



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ROZLOŽENÍ TLOUŠTKY MAZACÍHO FILMU PŘI ROZBĚHU HLADKÝCH TŘECÍCH POVRCHŮ.

FILM THICKNESS DISTRIBUTION DURING THE START-UP OF SMOOTH SURFACES.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN MANGA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR SVOBODA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Manga

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:

Rozložení tloušťky mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů.

v anglickém jazyce:

Film thickness distribution during the start-up of smooth surfaces.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je analýza rozložení tloušťky mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů. Práce předpokládá realizaci experimentu při užití vybavení Tribologické laboratoře při Ústavu konstruování.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
- 4.Vymezení cílů práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Analýzu a interpretaci získaných výsledků
- 7.Závěr

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: analytická

Účel práce: pro VV a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

GLOVNEA, R. P., DIACONESCU, E. N., FLAMAND, L. (1995): EHD Film Thickness Under Transient Speed Conditions., Acta Tribologica, 3, s. 31-36.

GLOVNEA, R. P. and SPIKES, H.A. (2002): Behavior of EHD films during reversal of entrainment in cyclically accelerated/decelerated motion., Trib. Trans., 45, 2, s. 177-184.

WANG, J., HASIMOTO, T., NISHIKAWA, H., KANETA, M. (2005): Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion., Tribology International 38, s. 1013-1021.

Svoboda, P.: Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 30 s. Vedoucí pojednání ke státní závěrečné zkoušce: Doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 26.10.2009

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá experimentálním studiem rozběhu hladkých třecích povrchů za podmínek smíšeného a elastohydrodynamického mazání. Rozběh třecích povrchů je nestacionární děj, při kterém nejsou třecí povrchy dostatečně odděleny souvislou vrstvou maziva. Proto při rozběhu hrozí nebezpečí poškození součástí. Práce shrnuje dosavadní poznatky, které rozšiřuje vlastním experimentem na vybavení v tribologické laboratoři Ústavu konstruování. Vyhodnocení experimentu bylo provedeno kolorimetrickou interferometrií, metodou používanou k měření tenkých mazacích filmů. Provedený experiment pro různé hodnoty zrychlení potvrzuje předešlé práce zabývající se tímto tématem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rozběh třecích povrchů, tloušťka mazacího filmu, smíšené mazání.

ABSTRACT

Bachelor thesis is engaged in experimental study of start-up of smooth surfaces under the conditions of mixed and elastohydrodynamic lubrication. Start-up is non-stationary process, whereat the surface doesn't need to completely separated with lubrication film. Therefore it exists a real risk of failure. Study summaries all present studies and extends with own experiment on the equipment of tribological laboratory. The evaluation of the experiment was made by chromatic interferometry. This method is used to measure thin lubrication films. Experiment for miscellaneous values of acceleration confirms the findings of previously studies.

KEYWORDS

Start-up of the motion, lubricant film thickness, mixed lubrication.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MANGA, M. Rozložení tloušťky mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Rozložení tloušťky mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Svobody, Ph.D. a použitou odbornou literaturu a prameny jsem uvedl v literatuře.

12. 5. 2010

.....
Martin Manga

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat zvláště Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za užitečné rady a odbornou pomoc při vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a mé přítelkyni za velkou podporu při psaní této práce.

OBSAH

ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
1.1 Procesy tribologické soustavy	13
1.1.1 Tření	13
1.1.2 Opotřebenění	13
1.2 Režimy mazání	14
1.2.1 Mezní mazání	14
1.2.2 Smíšené mazání	15
1.2.3 EHD mazání	15
1.3 EHD mazání při nestacionárních provozních podmínkách	16
1.3.1 Rozběh hladkých třecích povrchů – experimentální řešení	16
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	23
3 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE	24
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	25
4.1 Popis experimentálního zařízení	25
4.2 Průběh měření	26
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	27
6 ZÁVĚR - DISKUZE	30
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	31
8 SEZNAMY	32
8.1 Seznam použitých obrázků	32
8.2 Seznam použitých zkratk a symbolů	33

ÚVOD

Mazání je velice důležitým faktorem ovlivňujícím životnost a spolehlivost stroje. V každém stroji se nachází mnoho tribologických soustav pracujících za provozních podmínek měnících se v čase, kdy tloušťka mazacího filmu nemusí odpovídat dobře zdokumentovaným ustáleným provozním podmínkám.

Tématem této bakalářské práce je experimentální studium rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu při rozběhu dvou nekonformně zakřivených hladkých třecích povrchů za podmínek smíšeného a elasto-hydrodynamického (EHD) mazání. V každé tribologické soustavě (vačka-zdvihátko, ozubená kola, ložiska, aj.) hrozí při rozběhu poškození strojních součástí, jelikož mazací film není ještě plně vytvořen a povrchy nejsou dokonale odděleny souvislou vrstvou maziva. Z tohoto důvodu je tento stav kritickou fází provozu a je nutné této fázi dobře porozumět.

Bakalářská práce se zabývá výhradně experimentálním studiem tloušťky mazacího filmu při změně rychlosti relativního pohybu mezi dvěma třecími povrchy, konkrétně mezi skleněným diskem a ocelovou kuličkou. Ostatní parametry jako zatížení a směr pohybu jsou konstantní. Tvar mazacího filmu byl stanovován kolorimetrickou interferometrií, měřicí metodou určenou ke stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu. V práci jsou posouzeny získané interferometrické snímky.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Procesy tribologické soustavy

1.1

1.1.1 Tření

1.1.1

Tření je pasivní odpor působící proti relativnímu pohybu dvou vzájemně interagujících povrchů. Velikost tohoto odporu je závislá na zatěžovací síle a součiniteli tření mezi povrchy. U styku dvou nekonformních povrchů, kde je styková plocha malá a zatížení velké, je velká i třecí síla, naopak je tomu u styku dvou konformních povrchů. Typickou součástí reprezentující styk nekonformních povrchů jsou valivá ložiska, či ozubená kola. [1]

1.1.2 Opotřebení

1.1.2

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů součástí. Opotřebení je degrační proces vyznačující se progresivním úbytkem materiálu, což následně může vést k poškození interagujících součástí. Je definováno šest základních druhů opotřebení, které se v praxi vzájemně kombinují. [2]

- *adhezivní opotřebení*: v důsledku normálové síly dochází k tvorbě adhezivních mikrosvarů, které jsou následně relativním pohybem vytrhávány ze součástí.
- *abrazivní opotřebení*: vzniká zejména při styku dvou tvrdých a drsných povrchů nebo při působení abrazivních částic, přičemž částice tvrdšího povrchu deformují měkčí povrch.
- *erozivní opotřebení*: vzniká oddělováním materiálu účinkem částic proudu kapaliny nebo částic v proudu nesených.
- *kavitační opotřebení*: vzniká oddělováním částic v důsledku kavitace.
- *únarové opotřebení*: vzniká vlivem cyklického namáhání, které pod povrchem vytváří mikrotrhliny, což následně vede k vylomení části povrchu (pitting). Je nejčastější u styku dvou nekonformních povrchů.
- *vibrační opotřebení*: je důsledkem kmitavých tangenciálních posuvů při současném zatížení normálovou silou.

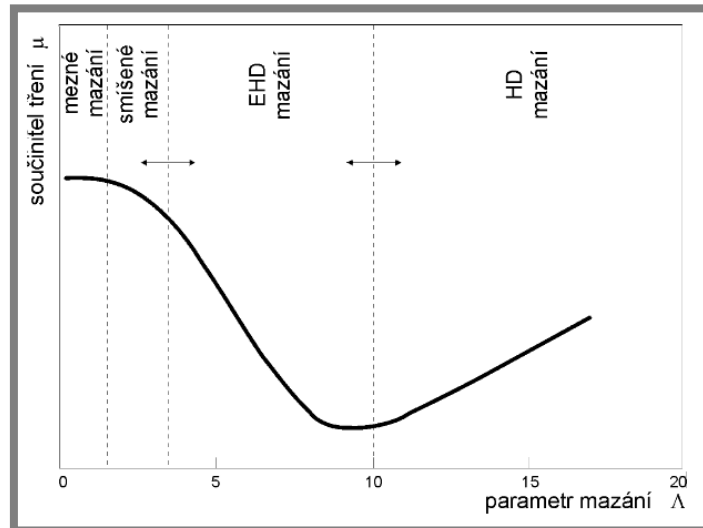
1.1.3 Mazání

1.1.3

Mazání je proces, který zabraňuje bezprostřednímu styku povrchů. Mazáním se tedy velice významně ovlivňuje tření a následně opotřebení. Jako mazivo, tedy látku, která odděluje interagující povrchy, používáme nejrůznější látky v plynném, kapalném a tuhém stavu. Sekundární úlohou maziva je také odvod tepla vznikajícího v kontaktu, či odvod nečistot, případně zajištění speciálních vlastností např. korozivzdornosti. Rozlišujeme specifické režimy mazání, přičemž každý režim se vyznačuje jinými charakteristikami. [1]

1.2 Režimy mazání

Samotná tloušťka mazacího filmu přímo neurčuje režim mazání a z toho vyplývající životnost třecího povrchu. Je nutné uvažovat ještě redukovanou drsnost stýkajících se povrchů. Poměr těchto dvou parametrů se nazývá parametr mazání (1). Jednotlivé režimy mazání jsou rozlišovány právě tímto parametrem. Závislost součinitele tření na parametru mazání vyjadřuje Stribeckova křivka (Obr. 2.1). Dále jsou popsány režimy mazání typické pro rozběh dvou nekonformních povrchů. [1]



Obr. 2. 1 Stribeckova křivka [1].

Parametr mazání Λ (1) vyjadřuje poměr tloušťky mazacího filmu k redukované drsnosti třecích povrchů.

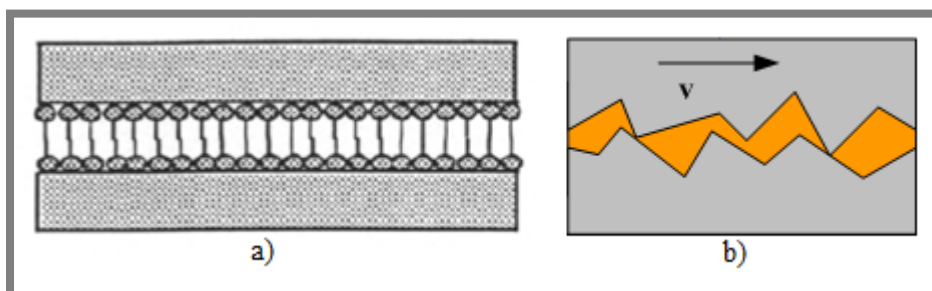
$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_{red}} = \frac{h_{min}}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}} \quad [1] \quad (1)$$

kde:

- h_{min} [m] - minimální tloušťka filmu
- R_{red} [m] - redukovaná kvadratická úchylka povrchu
- Rq_a [m] - průměrná kvadratická úchylka profilu součásti a
- Rq_b [m] - průměrná kvadratická úchylka profilu součásti b

1.2.1 Mezní mazání

Mezní mazání (Obr. 2.2) se vyznačuje bezprostředním stykem mazaných součástí. Dochází tedy k interakci povrchových mikronevlností. Zatížení je přenášeno pouze pomocí tenkého mezního filmu, který je tvořen vazbami polárních molekul. [1]

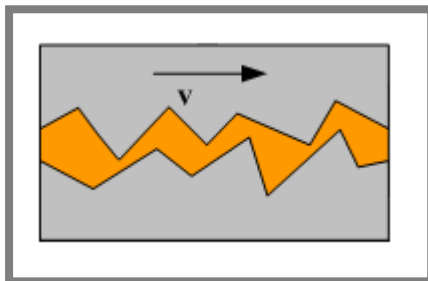


Obr. 2. 2 Schéma mezního mazání, (a) vazby polárních molekul [1], (b) schéma styku povrchů [3].

1.2.2 Smíšené mazání

1.2.2

U tohoto typu je průměrná tloušťka mazacího filmu menší než výška povrchových nerovností, což přímo ovlivňuje velikost tření a následně opotřebení a životnost součástí. Ilustrační schéma je na obrázku 2.3. [1]

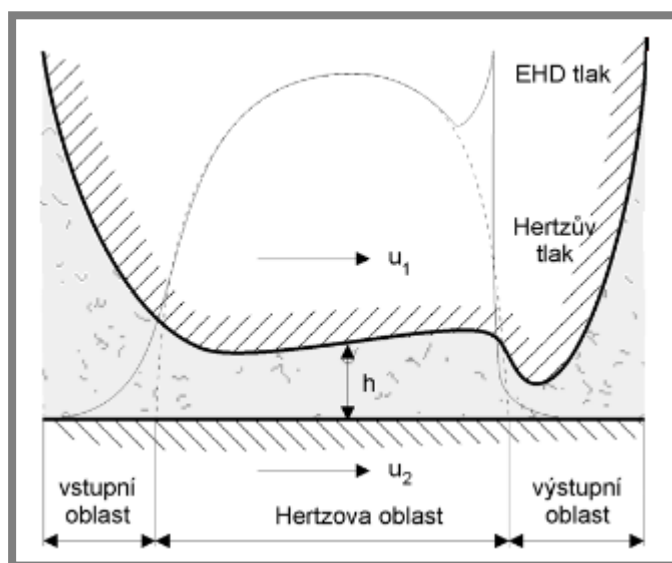


Obr. 2. 3 Schéma smíšeného mazání [3].

1.2.3 EHD mazání

1.2.3

Je režim mazání, kdy jsou povrchy od sebe odděleny vrstvou tenkého mazacího filmu. Dochází k elastické deformaci třecích povrchů a velikost této je přibližně stejná jako tloušťka filmu. Viskozita maziva chyceného mezi třecí povrchy se výrazně zvyšuje. Charakteristická pro toto mazání je centrální tloušťka filmu, která se nachází ve středu kontaktu. Rozložení tlaku v mazaném kontaktu odpovídá Hertzovu rozložení (Obr. 2.4). Toto mazání je typické zejména pro styk nekonformních povrchů. [1]



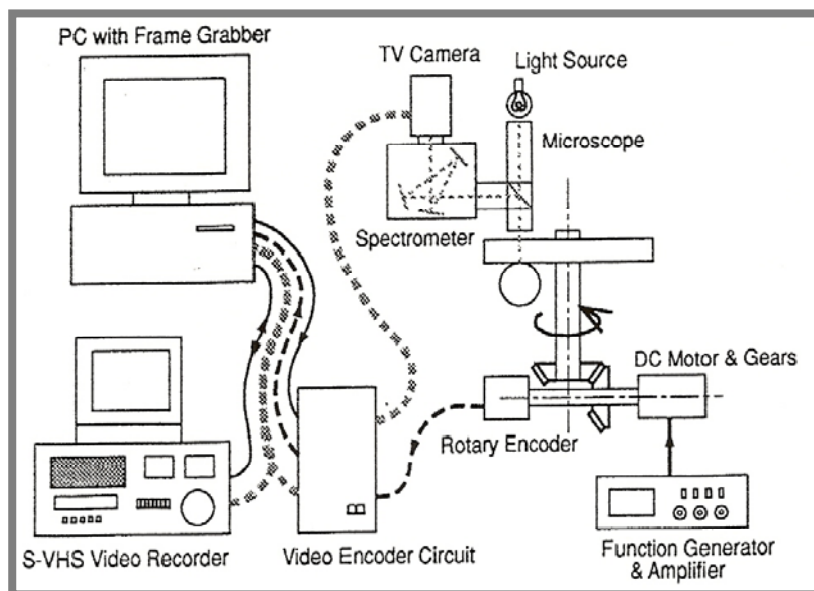
Obr. 2. 4 Schéma rozložení tlaku v EHD kontaktu [1].

1.3 EHD mazání při nestacionárních provozních podmínkách

Chování EHD filmu za ustálených provozních podmínek je velice dobře popsáno jak z teoretického, tak experimentálního hlediska. Avšak ve většině aplikací se velmi zatěžované bodové kontakty vyskytují v ustálených podmínkách velmi málo. Většina těchto kontaktů např. vačky, ozubené převody, ložiska nebo zdvihátka ventilů jsou provozovány za nestacionárních podmínek. Za nestacionární podmínky uvažujeme jakoukoliv změnu zatížení, geometrie nebo rychlosti zatěžovaných kontaktů v čase. Jak je vidět, problematika nestacionárních podmínek je velice rozsáhlá, proto i v rámci zadání této práce jsou níže popsány experimentální studie týkající se pouze rozběhu hladkých třecích povrchů.

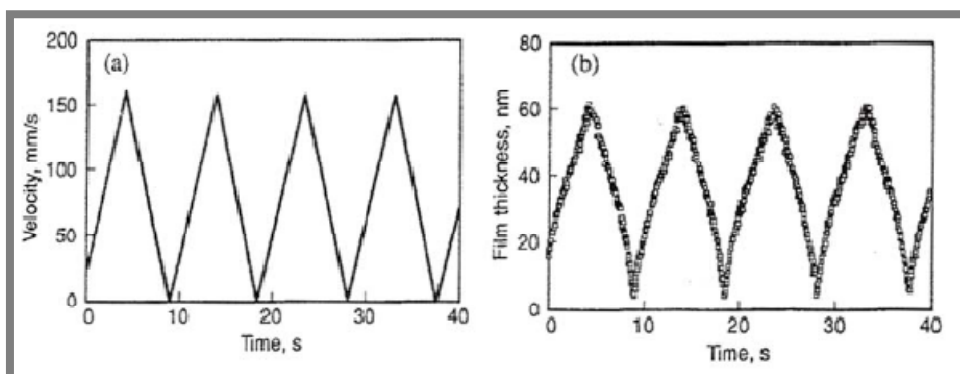
1.3.1 Rozběh hladkých třecích povrchů – experimentální řešení

V druhé polovině 20. století byla drtivá většina prací zaměřena na studium EHD bodových kontaktů při stacionárních provozních podmínkách, tedy převážně za konstantní rychlosti, zatížení, geometrie. Teprve v druhé polovině 90. let 20. století J. Sugimura [4] realizoval jeden z prvních experimentů zaměřených na výzkum přechodových jevů. Do té doby bylo totiž velice obtížné sledovat procesy při nestacionárních podmínkách, kvůli nedokonalosti měřících zařízení. Až díky zařízení, které Sugimura použil (Obr. 2.5), bylo možno tyto jevy zkoumat blíže. Na rozdíl od klasické interferometrie měl disk na reflexní vrstvě chromu nanesen další silikonový povlak, díky kterému bylo možno určit i tenkou vrstvu mazacího filmu. Vrstva se vyhodnocovala z videozáznamu CCD kamery, která snímala rychlostí 50 snímků za sekundu. Ve své studii Sugimura dále ověřoval schopnost zařízení zkoumat nestacionární děje. Provedl sérii experimentů, které zahrnovaly náhlé zastavení stroje, start-stop stroje, vratný pohyb a akceleraci/deceleraci.



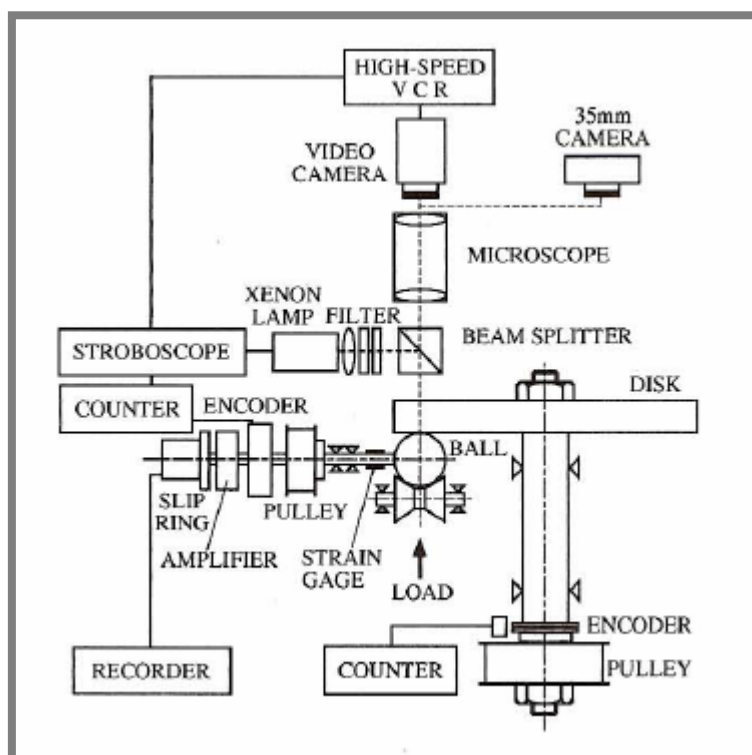
Obr. 2. 5 Schéma experimentálního Sugimurova zařízení [4].

Pro případ akcelerace je patrné z Obr. 2.6, že tloušťka mazacího filmu kopíruje změnu rychlosti.



Obr. 2. 6 (a) změna rychlosti, (b) změna centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti [4].

Další o poznání podrobnější experiment provedl M. Kaneta [5]. Mazací film vyhodnocoval optickou interferometrií pomocí zařízení na Obr. 2.7 s rychlostí záznamu až 200 snímků za sekundu. Předností jeho studie byl široký rozsah použitých olejů BS, ST100, 5P4E, TN320 a TN68.



Obr. 2. 7 Schéma experimentálního Kanetova zařízení [5].

Pomocí bílého bodu na skleněném disku zjistil, že v případě čistého valení urazí mazivo stejnou vzdálenost jako disk. V případě čistého prokluzu je tato vzdálenost poloviční. Disk se tedy musí otočit dvakrát o průměr kontaktu, aby jej mazivo celý zaplavilo. Toto chování je patrné z Obr. 2.8.

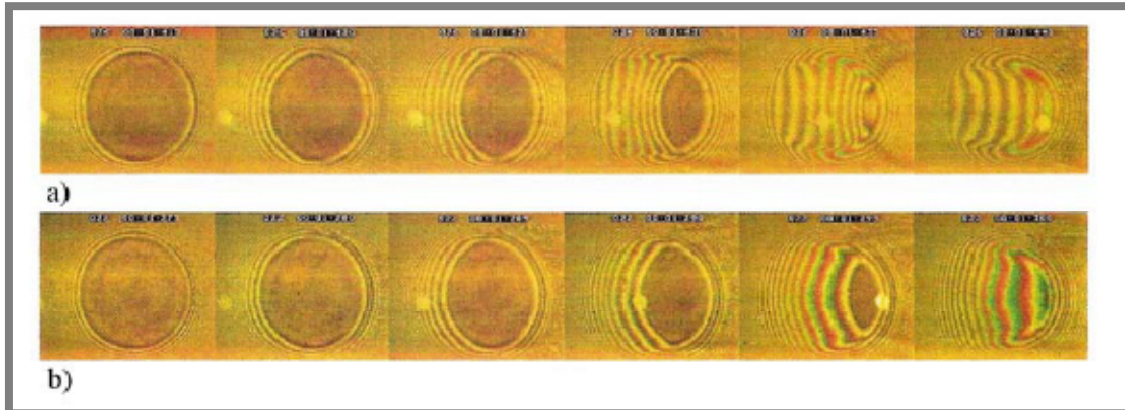
Čistý prokluz a čisté valení definoval pomocí vzorce pro prokluz Σ (2). V případě čisté valení je Σ rovno nule a v případě čistého prokluzu se Σ rovná 2, případně -2.

$$\Sigma = \frac{u_D - u_B}{u_D + u_B} \quad [1] \quad (2)$$

kde:

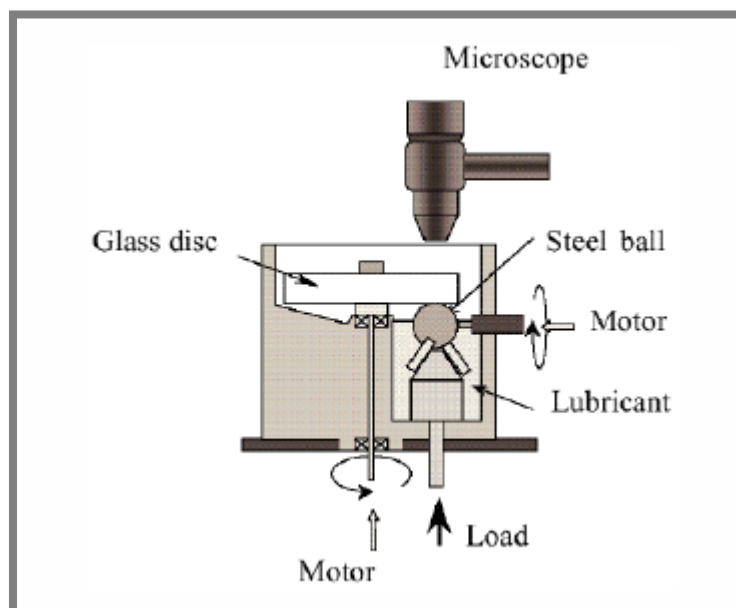
$u_D [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ - rychlost disku

$u_B [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ - rychlost kuličky



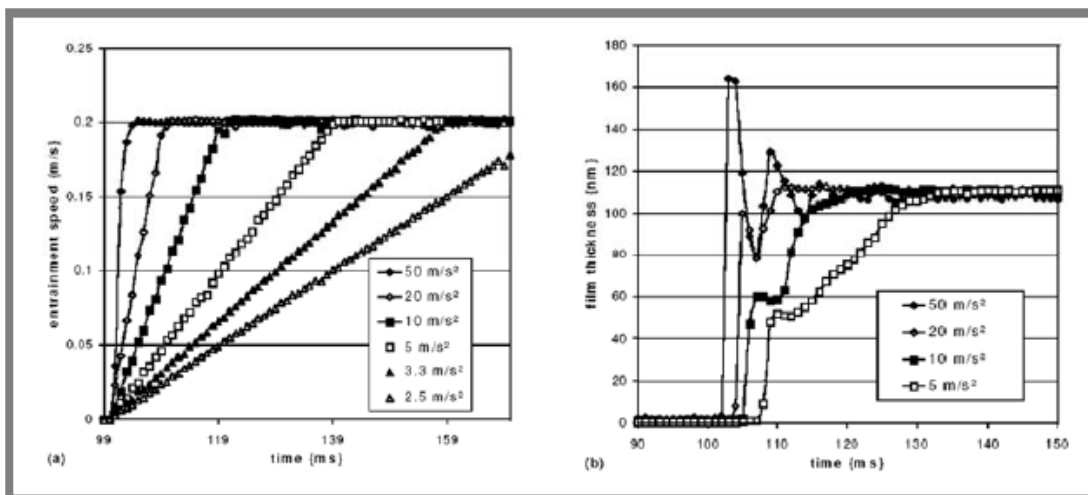
Obr. 2. 8 Série snímků při rozběhu (a) čisté valení, (b) čistý prokluz [5].

Jednu z nejrozsáhlejších prací zkoumající vznik mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů zveřejnili začátkem tohoto století R. P. Glowea a H. A. Spikes [6]. Mazací film měřili ultratenkou optickou interferometrií na zařízení (Obr. 2.9) s možností nezávislého řízení pohybu jak ocelové uličky, tak skleněného disku. Průběh experimentu zaznamenávali pomocí vysokorychlostní kamery s možností pořízení až 1000 snímků za sekundu.



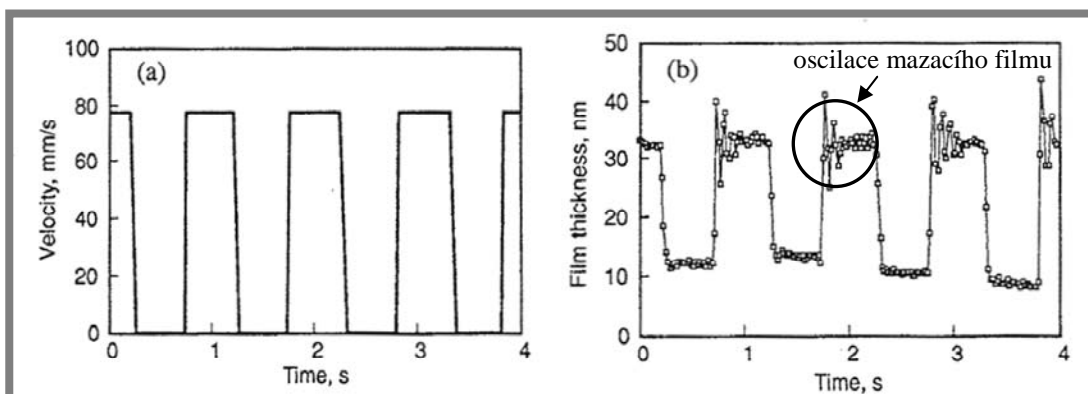
Obr. 2. 9 Schéma experimentálního měřícího zařízení [6].

Experimentu byly podrobeny tři typy olejů, minerální olej HVI650, polyalphaolefin PAO a polyphenylether 5P4E. Chování olejů bylo pozorováno nejprve za podmínek čistého prokluzu $\Sigma=0$ (kulička se otáčí, disk stojí) a následně čistého valení $\Sigma=2$ (oba komponenty se otáčí). Rozsah akcelerace u čistého prokluzu byla od 2,5 do 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Kvůli mnohonásobně větší setrvačnosti disku oproti kuličce nebylo možné dosáhnout čistého valení u vysokých akcelerací, proto byl experiment proveden pouze pro rozsah od 2,5 do 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.



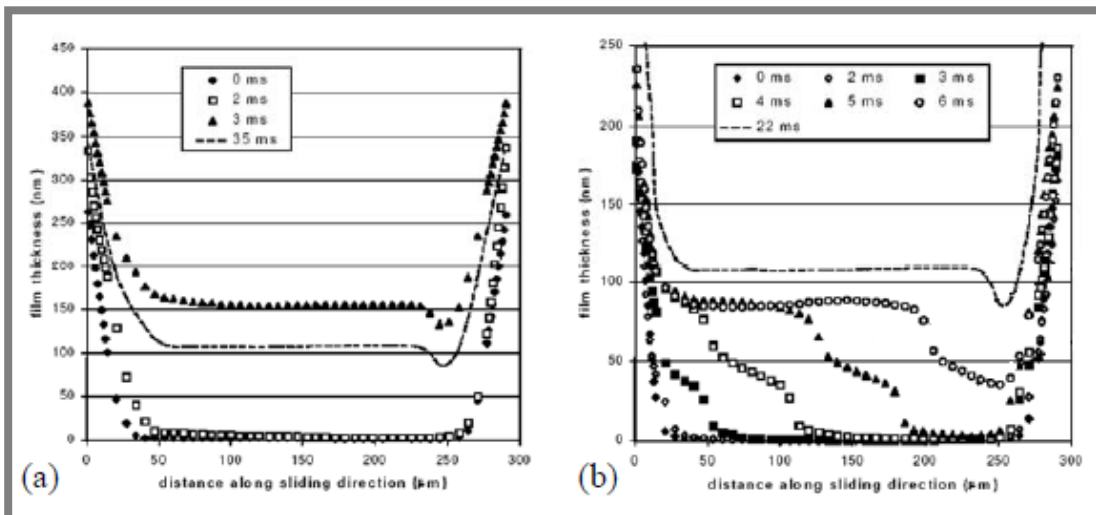
Obr. 2. 10 (a) Závislost velikosti rychlosti na čase při různých zrychleních. (b) Centrální tloušťka filmu pro různé akcelerace a olej HVI650 a 80 °C [6].

Na obrázku 2.10 je srovnání změny rychlosti a tomu odpovídající změna centrální tloušťky mazacího filmu. Přestože rychlost narůstá lineárně, tloušťka filmu nikoliv. Při vysokých akceleracích tloušťka filmu dokonce v krátkém časovém okamžiku převyšuje hodnotu filmu za ustálených podmínek a následně krátce osciluje, dokud se neustálí. Podobné chování mazacího filmu zaznamenal Sugimura [4] při náhlém rozběhu a následném rychlém zastavení systému (Obr. 2.11). Reprezentantem těchto provozních podmínek je např. krokový motor. Fáze start je v podstatě vysoká akcelerace na určitou hodnotu, proto lze v experimentech sledovat podobnost.



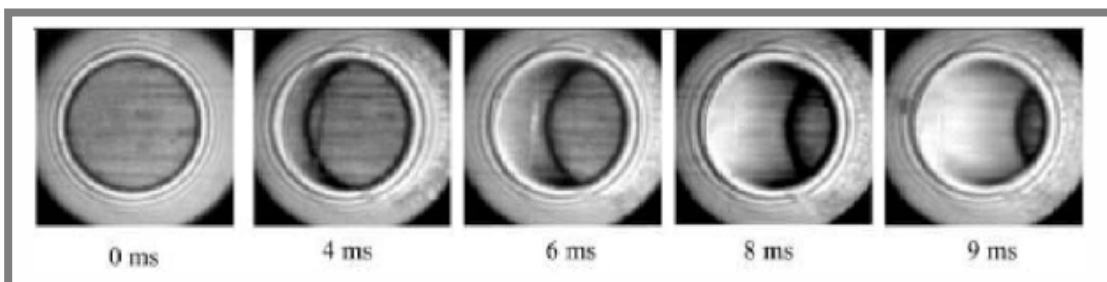
Obr. 2. 11 (a) změna rychlosti, (b) změna centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti pro start-stop systému [4].

Obrázek 2.12a a obrázek 2.12b ukazují tloušťku filmu ve směru pohybu při různých akceleracích a je na nich lépe znatelné jeho utváření. Při všech hodnotách akcelerace je na první pohled patrné, že tloušťka filmu v prvních okamžicích pohybu narůstá velmi nepatrně. Až dosáhne-li unášecí rychlost hodnoty okolo $0,01-0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ začne se tloušťka filmu měnit výrazněji a nabývat jistého schodovitěho tvaru. Kromě akcelerace $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (Obr 2.12a) je tento tvar velice dobře pozorovatelný. Tento tvar vzniká postupně. První hrana se vytvoří v podstatě skokovou změnou tloušťky mazacího filmu. Tloušťka filmu se dále skoro nemění. Další hrana se opět vytvoří skokově o něco později. Zpoždění druhé hrany je silně závislé na akceleraci. Čím je akcelerace vyšší, tím dříve se druhý schod vytvoří. Proto nebyl při akceleraci $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ schodovitý tvar zaznamenán, jelikož obě hrany byly vytvořeny téměř současně a dosáhly konce kontaktu dříve, než byly vůbec zachyceny. Je také patrné, že v čase 3ms nabývá tloušťka centrálního filmu hodnot o 50% vyšší než při ustáleném stavu. Při ostatních hodnotách akcelerace nikdy aktuální hodnota tloušťky nepřekročila ustálený stav, což koresponduje s obrázkem 2.10.

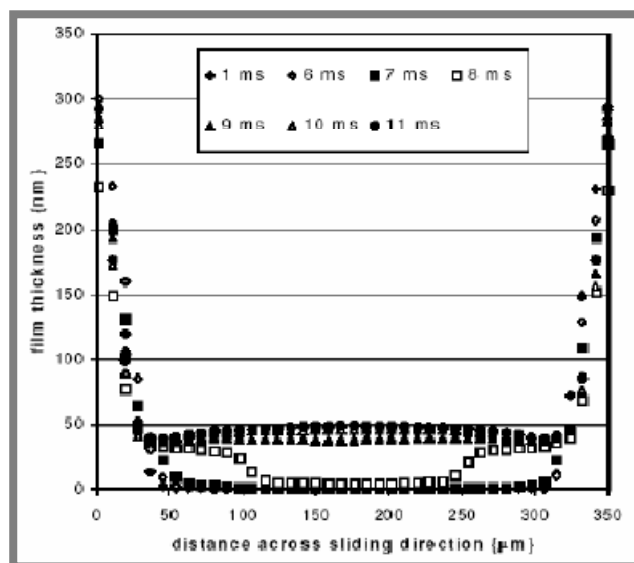


Obr. 2. 12 Rozložení tloušťky filmu v profilu styku dvou třecích povrchů pro olej HVI650 za teploty $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, (b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [6].

Při pohledu na tloušťku mazacího filmu napříč kontaktem (Obr 2.14) je vidět postupné zaplavování kontaktu do doby, než se vytvoří kompletní mazací film. Toto zaplavování je zvláště patrné z interferenčních snímků (Obr. 2.13), kdy je zřetelně vidět propad menisku mazacího filmu, který postupuje snímkem zleva doprava. V čase 6 ms je dobře vidět i jeho příčný profil.



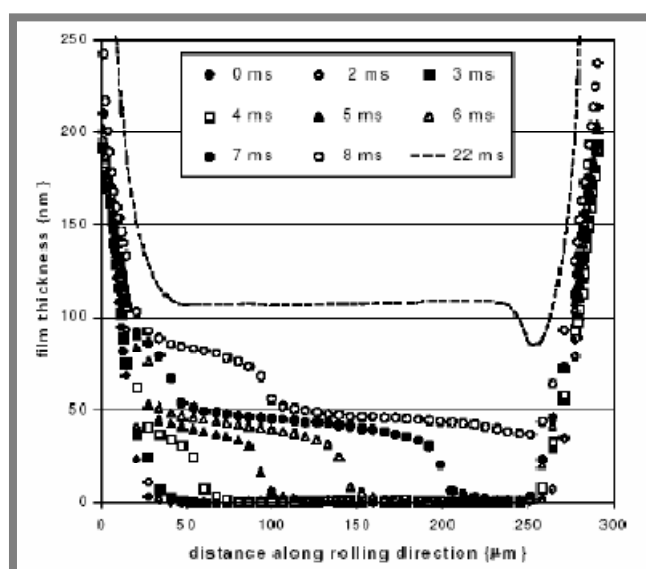
Obr. 2. 13 Série interferenčních snímků při zaplavování kontaktu (olej HVI650 za teploty $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [6].



Obr. 2. 14 Tloušťka mazacího filmu napříč kontaktem pro olej HVI650 za teploty 80 °C [6].

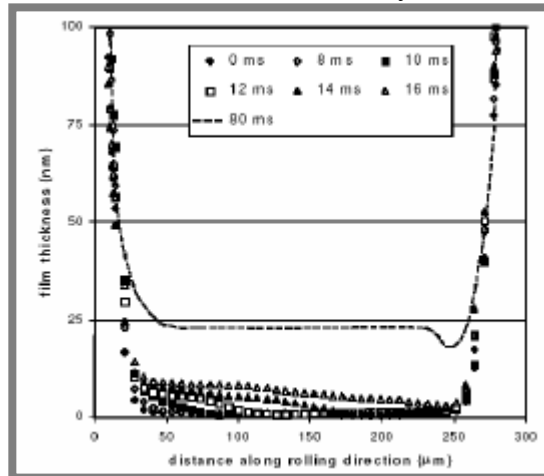
Všechny zkoumané oleje vykazovaly při stejných podmínkách stejné známky chování při tvorbě mazacího filmu, i přes jiné hodnoty jejich základních charakteristik jako je viskozita a viskózně-tlakový koeficient. Jediné rozdíly byly zaznamenány pouze v tloušťkách mazacích filmů.

Dále byl stejný experiment proveden za podmínek čistého valení. Průběh tvorby mazacího filmu patrný z obrázku 2.15 je v zásadě shodný s tím, který byl pozorován u čistého prokluzu. Po bližším prozkoumání byly ale zjištěny malé rozdíly. Za podmínek čistého valení první vlna maziva prochází první polovinou kontaktu pomaleji, než je unášivá rychlost, a druhou polovinou kontaktu naopak rychleji. Za podmínek čistého valení první hrana maziva prochází celým kontaktem rychlostí vyšší, než je rychlost unášivá.



Obr. 2. 15 Rozložení tloušťky mazacího filmu za podmínek čistého valení pro 10 m.s⁻² (HVI650 při 80 °C) [6].

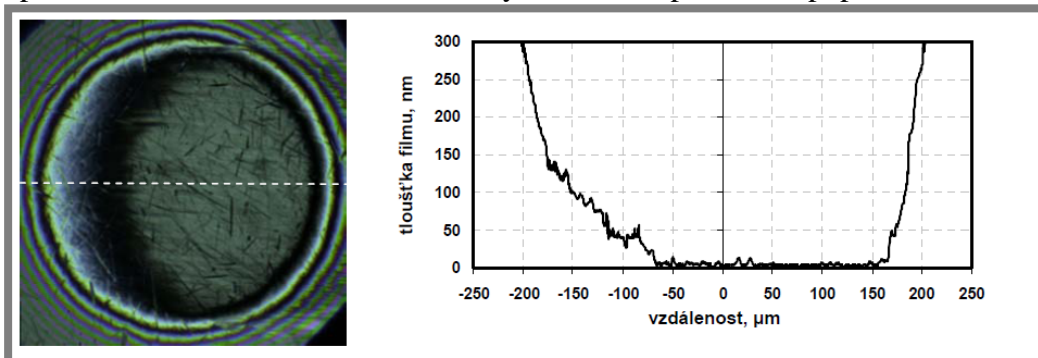
Za účelem zjištění, jak ovlivňuje viskozita maziva proces tvorby mazacího filmu, byla provedena série testů s olejem PAO při teplotách 30, 55 a 80 °C. Při vyšších teplotách profil filmu zachycený v různých časových okamžicích vykazoval klínovitý tvar (Obr. 2.16), odpovídající ustálenému stavu. Nejprve se celý kontakt zaplavil tenkou vrstvou maziva a následně se v celém profilu tloušťka filmu postupně zvyšovala. Při nízkých teplotách a tedy vyšší viskozitě maziva měl film opět stupňovitý tvar. Z porovnání viskózně-tlakových koeficientů olejů 5P4E při 80 °C a PAO při 55 °C, tedy při teplotách, kdy viskozita obou olejů je téměř shodná, ale viskózně-tlakový koeficient PAO má třetinovou hodnotu 5P4E, vyplývá, že jedním z hlavních faktorů, který ovlivňuje tvorbu schodovitěho tvaru, je viskózně-tlakový koeficient. Tento závěr je ale v rozporu s tím, co popsal Kaneta [5]. Kaneta použil mazivo s nižším viskózně-tlakovým koeficientem, které vytvořilo konstantní tloušťku filmu, zatímco další použité mazivo s vyšším koeficientem vytvořilo klínovitý tvar. Ovšem experimentální podmínky byly rozdílné. Bylo použito mazivo, které mělo vysokou viskozitu a tak tloušťka filmu byla mnohonásobně větší.



Obr. 2.16 Rozložení tloušťky mazacího filmu za podmínek čistého valení pro $2,5 \text{ m.s}^{-2}$ (olej PAO při 80 °C) [6].

Kmity popsané v experimentu vznikající v důsledku vysokých akcelerací mohly podle Glovnei vzniknout ze dvou důvodů. Prvním je statické tření mezi kuličkou a diskem v době, kdy kontakt ještě není zaplaven mazivem. Druhou, pravděpodobnější, možností je však zpoždění přenosu sil v mazacím filmu, které následně vede k dynamické odezvě systému na náhlou odchylku v rovnováze.

Jednu z posledních prací okrajově zkoumajících rozběh hladkých třecích povrchů provedl P. Svoboda [7]. Třecí film byl simulován v kontaktu neleštěné ocelové kuličky a skleného disku. Dílčí výsledky jeho disertační práce (Obr. 2.17) potvrzují stupňovité utváření mazacího filmu, který ve svém experimentu popsal Glovnea [6].



Obr. 2. 17 Chromatický interferogram a profil tloušťky mazacího filmu v čase 46,7 ms od rozběhu. Experimentální podmínky: olej L. S. B/S při pokojové teplotě, $\Sigma=1,68$. [7]

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

2

Rozběh hladkých a obecně třecích nekonformních povrchů je běžnou fází provozu strojních součástí, jako jsou například ložiska, kontakt vačky a zdvihátka, ozubená kola atd. Je to děj nestacionární a doposud nebyl narozdíl od stacionárního provozu spolehlivě popsán. Při samotném rozběhu styková plocha třecích povrchů prochází několika režimy mazání a to od mezního přes smíšené až k elastohydrodynamickému, které je charakteristické právě pro nekonformní povrchy při stacionárních podmínkách. Je tedy patrné, že u součástí dochází ke styku ve chvíli, kdy oba povrchy nejsou odděleny dostatečnou vrstvou maziva. Pro jisté podmínky může dojít k poškození stýkajících se součástí.

Předchozí práce na toto téma naznačují, že charakter utváření mazacího filmu během rozběhu není až tak silně závislý na síle zatížení a typu použitého oleje, jak na rychlosti akcelerace. Práce, které porovnávaly různá maziva, ukázaly, že základní charakteristiky utváření mazacího filmu při pokojových teplotách jsou podobné a záleží spíše na akceleraci. Rozdíly dané vlastnostmi maziv jsou patrnější při teplotách vyšších. Hodnota prokluzu Σ nemá, jak je patrné z předešlých prací, na způsob utváření mazacího filmu také velký vliv. Samotnou tloušťku mazacího filmu zase určuje spíše zatížení, než jiné podmínky.

Úkolem bakalářské práce je provést měření profilu tloušťky mazacího filmu pro různé hodnoty zrychlení. Vyhodnocení měření bude provedeno chromatickou interferometrií. Pro měření bude použito z výše uvedených důvodů pouze jednoho typu oleje. Samotná hodnota zatížení nebude hrát stěžejní roli. Cílem je především popsat charakter utváření mazacího filmu a srovnat jej s předcházejícími experimentálními pracemi.

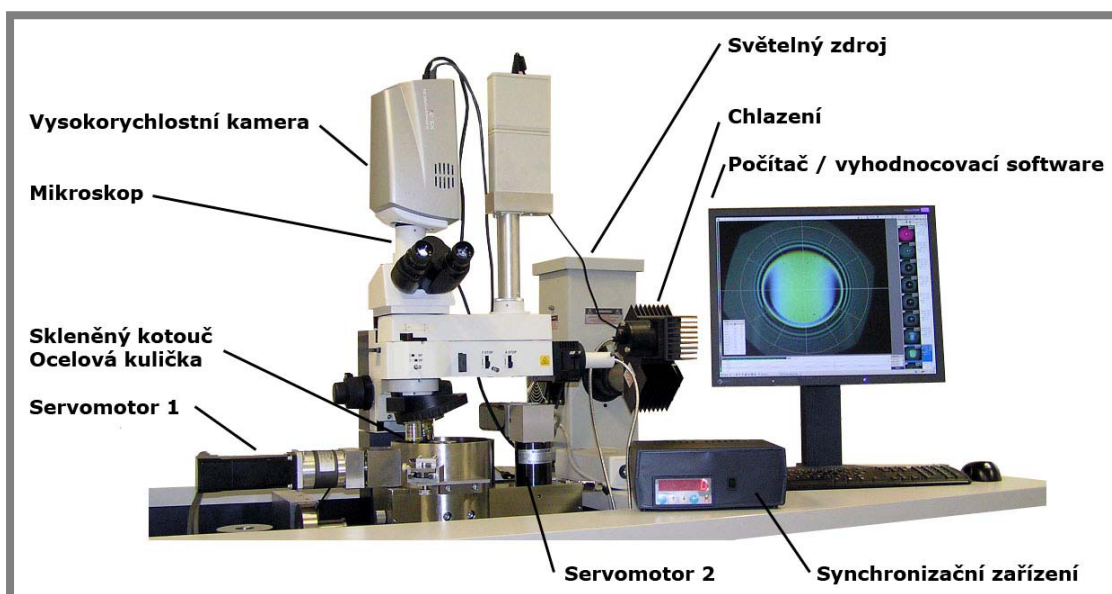
3 VYMEZENÍ CÍLE PRÁCE

Úkolem této bakalářské práce je shrnout experimenty týkající se problematiky rozběhu hladkých třecích a nekonformních povrchů za podmínek elastohydrodynamického mazání. Cílem práce je také provést samotný srovnávací experiment při různých podmínkách rozběhu, tedy při různých hodnotách zrychlení za podmínek čistého valení, konkrétně pro $0,0887 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; $0,1330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a $0,2660 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zatížení bude po celou dobu rozběhu konstantní. Mazací film se bude simulovat ve styku skleněného kotouče a leštěné ocelové kuličky, čímž bude zajištěná geometricky neměnná kontaktní plocha. Leštěná kulička také zajišťuje snadné a jednoznačné vyhodnocení pomocí chromatické interferometrie. Experiment by měl napomoci objasnit děje při rozběhu třecích povrchů. Dále je úkolem provedený experiment samostatně vyhodnotit pomocí chromatické interferometrie a porovnat s předchozími experimentálními pracemi na dané téma.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4.1 Popis experimentálního zařízení

Simulace procesů, které probíhají v reálných tribologických soustavách, se modelují pomocí tribometru (obr. 4.1), který je umístěn v tribologické laboratoři Ústavu konstruování na FSI VUT v Brně. Mazací film se vytváří ve styku skleněného kotouče a ocelové kuličky. Skleněný kotouč je z vrchní strany vzhledem k mikroskopu pokryt antireflexní vrstvou, která umožňuje průchodu světla a zabraňuje odrážení. Spodní strana kotouče je pokryta vrstvou chrómu. Zatížení kontaktu je realizováno pomocí dvojzvrtné páky přes skleněný kotouč. Kotouč i kulička jsou poháněny na sobě nezávislými servomotory s měnitelnými převodovkami vybavenými měniči frekvence. Ocelová kulička je poháněna servomotorem s převodovkou přímo, zatímco kotouč je poháněn servomotorem přes řemenový převod s drážkovým řemenem. Tato kombinace umožňuje modelování procesů za nejrůznějších provozních podmínek. Mazivo se do kontaktu dostane vzájemným pohybem kuličky a disku, jelikož kulička se brodí v olejové nádrži.

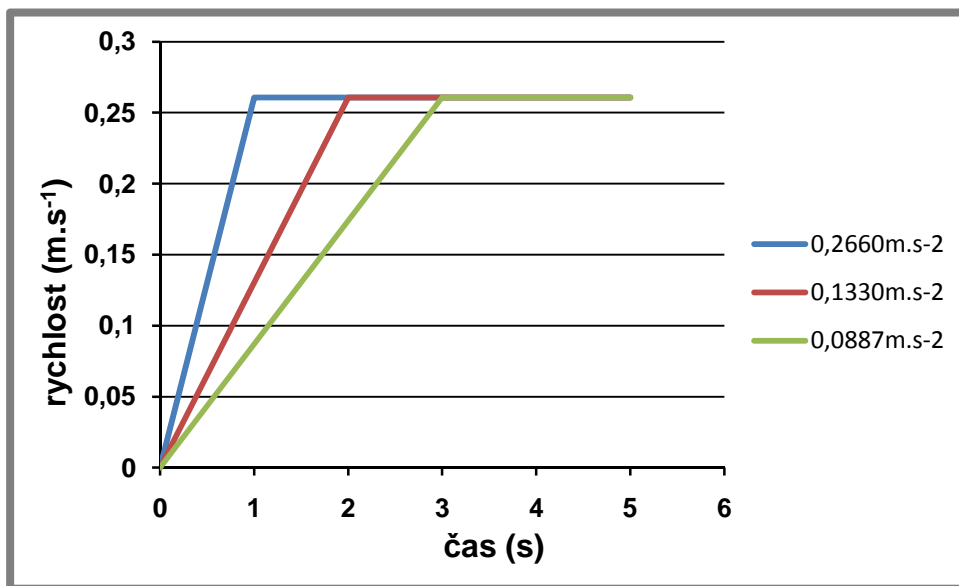


Obr. 4. 1 Experimentální zařízení tribometr [8]

Pro sledování procesů mezi kuličkou a diskem se využívá vhodná kombinace záznamového zařízení a světelného zdroje. Vyhodnocovací zařízení pro nestacionární děje, přesněji pro rozběh třecích povrchů, sestává s mikroskopu a vysokorychlostní CMOS kamery X-Stream™ VISION XS-3 s možností záznamu až 630 snímků za sekundu a počítačového programu Achilles, který pomocí chromatické interferometrie vyhodnotí profil tloušťky mazacího filmu. Chromatická interferometrie umožňuje rozlišit tloušťku mazacího filmu v řádech nanometrů. Pro chromatickou interferometrii je důležité zajistit zdroj monochromatického koherentního světla. Toto zajišťuje xenonový zdroj bílého světla o výkonu 1000W, který je pomocí optického vlákna a soustavy zrcadel, pro zlepšení chlazení, přiveden do kontaktu. Vysoký výkon zdroje je nutný pro kvalitní záznam vysokorychlostní kamerou. Výkon lze různě nastavit, ale maximální výkon umožní kameře záznam až 630 snímků za sekundu při rozlišení 1280x1024 pixelů.

4.2 Průběh měření

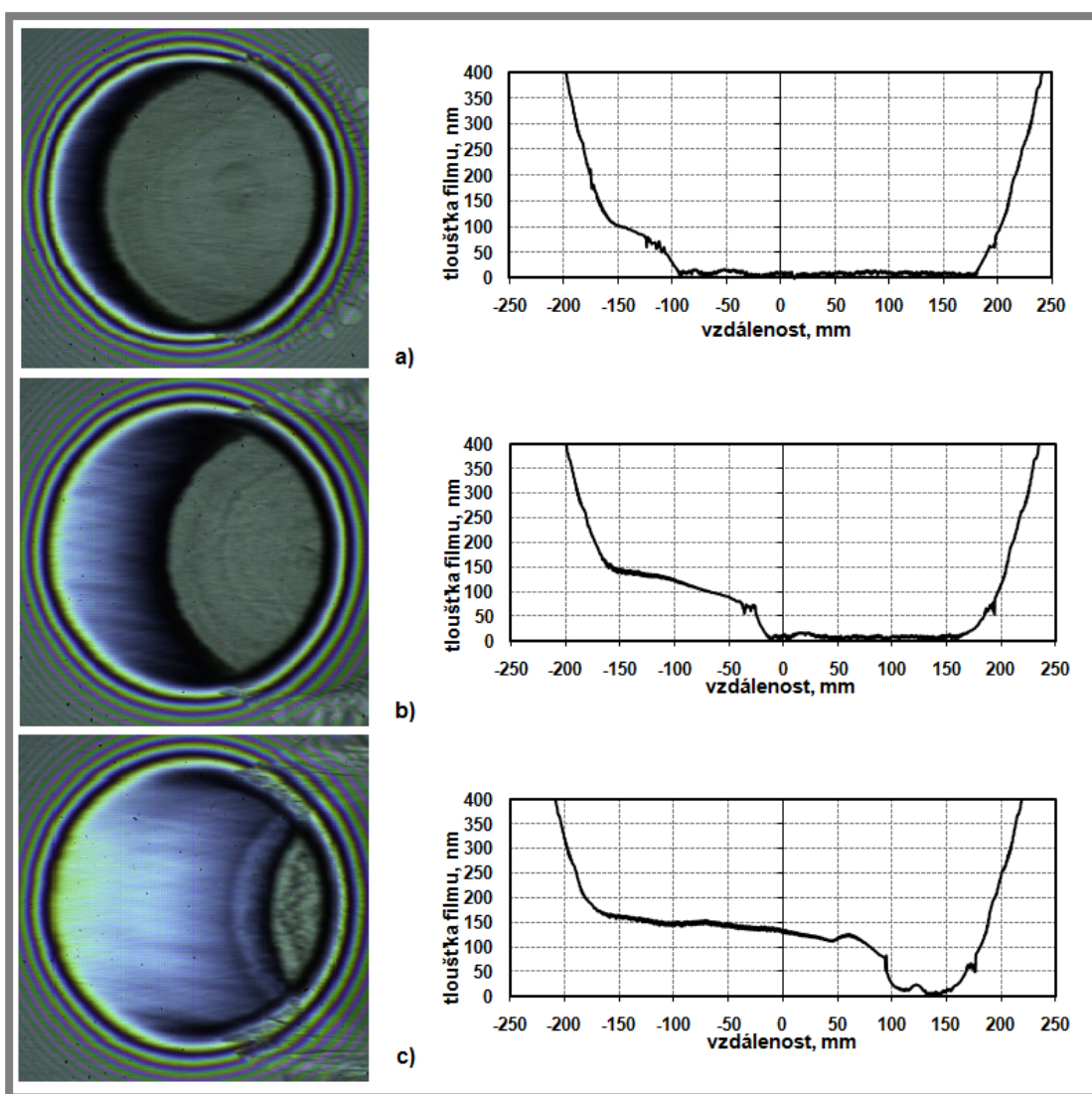
Profil tloušťky mazacího filmu při rozběhu hladkých třecích povrchů byl simulován v kontaktu leštěné ocelové kuličky a skleněného disku. Opticky hladký ocelový disk o modulu pružnosti 81 GPa byl přitlačován na ocelovou kuličku z ložiskové oceli 100Cr6 o průměru 25,4 mm o modulu pružnosti 212 GPa silou 36,5 N. Ocelová kulička byla vyleštěna diamantovou pastou na drsnost přibližně 0,018 μm . Použit byl základový minerální olej SUNOCO L. S. B/S o dynamické viskozitě 0,69 Pa.s a s indexem lomu světla 1,491, přičemž byl experiment prováděn za pokojové teploty. Simulace rozběhu třecích povrchů byla prováděna za podmínek čistého valení ($\Sigma=0$) pro tři různé velikosti akcelerace, konkrétně: 0,0887 m.s^{-2} ; 0,1330 m.s^{-2} ; 0,2660 m.s^{-2} . Maximální rychlost byla 0,2608 m.s^{-1} při 1000 otáčkách servomotoru převodovkou 1:5. Pro každou akceleraci bylo nutné nastavit tzv. rampu na frekvenčním měniči servomotoru. Je to vlastně závislost otáček na čase. Rampa se znázorňuje jako doba, za kterou servomotor dosáhne nastavených otáček. Závislost změny rychlosti na čase je znázorněna na obrázku 4.2. Po zaostření kamery bylo možno provést měření. Každý rozběh při dané akceleraci byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou rychlostí záznamu 450 snímků za vteřinu při době expozice 2222,2 μs a následně získané snímky vyhodnoceny v programu Achilles, který bylo ovšem nutné nejprve zkalibrovat pomocí monochromatických snímků.



Obr. 4. 2 Rampa frekvenčního měniče pro tři různé hodnoty zrychlení.

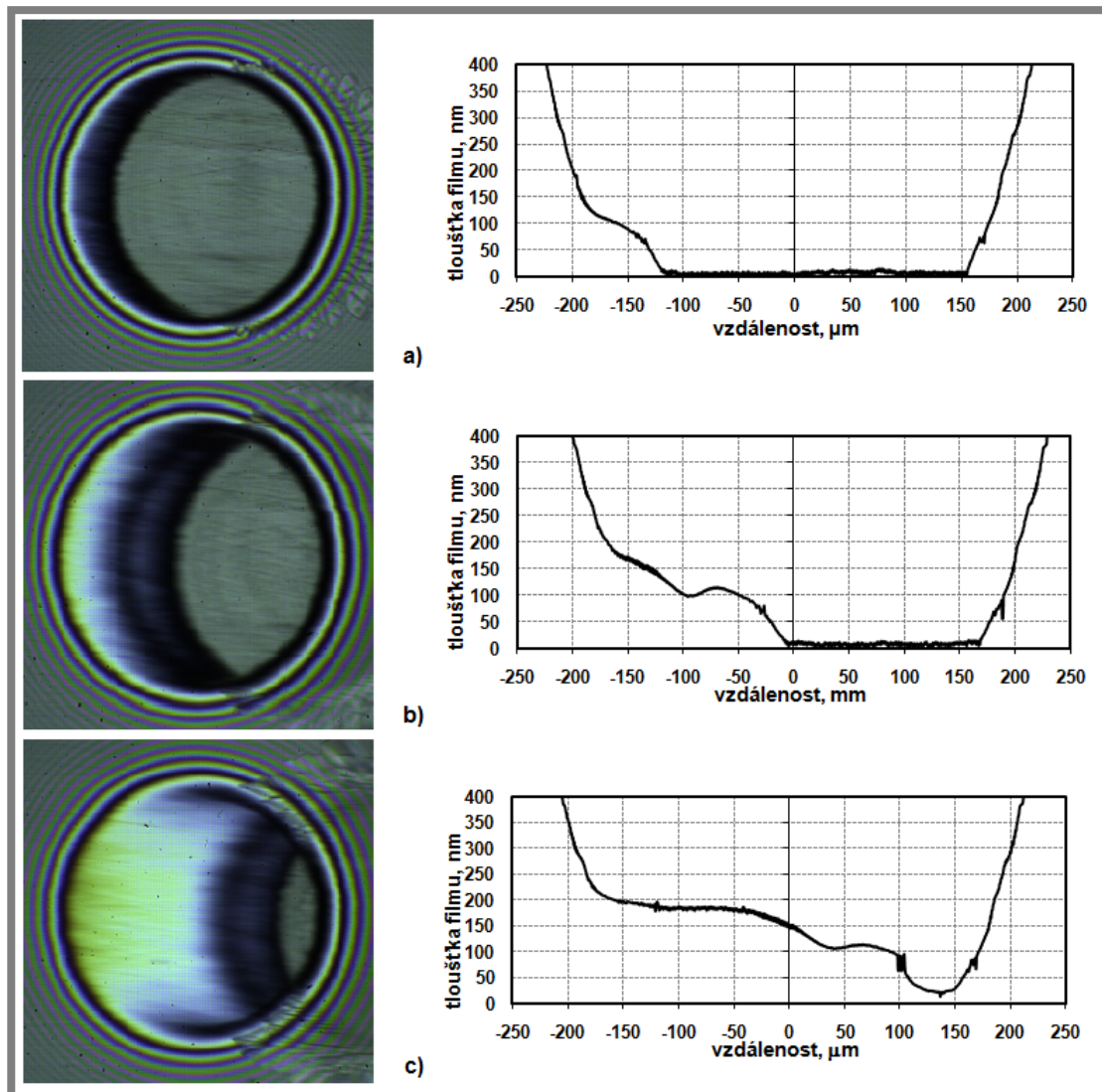
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

Jako první byl realizován experiment při hodnotě akcelerace $0,0887 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na obrázku 5.1 je série vybraných interferogramů zachycených v různých okamžicích pro tuto hodnotu zrychlení. Jak lze vidět, krátce po rozběhu se začne vytvářet první schod. Na něj bezprostředně navazuje oblast s mírným klínovitým nárůstem maziva, která již byla popsána v práci Glovnei a Spikese [6]. Tato vrstva následuje první schod po celé šířce kontaktu v až do úplného zaplavení kontaktu mazivem. Jak lze vidět, po celou dobu rozběhu kontaktu v něm existuje určitá část, kde mazivo souvisle neodděluje třecí povrchy a lze připustit, že po jistém počtu rozběhů, existuje reálné riziko poškození strojních součástí.



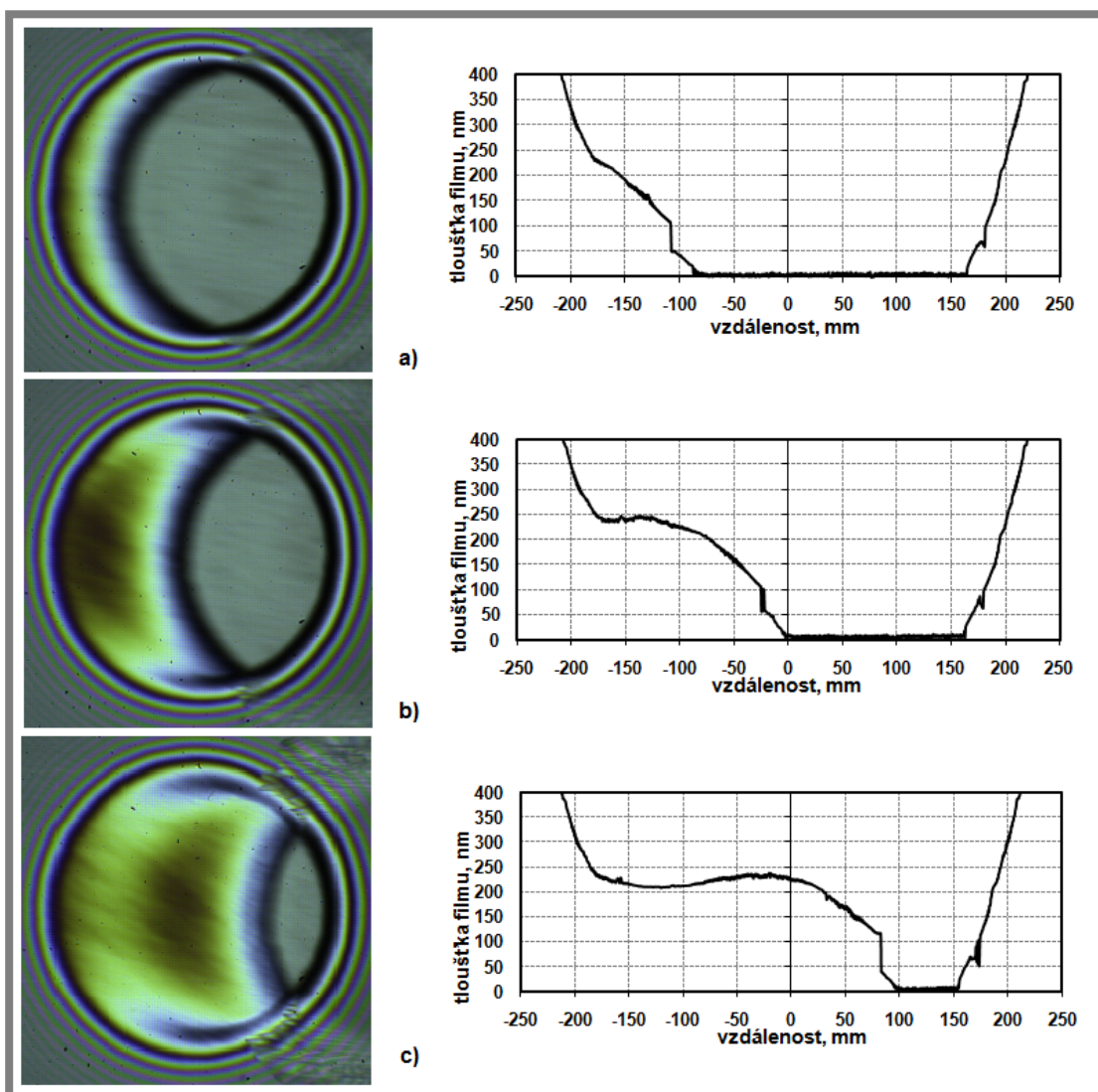
Obr. 5. 1 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení $0,0887 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ za použití oleje L.S. B/S ($\eta=1,89 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n=1,491$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) při $\Sigma=0$ a zatížení $36,5 \text{ N}$. (a) $t=26,7 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0024 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $t=48,9 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0043 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (c) $t=66,7 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0059 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Druhou sérii interferogramů pro hodnotu akcelerace $0,1330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ lze vidět na obrázku 5.2. Přibližně ve stejných místech rozběhu jako v první sérii, ovšem při jiných časových okamžicích, lze vidět jisté rozdíly. První schod se opět vytvořil bezprostředně po rozběhu třecích povrchů. Dále se ovšem vytvoří strmá klínovitá vrstva maziva, která by se dala interpretovat jako druhý schod, popsany v práci Glovnei [6]. Tento schod prochází celou šířkou kontaktu v prakticky konstantní vzdálenosti od prvního. Jako v prvním případě opět také platí, že po celou dobu rozběhu neexistuje po délce kontaktu souvislá vrstva maziva.



Obr. 5. 2 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení $0,1330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ za použití oleje L.S. B/S ($\eta=1,89 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n=1,491$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) při $\Sigma=0$ a zatížení $36,5 \text{ N}$. (a) $t=35,5 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0047 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $t=55,5 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,074 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (c) $t=80 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0106 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Třetí série interferogramů na obrázku 5.3 byla naměřena pro experiment nejvyšší hodnotu zrychlení $0,2660 \text{ m.s}^{-2}$. Při nejvyšší hodnotě zrychlení z celého experimentu je patrná v kontrastu s prvními dvěma měřeními násobně vyšší hodnota tloušťky maziva. Znovu ihned po rozběhu se začíná utvářet první zcela jasně zřetelný schod. Opět následuje jako v druhém případě klínovitá vrstva maziva, která je ovšem viditelně strmější než v druhém a prvním případě. Během rozběhu kontaktu se její strmost postupně snižuje, ale klínovitá vrstva jako taková je velice dobře patrná i těsně před celým zaplavením kontaktu.



Obr. 5. 3 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení $0,2660 \text{ m.s}^{-2}$ za použití oleje L.S. B/S ($\eta=1,89 \text{ Pa.s}$, $n=1,491$ při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) při $\Sigma=0$ a zatížení $36,5 \text{ N}$. (a) $t=17,8 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0047 \text{ m.s}^{-1}$, (b) $t=24,4 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0065 \text{ m.s}^{-1}$, (c) $t=35,5 \text{ ms}$, $u_D=u_B=0,0095 \text{ m.s}^{-1}$.

6 ZÁVĚR - DISKUZE

Tato bakalářská práce shrnuje poznatky týkající se experimentálních studií mazacího filmu při rozběhu nemodifikovaných třecích povrchů a na tyto práce navazuje vlastním experimentem za použití zařízení na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. Výstupem experimentu jsou série interferogramů rozběhu hladkých třecích povrchů pro různé hodnoty akcelerace za konstantních podmínek jako zatížení, geometrie, čisté valení, vlastnosti oleje.

Z porovnání experimentu s předešlými pracemi vyplývá, že utváření mazacího filmu, při rozběhu hladkých třecích povrchů je silně závislé na akceleraci. Dalším faktorem, který ovlivňuje tvorbu mazacího filmu, je volba maziva a jeho charakteristiky, konkrétně viskózně-tlakový koeficient. Z práce Glovnei [6] vyplývá, že prokluz také není stěžejní parametr, který má vliv na utváření filmu. Samotné zatížení má vliv zejména na tloušťku mazacího filmu.

Akcelerace a vlastnosti maziva při dané teplotě ovlivňují zejména tvar mazacího filmu, který při rozběhu vnikl do kontaktu. Při nízkých akceleracích je patrný okamžitý schodovitý nárůst maziva následován klínovitou vrstvou maziva. Při vyšších akceleracích lze pozorovat profil schodovitého tvaru, který postupuje kontaktem. Při ještě vyšších hodnotách akcelerace je patrný pouze jeden vstupní schod následován velmi strmou klínovitou vrstvou maziva. Patrně je to z toho důvodu, že druhý schod se vytvoří prakticky souběžně s prvním, proto není tak snadno rozpoznatelný, ke stejnému závěru došel i Glovnea v práci [6]. Ovšem i přes tyto zjištění pořád během rozběhu kontaktu existuje oblast, která není oddělena souvislou vrstvou maziva, a stýkající se součásti interagují bezprostředně svými povrchy. Což po určitém cyklu rozběhu může vést k poškození součástí.

Závěrem by se dalo říci, že při jakékoliv změně parametrů jako akcelerace, typ maziva, zatížení nedojde k úplnému oddělení povrchů i při rozběhu. Jako východisko se tedy jeví modifikace geometrie třecích povrchů.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**7**

- [1] Vutbr.cz/elearning [online], [cit. 2010-03-15]. Dostupné na World Wide Web: < <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=79078>>
- [2] GSXR.wz.cz [online], [cit. 2010-03-15]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gsxr.wz.cz/opotreb.htm>>
- [3] Subtech.com [online], [cit. 2010-03-15]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=lubrication_regimes>
- [4] SUGIMURA, J. and SPIKES, H. A. (1997): *Technique for Measuring EHD Film Thickness in Non-steady State Contact Conditions.*, in Proc. Leeds/Lyon Symp., Elastohydrodynamics `96, Dowson, D., et al., Eds., Elsevier.
- [5] KANETA, M. *For the establishment of a new EHL theory.* In Lubrication at the Frontier, 1999 (Elsevier, Amsterdam).
- [6] GLOVNEA, R. P. and Spikes, H.A. (2001): *Elastohydrodynamic film formation at the start-up of the motion.*, Proc. I. Mech.E., J215, s. 125-138.
- [7] SVOBODA, P. *Experimentální studium utváření mazacích filmů při reverzaci a rozběhu třecích povrchů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 85s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [8] ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. (2009): A research of behavior of lubrication film under non-steady state conditions. In *Engineering mechanics 2009*. 1. Praha, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i. 2009. p. 1513 - 1523. ISBN 978-80-86246-35-2.

8 SEZNAMY

8.1 Seznam použitých obrázků

Obr.2.1 Stribeckova křivka [1].	14
Obr.2.2 Schéma mezného mazání, (a) vazby polárních molekul [1], (b) schéma styku povrchů [3].	14
Obr.2.3 Schéma smíšeného mazání [3].	15
Obr.2.4 Schéma rozložení tlaku v EHD kontaktu [1].	15
Obr.2.5 Schéma experimentálního Sugimurova zařízení [4].	16
Obr.2.6 (a) změna rychlosti, (b) změna centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti [4].	17
Obr.2.7 Schéma experimentálního Kanetova zařízení [5].	17
Obr.2.8 Série snímků při rozběhu (a) čisté valení, (b) čistý prokluz [5].	18
Obr.2.9 Schéma experimentálního měřícího zařízení [6].	18
Obr.2.10 (a) Závislost velikosti rychlosti na čase při různých zrychleních. (b) Centrální tloušťka filmu pro různé akcelerace a olej HVI650 a 80 °C [6].	19
Obr.2.12 (a) změna rychlosti, (b) změna centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti pro start- stop systému [4].	19
Obr.2.11 Rozložení tloušťky filmu v profilu styku dvou třecích povrchů pro olej HVI650 za teploty 80 °C (a) 50 m.s ⁻² , (b) 10 m.s ⁻² [6].	20
Obr.2.13 Tloušťka mazacího filmu napříč kontaktem pro olej HVI650 za teploty 80 °C [6].	20
Obr.2.14 Série interferenčních snímků při zaplavování kontaktu (olej HVI650 za teploty 80 °C) [6].	21
Obr.2.15 Rozložení tloušťky mazacího filmu za podmínek čistého valení pro 10 m.s ⁻² (olej HVI650 při 80 °C) [6].	21
Obr.2.16 Rozložení tloušťky mazacího filmu za podmínek čistého valení pro 2,5 m.s ⁻² (olej PAO při 80 °C) [6].	22
Obr.2.17 Chromatický interferogram a profil tloušťky mazacího filmu v čase 46,7 ms od rozběhu. Experimentální podmínky: olej L. S. B/S při pokojové teplotě, $\Sigma=1,68$. [7]	22
Obr.4.1 Experimentální zařízení tribometr [8]	25
Obr.4.2 Rampa frekvenčního měniče pro tři různé hodnoty zrychlení.	26
Obr.5.1 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení 0,0887 m.s ⁻² za použití oleje L.S.B/S ($\eta=1,89$ Pa.s, $n=1,491$ při 20 °C) při $\Sigma=0$ a zatížení 36,5 N. (a) $t=26,7$ ms, $u_D=u_B=0,0024$ m.s ⁻¹ , (b) $t=48,9$ ms, $u_D=u_B=0,0043$ m.s ⁻¹ , (c) $t=66,7$ ms, $u_D=u_B=0,0059$ m.s ⁻¹ .	27
Obr.5.2 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení 0,1330 m.s ⁻² za použití oleje L.S. B/S ($\eta=1,89$ Pa.s, $n=1,491$ při 20 °C) při $\Sigma=0$ a zatížení 36,5 N. (a) $t=35,5$ ms, $u_D=u_B=0,0047$ m.s ⁻¹ , (b) $t=55,5$ ms, $u_D=u_B=0,074$ m.s ⁻¹ , (c) $t=80$ ms, $u_D=u_B=0,0106$ m.s ⁻¹ .	28
Obr.5.3 Série chromatických interferogramů při rozběhu hladkých třecích povrchů při zrychlení 0,2660 m.s ⁻² za použití oleje L.S. B/S ($\eta=1,89$ Pa.s, $n=1,491$ při 20 °C) při $\Sigma=0$ a zatížení 36,5 N. (a) $t=17,8$ ms, $u_D=u_B=0,0047$ m.s ⁻¹ , (b) $t=24,4$ ms, $u_D=u_B=0,0065$ m.s ⁻¹ , (c) $t=35,5$ ms, $u_D=u_B=0,0095$ m.s ⁻¹ .	29

8.2 Seznam použitých zkratk a symbolů

Λ	1	parametr mazání
h_{min}	m	minimální tloušťka filmu
R_{red}	m	redukováná kvadratická úchylka povrchu
Rq_a	m	průměrná kvadratická úchylka profilu součásti a
Rq_b	m	průměrná kvadratická úchylka profilu součásti b
Σ	1	prokluz
u_D	$m \cdot s^{-1}$	rychlost skleněného disku
u_B	$m \cdot s^{-1}$	rychlost ocelové kuličky
η	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
n	1	index lomu světla
t	s	čas