



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VYUŽITÍ EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ MINI TRACTION MACHINE PŘI STUDIU TŘENÍ MAZANÝCH A NEMAZANÝCH KONTAKTŮ

USING OF EXPERIMENTAL APPARATUS MINI TRACTION MACHINE FOR STUDY OF
FRICTIONAL PROPERTIES OF LUBRICATED AND UNLUBRICATED CONTACTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL WILHELM

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN VRBKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Wilhelm

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:

Využití experimentálního zařízení Mini Traction Machine při studiu tření mazaných a nemazaných kontaktů

v anglickém jazyce:

Using of experimental apparatus Mini Traction Machine for study of frictional properties of lubricated and unlubricated contacts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti experimentálního studia tření mazaných a nemazaných kontaktů s využitím experimentálního zařízení Mini Traction Machine doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Definici základních pojmů
- 3.Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti
- 4.Analýzu a zhodnocení získaných poznatků
- 5.Vymezení trendů budoucího vývoje
- 6.Souhrnnou bibliografii
- 7.Závěr

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva

Typ práce: rešeršní

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

1. Grease degradation in a bearing simulation device, P M Cann, Tribology International, Volume 39, Issue 12, pp 1698-1706, (December 2006)
2. Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact, Vicente J. de, Stokes, J.R. and Spikes, H.A. Proc. I.Mech.E. Part J220, pp 55-63, (2006)
3. <http://www.pcs-instruments.com/>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na popis zařízení Mini-Traction Machine. Po teoretickém úvodu do Tribologie je nejprve obecně popsán princip měření na zařízení Mini-Traction Machine a poté jsou uvedena a vysvětlena jednotlivá příslušenství. Následně jsou shrnuty výsledky stěžejních experimentů z celého světa, při jejichž měření bylo zařízení Mini-Traction Machine použito. Jednotlivé výzkumy ukazují možnosti aplikace Mini-Traction Machine při měření tribologických vlastností materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mini-Traction Machine, nekonformní povrchy, tření, mazání

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on description of Mini-Traction Machine test rig. After the theoretical introduction to Tribology is first generally described the principle of measuring on the Mini-Traction Machine and then are described the individual accessories.

Consequently the results of main experiments where Mini-Traction Machine test rig was used from all over the world are summarized. Individual experiments show the possibilities of applying Mini-Traction Machine when measuring the material tribological characteristics.

KEYWORDS

Mini-Traction Machine, non-conforming surfaces, friction, lubrication

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WILHELM, P. *Využití experimentálního zařízení Mini Traction Machine při studiu tření mazaných a nemazaných kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Vrbka, Ph.D..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci Využití experimentálního zařízení Mini Traction Machine při studiu tření mazaných a nemazaných kontaktů, jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Vrbky, Ph.D. a uvedl v seznamu všechny literární, odborné a jiné zdroje.

V Brně dne: _____

Pavel Wilhelm

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat za podporu ve studiu své rodině, své přítelkyni za motivaci, svým přátelům a spolužákům za rozptýlení i pomoc při přípravě na zkoušky a testy a svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Vrbkovi, Ph.D. za rady i trpělivost při psaní.

OBSAH

ÚVOD	15
1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	16
1.1 Tření	16
1.1.1 Smykové tření	16
1.1.2 Valivé tření	16
1.2 Opotřebení	17
1.3 Viskozita	17
1.4 Parametr mazání	18
1.5 Stribeckova křivka	18
1.6 Režimy mazání	19
1.6.1 Hydrostatické mazání	19
1.6.2 Hydrodynamické mazání	19
1.6.3 Elastohydrodynamické mazání	19
1.6.4 Mezní mazání	20
1.6.5 Mazání tuhými mazivy	20
1.7 Rozdělení kontaktů podle geometrie	20
1.7.1 Nekonformní povrchy	20
1.7.2 Konformní povrchy	20
.....	20
1.8 Princip zařízení	21
1.9 Zkušební tělesa	22
1.10 Přídavná zařízení	23
1.10.1 3D – SLIM (Spacer Layer Image Mapping)	23
1.10.2 MTM soft contact option	24
1.10.3 O ring holder	24
1.10.4 Reciprocating option	25
1.10.5 MTM Grease Scoop	26
1.10.6 Microscope Holder for MTM Specimens	26
1.10.7 Backing Plate	27
1.10.8 MTM Barrel Assembly	27
1.10.9 Pin on Disc Adapter & Software	28
1.10.10 Pot Filler	29
1.10.11 MTM Mini Pot	29
1.10.12 ECR - Electrical contact resistance	30
1.10.13 Oil Cooler	31
2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI	32
2.1 Grease degradation in a bearing simulation device	32
2.1.1 Abstrakt	32
2.1.2 Postup	32
2.1.3 Závěr	32
2.2 In situ observation of phosphorus and non-phosphorus antiwear films using a mini traction machine with spacer layer image mapping	33
2.2.1 Abstrakt	33
2.2.2 Postup	34
2.2.3 Závěr	34
2.3 Effects of basestock and additive chemistry on traction testing	34
2.3.1 Abstrakt	34

2.3.2 Popis experimentu.....	35
2.3.3 Závěr	35
2.4 Experimental investigation on the contact fatigue life under starved conditions	36
2.4.1 Abstrakt.....	36
2.4.2 Popis experimentu.....	37
2.4.3 Závěr	37
2.5 Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact	37
2.5.1 Abstrakt.....	37
2.5.2 Úvod.....	37
2.5.3 Popis experimentu.....	38
2.5.4 Závěr	39
2.6 Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts	44
2.6.1 Abstrakt.....	44
2.6.2 Úvod.....	44
2.6.3 Popis.....	44
2.6.4 Závěr	45
3 ZÁVĚR	47
4 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE	48

ÚVOD

Při chodu každého mechanismu dochází k nežádoucím ztrátám vlivem tření mezi povrchy. Následkem je zahřívání, rychlé opotřebení součástí a v neposledním případě zadření celého stroje.

Pro snížení vlivů tření se používá maziv aplikovaných různým způsobem na namáhané součásti.

Pro realizaci experimentů sloužících pro navazující výzkum je zapotřebí přesného nastavení několika parametrů. Ústav konstruování, z tohoto důvodu bude kupovat zařízení Mini-Traction Machine (MTM2, PCS Instruments, UK), které umožňuje nezávisle na sobě přesné nastavení hodnot: poměru odvalování/prokluz (slide/roll ratio), teploty maziva, a zatížení zkušebních těles. Za nastavených podmínek MTM2 automaticky měří a zaznamenává výsledky.

V této bakalářské práci jsou nejprve definovány základní pojmy tribologie, následně popsán princip funkce MTM2 a nakonec zmapovány současné poznatky v oblasti tření a mazání nekonformních třecích povrchů za použití přístroje Mini-Traction Machine.

1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1.1 Tření

Tření je pasivní odpor s opačným směrem působení, než relativní pohyb třecích povrchů.

Tření dělíme podle tvaru třecích ploch a relativního pohybu na dvě kategorie:

- Smykové
- Valivé

U nekonformních tuhých kontaktů např. oceli valivé tření je malé a obvykle může být zanedbáno. Nicméně u „měkkých“ kontaktů valivé tření zanedbat nemůžeme, jeho hodnota je srovnatelná s hodnotou smykového tření. [1,2]

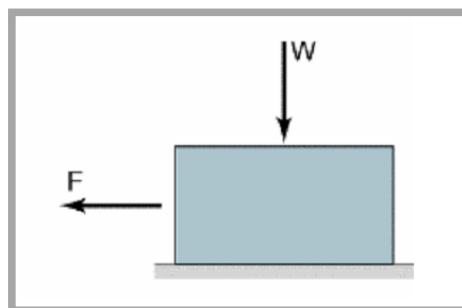
1.1.1 Smykové tření

Smykové tření vzniká rozdílem rychlostí povrchů v kontaktu. Směr smykového tření je opačný na každém z povrchů.

součinitel smykového tření

$$\mu = \frac{F}{W}$$

[1,2]



Obr. 1 Smykové tření [1]

1.1.2 Valivé tření

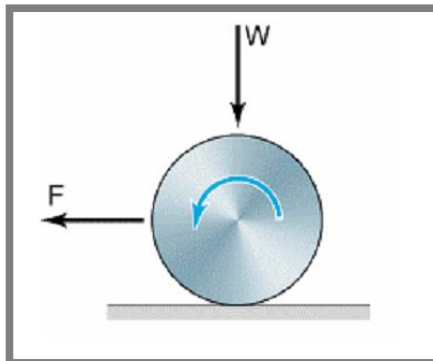
Naopak valivé tření nezávisí na rozdílu rychlostí obou povrchů ale na rychlosti vzhledem ke kontaktu.

I v případě, že se po sobě povrchy čistě odvalují, dochází k malému smykovému tření vlivem mikroprokluzu. [2]

Součinitel valivého tření

$$\mu_r = \frac{F}{W} r$$

[1,2]



Obr. 2 Valivé tření [1]

1.2 Opotřebení

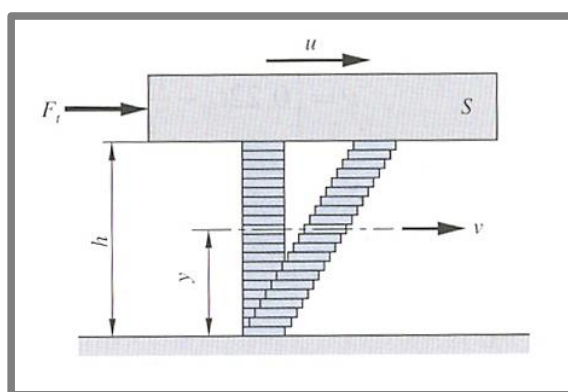
1.2

je proces postupného zhoršování součásti způsobující úbytek materiálu ze zatíženého povrchu. Opotřebení je způsobeno zatížením a relativním pohybem povrchů. [1]

1.3 Viskozita

1.3

Na obrázku je zobrazena deska o ploše S , pohybující se rychlostí u . Od druhého povrchu je oddělena vrstvou mazacího filmu o tloušťce h . Proudění mazacího filmu si můžeme jednoduše představit jako balíček karet. Třecí síla F_t způsobí posun vrstev filmu.



Obr. 3 Proudění maziva jako pohyb vrstev [3]

V závislosti na vzdálenosti vrstvy maziva y od desky se mění jejich velikost rychlosti. Proto platí

$$\mathcal{T} = \frac{F_t}{S} = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{u}{h}$$

Kde $\mathcal{T}$ je tečné napětí, η je dynamická viskozita, smykový spád dv/dy je gradient rychlosti v kolmém směru k pohybu tekutiny. Protože pro Newtonské tekutiny je konstantní, můžeme psát $dv/dy = u/h$.

Při popisování tokových charakteristik tekutin se také používá kinematická viskozita ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

1.4 Parametr mazání

Podle zkoušek valivých ložisek bylo prokázáno, že životnost třecích povrchů závisí na poměru tloušťky mazacího filmu k redukované drsnosti třecích povrchů.

Parametr mazání

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}}$$

h_{min} minimální tloušťka mazacího filmu

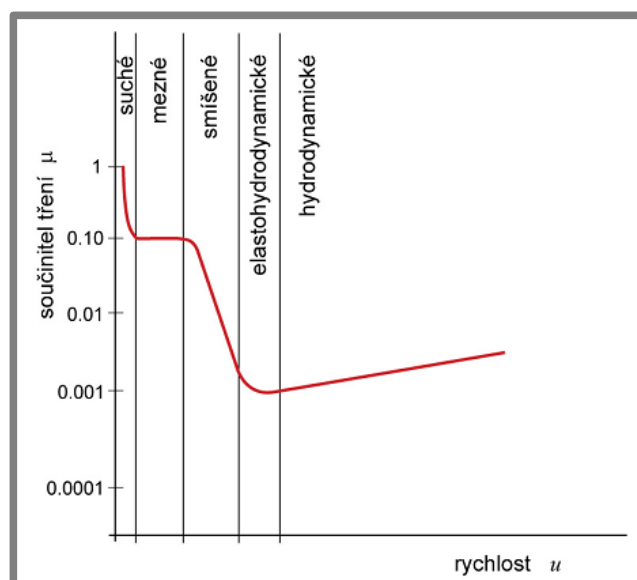
Rq_a průměrná kvadratická úchylka tělesa a

Rq_b průměrná kvadratická úchylka tělesa b

$5 \leq \Lambda < 100$	mazání hydrodynamické
$3 \leq \Lambda < 10$	mazání elastohydrodynamické
$1 \leq \Lambda < 5$	mazání smíšené
$\Lambda < 1$	mazání mezní [1,2,4]

1.5 Stribeckova křivka

Stribeckova křivka je základní charakteristikou mazání. Graf zobrazuje závislost součinitele tření na unášecí rychlosti. V grafu jsou patrné jednotlivé úseky režimů mazání. [1,4]



Obr. 4 Stribeckova křivka [1]

Stribeckova křivka může také porovnávat součinitel tření s unášivou rychlostí krát dynamická viskozita $u \cdot \eta$. Toto je výhodné při srovnávání výsledků různých maziv v jediném grafu. [2]

1.6 Režimy mazání

1.6

Celkem se rozlišuje pět režimů mazání:

1.6.1 Hydrostatické mazání

1.6.1

Mazivo je přiváděno dostatečně vysokým tlakem, vznikne relativně tlustý mazací film a třecí povrchy jsou od sebe vzájemně odděleny. U hydrostatického režimu mazání není nutný relativní pohyb třecích povrchů.

Tento režim mazání může být výhodný u ložisek s velmi malou až nulovou rychlostí. [3]

1.6.2 Hydrodynamické mazání

1.6.2

Obdobně jako u hydrostatického mazání, i zde jsou třecí povrchy odděleny poměrně tlustým mazacím filmem. Vlivem relativního pohybu třecích povrchů v mazacím filmu vzniká tlak, mazivo je unášeno do zúženého místa mezi oběma povrchy, kde vzniká klínová vrstva maziva.

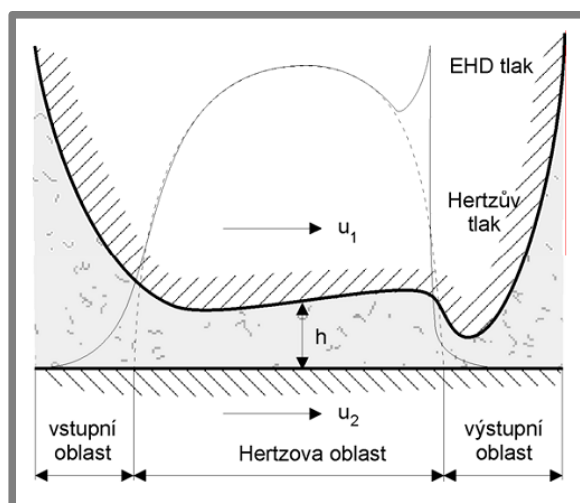
Při hydrodynamickém režimu mazání třecí povrchy nejsou téměř vůbec opotřebovávány. [1,3]

1.6.3 Elastohydrodynamické mazání

1.6.3

U elastohydrodynamického mazání je mazivo vtahováno mezi dva vzájemně se odvalující povrchy. Dochází k relativně vysokým zatížením, jehož následkem je změna viskozity maziva a elastická deformace povrchů, která je řádově stejně velká, jako tloušťka mazacího filmu.

Tento režim je častý u zatížených, nekonformně zakřivených povrchů jako jsou spoluzabírající kola nebo valivá ložiska. [1,3]



Obr. 5 Elastohydrodynamické mazání [1]

1.6.4 Mezné mazání

Při mezném mazání jsou od sebe povrchy odděleny velmi tenkým mazacím filmem o tloušťce pouhých několika molekul. Mezi oběma povrchy dochází k vzájemnému styku na výčnělcích nerovností. Vlastnosti závisí na fyzikálních a chemických charakteristikách.

Mezný film vzniká protržením souvislého mazacího filmu u kapalinového mazání. [1,3]

1.6.5 Mazání tuhými mazivy

Tuhá maziva jsou využívána pokud ložiska pracují v extrémních teplotách. Podobně jako u mezného mazání, i zde dochází k interakci mezi třecími povrchy. [3]

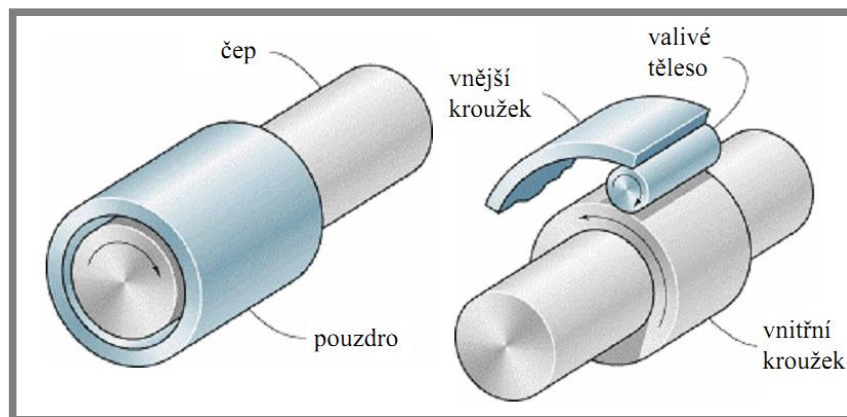
1.7 Rozdělení kontaktů podle geometrie

1.7.1 Nekonformní povrchy

- blízká geometrie obou stykových ploch
- malá působící radiální síla
- díky malé zatěžující síle a velké kontaktní ploše nedochází k podstatnému zvětšování kontaktních ploch
- např.: kluzná ložiska

1.7.2 Konformní povrchy

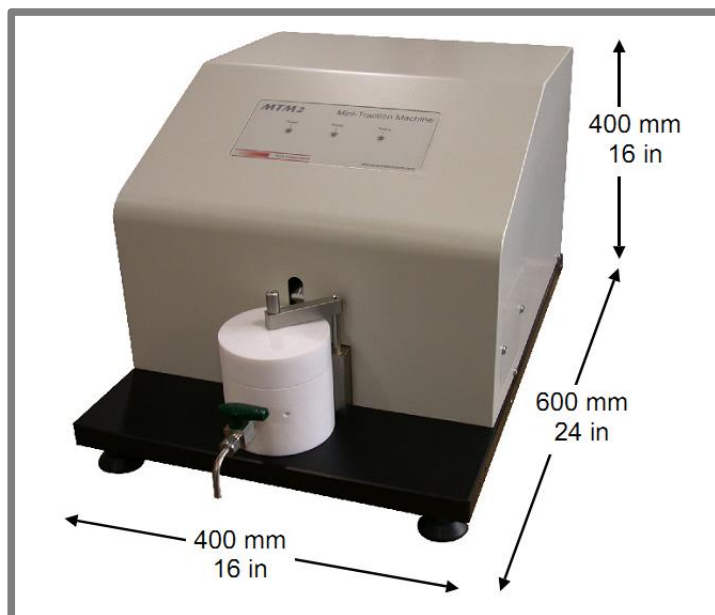
- velmi malá styková plocha
- velké přenášené zatížení
- vlivem malých stykových ploch a vysokému zatížení dochází k rozpínání kontaktních ploch
- např.: valivá ložiska, ozubené převody, vačka-zdvihátko [1]



Obr. 6 Konformní a nekonformní povrchy [4]

1.8 Princip zařízení

PCS Instruments se specializuje na testovací zařízení v oblasti tribologie. Po velkém úspěchu zařízení Mini Traction Machine, kterých se celosvětově prodalo více než 50 kusů, zkonstruovali nový Mini Traction Machine (MTM2). [5]



Obr. 7 Zařízení Mini Traction Machine [5]

Zkušební těleso je přitlačováno na disk. Díky nezávislému řízení rotace zkušební vzorku a disku můžeme testovat při různých poměrech valení/smýkání. Dále je možné nastavit hodnotu zatížení kuličky nebo teplotu maziva.

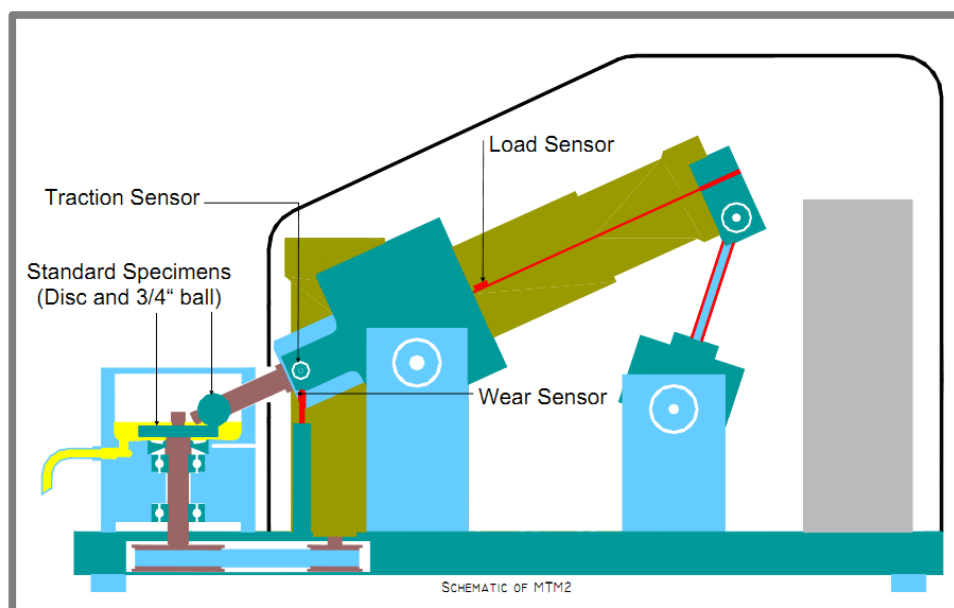
Zařízení pomocí **silového snímače (force transducer)** měří třecí sílu mezi diskem a kuličkou. Další senzory měří zatížení a teplotu maziva.

Další přídatná zařízení umožňují měření elektrického odporu v kontaktu a relativního opotřebení.

Řídící software běžící na počítači umožňuje nastavení testovacího profilu se sledem teplot, zatížení a rychlostí. Navolený profil potom automaticky řídí zařízení podle zadaných parametrů a samostatně měří výsledky. [5]

Tab. 1 Technické parametry MTM2

Rozsah zatížení:	0 ÷ 75 N
Kontaktní tlak	0 ÷ 1,25 GPa se standardními zkušebními vzorky 0 ÷ 3,1 GPa s alternativními zkušebními vzorky
Rychlosti	-4 ÷ 4 ms ⁻¹
Objem testovaného maziva	35 ml, 10 ml za použití přídatné výplně zásobníku maziva
Hmotnost zařízení	30 kg
Vyhodnocovací zařízení	Software běžící na OS MS Windows
Napájení	100-240 V, 50/60 Hz, 750 VA



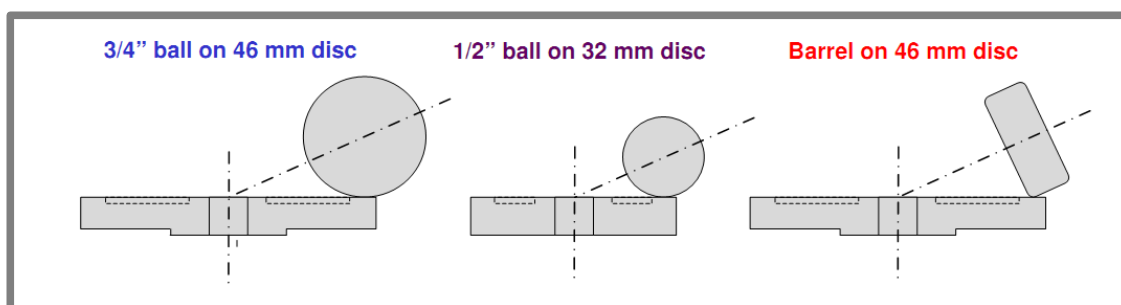
Obr. 8 Schématický náčrt Mini Traction Machine [5]

1.9 Zkušební tělesa

Tab. 2 Zkušební vzorky MTM2

Zkušební těleso	kulička nebo váleček
Průměr disku	46 nebo 32 mm
Materiály vzorků	oceli, nástrojové oceli neželezné kovy, keramika, polymery, elastomery, povlakované substráty, popř. na zakázku podle vlastních požadavků
Drsnost povrchu	Ra 0,5 ÷ Ra 0,01
Tvrdost disku	185 HV ÷ 760 HV
Tvrdost zkušebního tělesa	150 HV ÷ 800 HV

Díky malému rozměru zkušebních vzorků a jejich jednoduché geometrii mohou být vyrobena poměrně levně a proto je možné pro každý experiment použít nové zkušební vzorky. [5,6]



Obr. 9 Konfigurace zkušebních vzorků [6]

1.10 Přídavná zařízení

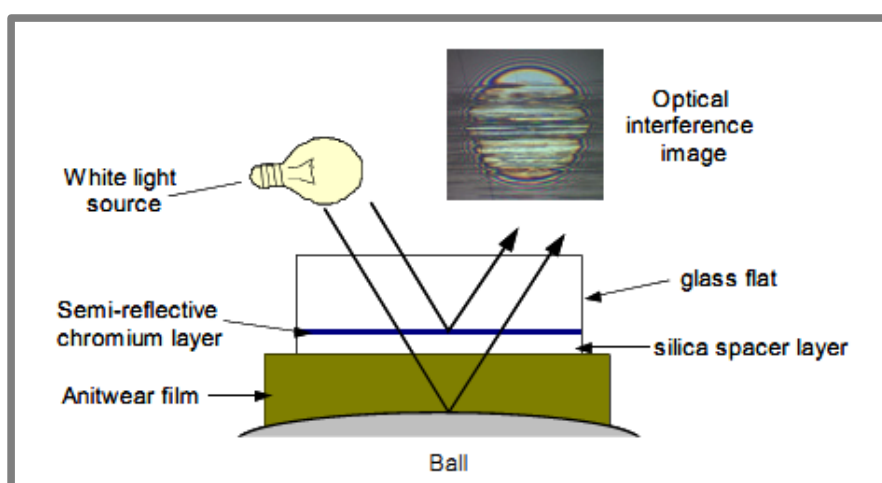
1.10

Se základním vybavením Mini Traction Machine je možné přikoupit další příslušenství pro rozšíření jeho možností. Zde je výčet všech nabízených přídavných zařízení

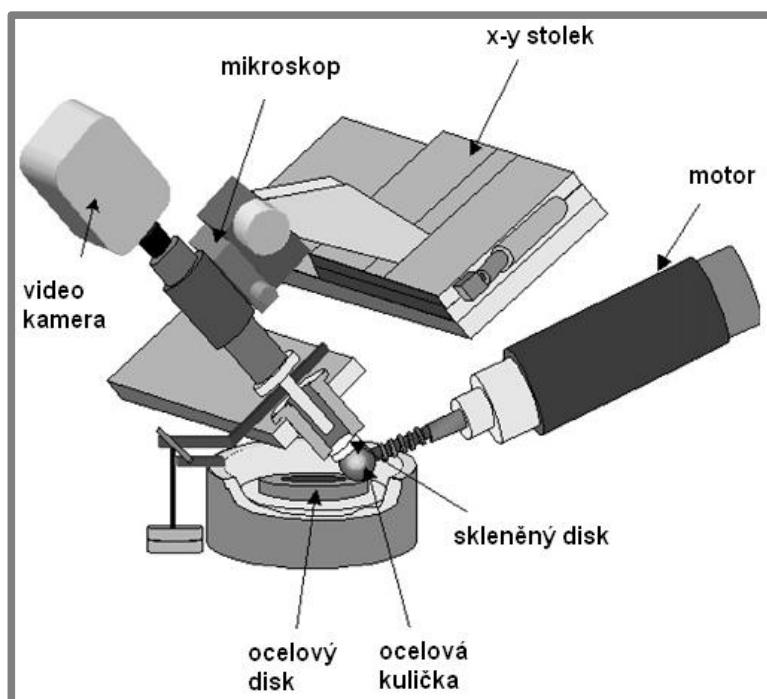
1.10.1 3D – SLIM (Spacer Layer Image Mapping)

1.10.1

Použití nástavce 3D – SLIM umožňuje optickou interferometrií měřit tloušťku filmu. Kulička je periodicky zastavována a přitlačena na pochromované sklíčko. Kontakt je osvětlen bílým světlem, část paprsku se odrazí od chromové vrstvičky disku a část světla projde skrz křemíkovou vrstvu a film a odrazí se od povrchu ocelové kuličky zpět do mikroskopu. Kamera přes mikroskop pořídí snímek povrchu. Snímek je softwarem analyzován pro určení tloušťky filmu. [5]

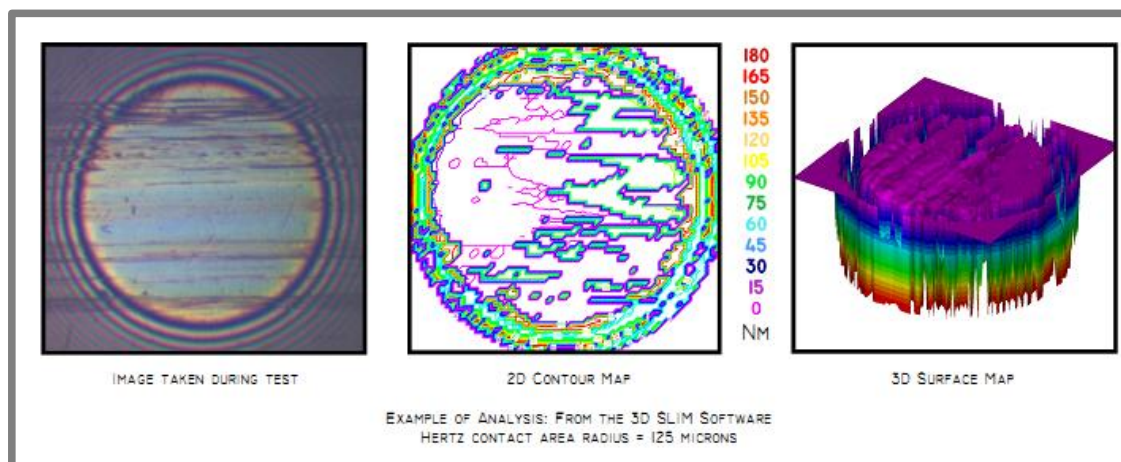


Obr. 11 Schématický náčrt principu optické interferometrie použité na MTM2 [5]



Obr. 10 MTM s nástavcem Spacer Layer Image Mapping [7]

Následně může být obrázek převeden do 3D modelu zobrazující tloušťky filmu v různých místech. [5]



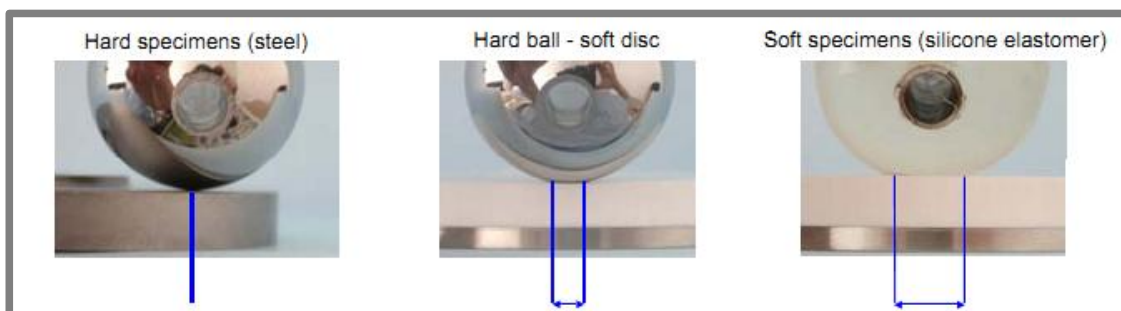
Obr. 12 Analýza obrazu pořízeného optickou interferometrií [5]

1.10.2 MTM soft contact option

Na Mini Traction Machine je možné měřit tření pro téměř všechny materiály, od nejtvrdších ocelí až po silikonové elastomery.

Zkušební kuličky z alternativních materiálů se upínají stejně jako ocelové. Pro volbu jiného materiálu disku je nutné k upnutí použít podložný disk, viz níže. [8,9]

Rozdíl v charakteru kontaktu „tvrdých“ povrchů a „měkkých“ je zřejmý z následujícího obrázku



Obr. 13 Rozdíl v kontaktu „tvrdých“ a „měkkých“ materiálů [8]

1.10.3 O ring holder

Dále je možné pomocí kleštiny na O-kroužky testovat charakteristiky měkkých kontaktů. MTM2 samo vypočítá kompenzaci deformace při použití plastických materiálů oproti kovovým, u MTM1 se musí deformace pro kompenzaci zatížení dopočítat ručně. [10]



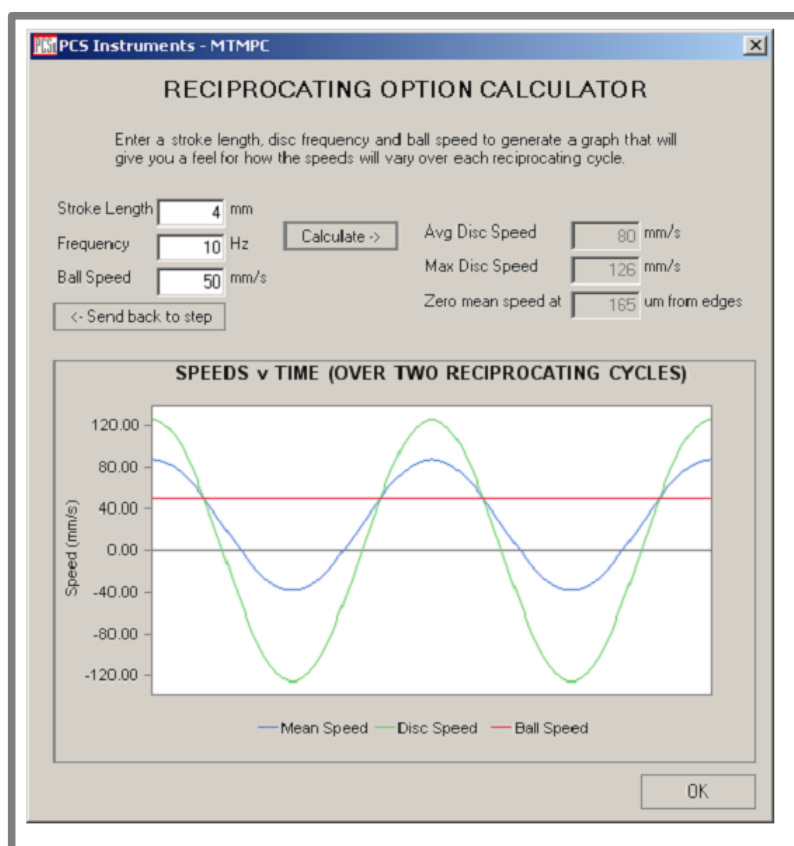
Obr. 14 O ring holder [10]

1.10.4 Reciprocating option

1.10.4

„Reciprocating option“ podle stanovené frekvence obrátí směr rotace. Toto nastavení je užitečné při zkoumání dynamických podmínek, kdy simulace za použití Reciprocating option je přesnější, než při měření s nepřerušovaně rotujícím diskem. Oscilační frekvence může být v rozmezí 0,1 až 20 Hz.

Rychlost kuličky: -4 až $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

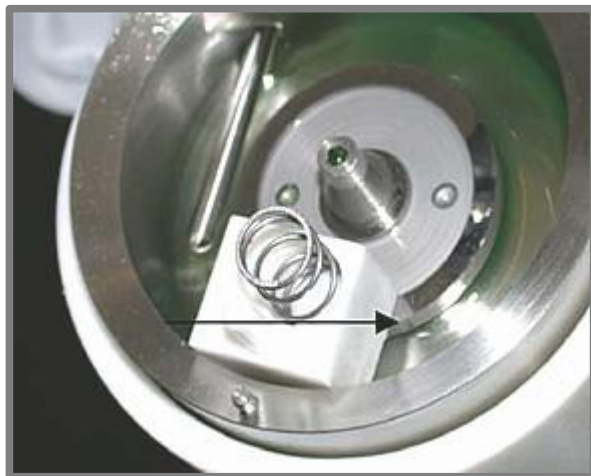


Obr. 15 Reciprocating option, simulace průběhů pro nastavené hodnoty [11]

Běžné testy opotřebení vačky-zdvihátka jsou časově i finančně náročné. Při použití Reciprocation option je celý test levnější i rychlejší. [11]

1.10.5 MTM Grease Scoop

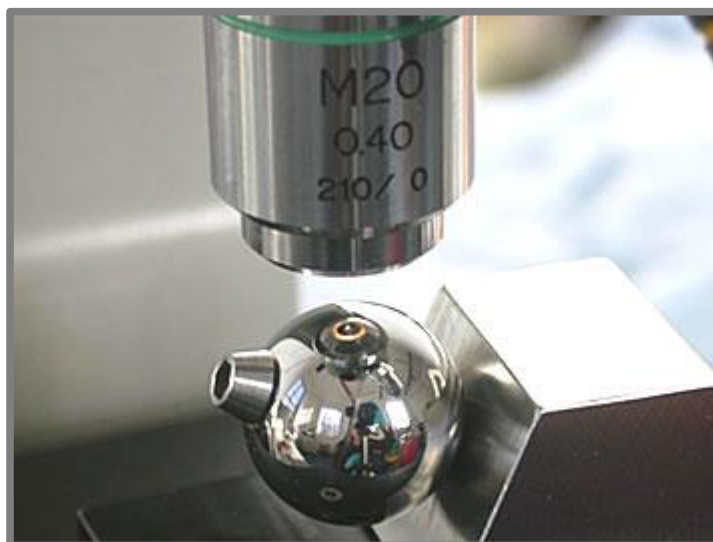
Tato součást nasměrovává mazivo do kontaktu. [12]



Obr. 16 Grease scoop [12]

1.10.6 Microscope Holder for MTM Specimens

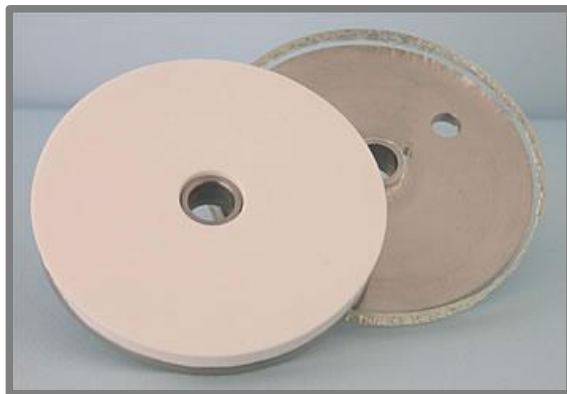
Toto přídavné zařízení nijak nerozšiřuje možnosti testování na MTM2. Jeho funkcí je ve správném úhlu zajistit polohu testovacího vzorku pro zkoumání pod mikroskopem.



Obr. 17 Microscope holder [13]

1.10.7 Backing Plate1.10.7

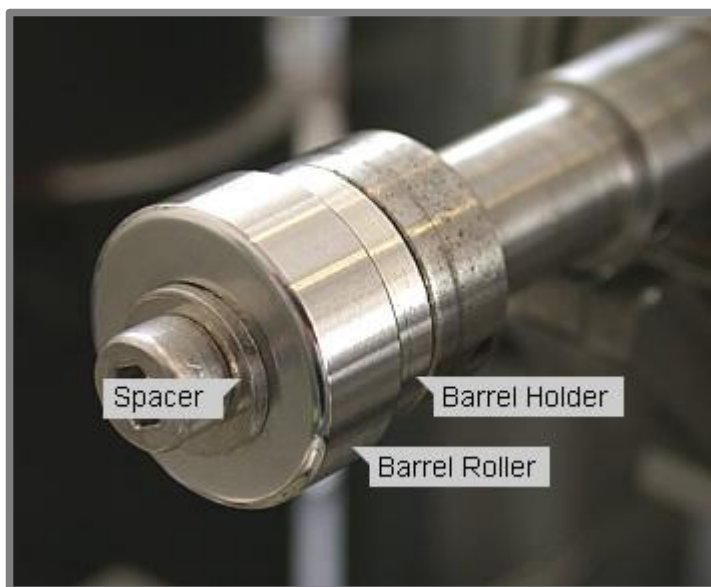
Na Backing Plate se uchytlí disk z jiného než kovového materiálu. Celá soustava tvořená Backing Plate a zkoumaným diskem se poté upne do MTM a tak je možné zkoumat tření na „měkkých“ materiálech. [8]



Obr. 18 Upevnění disků silikonových elastomerů na backing plate [8]

1.10.8 MTM Barrel Assembly1.10.8

Na zařízení MTM2 je možné testovat také se vzorkem tvaru válce, který díky malému zaoblení vytvoří vysoký kontaktní tlak. Při 75 N je kontaktní tlak při použití kuličky $d=19,05\text{mm}$ 1,3GPa, zatímco při použití válečku 3,2GPa. [14]



Obr. 19 Barrel Assembly [14]

1.10.9 Pin on Disc Adapter & Software

Mimo klasické sestavení vzorků kuličky a disku je možná i konfigurace s jehlou a diskem. Jehla je klíčem zajištěna, aby nedocházelo k jejímu protáčení. Zkušební disk může být z libovolného materiálu a drsnosti povrchu.

Spolu s mechanickými součástkami je dodáván i software k vyhodnocení naměřených hodnot.



Obr. 20 komponenty Pin on disc kleština, zajišťovací šroubek [15]



Obr. 21 Pin on disc adaptér ve zdvižené poloze [15]

1.10.10 Pot Filler1.10.10

Svým tvarem vložka zaplňuje rezervoár a tím snižuje jeho obsah a množství oleje pro testování z 35 ml na 10 ml. Proti pohybu je zajištěn šrouby. [16]



Obr. 22 Rezervoár maziva vlevo bez a vpravo s vložkou [16]

1.10.11 MTM Mini Pot1.10.11

Mini Pot svým tvarem redukuje množství oleje z 35 na 4 ml. Protože veškerá kapalina je po dobu testu uzavřena, je možné testovat vliv přítomnosti nečistot, jako je písek apod. Díky uzavření oleje a případných nečistot od rezervoáru MTM není třeba jej čistit.

Maximální rychlost je redukována na $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [17]



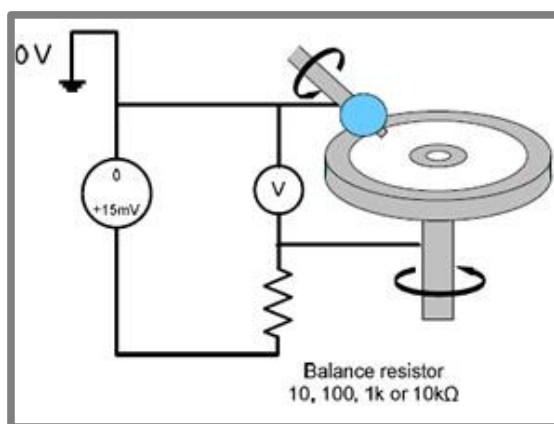
Obr. 23 Držadlo na $\frac{1}{2}$ palcovou kuličku, šroub pro její uchycení, speciální disk, přepážkový disk, víčko [17]



Obr. 24 Nainstalovaný Mini Pot [17]

1.10.12 ECR - Electrical contact resistance

Rezistor je zapojený v sérii se zkušebními vzorky, kterými prochází elektrický potenciál přibližně 15 mV. Protože lubrikant je nevodivý, pokud jsou vzorky od sebe odděleny filmem, napětí na disku je 15 mV a potenciál na rezistoru je 0 V. To odpovídá 100 % tloušťce filmu. Naopak pokud se zkušební vzorky dotýkají, dojde ke spojení nakrátko a napětí na disku bude 0 V. [18]



Obr. 25 schéma zapojení pro měření elektrického odporu kontaktu [18]

Přídavné zařízení pro měření elektrického odporu kontaktu je praktické pro testování vlivu aditiv v mazivu a zadírání. Vlivem vysokého zatížení v plně zaplaveném kontaktu anebo v hladovějícím kontaktu se k sobě zkušební vzorky přiblíží. Podle měření odporu kontaktu poznáme, ve které části Stribeckovy křivky testování probíhá, a v jakém režimu mazání.

Rozsah odporů 10 Ω , 100 Ω , 1 K Ω , 10 K Ω .

Měření je možné provádět se všemi vodivými materiály a geometriemi, které PCS Instruments nabízí. Dále je možné použití s 3-D SLIM, Pot filler apod. Zařízení není možné kombinovat s Reciprocating kit.

Spolu s mechanickými součástkami je dodáván i vyhodnocovací software. [18]

1.10.13 Oil Cooler

1.10.13

Chladič oleje řízený softwarem MTM umožňuje snížení teploty na požadovanou hodnotu. Výhodou je možnost dřívějšího testování na zařízení MTM, obzvláště při opakovaném testování za vysokých teplot.

Rozměry: 700x600x400mm, hmotnost 36kg [19]



Obr. 26 Chladič oleje [19]

2 PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

Zde je souhrn několika stěžejních experimentů za využití MTM2, ukazující jeho možnosti využití.

2.1 Grease degradation in a bearing simulation device

2.1.1 Abstrakt

Zařízení MTM bylo využito pro degradaci maziva za kontrolovaných podmínek. Celkem byly prováděny čtyři testy a to pro: plně zaplavený a polo vyhladovělý stav, čímž byly simulovány oba stavy mazání ve valivých ložiscích, a mazivo hydroxystearan lithný bez a s příměsí aditiv proti opotřebení a antioxidantů.

2.1.2 Postup

MTM bylo využito pro simulaci podmínek v kuličkových valivých ložiscích. Pro každý test byla použita nová ocelová kulička M52100, $d=19,05$ mm a ocelový disk M52100. Poměr smýkání/valení byl 10%. Doba zatěžování byla 300 minut, teplota maziva 120 °C, zatížení 35 N.

Doplňování maziva vlivem pohybu kuličky ve valivém ložisku bylo simulováno pohybem disku a kuličky.

Pro simulaci vlivu kapilárního efektu při doplňování maziva bylo užito opětovného zastavování a odlehčení kontaktu.

Kulička byla zatížena vždy po 5 minut za rychlosti $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Měření součinitele tření probíhalo vždy v 60 s intervalech, celkově tedy proběhlo 300 měření v 60 zátěžných cyklech.

Na konci každého testu byla provedena IR spektrometrie dráhy a okolního mazacího filmu.

2.1.3 Závěr

Plně zaplavený kontakt: vykazoval stabilně nízký koeficient tření v průběhu celého testu.

Polo vyhladovělý kontakt: součinitel tření se po několika cyklech stabilizoval na obdobně nízké hodnotě jako u plně zaplaveného kontaktu, protože mazivo po několika cyklech zaběhne mezi třecí povrchy.

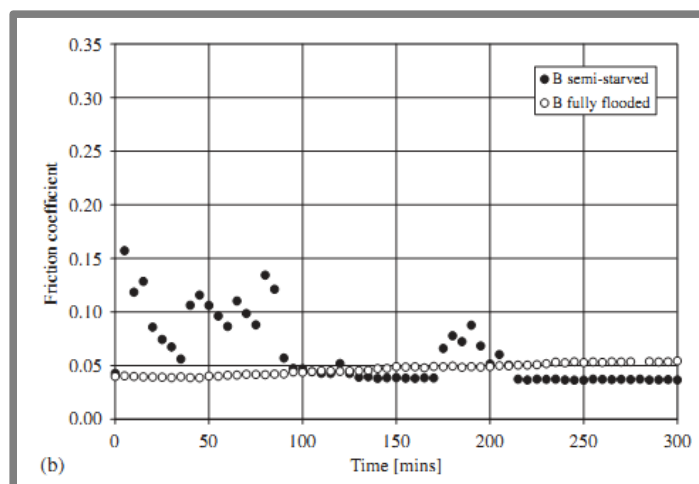
IR analýza mazacího filmu: vlivem **localized shear/mechanical degradation** je úbytek maziva tím větší, čím blíže se místo nachází dráze kuličky. Na rozdíl od maziva s aditivu, u maziva bez aditiv se zformovala hustá přilnutá vrstva.

Vliv aditiv: u maziva s přítomností aditiv trvalo déle, než se koeficient tření ustálil na nízké hodnotě (90 minut). U maziva bez aditiv se koeficient tření ustálil na nízké hodnotě už po pěti minutách.

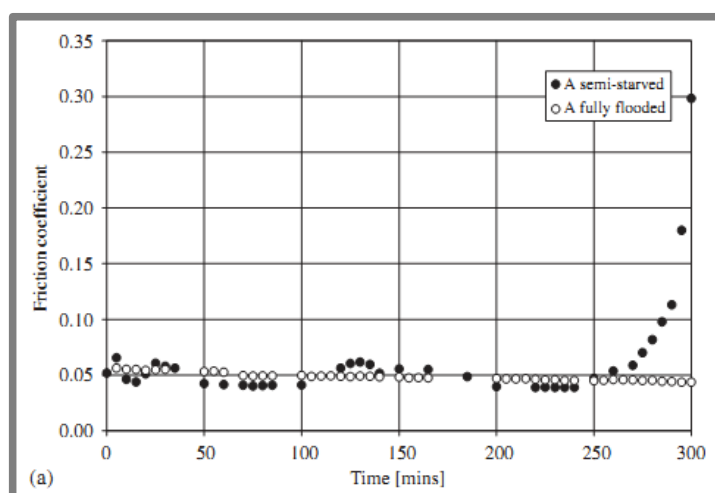
U maziva s aditivu ke zvýšení koeficientu tření v průběhu testu nedošlo.

U maziva bez aditiv se ke konci testu nekontrolovatelně zvyšoval koeficient tření. To bylo způsobeno vznikajícím hladověním kontaktu a vznikem nánosu zoxidovaného

vrstvičky na dráze, což přispělo ke zvýšení drsnosti povrchu. Nános zoxidované zhuštěné vrstvičky je podobný vzorku získaného z ložisek. [20]



Obr. 27 Graf průběhu součinitele tření v 5 min intervalech odlehčování, mazivo bez aditiv [20]



Obr. 28 Graf průběhu součinitele tření v 5 min intervalech odlehčování, mazivo s aditivou [20]

2.2 In situ observation of phosphorus and non-phosphorus antiwear films using a mini traction machine with spacer layer image mapping

2.2

2.2.1 Abstrakt

2.2.1

Cílem tohoto experimentu bylo vyšetřit nárůst filmu dialkyldithiofosforečnanu zinečnatého (ZDDP) a potom určit zda samotné sloučeniny boru zajistí výrazný film proti opotřebení v kontaktu valcím a smýkaném.

Pro měření tloušťky filmu bylo použito MTM s nástavcem SLIM (Spacer Layer Image Mapping). Disk byl ponořen v mazivu, jehož teplota je řízena s přesností ± 1 °C. Soustava kuličky a disku je zakryta víčkem, aby nedošlo k bočnímu výtoku maziva.

2.2.2 Postup

Souprava sestává z ocelové kuličky o průměru 19,05 mm a disku o průměru 50 mm, obojí z oceli AISI 52100 s povrchovou tvrdostí 750 HV, drsnost kuličky Ra 0,015 μm a drsnost disku Ra 0,150 μm .

Mazaný kontakt je smýkán/valen v poměru 50 % po dobu 60 minut. Kulička je zatížena silou 30 N, což odpovídá 0,9 GPa v oblasti Hertzova napětí. Teplota oleje byla 80 a 100 °C.

Pro každý test bylo použito nové kuličky i disku.

Kulička byla pravidelně zastavována a v 15 minutových intervalech byla měřena tloušťka filmu, koeficient tření a pořízen obrázek utváření filmu.

2.2.3 Závěr

Při teplotě 80 °C se nevytvořil žádný film obsahující ZDDP při různých koncentracích fosforu.

Při teplotě 100 °C vznikl film u všech olejů obsahujících ZDDP. Maximální tloušťka filmu nastala u oleje obsahujícího 0,08 % fosforu po jedné hodině, o tloušťce přibližně 90nm.

Se zvyšující se tloušťkou filmu spolu se zvyšující se koncentrací ZDDP při 100 °C, součinitel tření vzrostl až na 0,10 u oleje s obsahem 0,08 % fosforu. Toto pravděpodobně způsobilo nerovnoměrné rozdělení a podélný charakteru mazacího filmu.

Monoblend oleje s obsahem bóru 0,12 a 0,06 % vykazovaly značnou tvorbu filmu při 100 °C o tloušťce okolo 180nm.

Fully formulated oleje s obsahem bóru bez ZDDP aditiv vykazovaly nejvyšší tloušťku filmu okolo 185 nm.

Bórové aditivum spolu se ZDDP vykazovalo zvýšenou rychlost tvorby filmu v porovnání s tloušťkou oleje obsahujícího pouze ZDDP u monoblend i fully formulated olejů.

Výsledky povrchové analýzy ukázaly, že u fully formulated olejů obsahující bór došlo ke značné difuzi bóru na povrchu kuličky do hloubky 0,5 μm . Vysoká tloušťka filmu byla připisána bóru u všech olejů s obsahem bóru. [7]

2.3 Effects of basestock and additive chemistry on traction testing

2.3.1 Abstrakt

Zařízení MTM bylo použito pro měření efektů modifikátoru tření na základu o vysoké i nízké polaritě. Z výsledků vyplynulo, že modifikátor tření glycerol monoolate (GMO) je nejefektivnější s ropným minerálním olejem a nejméně efektivní v kombinaci s polyesterem.

Dále bylo zařízení MTM použito pro rozlišení trakce různých organických modifikátorů tření a vyšetření reakcí různých sulfonátových smáčedel.

2.3.2 Popis experimentu

19,05 mm průměr kuličky AISI 52100, disk průměr 46 mm AISI 52100, teploty 40, 80, 120 a 135 °C

měření koeficientu tření pro dvě charakteristiky:

1. křivka smýkání/valení (SRR)
10-70 % unášivá rychlost $v=1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
2. Stribeckova křivka
různá unášivá rychlost $v=0 \div 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tab. 3 Popis základních olejů

Popis oleje	Zkratka	Kinematická viskozita pro 40 °C(cSt)	Kinematická viskozita pro 100 °C(cSt)
Ropný minerální olej	MO	30	4,4
Alkylbenzen	AKB	30,7	4,5
Polyol ester	POE	33	5,9

Tab. 4 Popis modifikátorů tření a přesycených sulfonátů

Aditiva	popis
Modifikátory tření	
GMO	Glycerol mono oleate
ETA	Bis-(2-hydroxyethyl) tallow amine
ETA/TOFA	Reaction product of TEA + TOFA
CAP	Overbased calcium carboxylate
Přesycené sulfonáty	
C400A	Overbased calcium sulfonate crystalline, 300 TBN
C300C	Overbased calcium sulfonate crystalline, 300 TBN
C400C	Overbased calcium sulfonate crystalline, 400 TBN
M400A	Overbased magnesium sulfonate amorphous, 400 TBN

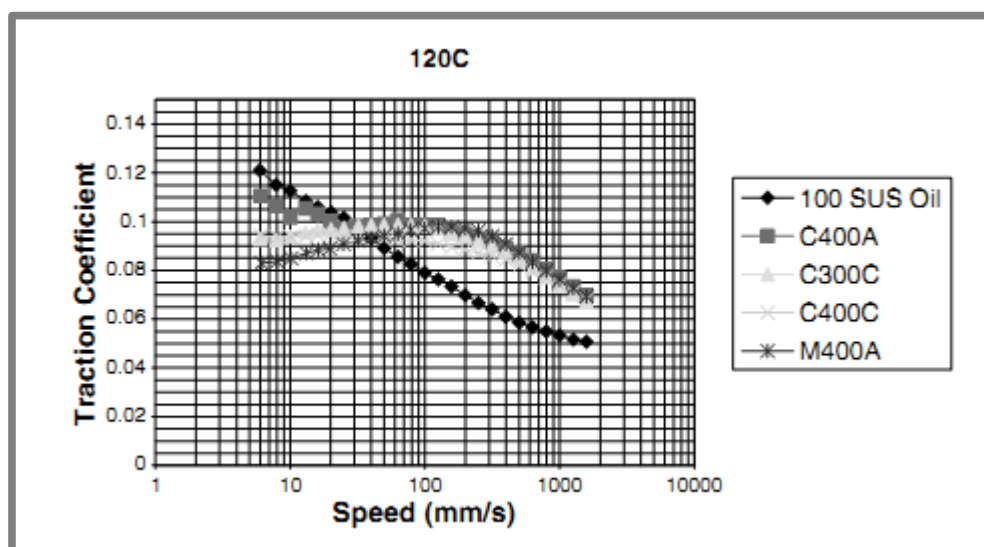
2.3.3 Závěr

Podle předpokladu součinitele tření v pořadí od nejvyššího po nejmenší byly Minerální olej > Alkylbenzen >> Polyol ester. Z grafů Stribeckovy křivky pro teploty 40 a 80 °C a SRR pro 40 °C je tento fakt patrný

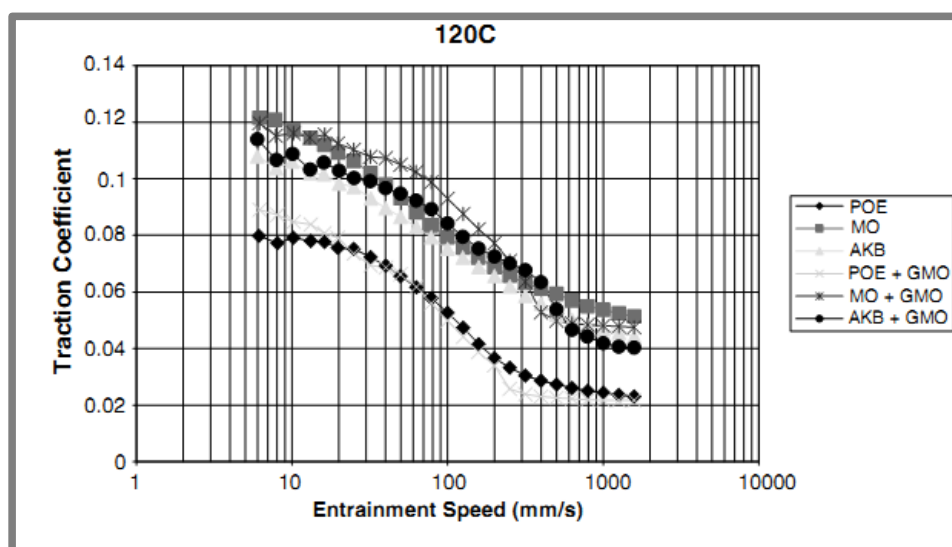
Předpoklad, že při použití modifikátoru tření GMO, pořadí zůstane zachováno se potvrdil, což je patrné z grafů Stribeckovy křivky pro 40,80 a 120 °C. Na grafu Stribeckovy křivky pro teplotu 135 °C je průběh komplexnější, než u předchozích teplot. Autor toto připisuje degradaci povrchu zkušební jehly a disku.

Při studiu přesycených sulfonátů bylo zjištěno, že průběhy koeficientu tření se u maziva s aditivou zásadně odlišovaly od základního oleje a ve všech případech se „napřímil“ průběh křivek. Tento efekt, je výhodný pro použití v automatické

převodovce, kde je vyžadován konstantní průběh tření, aby nedocházelo k prokluzu spojky. [21]



Obr. 29 Stribeckovy křivky základních olejů pro 120 °C [21]



Obr. 30 Stribeckovy křivky pro 10 % přesycené sulfonáty v oleji 100 SUS [21]

2.4 Experimental investigation on the contact fatigue life under starved conditions

2.4.1 Abstrakt

Výzkum popisuje vliv hladovění na únavovou životnost strojních součástí. První část spojuje provozní podmínky, dodávku maziva a součinitel tření.

Druhá část není testována na zařízení MTM, proto zde není popsána.

2.4.2 Popis experimentu

Ocelová kulička o průměru 20 mm je přitlačována na ocelový disk, Hertzův tlak 1,2 GPa.

Zařízení MTM měřilo součinitel tření v 40 sekundových intervalech po dobu 20 minut pro různé provozní podmínky a množství maziva.

Tab. 5 Provozní podmínky testu

Teplota	40; 60 °C
Zatížení	25 N
Průměrná rychlost valení	100 mm · s ⁻¹
Poměr smýkání/valení	2; 10 %
Množství oleje	5; 10; 15; 20 mg
Viskozita oleje PAO100 při 100 °C	85 mPa·s

2.4.3 Závěr

Výsledky ukázaly, že hladovění kontaktu zvyšuje termální účinky v kontaktu, které následně mohou vést k poruchám se zadíráním. Tloušťka filmu a součinitel tření úzce závisí na množství maziva a provozních podmínkách. Množství maziva určuje hodnotu ustáleného tření a času pro dosažení rovnováhy. [22]

2.4.3

2.5 Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact

2.5

2.5.1 Abstrakt

V této práci bylo zkoumáno smykové a valivé tření. Je popsán postup pro měření obou složek tření současně v jediném testu, což umožňuje zobrazení Stribeckových křivek zvláště pro valivé a zvláště pro smykové tření. Tyto křivky byly porovnány s teoretickými odhady tření.

2.5.2 Úvod

Až donedávna se při elastohydrodynamickému režimu mazání zaměřovalo pouze na výpočet tloušťky filmu a ne na tření. Nejčastěji používané rovnice pro výpočet tloušťky filmu pro kruhový kontakt jsou rovnice Hamrocka a Dowsona.

2.5.2

$$\frac{h_c}{R} = \bar{H}_c = 3,3 \bar{U}^{0,64} \bar{W}^{-0,22}$$

$$\frac{h_m}{R} = \bar{H}_m = 2,8 \bar{U}^{0,65} \bar{W}^{-0,21}$$

kde h_c je střední a h_m je minimální tloušťka filmu.

U je unášivá rychlost a W je zatížení

$$\bar{U} = \frac{U\eta}{E'R'} \\ \bar{W} = \frac{W}{E'R'^2}$$

kde, η je dynamická viskozita maziva, E' je redukovaný modul pružnosti

$$\frac{2}{E'} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2}$$

a R' je redukovaný poloměr dotyku ve směru unášivé rychlosti.

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}}$$

Autoři tohoto článku vyvinuli regresní rovnice pro I-EHL kontaktu kuličky s rovným povrchem.

$$(1) \mu_{Poiseuille} = 1,46\bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,70}$$

$$(2) \mu_{Couette} = SRR \left(3,8\bar{U}^{0,71} \bar{W}^{-0,76} + 0,96\bar{U}^{0,36} \cdot \bar{W}^{-0,11} \right)$$

kde SRR značí poměr smýkání/valení,

2.5.3 Popis experimentu

kulička z oceli AISI 440 o poloměru 9,5 mm byla v kontaktu s elastomerem tvaru disku o poloměru 46 mm. Povrchová drsnost kuličky byla $R_q 10$ nm, drsnost disku byla $R_q 800 \pm 100$ nm.

Tab. 6 Provozní podmínky testu

Teplota	35 °C
Zatížení	3 N
Průměrná rychlost valení	4 ÷ 1200 mm · s⁻¹
Poměr smýkání/valení	50 %

Tab. 7 Zkušební kapaliny

Kapalina	Viskozita při teplotě 35 °C Pa·s
Destilovaná voda	0,000754
50% kukuřičný sirup	0,00696
86% kukuřičný sirup	0,2335
93% kukuřičný sirup	1,141
Glycerol	0,380

Zařízení MTM měří tření u smíšeného režimu mazání dvěma po sobě následujícími měřeními. Siloměr umístěný na motoru, pohánějící kuličku změří nejprve sílu s kuličkou pohybující se rychleji než disk a poté s diskem pohybujícím se rychleji než

kulička. Výsledná třecí síla je vypočítána jako polovina rozdílu těchto dvou měření. MTM takto pracuje, aby eliminoval odchylku siloměru.

Pokud je odchylka nulová, obě měření budou vypadat následovně:

$$\begin{aligned} F_i &= 0 - F \\ F_{ii} &= 0 + F \\ \text{Naměřené síly} \end{aligned}$$

$$F_t = \frac{F_i - F_{ii}}{2}$$

Třecí síla

Bylo zjištěno, že tento způsob měření zanedbává vliv valivého tření. Proto v tomto článku jsou prováděna celkem čtyři měření namísto dvou. První dvě měření jsou provedena stejně jako při předchozím postupu. Při dalších dvou měřeních se disk i kulička pohybují stejnou rychlostí, ale v opačném směru. Tím získáme následující čtyři rovnice:

$$\begin{aligned} u_K > u_D \text{ obě kladné, } F_i &= 0 - F_s - F_v \\ u_K < u_D \text{ obě kladné, } F_{ii} &= 0 + F_s - F_v \\ u_K > u_D \text{ obě kladné, } F_{iii} &= 0 + F_s + F_v \\ u_K < u_D \text{ obě kladné, } F_{iv} &= 0 - F_s + F_v \end{aligned}$$

Kde u_K je unášivá rychlost kuličky a u_D unášivá rychlost disku, F_s je smyková třecí síla a F_v valivá třecí síla. Z těchto rovnic jednoduše spočítáme smykovou třecí sílu

$$F_{\text{smyková}} = \frac{F_i - F_{ii} - F_{iii} + F_{iv}}{4}$$

a valivou třecí sílu

$$F_{\text{valivá}} = \frac{F_i + F_{ii} - F_{iii} - F_{iv}}{4}$$

Protože provoz MTM je plně řízen počítačem, čtyři měření je možné v rychlém sledu bez nutnosti zastavit nebo odlehčovat kontakt.

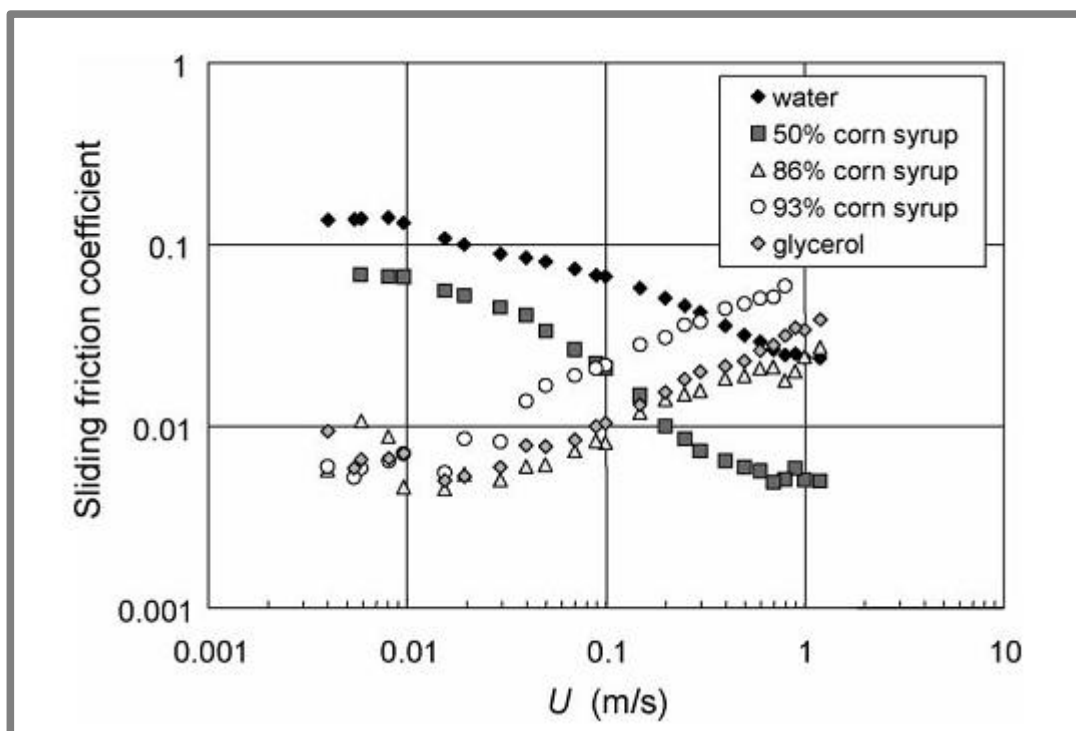
Při tomto nastavení také eliminujeme mikroskluz u valivého tření, protože je složkou smykového tření. Mikroskluz u „poddajných“ materiálů může dosahovat poměrně vysokých hodnot. Proto je toto nastavení pro měření valivého tření přesnější.

2.5.4 Závěr

2.5.4

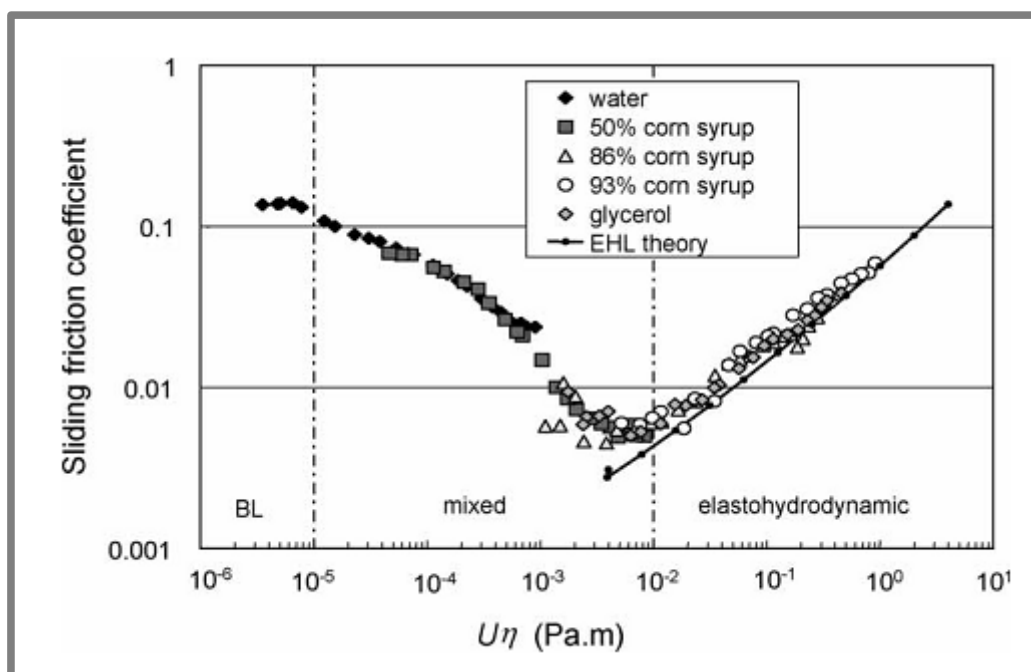
Parametr mazání je pro tento experiment přibližně $\Lambda = 4,5$ což je poměrně blízko hranici $\Lambda = 5$ mezi smíšeným a hydrodynamickým mazáním.

Při vykreslení do grafu součinitele smykového tření a unášivé rychlosti se zdá, že průběh součinitele tření pro jednotlivé kapaliny je odlišný.



Obr. 31 Graf součinitele smykového tření a unášivé rychlosti [2]

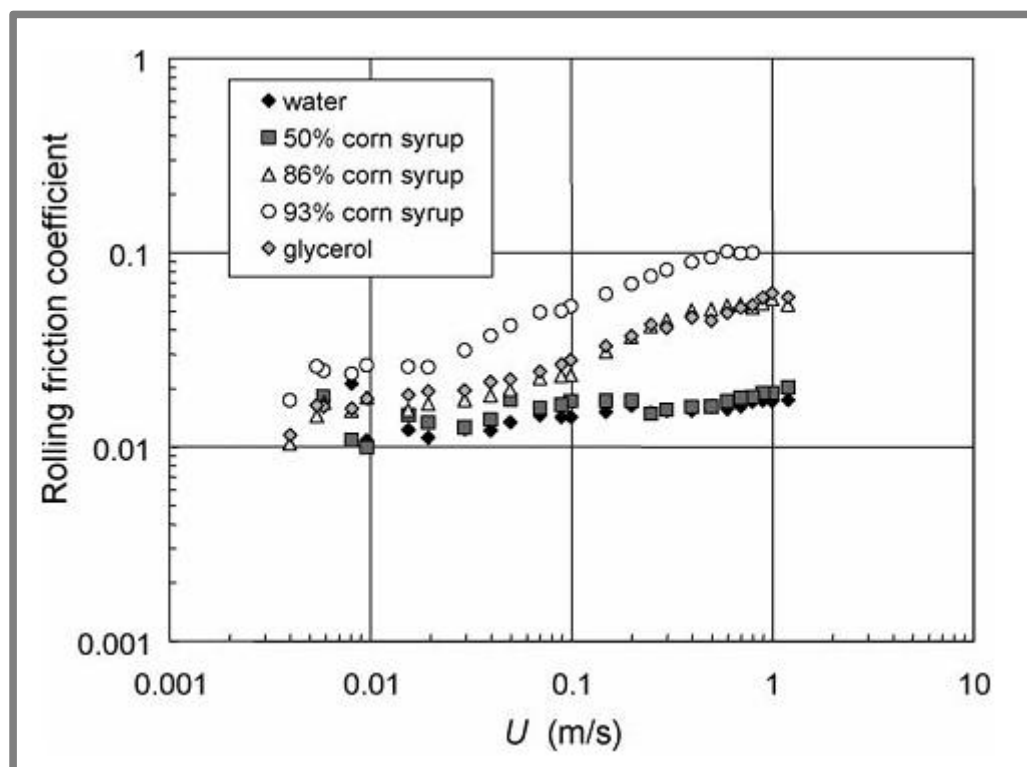
Ale při vykreslení do grafu součinitele tření a unášivé rychlosti krát dynamická viskozita, všechny výsledky vytváří jedinou Stribeckovu křivku.



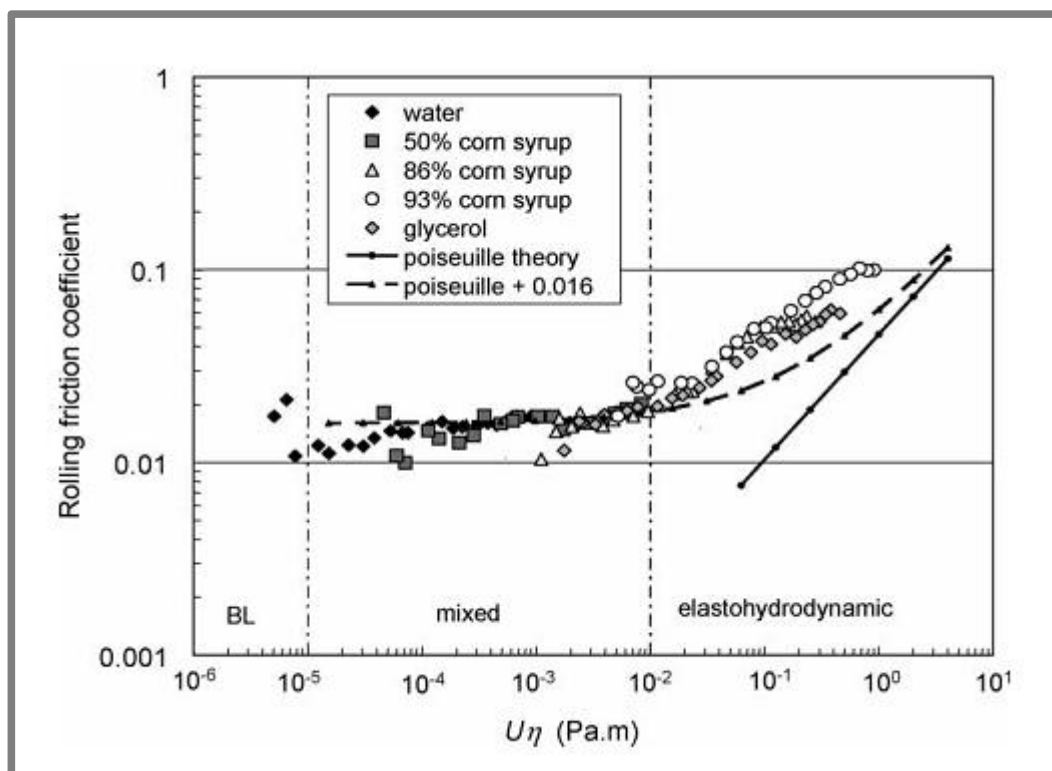
Obr. 32 Graf součinitele smykového tření a unášivé rychlosti krát dynamická viskozita kapaliny [2]

Na výše je vykreslen spočítaný průběh pro z rovnice (2). Teoretický výpočet se poměrně dobře shoduje s experimentálními výsledky. Rozdíl mezi hodnotami naměřenými a teoreticky vypočtenými je 3-5 %. Tuto chybu si autoři vyložili malou nepřesností v kalibraci zatížení.

Obdobný průběh můžeme sledovat při vykreslení výsledků valivého tření



Obr. 33 Graf součinitele valivého tření a unášivé rychlosti [2]



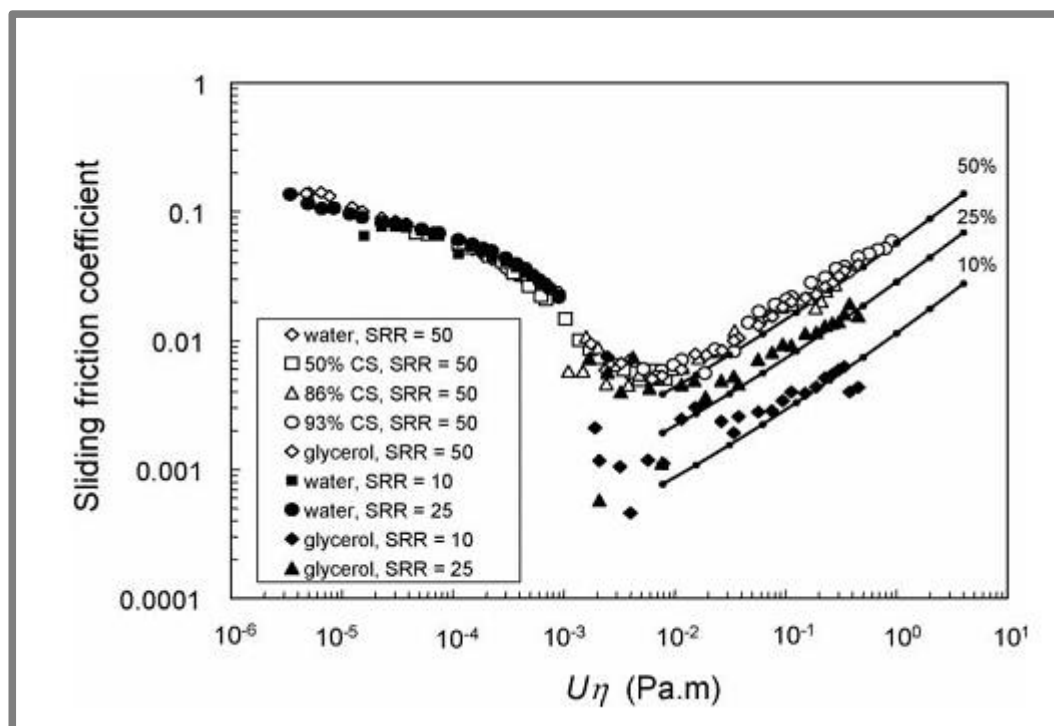
Obr. 34 Graf součinitele valivého tření a unášivé rychlosti krát dynamická viskozita kapaliny [2]

Z grafu je patrné, že při nízké hodnotě $U\eta$ součinitel tření nezávislý na $U\eta$ je 0,016. V grafu jsou proto dvě teoretické hodnoty z rce (1) jedna bez započtení a druhá se započtením počáteční hodnoty součinitele tření 0,016.

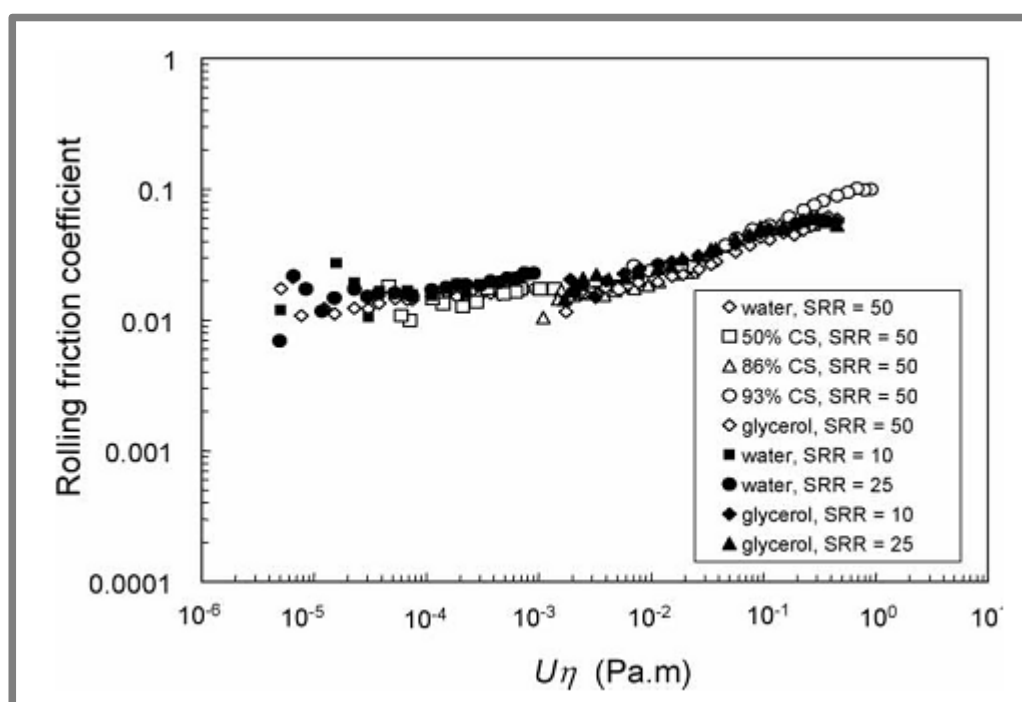
Vliv poměru smýkání/valení:

Testy tření byly měřeny pro zjištění vlivu poměru smýkání/valení provedeny s vodou a glycerolem.

Výsledky jsou patrné z následujícího grafu. Poměr smýkání/valení 0,1 a 0,25 vyplněními značkami, poměr smýkání/valení 0,5 je označen prázdnými značkami. Plné čáry jsou teoretické hodnoty pro všechny tři poměry smýkání/valení.



Obr. 35 Vliv poměru smýkání/valení na smykové tření [2]



Obr. 36 Vliv poměru smýkání/valení na valivé tření (CS znamená kukuřičný sirup) [2]

Při nízkých hodnotách $U\eta$ jsou patrné odchylky od pozdějšího průběhu. Tyto odchylky byly připsány malému množství surfaktantu v destilované vodě.

Závěr: díky novému přístupu k měření byly získány hodnoty zvlášť pro valivé a smykové tření.

Testy pro zjištění vlivu poměru smýkání/valení potvrdily, že tření vlivem adheze a Pouiellovu proudění nezávisí na smykové rychlosti, ale tření vlivem Couettova proudění je úměrné poměru smýkání/valení. [2]

2.6 Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts

2.6.1 Abstrakt

Mazání, kdy jeden nebo oba stýkající se materiály mají nízkou hodnotu modulu pružnosti, je rozšířeno nejen v inženýrství, ale i při studiu biologických procesů. Za takových podmínek je dominantním režimem mazání elastohydrodynamické mazání (isoviscous EHL, I-EHL). V tomto výzkumu byl pomocí MTM zkoumán vliv zatížení a elastických vlastností na tření.

2.6.2 Úvod

Mazané „měkké“ kontakty se vyskytují např. stěrače na autě, styk mokrých pneumatik s vozovkou, kontaktní čočky, styk jazyku a patra, synoviální klouby.

V těchto kontaktech je dostatečně velký tlak na to, aby způsobil elastickou deformaci jednoho, popř. obou stýkajících se povrchů. To má za vliv změnu tloušťky filmu, nicméně tlak není natolik velký, aby ovlivnil viskozitu maziva. V mnoha případech „měkký“ (soft) je zavádějící, protože zkoumaný systém není charakterizován tvrdostí, ale houževnatostí. Proto autoři používají namísto „měkký“ termínu „povolný“, „poddajný“ (compliant), tak jako v předchozím článku.

2.6.3 Popis

kulička z oceli AISI 440 o průměru 9,5 mm a drsnosti $R_a 10\mu\text{m}$ s polymerovým diskem o průměru 46 mm a tloušťce 4,5 mm. V prvním testu měly všechny disky drsnost $R_a 800\pm 100\mu\text{m}$, v druhém testu disky LDPE a PC měly drsnost $R_a 110\pm 20\mu\text{m}$. Polymerové disky měly hydrofobní povrch. Pro každý test byl vždy použit nový polymerový disk.

Tab. 8 Provozní podmínky testu

Teplota	35 °C
Zatížení	0,5; 1; 3; 5 N
Průměrná rychlost valení	$5 \div 1200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Poměr smýkání/valení	50 %

Tab. 9 Zkušební vzorky

Polymer	Modul pružnosti [GPa], při teplotě 35 °C	Poissonovo číslo μ
Polydimethylsiloxan, PDMS	0,005	0,49
Polyethylen o nízké hustotě LDPE	0,227	0,4
Polykarbonát, PC	2,38	0,36

Tab. 10 Zkušební kapaliny

Kapalina	Viskozita při teplotě 35 °C Pa·s
Čistá voda	0,00075
75% glycerol	0,017
Glycerol	0,382
95% kukuřičný sirup	2,45

Disky byly plně zaplaveny 40ml zkušební kapaliny. Po ustálení teploty byl kontakt za stálé teploty zatížen silami o velikostech 0,5; 1; 3; 5 N a 50 % poměru smýkání/valení. Unášivá rychlost byla postupně zvyšována z 5 až na 1200 mm · s⁻¹.

Aby bylo možné měřit zvlášť valivé a smykové tření, operační mód MTM byl změněn na „bi-directional“.

2.6.4 Závěr

Z výsledků měření byl ověřen numerický model pro elastohydrodynamické mazání, který vyvinul Vicente a kolektiv. I když numerické modely pro všechny tři testované polymery odpovídají experimentu, numericky nelze koeficient valivého tření přesně vypočítat jako funkci závislou na zatížení kontaktu.

Zatímco modelový výpočet ukazuje, že vliv modulu pružnosti je zanedbatelný, z výsledků experimentu bylo zjištěno, že koeficient valivého tření se se snižujícím modulem pružnosti zvyšuje. Naopak pro valivé tření, součinitel tření konverguje ke konstantní hodnotě 0,1 při vysokých unášivých rychlostech. Toto není překvapivé, deformační ztráty jsou při vysokých hodnotách unášivé rychlosti a dynamické viskozity se v porovnání s Poiseuillovým prouděním stává zanedbatelným. [22]

2.6.4

3 VYMEZENÍ TRENDŮ BUDOUCÍHO VÝVOJE

Zařízení Mini Traction Machine je špičkovým přístrojem pro měření tření. Ze všech článků, provedených na MTM, ani jednou nebylo zařízení použito pro zkoumání tření v živém organismu. Existují studie o tření v synoviálních kloubech a jejich využití je široké.

Po popsání všech možností Mini Traction Machine nevidím důvod, proč by úspěšně nemohlo testovat tření v kloubech a kloubních náhradách lidského těla.

4 ZÁVĚR

4

Tato bakalářská práce popisuje zařízení Mini Traction Machine a jeho využití. Práce shrnuje stěžejní experimenty, provedené na zařízení Mini Traction Machine. Experimenty byly vybírány tak, aby byla ukázána celá škála aplikací zařízení a jeho přídatných příslušenství: Electrical contact resistance, Soft contact option, 3D Spacer Layer Image Mapping a celou škálu zkušebních materiálů.

U jednotlivých experimentů jsou vždy popsány vlastnosti zkušebních těles, použité mazivo, nastavení unášivé rychlosti a poměru smýkání/valení a postup měření, aby tyto testy bylo možné opakovat. Následně jsou shrnuty výsledky jednotlivých experimentů a proveden rozbor, co tyto hodnoty znamenají.

Na všech zde uvedených testech zařízení Mini Traction Machine spolehlivě a velice přesně otestovalo zkoumané hodnoty.

Ústav konstruování v současné době uvažuje o zakoupení Mini Traction Machine.

Cílem bakalářské práce bylo sestavit rešerši o jeho možném využití.

5 SOUHRNNÁ BIBLIOGRAFIE

- [1] VUT v Brně, Ústav Konstruování. *přednáška 4, Tření, mazání, opotřebení* [online] [cit. 2011-03-23]
URL: <<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>>
- [2] DE VICENTE, J. – STOKES, J. R. - SPIKES, H. A. *Rolling and Sliding friction in compliant, lubricated contact* [online] 2006, [cit. 2011-4-17]
URL: <<http://pij.sagepub.com/content/220/2/55.refs?patientinformation=yes&legid=spij;220/2/55>>
- [3] SHIGLEY, J. E. - MISCHKE, C. R. - BUDYNAS, R. G. *Mechanical Engineering Design*, 7th edition 2004, z angl. originálu přel. HARTL, M. - Horníková, J. - CHLUP, Z. první vydání, 2010 1160 s. ISBN 978-80-214-2629-0
- [4] VUT v Brně, Ústav Konstruování. *Prezentace předmětu Tribologie, přednáška 1* [online] [cit. 2011-03-24]
URL: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/index5a8c.html?akce=3&sekce=vyuka&ln=cs&zobraz_predmet=175>
- [5] PCS Intstruments. *MTM2 - Mini Traction Measurement Instrument* [online] [cit. 2011-03-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/brochures/brochures.shtml>>
- [6] PCS Intstruments. *MTM specimens* [online] [cit. 2011-03-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/brochures/brochures.shtml>>
- [7] KAPADIA, R. – GLYDE, R.- WU, Y. *In situ observation of phosphorous and non-phosphorous antiwear films using a mini traction machine with spacer layer image mapping* [online] 2007, [cit. 2011-3-26]
URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X07000254>>
- [8] PCS Intstruments. *MTM2 Soft Contact option* [online] [cit. 2011-04-18]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/brochures/brochures.shtml>>
- [9] PCS Intstruments. *Backing Plate* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-backing-plate.shtml>>
- [10] PCS Intstruments. *MTM O-Ring Holder* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-oring-holder.shtml>>
- [11] PCS Intstruments. *Reciprocating Option* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-reciprocating-option.shtml>>
- [12] PCS Intstruments. *MTM Grease Scoop* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-grease-scoop.shtml>>
- [13] PCS Intstruments. *Microscope Holder for MTM Specimens* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-microscope-holder.shtml>>
- [14] PCS Intstruments. *MTM Barrel Assembly* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-barrel-assembly.shtml>>

- [15] PCS Instruments. *Pin on Disc Adapter & Software* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: < <http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-pin-on-disc.shtml>>
- [16] PCS Instruments. *Pot filler* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-pot-filler.shtml>>
- [17] PCS Instruments. *MTM Mini Pot* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-mini-pot.shtml>>
- [18] PCS Instruments. *ECR - Electrical contact resistance* [online]
[cit. 2011-04-13]
URL: <<http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-ecr.shtml>>
- [19] PCS Instruments. *Oil Cooler* [online] [cit. 2011-04-13]
URL: < <http://www.pcs-instruments.com/mtm/accessories/mtm-oil-cooler.shtml>>
- [20] CANN, P. M. *Grease degradation in a bearing simulation device* [online]
2006, [cit. 2011-2-20]
URL:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X06000375>>
- [21] COSTELLO Michael T. *Effects of basestock and additive chemistry on traction testing* [online]2004 [cit. 2011-04-13]
URL: < <http://www.springerlink.com/content/uk687u424847t025/>
- [22] QUERLIOZ, E.- VILLE, F. – LENON, H. Experimental investigations on the contact fatigue life under starved conditions [online]2006 [cit. 2011-04-13]
URL:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X06003276>>
- [22] MYANT, C. – SPIKES, H.A- STOKES, J.R. *Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts* [online]2008 [cit. 2011-04-13]
URL:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X09001145>>

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Smykové tření [1]	16
Obr. 2 Valivé tření [1]	17
Obr. 3 Proudění maziva jako pohyb vrstev [3]	17
Obr. 4 Stribeckova křivka [1]	18
Obr. 5 Elastohydrodynamické mazání [1]	19
Obr. 6 Konformní a nekonformní povrchy [1]	19
Obr. 7 Zařízení Mini Traction Machine [5]	21
Obr. 8 Schématický náčrtek Mini Traction Machine [5]	22
Obr. 9 Konfigurace zkušebních vzorků [6]	22
Obr. 11 MTM s nástavcem Spacer Layer Image Mapping [7]	23
Obr. 10 Schématický náčrtek principu optické interferometrie použité na MTM2 [5]	23
Obr. 12 Analýza obrazu pořízeného optickou interferometrií [5]	24
Obr. 13 Rozdíl v kontaktu „tvrdých“ a „měkkých“ materiálů [8]	24
Obr. 14 O ring holder [10]	25
Obr. 15 Reciprocating option, simulace průběhů pro nastavené hodnoty [11]	25
Obr. 16 Grease scoop [12]	26
Obr. 17 Microscope holder [13]	26
Obr. 18 Upevnění disků silikonových elastomerů na backing plate [8]	27
Obr. 19 Barrel Assembly [14]	27
Obr. 20 komponenty Pin on disc kleština, zajišťovací šroubek [15]	28
Obr. 21 Pin on disc adaptér ve zdvižené poloze [15]	28
Obr. 22 Rezervoár maziva vlevo bez a vpravo s vložkou [16]	29
Obr. 23 Držadlo na ½ palcovou kuličku, šroub pro její uchycení, speciální disk, přepážkový disk, víčko [17]	29
Obr. 24 Nainstalovaný Mini Pot [17]	30
Obr. 25 schéma zapojení pro měření elektrického odporu kontaktu [18]	30
Obr. 26 Chladič oleje [19]	31
Obr. 27 Graf průběhu součinitele tření v 5 min intervalech odlehčování, mazivo bez aditiv [20]	33
Obr. 28 Graf průběhu součinitele tření v 5 min intervalech odlehčování, mazivo s aditiv [20]	33
Obr. 29 Stribeckovy křivky základních olejů pro 120 °C [21]	36
Obr. 30 Stribeckovy křivky pro 10 % přesycené sulfonáty v oleji 100 SUS [21]	36
Obr. 31 Graf součinitele smykového tření a unášivé rychlosti [2]	40
Obr. 32 Graf součinitele smykového tření a unášivé rychlosti krát dynamická viskozita kapaliny [2]	40
Obr. 33 Graf součinitele valivého tření a unášivé rychlosti [2]	41
Obr. 34 Graf součinitele valivého tření a unášivé rychlosti krát dynamická viskozita kapaliny [2]	42
Obr. 35 Vliv poměru smýkání/valení na smykové tření [2]	43
Obr. 36 Vliv poměru smýkání/valení na valivé tření (CS znamená kukuřičný sirup) [2]	43

7 SEZNAM TABULEK**7**

Tab. 1 Technické parametry MTM2	21
Tab. 2 Zkušební vzorky MTM2	22
Tab. 3 Popis základních olejů	35
Tab. 4 Popis modifikátorů tření a přesycených sulfonátů	35
Tab. 5 Provozní podmínky testu	37
Tab. 6 Provozní podmínky testu	38
Tab. 7 Zkušební kapaliny	38
Tab. 8 Provozní podmínky testu	44
Tab. 9 Zkušební vzorky.....	45
Tab. 10 Zkušební kapaliny.....	45

SEZNAM ZKRATEK

μ [-]	- součinitel smykového tření
F [N]	- síla
W [N]	- zatížení kontaktu
μ_r [-]	- součinitel valivého tření
r [mm]	- poloměr
u [mm · s ⁻¹]	- unášivá rychlost
S [mm ²]	- plocha
h [mm]	- tloušťka filmu
F_t [N]	- třecí síla
η [Pa · s]	- dynamická viskozita
ν [m ² · s ⁻¹]	- kinematická viskozita
ρ [kg · m ⁻³]	- hustota
Λ [-]	- Parametr mazání
h_{min} [mm]	- minimální tloušťka mazacího filmu
Rq_a [μm]	- průměrná kvadratická úchylka tělesa a
Rq_b [μm]	- průměrná kvadratická úchylka tělesa b
h_c [mm]	- střední tloušťka filmu
h_m [mm]	- minimální tloušťka filmu
E' [GPa]	- redukovaný modul pružnosti
R' [mm]	- redukovaný poloměr dotyku ve směru unášivé rychlosti
u_K [mm · s ⁻¹]	- unášivá rychlost kuličky
u_D [mm · s ⁻¹]	- unášivá rychlost disku
F_s [N]	- smyková třecí síla
F_v [N]	- valivá třecí síla.
μ [-]	- Poissonovo číslo