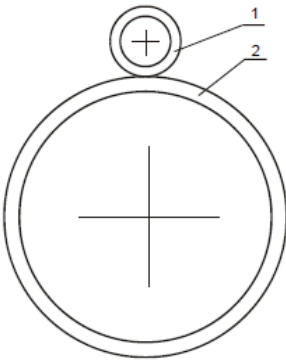
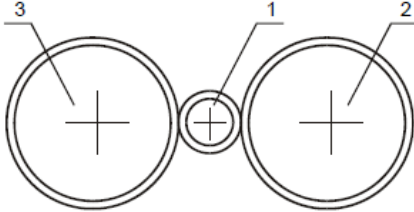
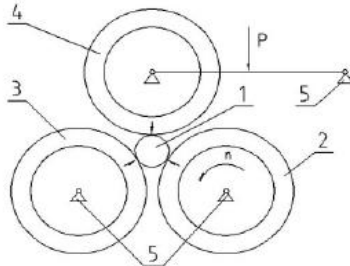
Kontaktní únava může být zkoušena na bodovém nebo přímkovém styku. V případě bodového styku jsou nejužívanějšími zkušebními stroji čtyřkuličkový (four-ball) a dvoukuličkový (rod-two-ball) zkušební stroj. Zkoušky kontaktní únavy přímkového styku jsou nejčastěji realizovány na jednodiskovém (rod-roller) a dvoudiskovém (roller-roller) stroji. Jednotlivé zkušební stroje mají své omezení. Například čtyřkuličkový zkušební stroj je používán pouze pro vyhodnocení účinků olejů na trvanlivost valivých kontaktů, jednodiskový zkušební stroj zase na hodnocení materiálu vzhledem ke kontaktní únavové pevnosti. V praxi lze ovšem nalézt také mnoho zkušebních strojů upravených dle individuálních požadavků. [12]

V tab. 1 resp. 2 jsou uvedeny základní zkušební stroje pro bodový resp. přímkový styk.

Tab. 1 Vybrané zkušební stroje s bodovým stykem [12]

Zkušební stroj	Schéma	Zkušební podmínky
four-ball		Styk: bodový Zkušební těleso: kuličky Max. Hertzův tlak: 8700 MPa 1 – horní kulička 2 – dolní kuličky
rod-three balls		Styk: bodový Zkušební těleso: váleček Max. Hertzův tlak: 5500 MPa 1 – váleček 2 – kuličky 3 – kuželová dráha

Tab. 2 Vybrané zkušební stroje s přímkovým stykem [12]

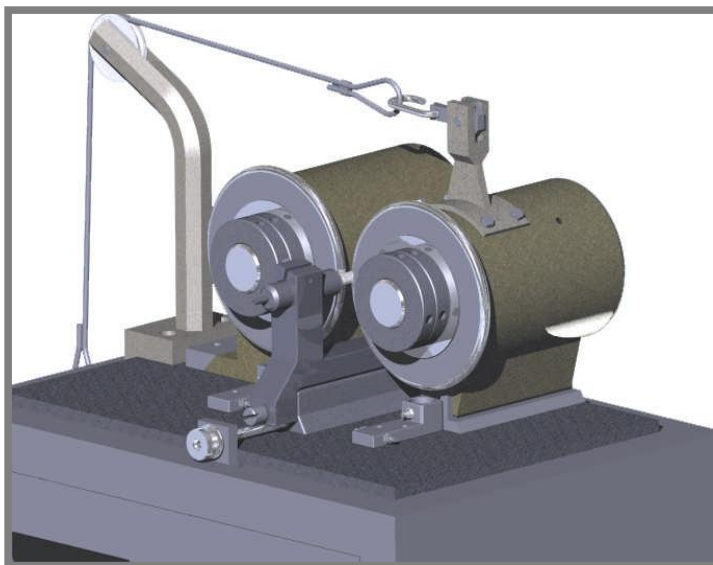
Zkušební stroj	Schéma	Zkušební podmínky
roller-roller		Styk: přímkový Zkušební těleso: kotouč Max. Hertz. tlak: 2300 MPa 1 – testovaný vzorek 2 – opěrný kotouč
rod-two rollers		Styk: přímkový Zkušební těleso: váleček Max. Hertz. tlak: 7520 MPa 1 – testovaný váleček 2, 3 – kotouče
rod-three rollers		Styk: přímkový Zkušební těleso: váleček 1 – testovaný váleček 2, 3 – kotouče 4 – zatížený kotouč 5 - zatížení

V Laboratoři kontaktní únavy na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně jsou používány zkušební stanice RMAT a AXMAT.

Zkušební stanice RMAT (viz obr. 6) je ekvivalentem ke zkušebnímu stroji rod-two-rollers, využívá přímkového styku. Jedná se o dvoudiskovou zkušební stanici, kde jeden disk je poháněn motorem a druhý disk je přítlačný. Zkoušený vzorek materiálu je uložen v kuličkových ložiskách vyšší přesnosti a za chodu stroje, účinkem třecích sil mezi oběma kotouči, rotuje. Hnaný disk je mazán a svým pohybem zajišťuje mazání celé soustavy. Průměry obou disků jsou několikanásobně větší než průměr zkoušeného válečku, takže mohou být použity na více zkoušek. [16]

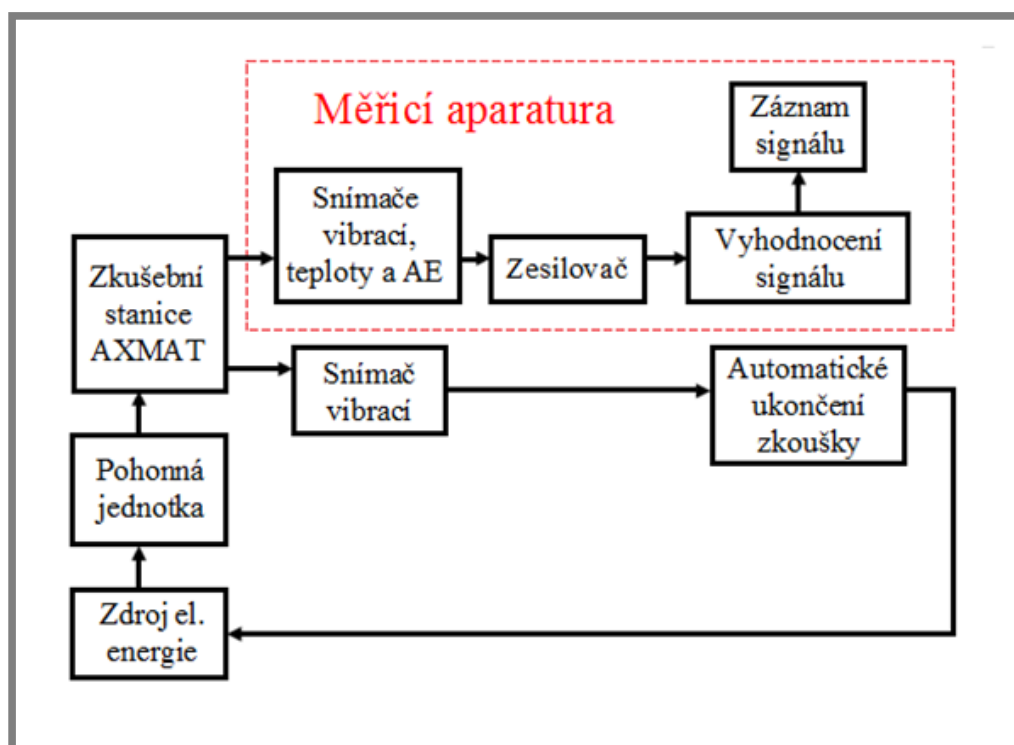
V okamžiku, kdy se vznikem pittingu poruší geometrický tvar oběžné dráhy zkušebního tělesa, je pomocí snímače vibrací zkouška automaticky ukončena. Počet cyklů do vzniku defektu je zaznamenáván počítadlem a stanovuje se z počtu otáček hnacího kotouče. [10]

Zkušební stanice RMAT umožňuje rychlé srovnání sledovaných materiálu, případně jiných podmínek zkoušky, porovnáním dosažených výsledků pro hlavní podmínky a režimy, vyskytujících se ve valivém kontaktu.



Obr. 6 Zkušební stanice RMAT [16]

Zkušební stanice AXMAT pracuje v axiálním směru. Zkušebním tělesem je prstenec z oceli, na který bodovým dotykem působí valivá tělesa, v tomto případě ocelové kuličky. Kuličky jsou mazány, nejčastěji plastickým mazivem, a tím je docíleno mazání celé soustavy. Zkušební stanice AXMAT bude blíže popsána v kapitole 4.2. Na obr. 7 je znázorněn princip měření na zkušební stanici AXMAT.



Obr. 7 Princip měření na zkušební stanici AXMAT

2.2 Maziva

Veškeré stroje v technické praxi mohou optimálně pracovat pouze tehdy, pokud jsou dobře mazány. Obecně maziva při správném použití zaručují ekonomičnost, spolehlivost a projektovanou životnost valivých kontaktů a tím i celého stroje. Aby mohla maziva splňovat požadavky, které jsou na ně kladeny a vyplývají z jejich funkce, musí mít určité tribologické vlastnosti. [1]

Základní vlastností maziva je jeho mazací schopnost, tedy vlastnost přenášet síly v kontaktním místě vnitřním třením při současném vytvoření souvislé vrstvy na kontaktním povrchu. K dalším požadavkům, které maziva mají splňovat, patří [1]:

- snížení ztrát mechanické energie a zlepšení účinnosti,
- zvýšení nebo dokonce úplné potlačení opotřebení a jeho škodlivých účinků,
- zlepšení odvodu tepla a dostatečné chlazení,
- dostatečná ochrana proti korozi,
- chemická neutralita,
- ochrana proti nečistotám, které se mohou dostat do valivého kontaktu z okolního prostředí, a schopnost zbavovat třecí plochy vytvořených nečistot,
- působení maziva jako těsnícího prostředku.

Maziva můžeme dělit dle několika hledisek. Podle původu je dělíme na přírodní a syntetická, podle chemického složení na organická a anorganická. V technické praxi se ovšem maziva nejčastěji dělí na:

- plynná,
- kapalná,
- plastická,
- tuhá.

Vlastnosti maziv jsou velmi významně ovlivněny zušlechťujícími přísadami. Těmto přísadám říkáme aditiva. Detailněji je rozeberu v kapitole 2.2.5.

2.2.1 Plynná maziva

Plynná maziva se používají omezeně při mazání kluzných ložisek a uložení. Jako běžné dvojice materiálů kluzných dvojic mazaných plynem se používají ocel/ocel, případně ocel/bronz. [1]

Nedostatky plynných maziv jsou především nestabilita a vznik turbulentního proudění nebo vysoké nároky na přesnost výroby a montáže kluzné dvojice.

2.2.2 Kapalná maziva

Kapalná maziva jsou v současnosti nejrozšířenějším druhem maziv, jejichž hlavní výhodou je široký sortiment. Základní dělení kapalných maziv je následující [6]:

- Chemicky jednoznačné látky
Vhodné pro použití ve speciálních konkrétních případech se stálými podmínkami

- Homogenní směsi
Směsi skládající se z molekul stejné chemické skladby, ale různé velikosti. Patří sem především mazací oleje s velmi širokou škálou viskozity.
- Kapalné disperze
Jak název napovídá, jedná se o disperze, ve kterých jsou navzájem rozptýlené částičky dvou a více látek bez jejich vzájemného smíchání. Patří sem i suspenze, tedy disperze tuhých látek v kapalinách, například suspenze koloidního grafitu a MoS_2 v minerálních olejích. [6]

2.2.3 Plastická maziva

2.2.3

Plastická maziva, zvaná též jako mazací tuky, se skládají z kapalné složky, kterou vytváří mazací olej, a z tuhých částic disperzní látky. Makroskopicky mohou být máslovitá, vláknitá, houbovitá nebo zrnitá.

Plastická maziva se většinou vyrábějí z ropných olejů a příslušnou konzistenci získávají zpevňováním kovovými mýdly a jinými látkami. K dosažení požadovaných vlastností mohou obsahovat též přídavné anorganické látky, například MoS_2 , grafit, ZnO_2 , PbO_3 a jiná plniva. [1]

Charakteristickou veličinou vyjadřující vlastnosti plastických maziv je penetrace, která vlastně vyjadřuje stupeň tuhosti plastických maziv. Rozděluje se do devíti konzistenčních stupňů, a to 00 až 7. Přesná definice penetrace podle BLAŠKOVICĚ [1] zní: „Penetrace je hloubka vniknutí normalizovaného zkušebního kužele vlivem vlastní hmotnosti do vzorku maziva při teplotě 25 °C za definovaný čas, přičemž hloubka se měří v desetinách milimetru“. Další důležitou vlastností plastických maziv je teplota skápnutí. Tato hodnota určuje teplotu, při které plastické mazivo přechází do kapalného stavu. [1]

Základní dělení plastických maziv jsou podle stálosti a podle typu zpevňovadla. Podle stálosti je dělíme na maziva tepelně stálá, mechanicky stálá a koloidně nestálá. Podle typu zpevňovadla mohou být plastická maziva dělena na mýdlová, nemýdlová, uhlovodíková a halogenová. [1]

Zpevňovadla mají obvykle větší vliv na výsledné vlastnosti plastických maziv než základové oleje. Jsou to částice s rozměry od 0,01 do více jak 20 μm , které charakterizuje schopnost vytvořit koloidní strukturu maziva. Zpevňovadla můžeme ještě dále dělit na [1]:

- Mýdlová zpevňovadla
 - jednoduchá na bázi Li, Na, Ca, Ba, Sr, Al, Pb, Zn,
 - kombinovaná, například Na-K, Ca-Ba, Li-Ca,
 - komplexní, například Na-Li-Ca-Ba,
- Nemýdlová zpevňovadla
 - anorganická, například bentonity, silikagely,
 - organické polymery,
 - uhlovodíky, například parafíny nebo vosky.

Plastická maziva jsou vzhledem ke svým vlastnostem užívána méně než mazací oleje. Všeobecně jsou určena na krátkodobé mazání s delšími mazacími intervaly, s výjimkou valivých ložisek, kde se těsnicí schopnosti plastických maziv využívá obvykle na mazání po celou dobu životnosti. Při volbě plastických maziv je důležité znát jejich vzájemnou interakci, neboť některá plastická maziva se mohou navzájem úplně rozrušit. Volba druhu plastického maziva závisí na rozsahu teplot, odolnosti proti vodě a ochranných schopnostech proti korozi. [1], [6]

2.2.4 Tuhá maziva

Užívají se především při třecích procesech s malou relativní rychlostí povrchů. Největšího užití dosahují jako složky maziv plastických.

Jako tuhá maziva lze použít tuhé látky s nízkou tvrdostí, vysokou přilnavostí k povrchům tuhých těles, především ke kovům, a vrstevnatou strukturou zaručující malou pevnost ve smyku.

Tuhá maziva lze rozdělit na dvě skupiny, a to organická a anorganická. Hlavními představiteli anorganických maziv jsou přírodní produkty, tedy grafit a molybdensulfid (MoS_2). Obě tato maziva se používají především jako přísada do olejů a plastických maziv. Z organických tuhých maziv má široké uplatnění polytetrafluoretylen (PTFE), v technické praxi znám jako teflon, který má ze všech tuhých maziv nejmenší součinitel tření. [1]

2.2.5 Aditiva maziv

Základové, čisté ropné a syntetické oleje, a stejně tak plastická maziva nemohou svými vlastnostmi vyhovovat mnohdy velmi rozličným podmínkám valivého kontaktu. Na něj totiž během provozu působí extrémní podmínky, například vysoké rychlosti, teploty či velké tlaky.

Vlastnosti a chování mazacích látek proto ovlivňujeme aditivy. Úlohou aditiv je zkvalitnit mazivo tak, že zvýrazní požadované vlastnosti základového maziva a potlačí jeho nežádoucí vlastnosti, případně mu dodají některé vlastnosti nové. [6]

V současnosti existuje velké množství aditiv do kapalných a plastických maziv, která působí fyzikálním nebo chemickým způsobem na zušlechťované mazivo. Většina těchto přísad nepůsobí pouze na jednu vlastnost, ale na několik vlastností základového maziva najednou. Na kvalitu výsledného maziva má rozhodující vliv dokonalá rozpustnost zvolených aditiv bez tvorby usazenin.

Dále bych chtěl uvést dělení aditiv podle jejich funkce dle BLAŠKOVICĚ [1]:

- Antioxidanty – zamezují působení kyslíku, potlačují oxidační děje a prodlužují životnost maziv.
- Detergenty – zamezují tvorbě usazenin, zejména ve spalovacích motorech.
- Disperzanty – potlačují vznik shluků nečistot.
- Antikoroziní přísady – zlepšují ochranu železných a neželezných ploch před stykem s vodou a atmosférickým kyslíkem.
- Modifikátory viskozity – ovlivňují reologické vlastnosti oleje, zvyšují viskozitu v oblasti vysokých teplot bez zhoršení ostatních vlastností.

- Depresanty – snižují bod tuhnutí.
- Mazivostní přísady – tvoří únosnější mazací filmy s nízkými hodnotami součinitele tření.
- Protioděrové přísady – vytvářejí vlastní mazací vrstvy a tím potlačují opotřebení kontaktních ploch.
- Protipěnovostní přísady – omezují pěnovost olejů.
- Protiúnavové přísady – potlačují vliv povrchových a podpovrchových mikrotrhlin.
- Emulgátory – zmenšují mezipovrchové napětí na rozhraní vody a oleje a vytvářejí souvislé tenké filmy, které brání tvorbě kapek.

Pro plastická maziva jsou důležitými aditivy zejména antioxidanty, antikoroziční přísady, protioděrové přísady, vysokotlaké (EP-Extreme Pressure) přísady, protiúnavové přísady, odlučovače vody a stabilizátory struktury. [1]

2.3 Metoda akustické emise

2.3

Metoda akustické emise je jedna z defektoskopických metod nedestruktivního zkoušení. Základním úkolem nedestruktivního zkoušení je odhalit a popsat vady materiálu a výrobků takovými postupy, při jejichž aplikaci se výrobky neporuší a nezmění se ani jejich užité vlastnosti. Nedestruktivní zkoušení materiálu má zásadní výhodu v tom, že při zkouškách nedochází k odstavení z provozu nebo dokonce zničení zkoušeného výrobku.

Akustickou emisí nazýváme fyzikální jev, při kterém se elastické napětíové vlny generované uvolněním mechanické energie uvnitř materiálu šíří na povrch materiálu, nebo proces působící vznik elastických napětíových vln na povrchu materiálu. [4]

Metodou akustické emise nazýváme proces, při kterém detekujeme akustickou emisí jako fyzikální jev a následně tento signál zpracováváme a vyhodnocujeme. Metodou akustické emise detekujeme akustickou událost. Akustická událost je fyzikální jev, který způsobuje vznik akustické emise. Fyzikální původ akustické události hledáme ve zdroji akustické emise. Je to fyzikální proces, který generuje akustickou emisí. Akustická událost může být praskavá nebo spojitá. Toto dělení charakterizuje hustota posloupnosti jednotlivých časově izolovaných hitů, událostí akustické emise. Zatímco při praskavé akustické emisí dochází k jednotlivým událostem (hitům) ve větších časových odstupech, při spojitě se překrývají a počítají, vzniká tak akustický šum. [4], [7]

2.3.1 Přenosová trasa akustické emise

2.3.1

Celý proces metody začíná u zdroje akustické emise, který vyvolá událost akustické emise. Tato událost se poté šíří materiálem v podobě podélné či příčné elastické napětíové vlny ke snímači akustické emise. Vlny se mohou šířit přímo, pak mluvíme o vlně dilatační, nebo odrazem, vlna smyková. Následuje detekce napětíových vln snímačem akustické emise na povrchu materiálu. Zde se mechanický impuls transformuje na elektrický signál. Většinou používáme vícekanálové měření akustické emise, to znamená, že používáme více snímačů rozmístěných na povrchu

materiálu. Elektrický signál se analogově vede na vstup měřicího systému akustické emise, kde probíhá jeho digitalizace a následné zpracování.

2.3.2 Citlivost akustické emise

Metoda akustické emise je vysoce citlivá metoda. Tento fakt je podmíněn rychlým průběhem akustické události, při kterém se uvolní velké množství energie v krátkém čase. Díky dynamickému průběhu akustické události se citlivost metody akustické emise teoreticky pohybuje řádově $10^{-13} - 10^{-14}$ m. [4]

Za obvyklé frekvenční pásmo detekce AE se považuje 80 kHz – 1 MHz. Obecně platí, že nejcitlivější detekce je možná na nízkých frekvencích. Bohužel také platí, že se na nízkých frekvencích setkáváme s vyšší úrovní akustického rušení. V praxi se proto snažíme nastavovat rozsah prahových hodnot, které z velké části odfiltrují akustické rušení. Správnou volbou frekvenčního pásma (dolní a horní prahové hodnoty) tedy můžeme zpřesňovat detekci akustické emise. [4]

2.3.3 Aplikace akustické emise při detekci poškození valivého kontaktu

První studie využití metod akustické emise pro detekci pittingu ve valivých ložiscích datujeme na přelom 60. a 70. let 20. století. Roku 1969 se Harvey L. Balderston ve svém článku prvně zmiňuje o využití akustické emise pro detekci defektu valivého ložiska. Od této doby dochází k rozvoji využití metody akustické emise v diagnostice ložisek, zejména pomaloběžných. [7]

Mezi základní parametry vyhodnocování signálu akustické emise patří RMS (efektivní hodnota signálu), Count, události a frekvenční charakteristiky signálu. Nejčastěji používaným parametrem signálu akustické emise v časové oblasti je RMS (Root Mean Square). Jedná se o efektivní hodnotu signálu, která je definována jako součet kvadrátů úrovně signálu v určitém časovém intervalu. Velmi často užívaným parametrem signálu v časové oblasti je parametr Count, který je definován jako počet překmitů přes nastavenou prahovou úroveň za jednotku času. Pro určení frekvenčních charakteristik naměřeného signálu se využívají různé metody pokročilého zpracování signálu, nejčastěji rychlá Fourierova transformace (FFT). Při hodnocení poškození ložisek se často používá parametr signálu Crest faktor, a to zejména pro svou informační hodnotu v oblasti počátku vzniku poškození. Pro detekci poškození valivého kontaktu se používají tři základní metody. Jedná se o monitorování vibrací, akustické emise a metodu rázových pulzů. [4], [7]

Monitorování vibrací

Při pohybu valivého tělesa přes defekt nebo jiné nerovnosti v oběžné dráze dochází k impulzům, které vyvolávají vibrace. Valivé těleso prochází defektem opakovaně, to má za následek pravidelnost impulzů. Frekvence, tedy intervaly opakování impulzů způsobujících vibrace, jsou závislé na geometrii valivého kontaktu, velikosti a umístění defektu a počtu otáček valivého kontaktu. [11]

Analýzy ve frekvenční oblasti jsou založeny na analýze vibrací v závislosti na diskretních frekvenčních složkách. Při tomto typu analýzy se využívá rychlé Fourierovy transformace. Nejjednodušší způsob analýzy vibrací je založen na sledování hodnoty RMS. [11]

V praxi je důležité další zpracování dat, jako je průměrování a filtrování signálu, výpočet obálky a výpočet amplitudy vybraných frekvenčních složek. Dále výpočet charakteristických rysů, tzv. vibračních parametrů. [11]

Množství různých parametrů, metod, postupů a jejich kombinací v analýze vibrací je neomezené, proto je tato metoda v praxi nejrozšířenější. [7], [11]

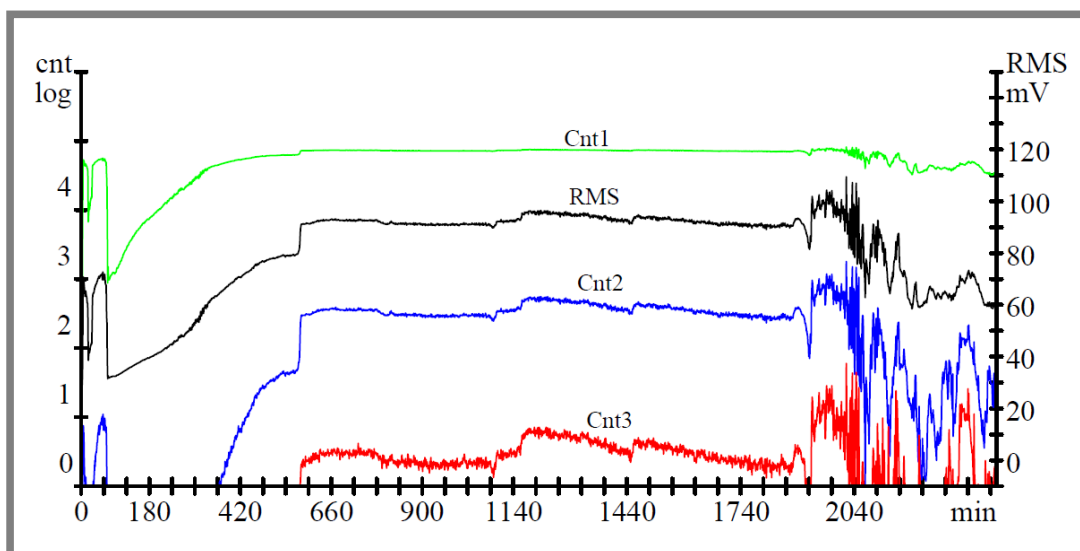
Monitorování akustické emise

Pro aplikace akustické emise v oblasti poškození valivých kontaktů je častěji užíváno vyhodnocení signálu v časové oblasti. Použití parametru FFT (frekvenční oblast) se ukázalo jako značně komplikované. [7]

V praxi se prokázalo, že metoda monitorování akustické emise je podstatně přesnější při odhalení vzniku poškození než metoda monitorování vibrací. Tento fakt je podložen i teoreticky, a to vysokou citlivostí akustické emise. V současnosti je kromě parametru RMS užíván ještě parametr Distress, který vykazuje velmi vysokou citlivost na vznik poškození. Použití metody akustické emise je v současnosti nejvíce rozvíjenou metodou při zkoušení valivých kontaktů. Hlavní výhodou je včasné odhalení počátečních stádií kontaktní únavy. [7]

V současnosti probíhá intenzivní výzkum v oblasti detekce počátečních stádií kontaktní únavy, jehož hlavními cíli je detekce poškození v co nejranějším stádiu a jeho následná lokalizace. Zkoumá se též využití vyhodnocení signálu akustické emise ve frekvenční oblasti. [7], [11]

Na obr. 8 je znázorněn reprezentant záznamu parametrů akustické emise ze zkoušek kontaktní únavy. Jsou zde zachyceny průběhy efektivní hodnoty signálu AE (RMS) a počty překmitů přes tři úrovně detekčních prahů (Cnt1, Cnt2, Cnt3). Ze záznamu je patrná oblast záběhu a vytváření valivé stopy na povrchu vzorku (cca do 70 min), dále oblast působení EP aditiv na povrch vzorku a oblast ustáleného stavu. V závěru je patrná aktivita v důsledku vzniku pittingu následovaná vysokými výkyvy parametrů při zvětšujícím se spallingu.



Obr. 8 Měřené veličiny AE vzorku s mazivem METANOVA F1.5

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Je-li valivé ložisko pro danou aplikaci správně navrženo, správně namontováno, mazáno, nepřetěžováno a je-li zabráněno vnikání nečistot, jsou eliminovány všechny příčiny poškození kromě únavy materiálu, tedy kontaktní únavy, v místě styku dvou nekonformních ploch. Kontaktní únava je závislá na zatížení, počtu cyklů, jakosti a tvrdosti povrchu, teplotě a přítomnosti maziv. Snížení rizika defektu valivého kontaktu kontaktní únavou lze v zásadě dosáhnout dvěma principy, a to zvýšením kvality povrchu materiálu a vhodnou volbou maziva.

Pro výrobu valivých ložisek se v současnosti užívají různé typy ložiskových ocelí, které musí splňovat specifická kritéria, zejména požadavky na tvrdost, únavovou odolnost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Jedná se především o celokalitelné oceli, cementační oceli a o oceli pro speciální ložiska. [2]

Jednodušším způsobem, jak lze ovlivnit trvanlivost valivého kontaktu je ovšem vhodná volba maziva. Základním požadavkem na mazivo je dostatečná tloušťka mazacího filmu, která zabrání přímému styku kontaktních ploch. To znamená, že v kontaktu je elastohydrodynamický (EHD) režim mazání. Další důležitá funkce maziva spočívá v odvodu tepla z místa styku, neboť v případě přehřátí může docházet k vymezení vůle, což vede k zadírání ložiska.

Jedním ze způsobů, jak lze hodnotit kvalitu materiálu a vhodnost maziv pro danou aplikaci valivého kontaktu, jsou zkoušky celých ložisek. Ovšem tyto zkoušky jsou časově a finančně značně náročné, proto se v praxi používají zkoušky na modelových tělesech. Těmito tělesy mohou být kulička, váleček, disk nebo plochý vzorek. Hlavními výhodami zkoušek trvanlivosti na modelových tělesech je výrazné zkrácení doby trvání zkoušky a také snížení nákladů na zkušební vzorky. Zkrácení doby trvání zkoušky je dosaženo zvýšením kontaktního tlaku tím, že na zkušební vzorku není vyrobena oběžná dráha, dochází k minimalizaci kontaktních ploch. Zkušební stroje můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin podle charakteru styku, a to na zkušební stroje s bodovým stykem a s přímkovým stykem.

Cílem bakalářské práce je experimentálně určit vliv plastických maziv na trvanlivost valivých kontaktů. K experimentálním zkouškám budou užity zkušební stanice AXMAT v Laboratoři kontaktní únavy na Ústavu Konstruování VUT v Brně. Zkoušky budou prováděny pro dva druhy plastických maziv. Jedním mazivem bude plastické mazivo bez vysokotlakých (EP) aditiv MOGUL LV3, druhým pak mazací tuk s EP aditivou METANOVA F1.5. Při zkoušce bude k monitorování pittingu užito snímačů teploty, vibrací a akustické emise, jejíž projevy při vzniku pittingu jsou středem pozornosti výzkumu mnoha autorů.

4 MATERIÁL A METODY

4

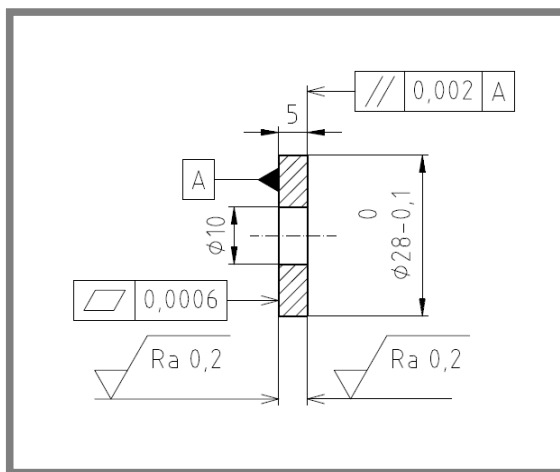
4.1

4.1 Zkušební těleso

Zkušebním tělesem je plochý vzorek prstencovitého tvaru (viz obr. 9), který je vyroben ze standardní martenziticky kalené ložiskové oceli 100Cr6, ekvivalentem dle ČSN je ocel 14109. Povrch zkušební tělesa je broušen a leštěn. Průměrná aritmetická odchylka profilu R_a povrchu zkušební tělesa je $0,2 \mu m$. Tvrdost povrchu zkušební tělesa je 61 ± 2 HRC. Na obr. 10 je znázorněna geometrie zkušební tělesa.



Obr. 9 Zkušební těleso [13]



Obr. 10 Geometrie zkušební tělesa

Ložisková ocel 100Cr6 je dobře tvařitelná za tepla a je vhodná k přímému kalení, ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná. Optimální průměr, nebo tloušťka zušlechtění je asi 20 mm . Ocel 100Cr6 je vhodná na součásti s velmi tvrdým povrchem odolným proti opotřebení. Využívána je na výrobu valivých elementů, a to kuliček do průměru 25 mm , válečků a kuželíků. Lze ji také použít na výrobu ložisek, ale pouze do tloušťky stěny 16 mm . [18]

Tab. 3 udává chemické složení oceli 14109 (100Cr6) dle ČSN 41 4109.

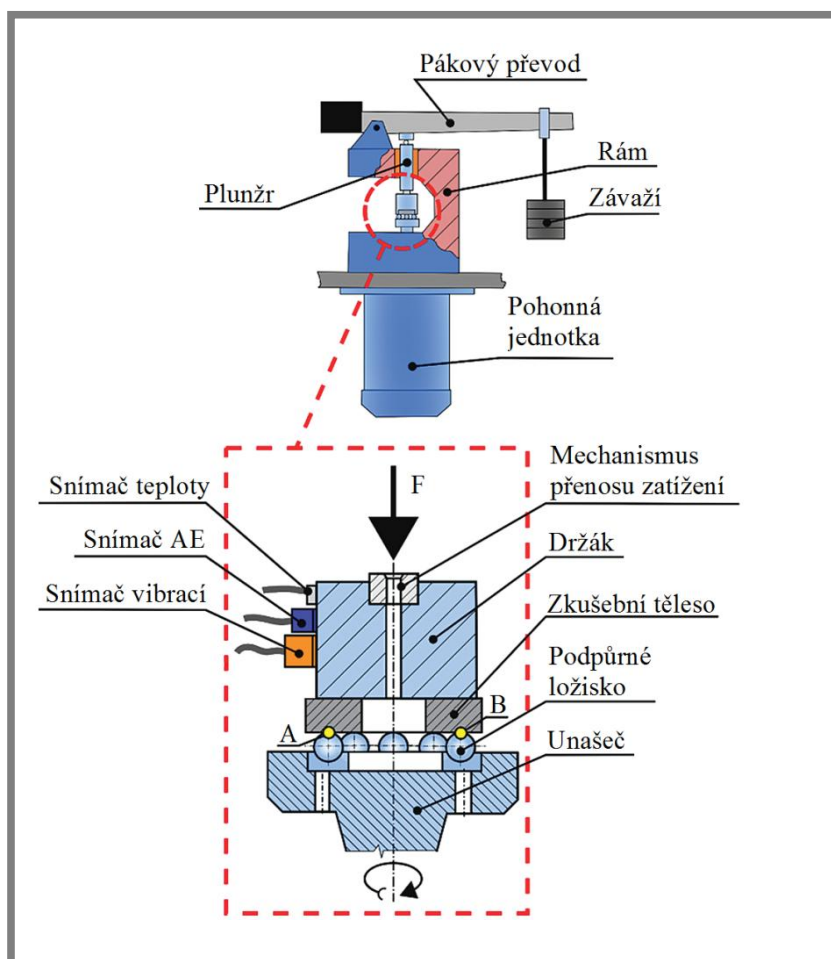
Tab. 3 Chemické složení oceli 14109 (100Cr6) [18]

Prvek	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
Obsah [%]	0,9 – 1,1	0,15 - 0,35	0,3 – 0,5	< 0,03	< 0,027	1,3 - 1,65	< 0,3

Další informace k oceli 100Cr6, zejména mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti a technologické údaje, uvádím v příloze 1. [21]

4.2 Zkušební stroj

Zkušebním strojem je zkušební stanice AXMAT, která pracuje v axiálním směru. To znamená, že směr zatěžující síly je axiálně orientován vzhledem ke směru pohybu zkušebního tělesa. Hlavní částí zkušebního stroje je masivní rám, v jehož horní části se nachází pákový převod se závažím, který umožňuje změnu zatížení. Zatížení je voleno tak, aby odpovídalo 5000 MPa kontaktního tlaku. Zatěžující síla je přenášena na plunžr, který je veden v rámu a definuje tak směr zatěžující síly. Přes kuličku je poté zatížení přenášeno na nehybný držák zkušebního tělesa. Tento mechanismus přenosu zatížení přes kuličku eliminuje nežádoucí přídavné zatížení. Zkušební těleso je definovaným zatížením přitlačováno proti prstenci valivých těles, ocelových kuliček, vedených v oběžné dráze opěrného kroužku. Jako valivých těles je užito 21 ocelových kuliček o průměru $3,175 \text{ mm}$ třídy přesnosti G5. Opěrný kroužek je tvořen standardním ložiskovým kroužkem axiálního ložiska 51102. Opěrný kroužek je pevně spojen s rotujícím unašečem. Unašeč je spojen s hřídelem pohonné jednotky, která se nachází ve spodní části rámu zkušebního stroje, pomocí kuželového trnu. V případě zkušební stanice AXMAT činí pracovní otáčky 1380 min^{-1} . Na držák zkušebního tělesa je připojen snímač vibrací, který umožňuje automatické ukončení zkoušky při vzniku poškození zkušebního tělesa pittingem. Zkušební stanice AXMAT s popisem jednotlivých částí je na obr. 11. [10]



Obr. 11 Schéma zkušební stanice AXMAT [13]

4.3 Zkoušená maziva

Mazání kontaktu mezi ocelovými kuličkami a zkušebním tělesem je realizováno plastickým mazivem. Pro zkoušky je použito dvou druhů plastických maziv. Jedná se o plastická maziva MOGUL LV3 a METANOVA F1.5.

MOGUL LV3 je průmyslové plastické mazivo na bázi ropných základových olejů, zpevněné lithným mýdlem. Je zušlechťeno aditivami proti oxidaci a rezivění. Jedná se o plastické mazivo poloměkklé až střední konzistence, žluté až hnědé barvy, které má vláknitou strukturu. V tab. 4 uvádím některé jeho charakteristické parametry.

Tab. 4 Charakteristické parametry plastického maziva MOGUL LV3 [19]

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Teplotní rozsah použitelnosti	°C	30 - 120	-
Zpevňovadlo	-	Li mýdlo	-
Penetrace při 25 °C	10 ⁻¹ mm	240 - 280	ČSN ISO 2137
Bod skápnutí	°C	185	ČSN ISO 2176
Kinematická viskozita základového oleje při 40 °C	mm ² · s ⁻¹	50	ČSN EN ISO 3104

METANOVA F1.5 je mazací tuk tzv. „nové generace“, který neobsahuje cizorodé příměsi na bázi grafitu, MoS₂ a jiných kovů nebo PTFE. Vyznačuje se vysokou mechanickou stabilitou a odolností proti velkým zatížením a vysokým obvodovým rychlostem. Výrobce též uvádí vysokou teplotní stálost a odolnost vůči oxidaci a korozi. Dalšími výhodami tohoto maziva jsou odolnost proti vodě, mísitelnost s většinou běžně užívaných maziv, použitelnost za velmi vysokých tlaků a tvorba mononukleární vrstvy, která výrazně snižuje opotřebení kontaktních ploch. V tab. 5 uvádím některé charakteristické parametry mazacího tuku METANOVA F1.5.

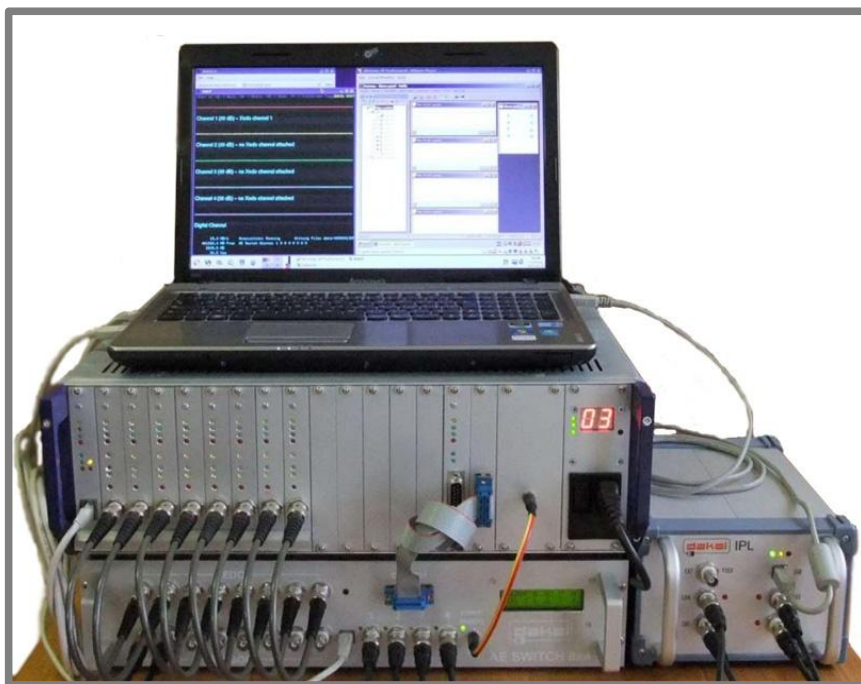
Tab. 5 Charakteristické parametry mazacího tuku METANOVA F1.5 [20]

Parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
Teplotní rozsah použitelnosti	°C	-35 - 230	-
Zpevňovadlo	-	Li mýdlo	-
Penetrace při 25 °C	10 ⁻¹ mm	240 - 300	-
Bod skápnutí	°C	270	-
Kinematická viskozita základového oleje při 40 °C	mm ² · s ⁻¹	600	-

4.4 Měřicí aparatura

Během zkoušky jsou sledovány tři parametry, a to úroveň vibrací, teplota a akustická emise. K detekci úrovně vibrací je užít snímač vibrací Wilcoxon ES-08100B s frekvenční odezvou 2-10 000 Hz. Při překročení nastavené prahové hodnoty úrovně vibrací je zkouška ukončena. Teplota je sledována pomocí snímače Viditech Pt 100. Akustická emise je měřena snímačem XEDO-IPL-AESWITCH spolu s frekvenčním měničem Dakel typu MIDI o frekvenčním rozsahu 80-750 kHz a rozsahu provozních teplot -20 až 150 °C. Všechny tři snímače jsou připojeny k držáku zkušebního tělesa. Vzorkování teploty a vibrací probíhá průběžně během zkoušky frekvencí 2 MHz. Na obr. 17 a 18 na str. 32 se nacházejí tři křivky, které odpovídají záznamu vibrací (modrá a zelená křivka) a teploty (červená křivka). Na obr. 8 na str. 25 se nachází sledované parametry akustické emise z provedené zkoušky trvanlivosti s mazivem METANOVA F1.5.

Na obr. 12 se nachází část měřicí aparatury, ve které probíhá vyhodnocení a záznam signálu sledovaných parametrů zkoušky.



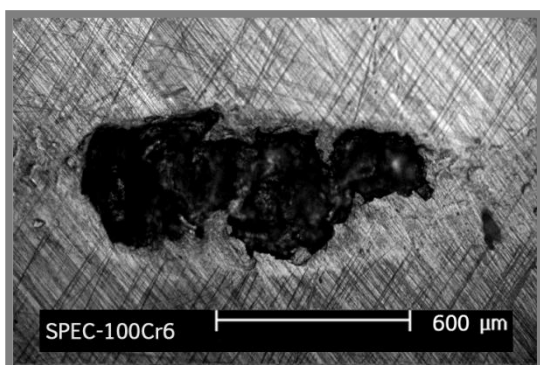
Obr. 12 Fotografie měřicí aparatury

Ze záznamu vibrací je odečten čas do vzniku defektu, ten je poté použit pro výpočet trvanlivosti valivého kontaktu. Záznam parametrů akustické emise je využit pro precizaci počátku vzniku defektu. Trvanlivost je určena statisticky, je užito dvouparametrického Weibullova rozdělení. Hodnocení trvanlivosti je založeno na porovnání základní trvanlivosti L_{10} , v praxi nejužívanějšího kritéria hodnocení trvanlivosti valivých ložisek. Základní trvanlivost je horní 10 %-ní kvantil Weibullova rozdělení, to znamená, že 90 % zkoušených valivých kontaktů dosáhne této trvanlivosti.

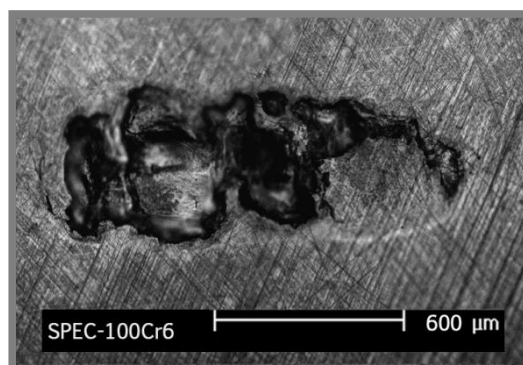
5 VÝSLEDKY

Z provedených zkoušek trvanlivosti je patrné, že trvanlivost vzorků se standardním mazivem MOGUL LV3 (L) je značně nižší než trvanlivost s mazivem METANOVA F1.5 (F), které obsahuje EP přísady. Základní trvanlivost vzorků s (F) je více jak dvakrát větší než u vzorků s (L). Tento výsledek je způsoben celkově vyšší kvalitou maziva (F) a přítomností EP přísad v tomto mazivu.

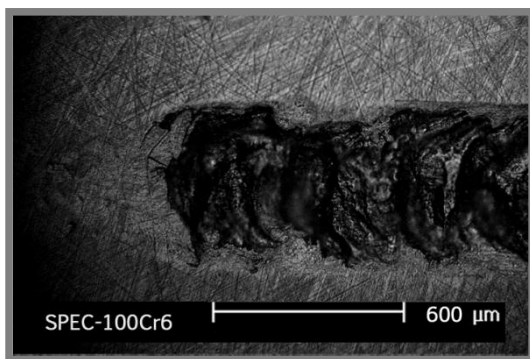
Po každé provedené zkoušce bylo provedeno optické pozorování povrchu vzorku. Byly hledány defekty, které způsobily zvýšení úrovně hladiny vibrací v záznamu signálu. Nejčastějšími poškozeními povrchu vzorků bylo podle očekávání vydrolování materiálu, tedy pitting a spalling. Na obr. 13 až 16 jsou některé defekty nafoceny optickým mikroskopem.



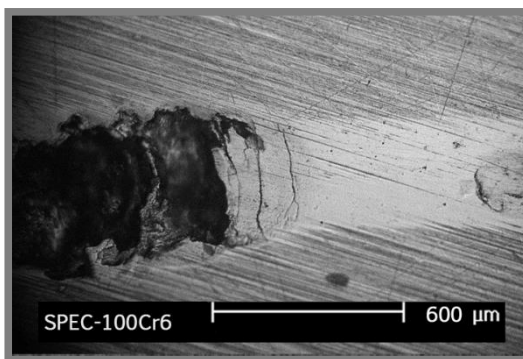
Obr. 13 Spalling na zkušebním vzorku L1



Obr. 14 Spalling na zkušebním vzorku F8



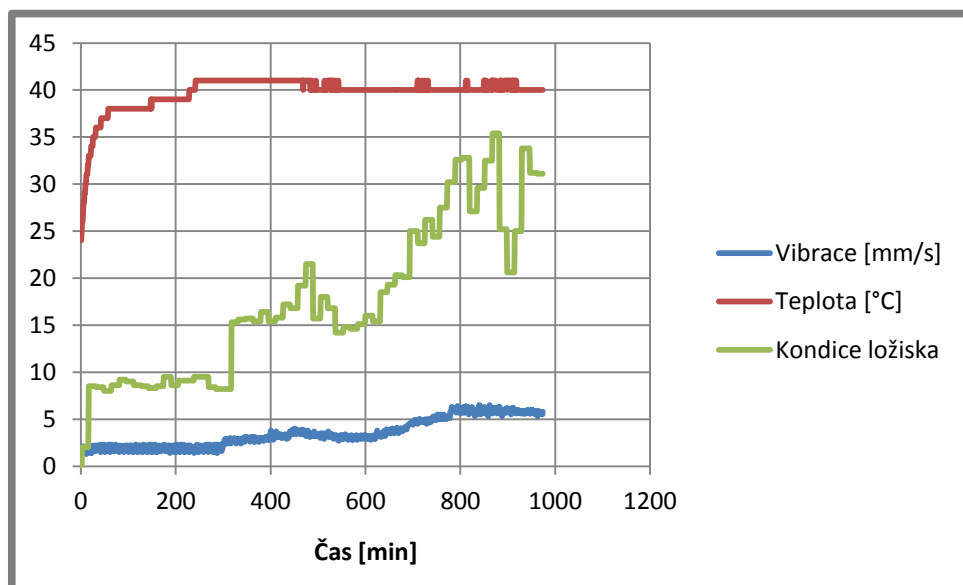
Obr. 15 Okraj defektu na zkušebním vzorku L1



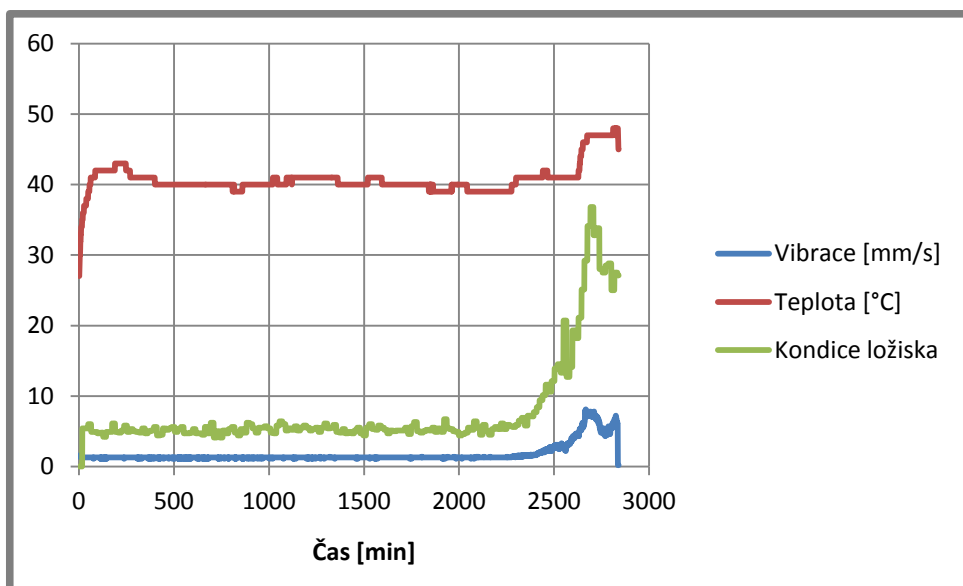
Obr. 16 Okraj defektu na zkušebním vzorku L3

Při zkouškách byly zaznamenávány parametry vibrací, akustické emise a teploty. Průběh teploty byl v obou případech podobný, při záběhu kontaktu se teplota zvýšila a poté již setrvala na konstantní hodnotě až do vzniku defektu, kdy byl zaznamenán další nárůst. Průběhy úrovně vibrací se v případě vzorků s (L) a (F) lišily. Vzorky mazané standardním mazivem (L) vykazovaly méně strmý, ale postupný nárůst hodnot vibrací po vzniku spallingu. Vzorky mazané mazivem s EP přísadami (F) naopak vykazovaly dlouho neměnné hodnoty, které se v jistém čase (doba vzniku defektu) strmě zvýšily. Domnívám se, že tento fakt je dán podstatou funkce EP přísad, které po jistou dobu zabráňují styku kontaktních ploch, a také použitím maziva, které vytváří mononukleární vrstvu zajišťující odolnost proti opotřebení.

Na obr. 17 resp. 18 jsou patrné rozdíly v záznamech sledovaných parametrů vibrací vzorků mazanými (L) a (F). Na obrázcích je také vidět podobnost průběhů teplot. Na obr. 8. na str. 25 se nachází záznam AE pro vzorek s mazivem (F).



Obr. 17 Záznam sledovaných parametrů s mazivem MOGUL LV3



Obr. 18 Záznam sledovaných parametrů s mazivem METANOVA F1.5

5.1 Mazivo MOGUL LV3

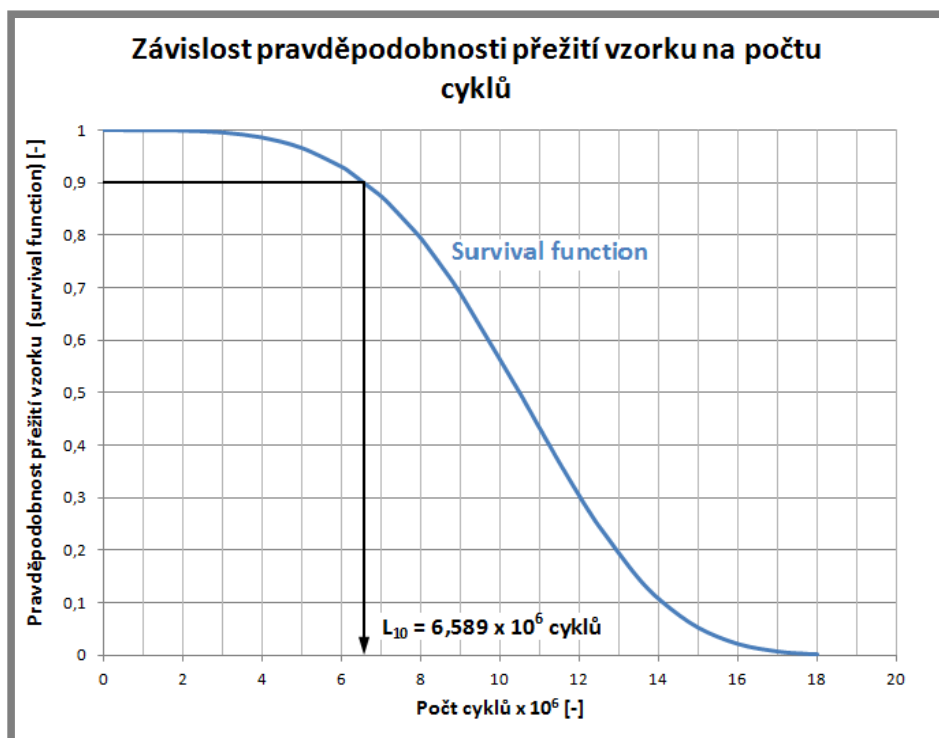
Pro stanovení základní trvanlivosti valivého kontaktu s mazivem (L), byly provedeny zkoušky 20 vzorků, jejichž výsledky jsou uvedeny v tab. 6. Ze souboru dat bylo vypočítáno dvouparametrické Weibullovo rozdělení podle algoritmu uvedeného v příloze 2. Základní trvanlivost L_{10} byla určena jako horní 10 %-ní kvantil funkce přežití Weibullova rozdělení.

Funkce přežití Weibullova rozdělení (survival function) udává pravděpodobnost, se kterou vzorek dosáhne dané trvanlivosti. Horní 10 %-ní kvantil poté udává, že alespoň 90 % vzorků dosáhne základní trvanlivosti L_{10} .

Tab. 6 Naměřené hodnoty a parametry zkoušek maziva MOGUL LV3

Číslo měření	Vzorek	Zatížení	Počet cyklů	Číslo měření	Vzorek	Zatížení	Počet cyklů
Jednotka	-	N	-	Jednotka	-	N	-
1	L1	2673	$12,0 \cdot 10^6$	11	L11	2673	$11,4 \cdot 10^6$
2	L2	2673	$8,8 \cdot 10^6$	12	L12	2673	$11,5 \cdot 10^6$
3	L3	2673	$13,4 \cdot 10^6$	13	L13	2673	$7,1 \cdot 10^6$
4	L4	2673	$6,2 \cdot 10^6$	14	L14	2673	$12,5 \cdot 10^6$
5	L5	2673	$17,7 \cdot 10^6$	15	L15	2673	$14,1 \cdot 10^6$
6	L6	2673	$12,2 \cdot 10^6$	16	L16	2673	$10,7 \cdot 10^6$
7	L7	2673	$9,0 \cdot 10^6$	17	L17	2673	$8,9 \cdot 10^6$
8	L8	2673	$7,0 \cdot 10^6$	18	L18	2673	$12,4 \cdot 10^6$
9	L9	2673	$7,2 \cdot 10^6$	19	L19	2673	$8,1 \cdot 10^6$
10	L10	2673	$7,9 \cdot 10^6$	20	L20	2673	$10,5 \cdot 10^6$

Na obr. 19 se nachází graf závislosti pravděpodobnosti přežití vzorku na počtu cyklů zkoušeného valivého kontaktu. Základní trvanlivost L_{10} valivého kontaktu s mazivem (L) je $6,589 \cdot 10^6$ cyklů.



Obr. 19 Survival function vzorku s mazivem MOGUL LV32

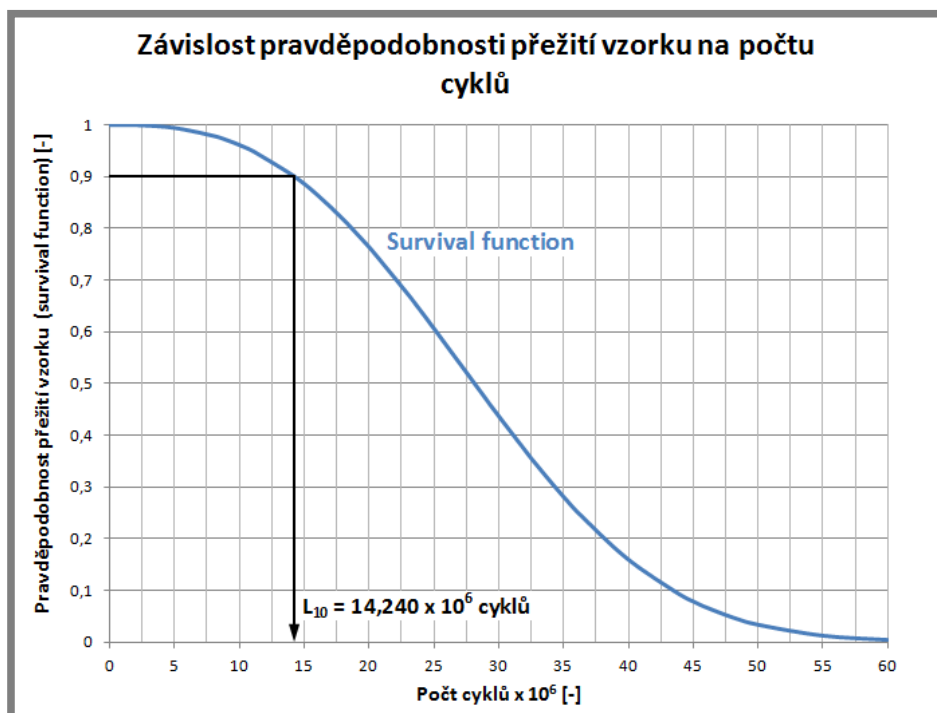
5.2 Mazivo METANOVA F1.5

Pro stanovení základní trvanlivosti valivého kontaktu s mazivem (F), byl opakován postup jako u maziva (L). Výsledky zkoušek 20 vzorků jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Naměřené hodnoty a parametry zkoušek maziva METANOVA F1.5

Číslo měření	Vzorek	Zatížení	Počet cyklů	Číslo měření	Vzorek	Zatížení	Počet cyklů
Jednotka	-	N	-	Jednotka	-	N	-
1	F1	2673	$20,3 \cdot 10^6$	11	F11	2673	$20,1 \cdot 10^6$
2	F2	2673	$36,3 \cdot 10^6$	12	F12	2673	$45,2 \cdot 10^6$
3	F3	2673	$34,1 \cdot 10^6$	13	F13	2673	$35,2 \cdot 10^6$
4	F4	2673	$29,7 \cdot 10^6$	14	F14	2673	$32,7 \cdot 10^6$
5	F5	2673	$11,1 \cdot 10^6$	15	F15	2673	$23,7 \cdot 10^6$
6	F6	2673	$39,8 \cdot 10^6$	16	F16	2673	$29,1 \cdot 10^6$
7	F7	2673	$14,2 \cdot 10^6$	17	F17	2673	$34,1 \cdot 10^6$
8	F8	2673	$43,8 \cdot 10^6$	18	F18	2673	$22,8 \cdot 10^6$
9	F9	2673	$10,6 \cdot 10^6$	19	F19	2673	$32,3 \cdot 10^6$
10	L10	2673	$24,5 \cdot 10^6$	20	L20	2673	$27,2 \cdot 10^6$

Obr. 20 znázorňuje závislost pravděpodobnosti přežití vzorku na počtu cyklů zkoušeného valivého kontaktu. Základní trvanlivost L_{10} valivého kontaktu s mazivem (F) je $14,240 \cdot 10^6$ cyklů.

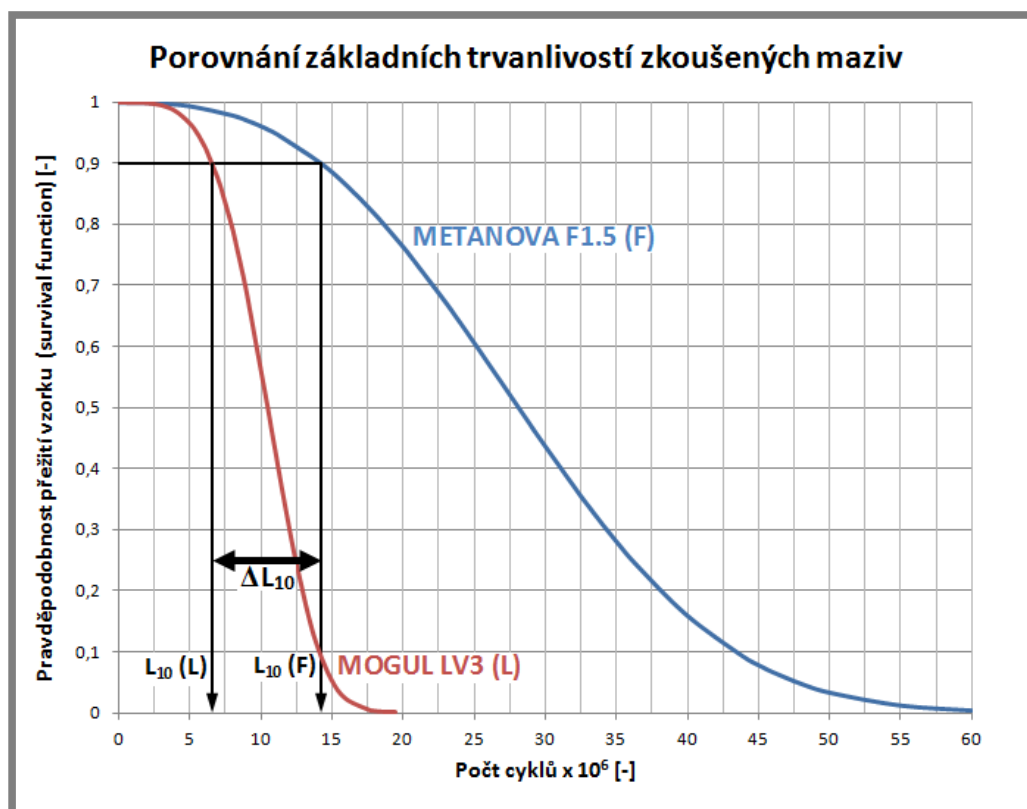


Obr. 20 Survival function vzorku s mazivem METANOVA F1.5

6 DISKUZE

V experimentální části práce byly potvrzeny dvě základní hypotézy, totiž že vliv maziv je základním faktorem ovlivňujícím trvanlivost valivého kontaktu a že EP přísady výrazně zlepší vlastnosti maziva při mazání styku kontaktních ploch.

Jak je patrné z obr. 21, základní trvanlivost L_{10} vzorků mazaných mazivem (F) s vysokotlakými EP přísadami je více jak dvakrát větší než u maziva (L). Základní trvanlivost vzorků s mazivem (F) se zvýšila o 116 % oproti vzorkům s mazivem (L). Nárůst trvanlivosti u maziva METANOVA F1.5 je způsoben všeobecně vyšší kvalitou tohoto maziva (porovnání hodnot charakteristických parametrů z tab. 4 a 5) a především přítomností EP aditiv. Ve výsledku porovnání trvanlivostí se také projevila skutečnost, že mazivo METANOVA F1.5 je charakteristické tvorbou mononukleární povrchové vrstvy, která výrazným způsobem snižuje opotřebení kontaktních ploch.



Obr. 21 Porovnání základních trvanlivostí vzorků mazanými zkoušenými mazivy

Z optického pozorování povrchů vzorků po zkoušce vyplývá, že u obou maziv je hlavním poškozením spalling. Ze záznamu vibrací je ovšem znatelné, že mechanismus jeho vzniku není u obou maziv totožný. Zatímco u maziva MOGUL úroveň vibrací stoupala postupně, u maziva METANOVA šlo o rychlý, strmý nárůst. Z tohoto usuzují, že také spalling na povrchu vzorku ošetřeného mazivem MOGUL vznikal postupně tvorbou menšího pittingu na povrchu vzorku, zatímco u vzorků ošetřených mazivem METANOVA vznikala podpovrchová trhlina větších rozměrů, která v jistém okamžiku zapříčinila odtržení většího množství materiálu z povrchu.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce je členěna na dvě části. V první, teoretické, je shrnut současný stav poznání v oblasti kontaktní únavy, maziv a akustické emise. Ve druhé části, experimentální, je vyhodnocena trvanlivost valivých kontaktů pro dvě různá plastická maziva.

Teoretická část práce shrnuje poznatky o kontaktní únavě, zkušebních strojích využívaných při zkouškách trvanlivosti valivých kontaktů, mazivech a okrajově o využití metody akustické emise pro monitoring valivého kontaktu. Je zde popsán mechanismus vzniku kontaktní únavy, její projevy (pitting, spalling) a rozdělení dle místa iniciace na iniciovanou na povrchu a pod povrchem. Zároveň tato část obsahuje výčet nejčastějších druhů poškození valivých kontaktů, což velice úzce souvisí s experimentálním zkoušením. V části zabývající se zkušebními stroji je provedeno členění těchto strojů na dvě základní skupiny a popsány základní principy modelových zkoušek, jejich výhody a oblast užití. Dále jsou detailněji popsány maziva, základní požadavky, které jsou na ně kladeny, dělení maziv a v neposlední řadě vliv aditiv na jejich vlastnosti. Na závěr teoretické části jsou uvedeny některé obecné poznatky o akustické emisi a možnosti využití metody akustické emise pro detekci pittingu valivých kontaktů.

V experimentální části je popsána metoda experimentu a zvolená instrumentace. Detailněji je popsán zkušební vzorek, zkušební stanice AXMAT, která byla pro dané zkoušky trvanlivosti zvolena, zkoušená plastická maziva a měřicí aparatura, zajišťující záznam průběhu zkoušky. Dále je z parametrů zkušební stanice a hodnot výsledků zkoušek statisticky určena základní trvanlivost pro plastické mazivo MOGUL LV3 a mazací tuk METANOVA F1.5. K určení základní trvanlivosti bylo použito dvouparametrického Weibullova rozdělení. K experimentální části práce patří také přílohy v digitální podobě. Všechny přílohy se nachází na přiloženém CD.

Cíle práce byly splněny, byly ověřeny pracovní hypotézy o vlivu maziv a jejich aditiv na trvanlivost valivého kontaktu. Byly provedeny zkoušky trvanlivosti valivých kontaktů pro dvě maziva a stanoveny jejich základní trvanlivosti. Z výsledků vyplývá, že mazací tuk METANOVA F1.5 s vysokotlakými EP přísadami zvýšil základní trvanlivost valivého kontaktu oproti standardnímu plastickému mazivu MOGUL LV3 více jak dvojnásobně.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**8**

- [1] BLAŠKOVIČ, Pavel; BALLA, Josef; DZIMKO, Marián. *Tribológia*. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 360 s. ISBN 80-05-00 633-0.
- [2] HARRIS, T. A and KOTZALAS, M. N. *Advanced Concepts of Bearing Technology*, Fifth edition, Taylor & Francis, 2006.
- [3] JOHNSON, K. L. *Contact mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1985, First edition. 452 p. ISBN 0-521-25576-7.
- [4] KOPEC, Bernard; a kol. *Nedestruktivní zkoušení materialu a konstrukcí*. 1.vyd. Brno: CERM s.r.o, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [5] POŠTA, Josef; VESELÝ, Petr; DVOŘÁK, Milan. *Degradace strojních součástí*. Praha: ČZU, 2002. 67 s. ISBN 80-213-0967-9.
- [6] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Brno: BEN, 2006. 1.vyd. 376 s. ISBN 80-239-6461-5.
- [7] HORT, F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [8] CHALOUPEK, P. *Procesy kontaktního poškození ložiskových materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Filip Hort.
- [9] SCHREIER, J. *Základní příčiny poškození valivých ložisek a jejich diagnostika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [10] STUPKA, K. *Hodnocení ložiskové oceli na odolnost vůči kontaktní únavě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1989. 123 s. Vedoucí kandidátské disertační práce Ing. Dušan Kolář, CSc.
- [11] HALME, J; ANDERSSON, P. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearings diagnostic. *Proc. IMechE, Part J: J.Engineering Tribology*, 2009, vol. 224, s. 377-393. DOI: 10.1243/13506501JET656
- [12] MICHALCZEWSKI, R.; PIEKOSZEWSKI, W.; SZCZEREK, M.; WULCZYNSKI, J. A Method for the Assessment of the Rolling Contact Fatigue. *Transactions of Fama*, 2012, roč. 36, č. 4, s. 39-48. ISSN:1333-1124.

- [13] NOHÁL, L.; HORT, F.; DVOŘÁČEK, J.; MAZAL, P. An Experimental Investigation of Rolling Contact Fatigue of Steels Using Acoustic Emission Method. *INSIGHT*, 2013, roč. 55, č. 12, s. 665-669. ISSN: 1354- 2575.
- [14] POŠTA, J. *Opořebení*. [online], [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>>.
- [15] POŠTA, J.; VESELÝ, P. *Degradace strojních součástí. : Opořebení únavové*. [online], [cit. 2009-04-07]. Dostupné z: <<http://degradace.tf.czu.cz>>.
- [16] ŠRÁMEK, O.; VRBKA, M. *Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních částí*. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2007. [online], [cit. 2009-04-09]. Dostupné z: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=361>.
- [17] Ústav konstruování - FSI VUT v Brně [online], [cit. 2014-04-07]. *Konstruování strojů - strojní součásti*. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/index5e20.html?akce=3&sekce=vyuka&ln=cs&zobraz_predmet=1>.
- [18] *Internetové stránky společnosti PRECIS, s.r.o.* [online], [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <<http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2067>>.
- [19] Internetové stránky společnosti PARAMO, a.s. [online], [cit. 2014-05-15]. *Technické informace k plastickému mazivu MOGUL LV3*. Dostupné z: <https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_mogul_lv2_3_z1.pdf>.
- [20] Internetové stránky společnosti METANOVA CZ. [online], [cit. 2014-05-20]. *Technické informace k mazivům*. Dostupné z: < <http://www.metanova.cz/index.php3?akce=2&podkategorie=3>>.
- [21] Internetové stránky WebSnadno. [online], [cit. 2014-05-17]. *Informace pro chromovanou ocel 14109 dle ČSN 41 4109*. Dostupné z: <http://kulicky.wbs.cz/14_109.pdf>.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**9**

Zkratka	Význam
RCF	Rolling Contact Fatigue
PTFE	polytetrafluoretylen
EP	Extreme Pressure
NDT	Non-Destructive Testing
RMS	Root Mean Square
FFT	Fast Fourier Transform
AE	akustická emise
EHD	elastohydrodynamický
ČSN	Česká technická norma
mazivo (L)	mazivo MOGUL LV3
mazivo (F)	mazivo METANOVA F1.5

Symbol	Popis
$v [m \cdot s^{-1}]$	rychlost relativního pohybu
$N [N]$	kolmá složka zatížení
Ra	průměrná aritmetická odchylka profilu povrchu
HRC	tvrdost podle Rockwella
L_{10}	základní trvanlivost valivého kontaktu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1** Frekvence výskytu jednotlivých poruch valivých ložisek [2]
- Obr. 2** Schéma mechanismu adhezivního opotřebení [14]
- Obr. 3** Postupná tvorba pittingu pod povrchem [11]
- Obr. 4** Pitting na valivém tělese [15]
- Obr. 5** Spalling na valivém tělese [15]
- Obr. 6** Zkušební stanice RMAT [16]
- Obr. 7** Princip měření na zkušební stanici AXMAT
- Obr. 8** Měřené veličiny AE vzorku s mazivem METANOVA F1.5
- Obr. 9** Zkušební těleso [13]
- Obr. 10** Geometrie zkušebního tělesa
- Obr. 11** Schéma zkušební stanice AXMAT [13]
- Obr. 12** Fotografie měřicí aparatury
- Obr. 13** Spalling na zkušebním vzorku L1
- Obr. 14** Spalling na zkušebním vzorku F8
- Obr. 15** Okraj defektu na zkušebním vzorku L1
- Obr. 16** Okraj defektu na zkušebním vzorku L3
- Obr. 17** Záznam sledovaných parametrů s mazivem MOGUL LV3
- Obr. 18** Záznam sledovaných parametrů s mazivem METANOVA F1.5
- Obr. 19** Survival function vzorku s mazivem MOGUL LV32
- Obr. 20** Survival function vzorku s mazivem METANOVA F1.5
- Obr. 21** Porovnání základních trvanlivosti vzorků mazanými zkoušenými mazivy

11 SEZNAM TABULEK**11**

- Tab. 1** Vybrané zkušební stroje s bodovým stykem [12]
Tab. 2 Vybrané zkušební stroje s přímkovým stykem [12]
Tab. 3 Chemické složení oceli 14109 (100Cr6) [18]
Tab. 4 Charakteristické parametry plastického maziva MOGUL LV3 [19]
Tab. 5 Charakteristické parametry mazacího tuku METANOVA F1.5 [20]
Tab. 6 Naměřené hodnoty a parametry zkoušek maziva MOGUL LV3
Tab. 7 Naměřené hodnoty a parametry zkoušek maziva METANOVA F1.5

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálové charakteristiky ložiskové oceli 14109

Příloha 2 Algoritmus výpočtu Weibullova rozdělení a základní trvanlivosti L_{10}

Příloha 3 Protokoly ke zkouškám trvanlivosti

Příloha 4 Záznam parametrů reprezentativních zkoušek