

Fakulta strojního inženýrství  
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering  
Institute of Machine and Industrial Design / Department of of Machine Design

# Studium smykově namáhaných elastohydrodynamických mazacích filmů za tranzientních podmínek

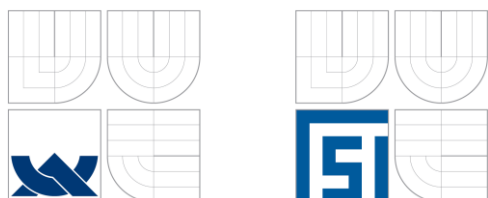
[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]  
[Thesis Type]

Autor práce: **Ing. Josef Frýza**  
Author



# Vysoké učení technické v Brně

Brno University of Technology



Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering

Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

## **Studium smykově namáhaných elastohydrodynamických mazacích filmů za tranzientních podmínek**

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]

[Discourse on the Dissertation Thesis]

**Autor práce: Ing. Josef Frýza**

Author

**Vedoucí práce: prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.**

Supervisor

Brno 2015





|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ÚVOD.....</b>                                                                          | <b>6</b>  |
| <b>2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE<br/>DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>         | <b>7</b>  |
| <b>3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ .....</b>                                              | <b>10</b> |
| 3.1 Vratné nestacionární pohyby v podélném směru kontaktu.....                              | 10        |
| 3.1.1 Reciproční pohyby s harmonickým průběhem rychlosti .....                              | 10        |
| 3.1.2 Reciproční pohyby s konstantní hodnotou zrychlení .....                               | 15        |
| 3.1.3 Reciproční pohyby s konstantní hodnotou rychlosti .....                               | 18        |
| 3.2 Jednosměrné nestacionární pohyby v podélném směru kontaktu.....                         | 20        |
| 3.2.1 Pohyby typu Start-Stop.....                                                           | 20        |
| 3.2.2 Pohyby typu Akceleraace-Deceleraace .....                                             | 23        |
| 3.2.3 Jednosměrné pohyby s harmonickým průběhem rychlosti.....                              | 29        |
| 3.3 Vratné harmonické pohyby v příčném směru kontaktu.....                                  | 33        |
| <b>4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ<br/>ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE .....</b> | <b>37</b> |
| <b>5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO<br/>ŘEŠENÍ .....</b>             | <b>39</b> |
| 5.1 Vymezení cíle práce .....                                                               | 39        |
| 5.2 Vědecká otázka a pracovní hypotéza.....                                                 | 39        |
| 5.3 Způsob řešení a použité metody .....                                                    | 40        |
| <b>6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>                                        | <b>42</b> |
| 6.1 Modifikace měřicí aparatury a úvodní měření.....                                        | 42        |
| 6.1.1 Limity měřicí aparatury a její další vývoj.....                                       | 43        |
| 6.2 Teoretická analýza kontaktních podmínek a model distribuce maziva .....                 | 44        |
| 6.3 Předběžné výsledky .....                                                                | 46        |
| <b>7 ZÁVĚR .....</b>                                                                        | <b>49</b> |
| <b>8 LITERATURA.....</b>                                                                    | <b>50</b> |
| <b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>                                   | <b>54</b> |
| <b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ .....</b>                                                      | <b>56</b> |

---

## 1 ÚVOD

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá studiem chování elastohydrodynamického (EHD) mazacího filmu za tranzientních podmínek. Typickými strojními prvky, jejichž kontakty spadají do EHD režimu mazání, jsou například valivá ložiska, ozubená kola či vačkové mechanismy. Chování EHD filmů pro ustálené provozní podmínky je v dnešní době již dostatečně popsáno. Jak experimentální, tak i numerické studie se v této oblasti shodují a poskytují uspokojivé predikce. V inženýrských aplikacích se ale ideální ustálené provozní podmínky nevyskytují. Mnohé stroje využívají mechanismů s vratnými pohyby, kde dochází ke zpravidla periodickým změnám průběhů rychlostí, zatížení i poloměrů zakřivení kontaktních ploch. Stejně tak, ale i stroje s pouze základními mechanickým pohybem jako je rotace hřídele, které pracují při zdánlivě stálých otáčkách a kroutících momentech, obsahují ložiska, jejichž valivé elementy podléhají provozu ve vibračním prostředí, popřípadě i dynamickým pohybům od rázů vznikajících například v převodových systémech.

Dosavadní experimenty a numerické modely ukazují, že nestacionární provozní podmínky či vibrace výrazně ovlivňují nejen samotnou tvorbu mazacího filmu v kontaktu, ale mohou být i důvodem jeho selhání. Hlubší pochopení chování mazacího filmu a objasnění jevů, které probíhají na rozhraní povrchů za těchto podmínek, jsou základem pro správné návrhy, vývoj a přesné predikce chování strojních celků. V konečném důsledku by tyto poznatky pak měli přinést zvýšení účinnosti, životnosti a spolehlivosti strojů se snížením jejich provozních nákladů.

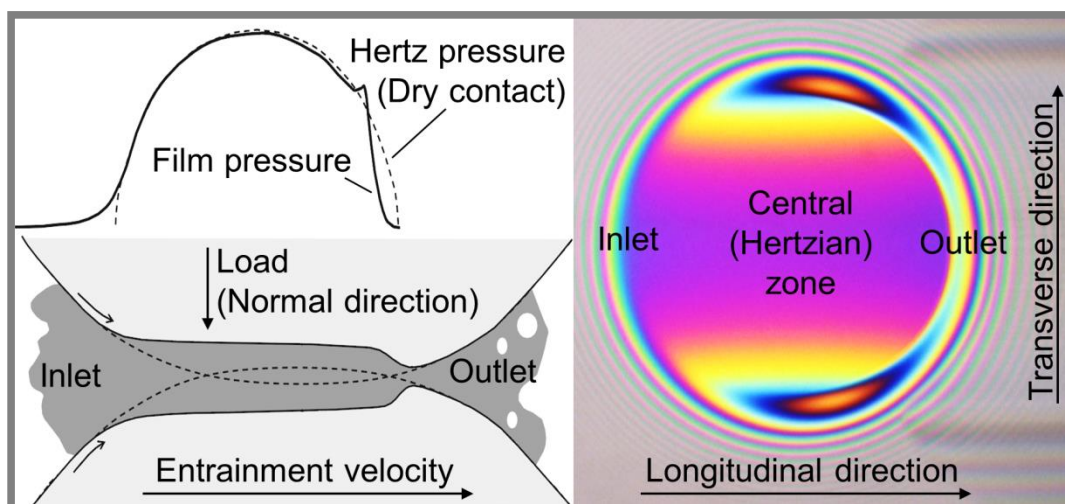
## 2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2

Účinnost strojů, jejich životnost, spolehlivost a provozní náklady jsou jedny z nejvýznamnějších parametrů, které rozhodují nejen o jejich uplatnění na dnešním dynamickém trhu, ale také vypovídají o efektivnosti jejich nakládání s energiemi. Část celkových energetických ztrát vzniká při přenosech či převodech mechanické energie vlivem pasivních odporů (např. u spalovacích motorů odebírají pasivní odpory běžně 5 až 60 % výkonu motoru v závislosti na jeho zatížení [1]). Pasivní odpory, přenos trakčních sil, opotřebení a únava kontaktních ploch dílů jsou podmíněny ději probíhajícími na jejich rozhraní. Vědní obor, který se snaží popsat a objasnit tyto interakce kontaktních povrchů a vzájemně provázané procesy tření, mazání a opotřebení, se nazývá tribologie.

Mnoho kontaktů se nachází v tzv. elastohydrodynamickém režimu mazání. Jedná se o režim kapalinového mazání, kdy jsou pohybující se nekonformní povrchy odděleny souvislým mazacím filmem, který přenáší zatížení kontaktů, zabraňuje jejich opotřebení a výrazně snižuje tření v kontaktu. Tloušťka filmu je řádově srovnatelná s elastickými deformacemi povrchů vznikajícími v důsledku vysokých kontaktních tlaků.

Chování mazacího filmu v kontaktu je velmi komplexní problematika. Je dáno kontaktními podmínkami, tokem maziva, jeho reologií a termálními jevy i jinými fenomény. Toky maziva v EHD kontaktu, které popisuje obecná Reynoldsova rovnice, mají jinou váhu na vstupu, výstupu a v centrální oblasti kontaktu [2]. V centrální oblasti za běžných podmínek dominuje smykový tok maziva (shear flow, Couettův tok) daný střední rychlostí kontaktních povrchů (tj. rychlost unášení maziva) a také tok způsobený vytlačováním maziva vlivem zatížení kontaktu (squeeze effect). Kdežto v důsledku vysoké viskozity stlačeného maziva a nízkých tlakových spádů je zde tlakově indukovaný tok (Poiseuillův tok) zanedbatelný. Poiseuillův tok má tak vliv zejména na vstupu a výstupu z kontaktu, kde dochází k vysokým tlakovým spádům vlivem fyzického tvaru deformovaného kontaktu (physical wedge effect) a viskozita maziva není příliš vysoká.



**Obr. 1** Profil tloušťky filmu s rozložením tlaku ve střední rovině EHD kontaktu (upraveno z [3]) a interferogram kontaktu s vyznačením směrů pohybů v tečné rovině kontaktu

Pro EHD kontakt je typická konstrikce podkovitého tvaru, která omezuje výtok maziva a udržuje tak kontinuitu toku. Největší vliv na tloušťku mazacího filmu má unášivá rychlost vtahování maziva do kontaktu (hydrodynamický efekt související s Couetovým tokem), viskozita maziva a jeho tlakově-viskózní koeficient. U velmi zatížených kontaktů, se mazivo při průchodu kontaktem vlivem vysokých tlaků přestává chovat jako kapalina, jeho viskozita vzrůstá na hodnoty  $10^7$  až  $10^{12}$  Pa·s a přibližuje se tak stavu skelného přechodu, kdy přebírá vlastnosti chování pevných látek (tzv. glassy state či solid-like) [4]. V literatuře se často takovýto stav maziva milně označuje jako solidifikovaný, i když se o plnohodnotnou solidifikaci nejedná z důvodů nízkých časů průchodu maziva kontaktem (přibližně  $10^{-4}$  s), za kterých nemůže dojít k tvorbě krystalů látky [5]. Trakce přenášená smykovým napětím v mazivu narůstá se skluzem až do jeho limitní hodnoty (tzv. limiting shear stress) [6], kde již není na nárůstu velikosti skluzu závislá a pravděpodobně dochází k prokluzu na nebo v blízkosti rozhraní mazivo-povrch (wall-slip) [7]. Rychlost toku maziva je pak skrz tloušťku filmu konstantní. Tento způsob toku maziva kontaktem se označuje jako tzv. plug flow [8] a přestává u něj platit původní Reynoldsova rovnice, kde je nutné změnit okrajové podmínky jejího řešení z rychlostních na napětíové [9].

Maziva jsou charakterizována chemickým složením, viskozitou při daném tlaku a teplotě, tlakově-viskózním koeficientem  $\alpha$ , který udává změnu viskozity v závislosti na tlaku (respektive změnu tvaru mazacího filmu v závislosti na rozložení tlakového pole v kontaktu) a viskozitním indexem (VI) vyjadřujícím závislost viskozity na teplotě. Do moderních průmyslových olejů jsou zpravidla přidávána aditiva pro zlepšení těchto vlastností. Nicméně některé oleje, popř. jejich příměsi mohou být náchylné na smykové řednutí (shear thinning), kdy vlivem smykového namáhání maziva dochází k uspořádávání molekul a ke snížení viskozity (tloušťky filmu). Tento jev se prohlubuje se vzrůstající molekulární hmotností a koncentrací polymerních řetězců [10].

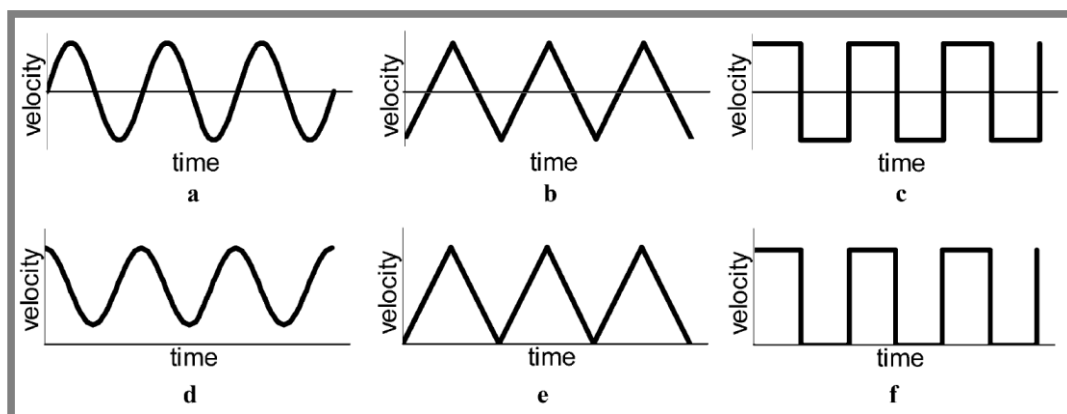
Při nedostatečné tloušťce filmu maziva způsobenou kombinací výše zmíněných jevů pak dochází až k interakci nerovností povrchů. V důsledku styku nerovností vznikají nežádoucí pasivní odpory, mechanická energie je disipována na teplo a plastickou deformaci nerovností. Následně se s rostoucí teplotou snižuje viskozita maziva a tím i tloušťka zbývajících filmu, což jen podporuje další interakce nerovností, nárůst opotřebení a dynamických jevů či vibrací, které tento cyklus mohou dále umocňovat. Celý proces pak může vést až k úplnému zadření kontaktu. Všechny tyto kontakty strojů tedy pracují za tranzientních podmínek a v přítomnosti vibrací, které působí ve svévolných směrech a nedají se zcela odstranit [11].

Problematikou vlivu neustálených provozních podmínek na chování EHD filmu se začali vědci zabývat během 60. let 20. století. Tehdy se studie zaměřovali převážně na jevy spojené s náhlým zatěžováním kontaktu [12]. Pro měření tloušťky mazacího filmu se zpočátku používala elektrická metoda odporová. Později pak elektrická metoda kapacitní a metoda optické interferometrie. Tehdejší experimentální metody byly ale velmi omezeny a nevedly k uspokojivě přesným výsledkům účinků dynamických dějů [13]. Vznikali tak především teoretické práce s numerickými modely, zejména zaměřené na liniové kontakty [14-16].

Největší rozmach experimentálního řešení nestacionárních dějů nastal až téměř na přelomu tisíciletí, především díky vývoji výpočetní techniky a dostupnosti vysokorychlostních kamer. V dnešní době je nejpoužívanější metodou optická

interferometrie, která je zpravidla uplatněna spolu s tribologickým simulátorem kontaktu v konfiguraci Ball-on-disk. Bodový kontakt je v něm realizován mezi transparentním diskem (sklo, safír) a kuličkou s odrazivým povrchem (ložiskové oceli, karbid wolframu, apod.). Metoda umožňuje pozorovat chování mazacího filmu a měřit jeho tloušťku s přesností  $\pm 1$  nm [13].

Mnoho strojních uzlů pracuje v provozních podmínkách, které se periodicky opakují. Při experimentálních studiích se proto často využívá periodickým průběhů rychlostí a zrychlení (viz Obr. 2) [17]. Nejběžnější jsou harmonické vratné pohyby (Obr. 2a), reciproční pohyby s konstantní hodnotou zrychlení (Obr. 2b), anebo s konstantní rychlostí (Obr. 2c). Další kategorií jsou jednosměrné pohyby s harmonickou změnou rychlosti (Obr. 2d), pohyby typu akcelera-decelera (Obr. 2e) a start-stop (Obr. 2f). Přesnost, s jakou jsou dodrženy tyto průběhy, závisí na konstrukci daného experimentálního zařízení a na jeho dynamických možnostech. Je zřejmé, že průběhy na Obr. 2c a Obr. 2f nejsou fyzikálně uskutečnitelné, protože je v nich dosahováno nekonečných zrychlení. Z důvodu nižší setrvačnosti jsou dynamické pohyby realizovány většinou pomocí kuličky, než pomocí disku. Disk je buď fixní (kontakt s čistým skluzem), popř. je jeho pohyb dán působením trakčních sil od kuličky (kontakt s teoreticky čistým valením), nebo je řízen zpravidla nezávislým pohonem. Použitím nezávislých pohonů kontaktních těles je možné nastavit různé poměry skluzové a valivé rychlosti (SRR) v rozsahu od čistého valení až po čistý skluz.



Obr. 2 Nejčastěji používané průběhy rychlostí v experimentálních studiích (upraveno z [17])

Chování mazacího filmu, který separuje kontaktní povrchy za tranzientních podmínek, ale nebylo dodnes dostatečně popsáno. Proto je předběžným cílem disertační práce studium chování mazacího filmu v bodových kontaktech za tranzientních podmínek s využitím metody optické interferometrie. Blíže se práce zaměřuje na různé druhy nestacionárních pohybů ve směru hlavního valivě-skluzového pohybu kontaktu (podélný směr) a ve směru kolmém na něj (příčný směr), viz Obr. 1. Studie zaměřené na proměnné zatížení (pohyby v normálním směru kontaktu) a na změny tvaru kontaktních ploch nejsou v této práci zahrnuty. Tato oblast výzkumu je nicméně stále příliš obsáhlá, proto bude cíl práce na základě rešerše dále specifikován.

### 3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

#### 3.1 Vratné nestacionární pohyby v podélném směru kontaktu

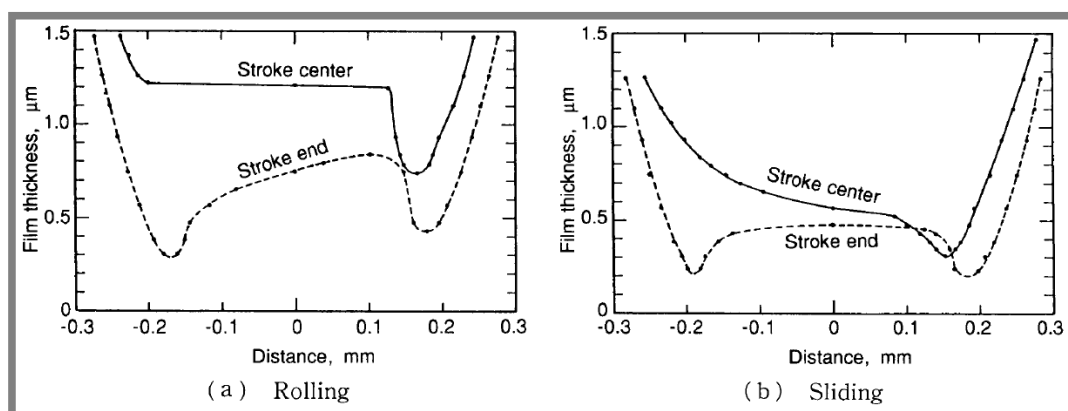
##### 3.1.1 Reciproční pohyby s harmonickým průběhem rychlosti

**NISHIKAWA, H. a M. KANETA.** Behavior of EHL films in reciprocating motion. *Jsmc International Journal Series C-Dynamics Control Robotics Design and Manufacturing*. 1995, vol. 38, issue 3, s. 558-567. DOI: 10.1299/jsmec1993.38.558. [18]

Účelem první experimentální studie zaměřené na vratný harmonický pohyb bylo poskytnutí základního popisu chování EHD filmu a trakčních sil při čistém valení i čistém skluzu. Použit byl minerální olej Bright Stock (BS) a dehtový hydrogenovaný olej TN 320 s vysokou hodnotou tlakově-viskózního koeficientu  $\alpha = 60 \text{ GPa}^{-1}$ . Experimenty byly provedeny pro zdvihy 10, 5, 2 a 1 mm při maximálním Hertzovu tlaku  $0.54 \text{ GPa}$  a maximální bezrozměrné rychlosti  $U = 4 \times 10^{-11}$ .

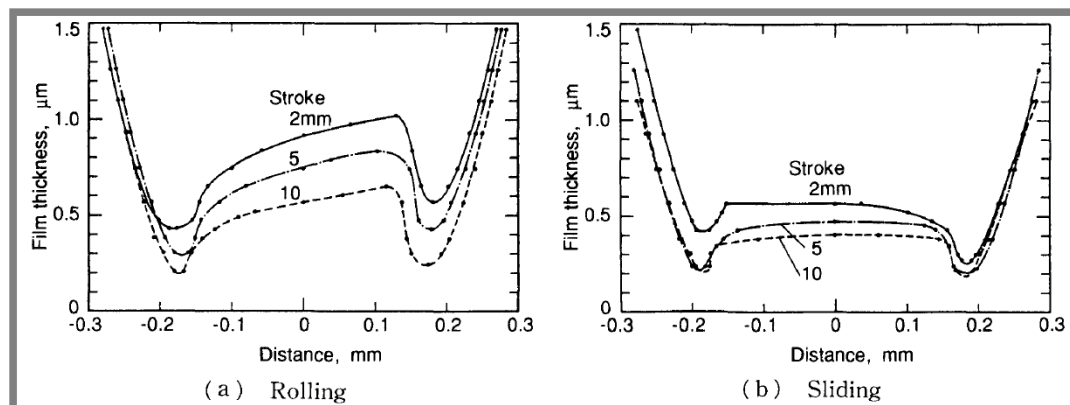
#### Výsledky

Ze získaných průběhů tloušťky filmu během jednoho cyklu vratného pohybu bylo zjištěno, že u obou maziv dochází na úvratích zdvihu (při nulové rychlosti pohybu) k uvěznění maziva v centrální oblasti kontaktu mezi kontaktními povrchy (viz Obr. 3). Takto uvězněné mazivo (v anglické literatuře často označováno jako dimple, protože v povrchu tělesa vzniká elastickou deformací důlek) se pak při opětovném pohybu kontaktu pohybuje beze změny tvaru střední rychlostí kontaktních povrchů a je uvolňováno ve výstupní části kontaktu. Spolu s tím se ve vstupní oblasti kontaktu nově tvoří vrstva maziva jeho vtahováním do konvergentní mezery a postupně prochází kontaktem stejnou rychlostí. U delších zdvihů je tloušťka filmu uprostřed zdvihu (nejvyšší rychlost) téměř srovnatelná s ustálenými podmínkami. Při snižování rychlosti pak opět dochází k postupnému uvěznění maziva v kontaktu. Měření trakce ukázalo, že hodnota trakčních sil vzrůstá v okamžiku uvěznění maziva.



**Obr. 3** Profily tloušťky filmu maziva TN 320 v polovině a na úvratí zdvihu pro podmínky čistého valení (a) a čistého skluzu (b) [18]

Dále bylo pozorováno, že při zkracování délky zdvihu a zvyšování frekvence pohybu pro stejnou rychlost  $U$  se celková tloušťka filmu na úvratích zvyšovala (viz Obr. 4). Nicméně pro zdvih 1 mm vlivem rychlých přechodů výstupní kavitační oblasti kontaktu na vstupní oblast při změně směru pohybu byly do kontaktu vtahovány spolu s mazivem i vzduchové bubliny. Ty byly přítomny v mazivu po dobu téměř celého zdvihu a tak negativně ovlivňovaly stabilitu filmu.



**Obr. 4** Profily tloušťky filmu maziva TN 320 na úvratích pohybu při změně délky zdvihu pro podmínky čistého valení (a) a čistého skluzu (b) [18]

## Závěr

Ačkoliv se jedná o jednu z nejstarších studií v této oblasti, její rozsah a poznatky jsou velmi významné. Tloušťka filmu se v průběhu zdvihu cyklicky mění z důvodu střídání jevů vtahování a vytlačování maziva, kdy pro kratší zdvihy se míra vytlačování snižuje. Přičemž tloušťka uvězněného filmu je větší na výstupní straně kontaktu než na straně vtoku (záleží tedy na směru předcházejícího pohybu), protože zde dochází k výraznějšímu efektu vytlačování. Celková tloušťka filmu je u maziva TN 320 při skluzu menší než při valení, kdežto pro mazivo BS jsou tloušťky téměř stejné. Toto poukazuje na náchylnost tohoto maziva na smykové řídnutí či ovlivnění teplotou při skluzu (inlet shear heating), což potvrzuje i měření trakce spolu s tím, že uvězněné mazivo se nechová jako viskózní kapalina. Je usuzováno, že při kombinaci vysokých frekvencí a malých zdvihů může dojít ke kolapsu EHD filmu, protože vzduchové bubliny mohou zapříčinit hladovění (nedostatečné zásobování kontaktu mazivem pro vytvoření běžné tloušťky filmu) a omezit tvorbu hydrodynamického tlaku, čímž se sníží únosnost kontaktu.

---

**KANETA, M. a H. NISHIKAWA.** Experimental study on microelastohydrodynamic lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 371-381. [19]

Stejní autoři dále studovali ovlivnění chování filmu maziva BS umělými nerovnostmi. V rámci tohoto článku použili i vratný pohyb o zdvihu 0.2 mm kuličky za podmínek 100% SRR (odpovídá zdvihu 0.6 mm disku), kdy na povrchu kuličky byla příčná drážka o hloubce 0.8  $\mu\text{m}$ . Úvrat' zdvihu nastala, když se drážka dostala do středu kontaktu.

## Výsledky a závěr

Autoři zjistili, že vzduchové bubliny spolu s mazivem unikají bokem kontaktu podél nerovnosti. V porovnání s ustálenými podmínkami, kde docházelo k obnově mazacího filmu na vstupu kontaktu po průchodu nerovnosti, při vratném pohybu je tloušťka filmu velmi malá s přítomností vzduchových bublin. Při zániku bublin na vstupu kontaktu dochází k mírné obnově tloušťky filmu. Nicméně při dalším zdvihu, nastal kolaps mazacího filmu bezprostředně po projití drážky kontaktem vlivem kombinace bublin a velkého bočního výtoku. Toto zjištění je důležité, protože v běžné praxi jsou na kontaktních površích stochastické nerovnosti, které spolu s vratným pohybem mohou způsobit zhroucení mazacího filmu.

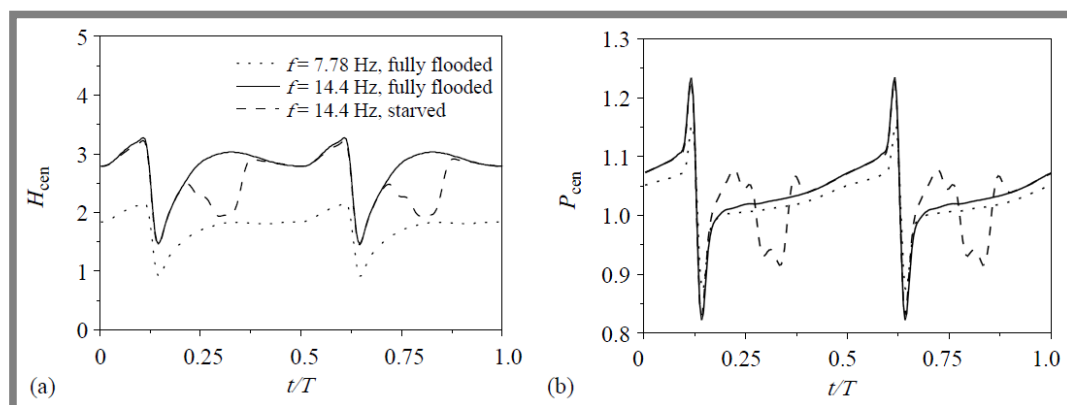
**WANG, J., T. HASHIMOTO, H. NISHIKAWA a M. KANETA.** Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion. *Tribology International*. 2005, vol. 38, 11-12, s. 1013-1021. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.022. [20]

**STADLER, K., N. IZUMI, T. MORITA, J. SUGIMURA a B. PICCIGALLO.** Estimation of Cavity Length in EHL Rolling Point Contact. *Journal of Tribology*. 2008, vol. 130, issue 3, s. 031502-. DOI: 10.1115/1.2919780. [21]

V návaznosti na předchozí články byl EHD film maziva BS vyšetřován pomocí optické interferometrie a numerických simulací s ohledem na míru hladovění kontaktu. Chování filmu za podmínek zdvihu 1 mm při tlaku 0.54 GPa a čistém valení bylo studováno pro frekvence pohybu 7.78 ( $U = 2 \times 10^{-11}$ ) a 14.4 Hz ( $U = 4 \times 10^{-11}$ ). Jako model hladovění byl v práci [20] využit přístup pro ustálené podmínky založený na poměru tloušťky a vzdálenosti menisku maziva od vstupní oblasti kontaktu viz [22]. Následně byl publikován teoretický model určený pro vratný pohyb [21], který vychází z predikce délky kavitační oblasti od středu kontaktu jako parametru pro určení míry hladovění.

## Výsledky

Chování filmu během zdvihu bylo obdobné jako v předchozí studii [18]. Při nižší frekvenci byla míra hladovění zanedbatelná. Při frekvenci 14.4 Hz docházelo vlivem hladovění k propadům centrální tloušťky filmu v polovině zdvihu, když se začala



**Obr. 5** Modely průběhu centrální tloušťky filmu (a) a tlaku (b) během jednoho cyklu harmonického pohybu o rozdílné frekvenci, kde  $t$  je čas a  $T$  je perioda pohybu [20]

rychlost pohybu snižovat z maximální hodnoty. Minimální tloušťka filmu ale zůstala u obou frekvencí pohybu téměř nezměněna bez ohledu na hladovění a nedošlo tak k selhání filmu. Modely obou studií měli obecně dobrou shodu s experimentálními výsledky. Při hladovění kontaktu modely poukazovali na fluktuaci tlaku v kontaktu (Obr. 5b, čárkovaná čára).

### Závěr

Práce [20] potvrzuje výsledky předchozích studií a přidává srovnání s numerickými modely. Nicméně použitý model je pravděpodobně omezený jen na několik experimentálních podmínek. Predikované fluktuace tlaku při hladovění kontaktu jsou nejspíše dány snahou tlakového pole vyvážit únosnost kontaktu skrz rozdílně tlustý mazací film. To může mít ale negativní dopad na kontaktní únavu. Autoři v práci uvádí, že si nejsou jisti skutečným tvarem a chováním filmu v hladovějící oblasti kontaktu. Stadlerův [21] model uvažuje tlak pro tvorbu kavitačních bublin v mazivu - 0.1 MPa. Avšak pro tenké filmy není přesná hodnota kavitačního tlaku známa a je obtížně zjistitelná. Model je dále limitován na čisté valení a pouze na bubliny vzniklé v mazivu, nikoliv na ty, které jsou do kontaktu vtahovány. Model je proto pro univerzálnější použití nutné modifikovat a ověřit rozsáhlejšími experimentálními studiemi.

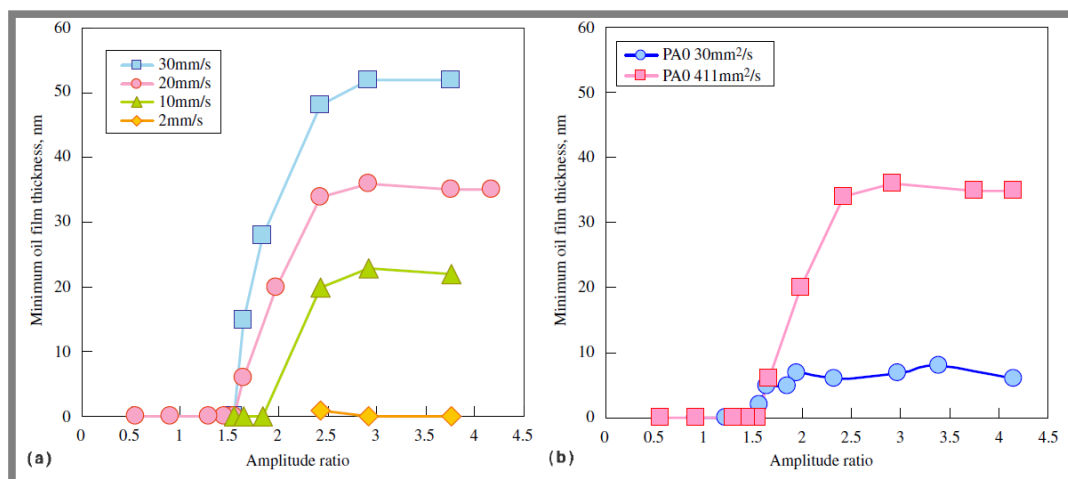
---

**MARUYAMA, T. a T. SAITOH.** Oil film behavior under minute vibrating conditions in EHL point contacts. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 8, s. 1279-1286. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.11.004. [23]

Cílem článku bylo za podmínek čistého skluzu dokázat existenci kritické hodnoty tzv. amplitudového poměru (critical amplitude ratio). Jedná se o poměr mezi hodnotou zdvihu (skluzovou vzdáleností) a průměrem Hertzovy oblasti kontaktu, který udává míru vibračního pohybu, při kterém mazací film začíná plně oddělovat kontaktní povrchy po celou dobu vratného pohybu kuličky po statickém disku. Pro tyto účely byla použita maximální rychlost harmonického pohybu 2 až 30 mm/s, kontaktní tlaky 0.29 až 0.54 GPa a dvě maziva PAO o rozdílné viskozitě 30 a 411 mm<sup>2</sup>/s.

### Výsledky

Minimální tloušťka filmu v grafech (viz Obr. 6) odpovídá minimu filmu po dobu vratného pohybu. Grafy ukazují, že při amplitudovém poměru menším než 1.6 nedochází k vytvoření udržitelné tloušťky filmu po celou dobu zdvihu. K selhání filmu docházelo na úvratích, kde tlustější film v centrální oblasti kontaktu byl uvězněn dotykem povrchů (nulovou tloušťkou) na okrajích kontaktu. Při překročení této kritické hodnoty poměru minimální tloušťka filmu během jednoho harmonického cyklu postupně narůstala až do poměru 2.9. Nad touto mezí již minimální tloušťka stagnovala a nebyla tedy dále ovlivňována skluzovou vzdáleností zdvihu. Použité mazivo, rychlost pohybu (frekvence) ani velikost kontaktu (zatížení) neovlivňovali hodnotu kritického poměru. Změna maziva ale posunula konečnou hranici tvorby filmu, kde pro méně viskózní mazivo se tato hranice přiblížila kritické hodnotě na hodnotu poměru 1.9.



Obr. 6 Vliv amplitudového poměru na minimální tloušťku mazacího filmu pro (a) rozdílné rychlosti a pro (b) rozdílné viskozity maziva [23]

## Závěr

V práci byla ukázána existence kritické hodnoty udávající míru vibračního pohybu potřebou pro oddělení povrchů souvislým filmem maziva. Kritický poměr je zde vyčíslen i analytickým odhadem jako  $\pi/2 \approx 1.57$ . Významné je, že v měřeném rozsahu je kritická hodnota imunní na změnu maziva, zatížení i rychlosti. Tato hodnota je ale nejspíše platná jen pro nízké rychlosti, kdy ještě nedochází k podstatnému ovlivnění kontaktu vtahováním kavitačních bublin. V článku také autoři nekomentují výsledky pro nejnižší použitou rychlost 2 mm/s, kdy zřejmě nedošlo k separaci povrchů. Je tedy potřebné tato tvrzení ještě potvrdit pro větší rozsah parametrů a najít jejich omezující hranice.

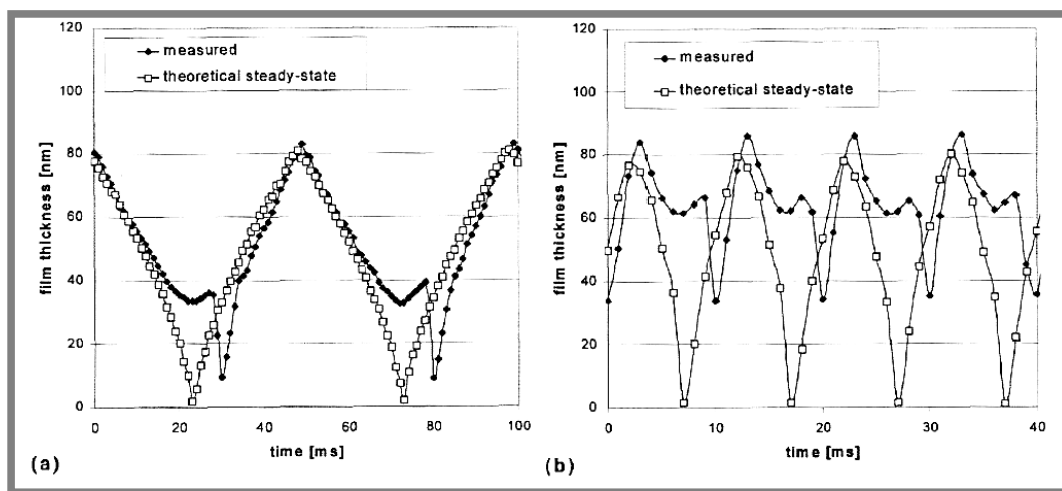
### 3.1.2 Reciproční pohyby s konstantní hodnotou zrychlení

**GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES.** Behavior of EHD Films During Reversal of Entrainment in Cyclically Accelerated/Decelerated Motion. *Tribology Transactions*. 2002, vol. 45, issue 2, s. 177-184. DOI: 10.1080/10402000208982537. [24]

Cílem studie byl popis chování filmu maziva PAO při vratném pohybu kuličky v kombinaci s konstantním průběhem změny rychlosti (akcelpace-decelerace). Měření proběhla pro čistě skluzový kontakt a kontakt s přítomností valivé i skluzové složky rychlosti při frekvencích (odpovídajících i příčným zrychlením v m/s): 2, 10, 20 a 50 Hz.

#### Výsledky

Průběh centrální tloušťky filmu (Obr. 7) nenabýval své minimální hodnoty na úvratích pohybu při nulové rychlosti, jak stanovuje teorie EHD pro ustálené podmínky, ale až za úvratí s jistou časovou prodlevou. Tato prodleva byla závislá na frekvenci pohybu a odpovídala době přechodu minimální tloušťky filmu z okrajové části kontaktu vzniklé při uvěznění maziva na úvratí pohybu do středu kontaktu, kde byla centrální tloušťka odečítána. Pro podmínky valivého kontaktu se skluzem se povaha chování nezměnila. Avšak pro stejné rychlosti při zpomalování pohybu kuličky (snižování skluzové rychlosti) byla pozorována nižší tloušťka filmu, než při zvyšování rychlosti, což u čistě skluzového pohybu pozorováno nebylo.



**Obr. 7** Centrální tloušťka mazacího filmu při čistém skluzu pro frekvence vratného pohybu (a) 10 a (b) 50 Hz [24]

#### Závěr

Přínosem publikace je detailní popis chování filmu za stanovených podmínek a poukázání na to, že chování mazacího filmu za tranzientních podmínek je dáno především kinematikou kontaktu v jeho vstupní oblasti. Obdobné kinematické podmínky byly aplikovány již dříve v [25, 26], ale získané výsledky nebyly příliš detailní, popř. byly použity malé snímací frekvence kontaktu a nízké hodnoty

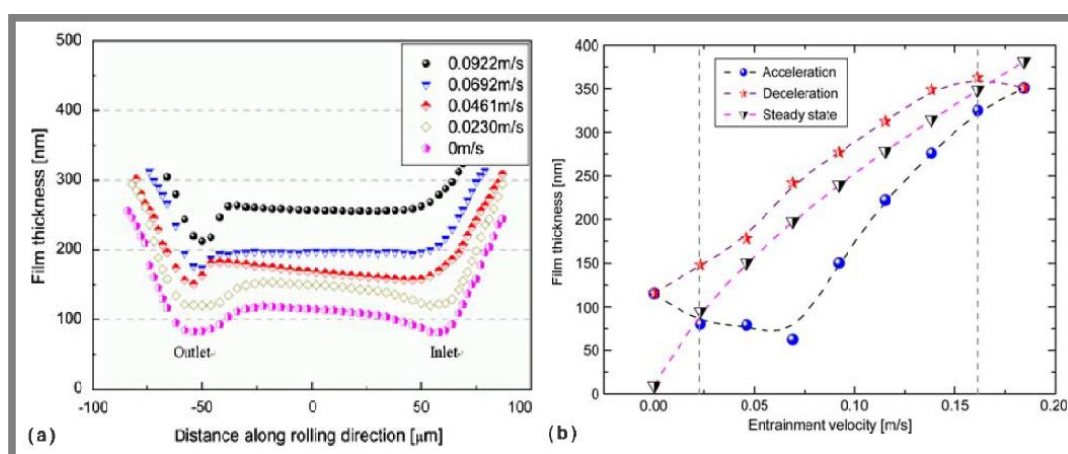
zrychlení. Práce také potvrzuje unášení neměnného tvaru filmu střední rychlostí kontaktem, jak bylo pozorováno při harmonickém pohybu v [18]. Důvodem pro zjištěné rozdílné tloušťky filmů je nejspíše teplotní ovlivnění kontaktu skluzem, kdy při snižování skluzové rychlosti byla teplota v kontaktu vyšší než při nárůstu rychlosti z nižší hodnoty skluzu. Pro podmínky čistého skluzu byly aplikované skluzové rychlosti čtyřnásobně nižší (pro docílení stejného průběhu unášivé rychlosti) a tak zde patrně nebyly výraznější odchylky v tloušťce filmu zaznamenány.

**LI, G., C. ZHANG, J. LUO, S. LIU, G. XIE a X. LU.** Film-forming Characteristics of Grease in Point Contact under Swaying Motions. *Tribology Letters*. 2009, vol. 35, issue 1, s. 57-65. DOI: 10.1007/s11249-009-9433-7. [27]

Autoři se zabývali chováním lithiového plastického maziva za podmínek čistého valení při frekvenci pohybu 2 Hz se zrychlením  $\pm 1.38$  m/s. Motivace tohoto článku je zřejmá – plastická maziva jsou hojně využívána právě v kontaktech, které jsou často vystaveny neustáleným provozním podmínkám a působení vibrací. Obecně lze chování plastických maziv v porovnání se základovými oleji mnohem obtížněji predikovat. To je dáno zejména jejich komplexnější strukturou a reologií. V práci je také vytvořen jednoduchý numerický model pro tyto podmínky.

## Výsledky

Na úvratích pohybů docházelo opět při deceleraci k uvěznění mazacího filmu (Obr. 8a) a k jeho následnému průchodu kontaktem bez výraznějších změn tvaru. Graf centrální tloušťky filmu v průběhu jednoho cyklu pohybu tvoří smyčku s tlustějším filmem při zpomalování pohybu a tenčím filmem při jeho zrychlování. Z grafu je také zřejmá časová prodleva mezi okamžikem nulové rychlosti pohybu a minimem tloušťky filmu.



**Obr. 8** Podélné profily (a) tloušťky filmu při deceleraci a vývoj centrální tloušťky filmu (b) během jednoho cyklu vratného pohybu [27]

**Závěr**

Práce je přínosná zejména s ohledem na použití plastického maziva. Chování plastického maziva při akceleraci a deceleraci bylo velmi podobné tomu, které pozoroval již dříve u klasických olejů Sugimura [28] při jednosměrném pohybu, viz níže kapitola 3.2.2. Pozorované rozdíly v tloušťce maziva jsou vysvětleny kombinací časové prodlevy (odlišnými rychlostmi na vstupu do kontaktu) a squeeze efektem. Při akceleraci pohybu je vlivem časové prodlevy odčítaná tloušťka filmu, která vznikla na vstupu do kontaktu při předchozí nižší rychlosti, kdežto pro deceleraci byla tato rychlost původně vyšší a tak je v centrální oblasti kontaktu tlustější vrstva maziva. Tok od squeeze efektu je zde mnohem menší než Couettův tok. Vlivem akcelerace dochází ke snaze kontaktů být odlehčeny, čímž se snižuje viskozita maziva v kontaktu a rovněž tloušťka filmu. Naopak při deceleraci mají kontakty tendenci se přiblížit a produkovat tak tlustější film maziva.

### 3.1.3 Reciproční pohyby s konstantní hodnotou rychlosti

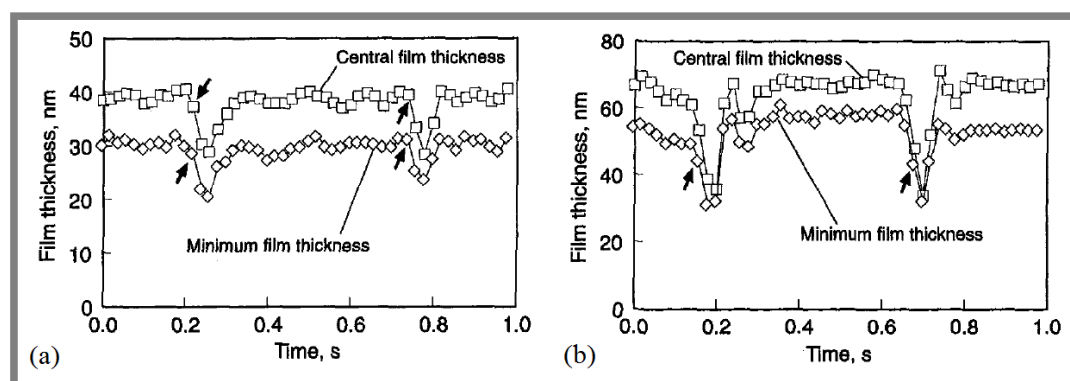
**SUGIMURA, J., W. R. JONES a H. A. SPIKES.** EHD Film Thickness in Non-Steady State Contacts. *Journal of Tribology*. 1998, vol. 120, issue 3, s. 442-452. DOI: 10.1115/1.2834569. [28]

**SUGIMURA, J.** Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2002, vol. 47, issue 10, s. 752-757. ISSN: 0915-1168. [29]

Publikace se orientují na změny v tloušťce EHD filmu za čistého valení při působení trhavých pohybů vznikajících od krokových motorů. Články zahrnují 3 typy tranzientních pohybů, které jsou v tomto pojednání rozděleny do příslušných podkapitol. Krokové motory jsou často uplatněny ve vesmírných aplikacích, proto autoři kromě běžných minerálních olejů (SN100, SN150) studovali i chování perfluorovaných polyetherů (PFPEA, PFPEZ) užívaných v této oblasti průmyslu. Všechny testy byly provedeny pro maximální Hertzův tlak 0.78 GPa. Vratný pohyb byl uskutečněn pro rychlosti 40 mm/s s mazivem PFPEA a rychlost 123 mm/s s mazivem PFPEZ za teploty 100 °C.

#### Výsledky

Při porovnání maziv za ustálených podmínek vyplynulo, že u PFPEZ dochází ke smykovému řidnutí a také k adsorpci molekul na povrch tvořící vrstvu filmu o tloušťce 4 nm. Ostatní maziva vykazovala newtonské chování. Pro 100 °C byla tloušťka filmu obou polyetherů srovnatelná. Při změně orientace pohybu (na úvratí) docházelo k rychlému poklesu a opětovnému obnovení centrální i minimální tloušťky filmu. Také nastalo již dříve pozorované uvěznění maziva v centrální oblasti kontaktu.



**Obr. 9** Centrální a minimální tloušťka filmu při vratném pohybu pro (a) PFPEA při 40 mm/s; (b) PFPEZ při 123 mm/s [28]

#### Závěr

Z článku jsou zřejmá omezení dynamiky pohybu vlivem konstrukce zařízení a záznamové techniky, kdy byla použita jen běžná kamera se snímací frekvencí 50 snímků za sekundu. Je možné, že docházelo ke skluzu mezi povrchem disku

a kuličky, protože kulička neměla vlastní pohon a její pohyb byl dán trakcí od disku. Také změna orientace pohybu nebyla úplně okamžitá vlivem vůlí u ozubeného převodu řízení disku. Vzniklá časová prodleva (0.08 s) umožnila vytlačení většího množství původně uvězněného maziva z kontaktu. Autoři uvádí, že vzhledem k omezenému rozsahu použité metody, která umožňuje měřit tloušťku filmu mezi 2 až 200 nm, byla použita pro každé mazivo rozdílná rychlost, aby byla výsledná tloušťka v tomto rozmezí. Tato kombinace současné změny rychlosti a maziva poměrně znesnadňuje vyvození závěrů z chování mazacího filmu a určení míry působících vlivů na dané chování. Pokud však budeme předpokládat, že testovaná maziva se chovají stejně při dané teplotě i pro nestacionární podmínky, jako tomu bylo za ustálených podmínek, tak lze z výsledků říci, že s rostoucí dynamikou (zrychlením) pohybu a tím i s tloušťkou filmu vznikají výraznější deviace v tvaru mazacího filmu. Autoři také zmiňují, že porovnání s analytickými studiemi je problematické, protože se v nich výhradně užívají ideální podmínky průběhů rychlostí či zrychlení, které nejsou v praxi dosažitelné.

## 3.2 Jednosměrné nestacionární pohyby v podélném směru kontaktu

### 3.2.1 Pohyby typu Start-Stop

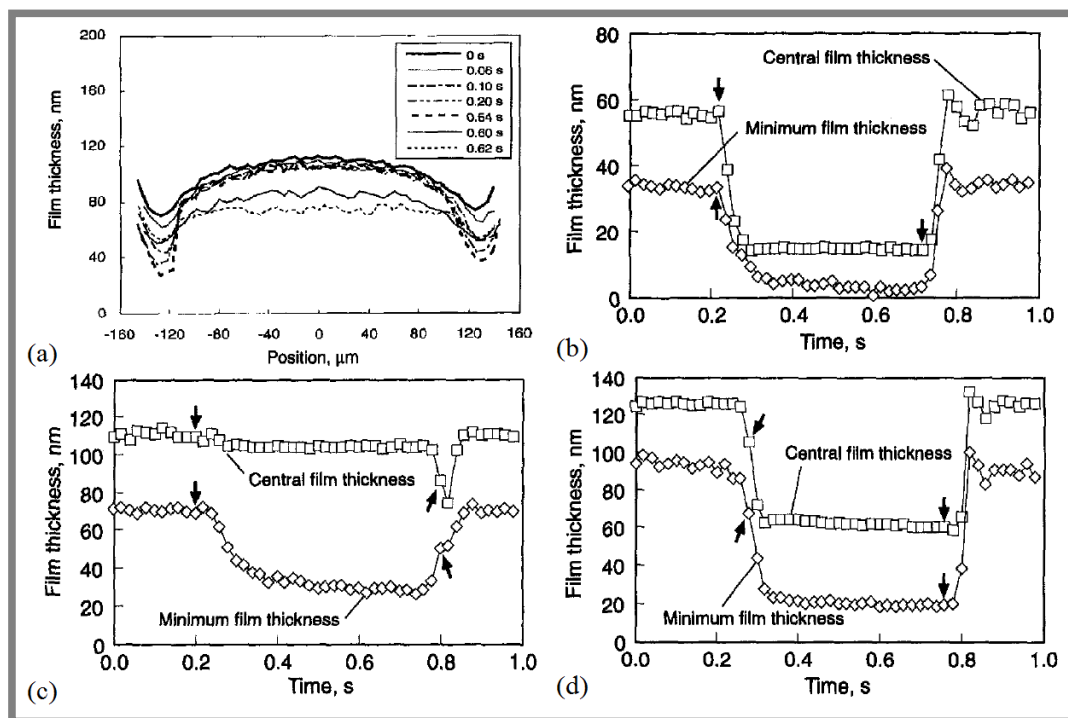
**SUGIMURA, J., W. R. JONES a H. A. SPIKES.** EHD Film Thickness in Non-Steady State Contacts. *Journal of Tribology*. 1998, vol. 120, issue 3, s. 442-452. DOI: 10.1115/1.2834569. [28]

**SUGIMURA, J.** Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2002, vol. 47, issue 10, s. 752-757. ISSN: 0915-1168. [29]

Další část článků [28, 29] byla věnována start-stop pohybu typickému pro krokové motory. Valivý pohyb o rychlosti 9,7, 90 a 157 mm/s byl zastavován a uváděn znovu do pohybu s frekvencí 1 Hz.

### Výsledky

Při náhlém zastavení pohybu došlo u všech maziv k jejich uvěznění v centrální oblasti kontaktu, kdy u maziva PFPEA zůstala centrální tloušťka téměř nezměněna. Chvilkový pokles zde vznikl až při opětovném uvedení do pohybu s určitou časovou prodlevou (viz Obr. 10c). Po rozjezdu u maziv SN100 a PFPEZ vznikl vlivem většího zrychlení překmit tloušťky filmu s následným ustálením hodnoty.



**Obr. 10** Profily tloušťky filmu maziva PFPEA (a) při zastavení pohybu a průběhy tlouštěk filmu pro (b) SN100 při 157 mm/s; (c) PFPEA při 9,7 mm/s a (d) PFPEZ při 90 mm/s [28]

## Závěr

Podobně jako v předchozí části článku jsou výsledky do značné míry ovlivněny nevhodným přístupem měření (současná změna rychlostí, maziv a tentokrát i teploty) a konstrukcí zařízení. Po zpětné analýze jsou fluktuace tloušťky filmů nejspíše způsobeny kolísající rychlostí disku po jeho náhlém uvedení do pohybu. Autoři usuzují, že tvar uvězněného maziva stejně jako rychlost jeho vytlačování jsou výrazně závislé na jeho reologii. Pokles filmu ihned po startu pohybu (zřetelný zejména z Obr. 10c) je přikládán přechodu uvězněného maziva z solid-like stavu (ten přibližně nastává, pokud je  $\alpha p > 13$  [30]) do stavu viskózní kapaliny ještě předtím, než je do středu kontaktu přivedeno nové mazivo. Je zřejmé, že vzhledem k nízké snímací frekvenci nebylo možné přesně popsat chování maziva ihned po zastavení či na počátku pohybu a jsou potřebné další studie, zaměřující se na tuto oblast.

---

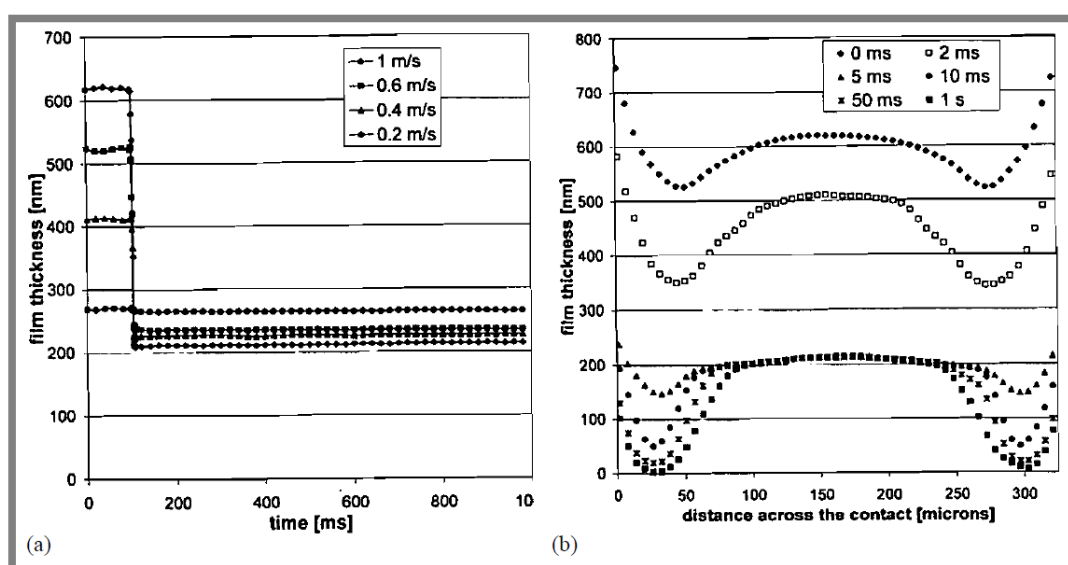
**GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES.** The Influence of Lubricant Upon EHD Film Behavior During Sudden Halting of Motion. *Tribology Transactions*. 2000, vol. 43, issue 4, s. 731-739. DOI: 10.1080/10402000008982402. [31]

---

Studie navazuje na předchozí články s využitím vysokorychlostní kamery snímající kontakt každou milisekundu. Cílem byl detailní popis chování mazacího filmu při náhlém zastavení čistě skluzového pohybu kuličky pro rychlosti od 0.1 do 1 m/s se zohledněním viskozity a tlakově-viskózního koeficientu studovaných maziv.

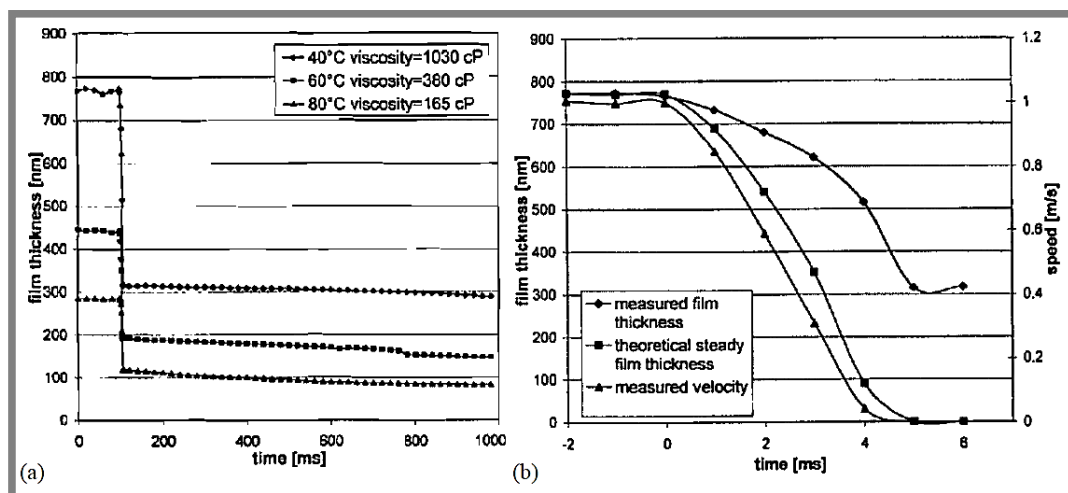
## Výsledky

Z výsledků je zřejmé, že při náhlém zastavení dochází ke kolapsu mazacího filmu ve dvou fázích. V první fázi dochází k rapidnímu poklesu tloušťky maziva v celém kontaktu bez výraznějších změn jeho tvaru. Ukazuje se, že počáteční rychlost (tloušťka) má zanedbatelný vliv na vzniklou tloušťku filmu ihned po zastavení pohybu (na konci první fáze).



**Obr. 11** Chování mazacího filmu minerálního oleje HVI 650: (a) centrální tloušťka po náhlém zastavení pohybu z rozdílných rychlostí; (b) vývoj profilu filmu v čase po zastavení pohybu [31]

Nicméně reologie maziva na ni má naopak vliv významný (viz Obr. 12a). První fáze nenastává, pokud je počáteční rychlost pohybu pod určitou kritickou hodnotou. Poté dochází ihned k druhé fázi, kterou je velmi pomalý pokles centrální tloušťky spolu s rychlým poklesem tloušťky minimální na okrajích kontaktu vlivem tlakového rozložení – mazivo o vyšší viskozitě je uvězněno v centrální oblasti a nastává jeho vytlačování.



**Obr. 12** (a) Efekt viskozity na centrální tloušťku filmu maziva; (b) detail vývoje predikované a změřené centrální tloušťky ihned po zastavení pohybu s průběhem rychlosti v čase [31]

Důvodem pro přibližně stejné tloušťky filmů tvořené na konci první fáze zastavení pohybu je rovnováha mezi počáteční rychlostí a dobou do úplného zastavení pohybu vlivem setrvačnosti, tedy aplikovaná decelerace. Čas do konce první fáze je také ovlivněn vlastnostmi maziva, kdy viskozita způsobuje třecí síly a mazivo se v kontaktu chová jako tlumič. Ve výsledku je první fáze dána kombinací hydrodynamického jevu (vlivem pohybu kuličky do zastavení) a squeeze efektu. V návaznosti na toto, první fáze není pozorována při nízkých rychlostech, protože je zde účinek hydrodynamického jevu malý a v porovnání se squeeze efektem má v této fázi majoritní podíl na chování filmu. Zajímavé je, že poměr původní tloušťky a tloušťky na konci první fáze je téměř konstantní bez ohledu na viskozitu maziva. Mechanismem v druhé fázi je čistě squeeze efekt. Vliv původní viskozity má své místo na počátku této fáze, kde ovlivňuje rychlost uvěznění maziva okraji a řídí tak počáteční výtok maziva, tvar filmu a rozložení tlakového pole. Po uvěznění filmu rozhraním je původní viskozita již zanedbatelná – výtok je dán kombinací tlakového pole a tlakově-viskózního koeficientu.

## Závěr

Práce přinesla zásadní posun ve stavu poznání tranzientních jevů. To je dáno jednak použitím vysokorychlostní kamery a také díky detailnímu přístupu autorů k provádění měření i analýzy dat se zohledněním reologie maziv, která bývá i dnes často v experimentálních studiích přehlížena. Uplatnění výsledků je cíleno na valivá ložiska u krokových motorů, ale i obecně na EHD kontakty strojů s náhlým zastavením pohybu, ať už z havarijních či běžně provozních důvodů.

## 3.2.2 Pohyby typu Akcelrace-Decelerace

3.2.2

**SUGIMURA, J., W. R. JONES a H. A. SPIKES.** EHD Film Thickness in Non-Steady State Contacts. *Journal of Tribology*. 1998, vol. 120, issue 3, s. 442-452. DOI: 10.1115/1.2834569. [28]

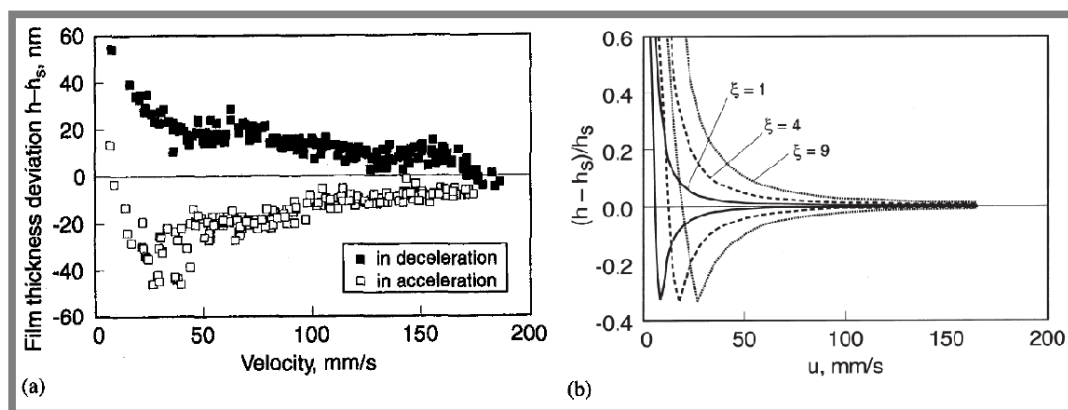
**SUGIMURA, J.** Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2002, vol. 47, issue 10, s. 752-757. ISSN: 0915-1168. [29]

**SUGIMURA, J., T. OKUMURA, Y. YAMAMOTO a H.A. SPIKES.** Simple equation for elastohydrodynamic film thickness under acceleration. *Tribology International*. 1999, vol. 32, issue 2, s. 117-123. DOI: 10.1016/s0301-679x(99)00022-5. [32]

Poslední ze série experimentů [28, 29] byly realizovány za podmínek rovnoměrného zrychlování a zpomalování jednosměrného pohybu disku s frekvencí změny rychlostních ramp 0,2, 1 a 2 Hz odpovídající zrychlením 0,08, 0,35 a 0,74 m/s<sup>2</sup>.

## Výsledky

Výsledky experimentů ukazují, že čím vyšší je hodnota zrychlení či zpomalení (frekvence změny ramp rychlosti), tím dochází k větším nárůstům (při zpomalení) nebo propadům (při zrychlení) v tloušťce filmu oproti stacionárním podmínkám při odpovídající aktuální rychlosti. Tyto rozdíly se zmenšují pro vyšší rychlosti valení a naopak zvětšují pro maziva tvořící pro danou rychlost tlustější film za stacionárních podmínek (ať už vlivem viskozity či tlakově-viskózního koeficientu  $\alpha$ ).



**Obr. 13** (a) Odchytky tloušťky filmu maziva PFPEZ při akceleraci-deceleraci pohybu oproti ustáleným podmínkám při frekvenci 2 Hz [28]; (b) model změny tloušťky filmu s rychlostí [32]

## Závěr

Tato poslední část publikací [28, 29] má z pohledu výsledků největší přínos, kdy poukazuje na podstatný vliv zrychlení. Práce je doplněna také jednoduchým empirickým vzorcem (1) [32] pro predikci centrální tloušťky filmu při akceleraci pohybu. Predikce vychází z kontinuity toku, kdy předpokládá, že tloušťka filmu je dána na vtoku do kontaktu a dále je unášena beze změny. Rovněž vzorec závisí na místě tvorby filmu vyjádřené parametrem  $\xi$  (viz Obr. 13b). Při správném zvolení

hodnoty  $\xi$  vzorec souhlasí s naměřenými daty. Nicméně pro přesnější a obecněji uplatnitelnou predikci tloušťky filmu je nutné provést parametricky rozsáhlejší experimentální studie.

$$h(u, a) = h_s(u)(1 - 0.67a\xi b/u^2) \quad (1)$$

|       |                                                                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $h_s$ | - tloušťka filmu při stacionárních podmínkách (nm)                                                  |
| $a$   | - zrychlení ( $\text{m/s}^2$ )                                                                      |
| $b$   | - poloměr Hertzova kontaktu (m)                                                                     |
| $u$   | - aktuální rychlost (m/s)                                                                           |
| $\xi$ | - konstanta mezi 4 a 9 reprezentující místo tvorby filmu v násobcích poloměrů Hertzova kontaktu (-) |

**GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES.** Elastohydrodynamic Film Collapse During Rapid Deceleration. Part I—Experimental Results. *Journal of Tribology*. 2001, vol. 123, issue 2, s. 254-. DOI: 10.1115/1.1308011. [33]

**GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES.** Elastohydrodynamic Film Collapse During Rapid Deceleration. Part II—Theoretical Analysis and Comparison of Theory and Experiment. *Journal of Tribology*. 2001, vol. 123, issue 2, s. 262-. DOI: 10.1115/1.1308012. [34]

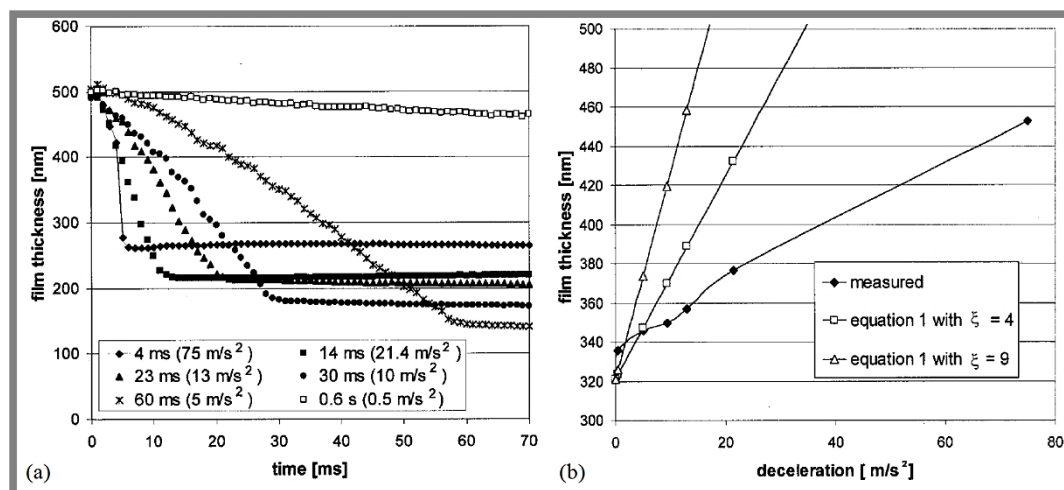
V návaznosti na zjištění v předchozí studii autorů při náhlém zatavení pohybu [31], má práce za cíl objasnit vývoj mazacího filmu při řízeném zastavení pohybu danou decelerací ( $0.5 \text{ m/s}^2$  až  $75 \text{ m/s}^2$ ) za podmínek čistého skluzu (pro  $50^\circ\text{C}$ ) i valení (pro  $70^\circ\text{C}$ ). Pozornost je věnována hlavně první fázi kolapsu filmu, která podmiňuje výchozí tloušťku pro druhou fázi danou čistě squeeze efektem.

## Výsledky

První fáze kolapsu filmu při deceleraci je spojena s náhlou redukcí tloušťky filmu bez změny jeho tvaru (tlakového pole), který odpovídá klasickému tvaru EHD filmu s podkovitou konstrikcí při ustálených podmínkách (Obr. 1). Ukazuje se, že první fáze končí, pokud rychlost vtahování maziva klesne pod hodnotu  $2 \text{ mm/s}$ , přičemž tloušťka filmu je větší než za ustálených podmínek. Rozdíly v chování pro čistý skluz a čisté valení nebyly pozorovány, i když redukce původní tloušťky je mírně vyšší pro skluz, což naznačuje ovlivnění viskozity generovaným teplem.

Výsledky jsou porovnány s teoretickým modelem (1) [32] pro tento typ pohybu, ale predikované chování je velmi odlišné (Obr. 14b). Proto na výše popsané chování filmu při zastavení pohybu vytvořili autoři semi-analytický model. Model je založený na Grubinovu přístupu. V modelu je aktuální tloušťka filmu dána sumou tloušťky při stacionárních podmínkách závislé na poloze a tloušťky od tranzientních jevů dle formule (2) závislé na čase  $t$ .

$$h_0(t) = h_s / \left[ \exp \left( -\frac{1}{6.522b} \int_0^t U dt \right) \left\{ \frac{h_s}{h_i} + \frac{U^{8/11}}{6.522b} \int_0^t \left[ U^{3/11} \exp \left( \frac{1}{6.522b} \int_0^t U dt \right) \right] dt \right\} \right] \quad (2)$$



Obr. 14 (a) Centrální tloušťka mazacího filmu při řízeném zastavení pohybu pro rozdílné hodnoty decelerace; (b) porovnání výsledků s predikcí [33]

## Závěr

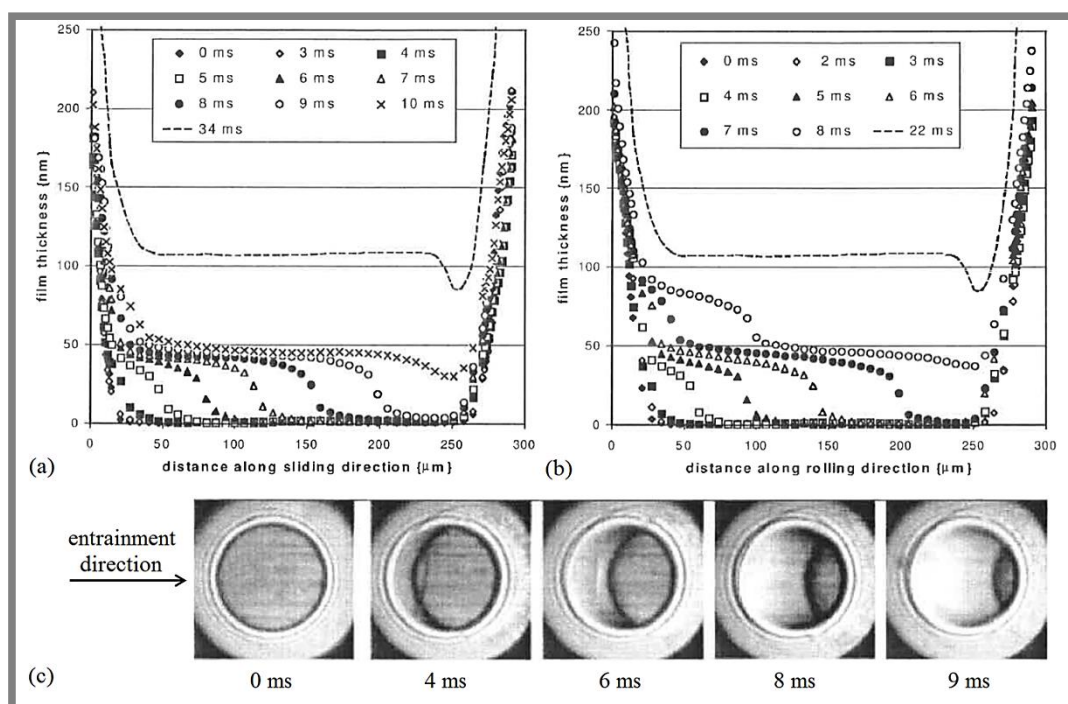
Dvoudílný článek poskytl nové experimentální výsledky spolu s empirickým modelem. V práci byl použit velký rozsah decelerace pohybu a byla nalezena hranice konce první fáze kolapsu filmu. Není ale zřejmé, zda zjištěná hranice rychlosti je platná pro všechny maziva, či pouze pro použité mazivo PAO. Pro odpověď na tuto otázku je nutné provést ještě další experimenty. Také přímé srovnání výsledků pro čistý skluz a čisté valení nebyl uskutečněn, protože testy proběhly za rozdílných teplot. Při rychlejší zastavení pohybu zůstává po první fázi v kontaktu zachyceno více maziva, jehož tloušťka je následně řízena jen squeeze efektem. Toto zjištění má praktickou aplikaci, protože při pohybech typu start-stop či recipročních pohybech zůstávají povrchy stále odděleny a může tak dojít k rychlejšímu obnovení plnohodnotného filmu. Z pohledu mazání je proto výhodnější snažit se o co největší dynamiku těchto pohybů, než ji redukovat. Při porovnání modelu s hodnotami z experimentů se dosahuje velmi dobré shody. Odchyłky nastávají zejména v posledních 15 % průběhů u zrychlení nad 10 m/s<sup>2</sup>.

**GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES.** Elastohydrodynamic film formation at the start-up of the motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001-1-1, vol. 215, issue 2, s. 125-138. DOI: 10.1243/1350650011541774. [35]

Dalším logickým krokem autorů bylo popsání tvorby EHD filmu při začátku pohybu opět za podmínek čistého skluzu a valení. Z klidové polohy do střední rychlosti povrchů 0.2 m/s byla pro lineární nárůst unášivé rychlosti maziva aplikována rozdílná zrychlení od 2.5 až do 50 m/s<sup>2</sup>. Při testech byl použit minerální olej HVI 650, PAO a polyphenyl ether 5P4E, který je zpravidla využíván při extrémních provozních podmínkách (vesmírné aplikace, vakuové pumpy, apod.). Motivací práce je opět mazání valivých ložisek krokových motorů ve vesmíru.

## Výsledky

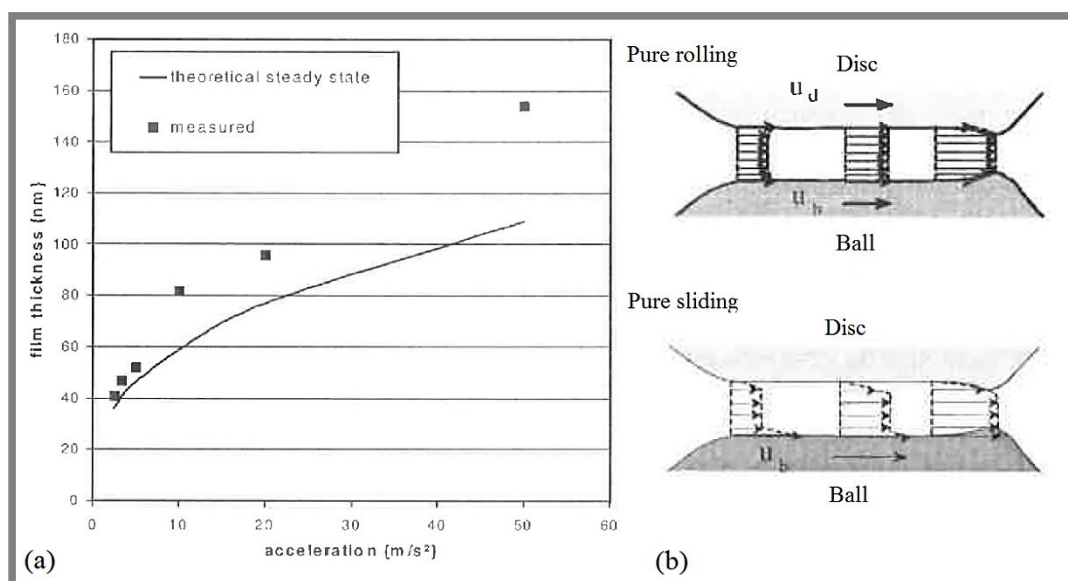
Tvorba mazacího filmu je výrazně ovlivněna velikostí zrychlení pohybu. Bylo pozorováno, že tvorba mazacího filmu probíhá postupně ve vlnách vtahovaného maziva. Nejdříve první vlna maziva bez výrazné změny tloušťky začíná procházet kontaktem a odděluje tak kontaktní tělesa. Přední okraj postupujícího maziva má kruhový tvar napříč kontaktem se středem na straně výstupu z kontaktu (viz Obr. 15c). Tvar tvořené tloušťky filmu se liší od predikovaného klínového tvaru běžnými modely a mění se v závislosti na akceleraci. Za nějaký čas, opět v závislosti na zrychlení pohybu, vniká do kontaktu druhá a postupně i další vlny maziva, které navyšují původní tloušťku filmu a postupně prochází kontaktem, takže vzniká stupňovitý profil filmu.



**Obr. 15** Tvorba mazacího filmu při začátku pohybu pro 80 °C a akceleraci (a) 5 a (b) 10 m/s<sup>2</sup>; interferogramy kontaktu pro 60 °C a akceleraci 5 m/s<sup>2</sup> [35]

Pro zrychlení nad 5 m/s<sup>2</sup> je tloušťka filmu vyšší než predikce pro ustálené podmínky, zatímco pro nižší hodnoty zrychlení je tloušťka srovnatelná. To je spojeno s tím, že vstupují další vlny maziva do kontaktu ještě předtím, než dojde k úplnému oddělení kontaktu první vlnou, kdy pro 20 m/s<sup>2</sup> již nelze jednotlivé stupňovité nárůsty tloušťky odlišit. Při zrychlení 50 m/s<sup>2</sup> dochází v počátku pohybu dokonce k oscilacím tloušťky filmu, kdy je prvně vytvořen tlustější film, než po následném ustálení pohybu. Odlišnosti jsou také nalezeny mezi čistým valením a čistým skluzem. Při valení první vrstva maziva prochází kontaktem do dosažení jeho poloviny nižší rychlostí, než je střední rychlost povrchů. Od poloviny kontaktu potom rychlostí vyšší. Kdežto při skluzu je rychlost šíření první vlny maziva v místě vstupu kontaktu shodná s unášivou rychlostí maziva, ale po zbytek kontaktu je vyšší. Zjištěné chování mazacího filmu bylo pro všechna použitá maziva velmi podobné,

i když vlivem rozdílné reologie se lišily tloušťky jednotlivých stádií tvorby filmu a esovitý tvar profilů byl pro maziva s nižší viskozitou více protáhlý.



Obr. 16 (a) Porovnání predikované a změřené tloušťky filmu v okamžiku separace povrchů; (b) rychlostní profily první vlny maziva při čistém valení a čistém skluzu [35]

## Závěr

Jedná se o jednu z nejprínosnějších publikací, co se tranzientních jevů týče, o čemž vypovídá i její citovanost. Převratným zjištěním je, že generovaný film na vstupu do kontaktu nemá čistě klínový tvar, jak se předpokládalo z Osbornova predikčního modelu [36], ale je dán jednotlivými vlnami maziva, které postupně tvoří schodovitý tvar až do ustálení podmínek. I když při kombinaci nízkého zrychlení a malé viskozity maziva se tento esovitý tvar protahuje a je velmi blízko tvaru klínu. Rozpor také vzniká s výsledky v Obr. 13 z [28, 29], ukazujícími, že se zvyšující akcelerací se tloušťka filmu naopak snižuje oproti hodnotám tloušťky pro ustálené podmínky. Zde ([28, 29]) ale byla použita malá rychlost snímání, kdy vyhodnocená tloušťka byla vlivem jevu časové prodlevy zkreslena. V článku je diskutován i rychlostní profil první vrstvy maziva, kdy je tok omezen nulovou tloušťkou na výstupu kontaktu. Z výsledků první vrstvy filmu je vidět, že rychlost maziva je pro přibližně 60 % jeho tloušťky obdobná. Za předpokladu, že rychlost maziva u povrchů kontaktních těles je stejná s rychlostí těchto povrchů (nedochází k jevu wall-slip), tak profily pro čisté valení a čistý skluz odpovídají dle teorií Obr. 16b. Autoři uvádí hypotézu, že tlakově-viskózní koeficient má při tranzientních podmínkách mnohem větší dopad na chování maziva než viskozita samotná. Vlivem nízkých rychlostí na počátku pohybu byla tvorba filmu zřetelná až po dosažení rychlosti přibližně 0.012 m/s. Předpokládá se ale, že i pro nižší rychlosti je mechanismus tvorby filmu obdobný. Naopak při velkých zrychleních nebyly vlivem snímací frekvence postupné vlny pozorovatelné. Důvodem rychlostí první vlny maziva a oscilací tloušťky při vysokých akceleracích může být dynamická odezva kontaktu k dosažení silové rovnováhy přes zpočátku rozdílné tloušťky filmu. Oscilace nastávají, když je čas pro dosažení konečné hodnoty rychlosti blízko času průchodu maziva kontaktem.

Obdobnou studii provedl již dříve Kaneta [37], ale pro výrazně nižší zrychlení a maziva tvořící podstatně tlustější film, takže tvar profilu maziva se jevil jako klínový. Zaměřoval se v ní spíše na vznik uvězněného maziva v kontaktu a na následný skluz na rozhraní mazivo-povrch (wall-slip), než na tvorbu samotného filmu po začátku pohybu.

## 3.2.3 Jednosměrné pohyby s harmonickým průběhem rychlosti

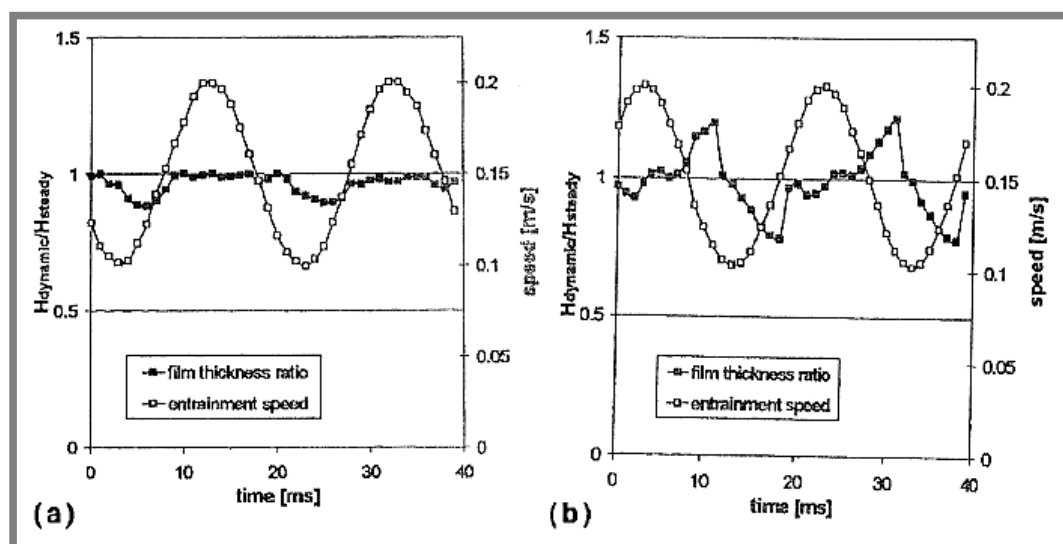
3.2.3

**GLOVNEA, R.P. a H.A. SPIKES.** The influence of lubricant properties on EHD film thickness in variable speed conditions. *Transient Processes in Tribology: Proceedings of the 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. 2004, vol. 43, s. 401-408. DOI: 10.1016/S0167-8922(03)80067-6. [38]

Stejná dvojice autorů dále publikovala článek, který se zaměřuje na chování dvou maziv se stejnou hodnotou viskozity  $0.15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , ale s odlišnou hodnotou tlakově-viskózního koeficientu (PAO  $\alpha = 21.3 \text{ GPa}^{-1}$ , 5P4E  $\alpha = 30.3 \text{ GPa}^{-1}$ ). Při experimentech byl použit safírový disk, pro dosažení kontaktního tlaku  $1 \text{ GPa}$ . Disk se otáčel stálou rychlostí, kdežto kulička byla řízena pro sinusový jednosměrný průběh rychlosti s frekvencí 5 (zrychlení  $1 \text{ m/s}^2$ ) a 50 Hz ( $10 \text{ m/s}^2$ ), takže se v průběhu pohybu měnila hodnota SRR od 0 do 1.

## Výsledky

Pro lepší posouzení vlivu tlakově-viskózního koeficientu za tranzientních podmínek rychlosti jsou výsledky zobrazeny jako poměr tloušťky filmu z experimentů a tloušťky predikované pro stacionární EHD za čistého valení. Tloušťka je odčítána ve středu kontaktu, takže je zde znatelný jev časové prodlevy potřebné pro průchod maziva od vtoku kontaktu do jeho středu. Zjistilo se, že průběh tloušťky maziva 5P4E v čase se již při nižší frekvenci lišil od predikovaných hodnot, zatímco tloušťka maziva PAO měla jen drobné odchylky. Tyto neshody se pro vyšší frekvenci pohybu výrazně prohloubily. U maziva 5P4E docházelo k velkým časovým prodlevám mezi chováním tloušťky filmu a průběhem rychlosti s výchyly pod i nad predikované hodnoty, kdežto u maziva PAO byly tloušťky filmu stejné nebo menší jako predikované hodnoty.



**Obr. 17** Poměr měřené a predikované centrální tloušťky mazacího filmu při frekvenci změny rychlosti pohybu 50 Hz pro mazivo (a) PAO a (b) 5P4E [38]

## Závěr

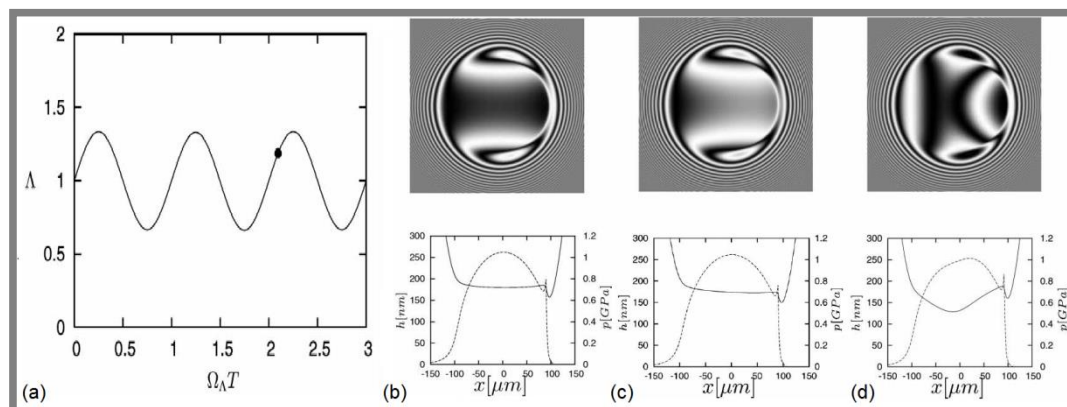
Práce ukazuje významný podíl tlakově-viskózního koeficientu na míře projevu tranzientních jevů. Pro frekvenci 50 Hz docházelo u maziva 5P4E k odchylkám tloušťky filmu od tloušťky za stacionárních podmínek v míře 22 %. Autoři diskutují, že vzniklé odchylky jsou dány třemi jevy: Prvním jevem je zkreslení časovou prodlevou, které způsobily odchylky přibližně 7 %. Dalším jevem je squeeze efekt, kdy sice nedocházelo k uvěznění maziva, ale při deceleraci vznikal zploštěný profil filmu a při akceleraci byl film skloněn směrem k výstupní oblasti. Posledním diskutovaným jevem je možný výskyt wall-slipu. Autoři článku tvrdí, že ovlivnění vlivem skluzu je pro hodnoty do SRR 1 možné považovat za zanedbatelné, s čímž autor pojednání nesouhlasí, protože mohlo docházet jednak k smykovému řidnutí maziv, tak i k jevu inlet shear heating (viz predikce [39]), popř. k celkovému či místnímu ovlivnění viskozity teplotou (bulk a flash temperature jevy, [40]).

**VENNER, C. H. a R. HAGMEIJER.** Film thickness variations in elasto-hydrodynamically lubricated circular contacts induced by oscillatory entrainment speed conditions. *PIME, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2008, vol. 222, issue 4, s. 533-547. DOI: 10.1243/13506501jet306. [41]

Na základě předchozích experimentálních zjištění [38] byl pro obdobné podmínky harmonického průběhu rychlosti vytvořen úplný numerický model planý v piezo-viskózním režimu kapalinového mazání a zjednodušený model vycházející čistě z tloušťky filmu na vstupu do kontaktu dle aktuální rychlosti (analogie řešení pro ustálené podmínky). Numerické řešení vychází ze základních časově závislých modelů EHD mazání založených na řešení bezrozměrné Reynoldsovy rovnice. Pro vyjádření viskozitně-tlakové závislosti byl použit Roleandsův empirický vztah, pro stlačitelnost maziva empirický vztah dle Dowsona a Higginsona.

## Výsledky

Tloušťka filmu v centrální oblasti závisela zejména na použité amplitudě a frekvenci změny rychlosti. Pro frekvenci 5 a 50 Hz byla vlnová délka změny tloušťky filmu skrz kontakt větší než velikost kontaktu a tak byl výsledný tvar filmu velmi obdobný



**Obr. 18** Predikované pseudo-interferogramy s profily tloušťky filmu a tlaku v okamžiku harmonické změny rychlosti dle (a) pro frekvence změny rychlosti (b) 5, (c) 50 a (d) 500 Hz [41]

ustáleným podmínkám. Při frekvenci 500 Hz se tvar od ustálených podmínek výrazně lišil a odpovídal propagaci vlnovitého profilu filmu. Přesto byly nižší hodnoty centrální tloušťky filmu v průběhu cyklu v okamžiku minimální rychlosti predikovány pro menší frekvence. Pro mazivo PAO se predikce ze zjednodušeného modelu shodují s chováním popsaným v [38], ale predikované chování maziva 5P4E jsou obdobné predikcím pro PAO a velmi se liší od experimentálních zjištění, protože tento model nezohledňuje rozdílné parametry maziva. Obdobné predikce nicméně poskytuje i použité plně numerické řešení.

### Závěr

Práce jasně ukazuje, že rozdíly mezi chováním maziv zjištěné experimentálně v [38] nemohou být vysvětleny konvenčními EHD modely. Tyto modely jsou dostatečné pro predikci filmů newtonských minerálních olejů, kde je chování dáno pouze hustotou a viskozitou v celém objemu maziva. Zde lze s výhodou uplatnit i časově méně náročné zjednodušené modely místo plně numerických řešení. Kdežto mazivo 5P4E vykazuje ne-newtonské visko-elastické chování, kde významnou roli bude hrát i časově proměnná stlačitelnost maziva. Pro vytvoření aplikovatelných predikcí tranzientních jevů s využitím pokročilých reologických modelů je potřeba více experimentálních výsledků s ne-newtonskými mazivy a při vyšších frekvencích pohybu.

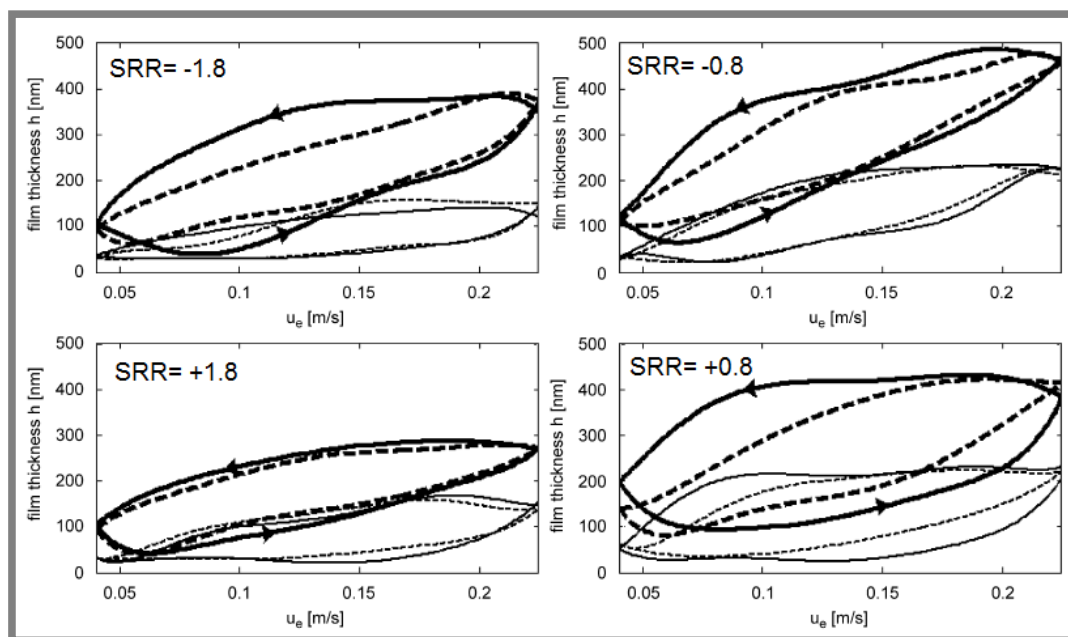
---

**CIULLI, E., K. STADLER a T. DRAEXL.** The influence of the slide-to-roll ratio on the friction coefficient and film thickness of EHD point contacts under steady state and transient conditions. *Tribology International*. 2009, vol. 42, issue 4, s. 526-534. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.04.005. [42]

Cílem článku bylo experimentální zjištění dopadů rozdílné míry skluzu SRR na tloušťku filmu a součinitel tření v bodovém EHD kontaktu. Testy byly provedeny s minerálním olejem SN 500 pro sinusový průběh rychlosti mezi hodnotami 0.04 a 0.225 m/s s frekvencí pohybu 0.25 (zrychlení 0.09 m/s<sup>2</sup>) a 1 Hz (0.37 m/s<sup>2</sup>) při hodnotách SRR ±0.8 a ±1.8 a Hertzovu tlaku 0.7 GPa.

### Výsledky

Průběhy sledovaných veličin měly tvar smyček (viz Obr. 19). Velikost smyček (odchylky tloušťek maziva a tření) se zvětšovala s rostoucí frekvencí pohybu a tloušťka filmu i součinitel tření byli lehce větší pro negativní hodnotu SRR (rychleji pohybující se disk než kulička) než pro pozitivní. Horní část křivky tvořilo mazivo o větší tloušťce při snižování rychlosti pohybu, kdežto ve spodní části byl tenčí film při zrychlování pohybu. Rozptyl hodnot (velikost smyček) je přibližně stejný pro kladné i záporné SRR o totožné hodnotě, avšak pro vyšší absolutní hodnoty SRR se rozptyl zmenšuje, přičemž pro ně klesá tloušťka filmu i tření. Tento efekt je výraznější pro vyšší frekvence pohybu.



**Obr. 19** Tloušťky filmů při harmonickém pohybu, kde tlusté čáry odpovídají centrální tloušťce filmu a tenké čáry minimální tloušťce při frekvenci 1 Hz (plná čára) a 0.25 Hz (přerušovaná čára) [42]

## Závěr

Přínosem práce je především diskuze termálních jevů. Práce poukazuje na obdobné chování filmu jako u recipročního pohybu s konstantním zrychlením [27], kde rovněž tvořily průběhy sledovaných veličin tvary smyček. S ohledem na zaměření pojednání je dána pozornost především chování mazacího filmu, než vývoji tření. Jako příčiny různých tlouštěk filmů jsou opět poznamenány jevy zkreslení vlivem časové prodlevy a squeeze efekt. Navíc je zde diskutováno několik termálních jevů. Dle výpočtů autorů pro vyšší hodnoty SRR mohl mít jev inlet shear heating (nárůst teploty vlivem skluzu ve vstupní oblasti) významný dopad na pokles viskozity a tím i tloušťky filmu. Stejný dopad mohl mít i bulk heating, tedy přívod tepla do kontaktní oblasti kontaktními tělesy, kdy zejména při kladné hodnotě SRR (rychlejší pohyb kuličky) je přes hřídel kuličky přiváděno teplo z jejího uložení. Největší význam je nicméně příkládám jevu teplotně-viskozitního klínu (temperature-viscosity wedge effect [43]). Podstatou tohoto jevu je rozdílná tepelná vodivost či rozdíl v rychlosti kontaktních povrchů, přičemž se uvažuje, že skluzem generované teplo vzniká uprostřed tloušťky filmu. U povrchu s nižší tepelnou vodivostí (sklo), popř. s nižší rychlostí dochází k akumulaci tepla, nárůstu teploty a snížení viskozity maziva, která je tak skrz tloušťku filmu rozdílná. Vlivem toku maziva pak vzniká tvar klínu, na jehož rozhraní proti sobě působí toky maziva o rozdílné viskozitě, což ovlivňuje tlakové pole. V důsledku rozložení tlaku vzniká asymetrie profilu filmu a obdobně jako při náhlém zatížení či zpomalení se v centrální oblasti tvoří tlustější vrstva maziva (dimple). Jev teplotně-viskozitního klínu navíc mohl ještě umocnit squeeze efekt, což by vysvětlovalo vyšší redukci tloušťky filmu pro kladnou hodnotu SRR. Tato tvrzení je ale nutné pro tranzientní pohyby dále experimentálně ověřit při vyšších rychlostech a s více kombinacemi materiálů kontaktních těles.

### 3.3 Vratné harmonické pohyby v příčném směru kontaktu

3.3

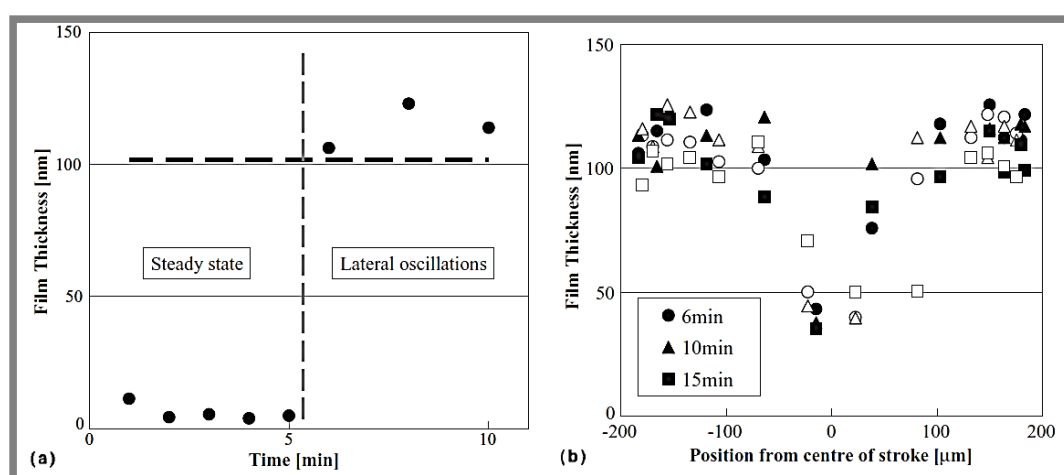
**NAGATA, Y., K. KALOGIANNIS a R. GLOVNEA.** Track Replenishment by Lateral Vibrations in Grease-Lubricated EHD Contacts. *Tribology Transactions*. 2012, vol. 55, issue 1, s. 91-98. DOI: 10.1080/10402004.2011.629404. [44]

**KALOGIANNIS, K.** *Behaviour of elastohydrodynamic films subjected to oscillatory motion*. Brighton, 2013. Doctoral thesis. University of Sussex. [45]

Publikace [44] vznikla jako jeden z výstupů následující disertační práce [45]. Cílem článku bylo analyzovat efektivnost mazání plastickým mazivem pro valivý pohyb rychlostí 0.5 m/s při působení příčných vibrací o frekvenci 10 Hz a zdvihu 355  $\mu\text{m}$  (max. zrychlení 0.7  $\text{m/s}^2$ ). Studován byl především vliv těchto vibrací na redukci hladovění kontaktu, respektive doplňování dráhy kontaktu plastickým mazivem. Se stejným záměrem byl navíc v disertační práci [45] posuzován vliv poměru velikosti zdvihu k velikosti kontaktu o hodnotách 0.185 a 1.3 a vyšších frekvencí pohybu 50 a 100 Hz. Pro dosažení vysokého tlaku 1.7 GPa při průměru kontaktu 230  $\mu\text{m}$  byla proti safírovému disku přitlačována kulička z karbidu wolframu. Na spodní část disku byla nanášena tenká vrstva plastického maziva a následovala záběhová fáze o délce 5 minut při ustálených podmínkách danou rychlostí valení.

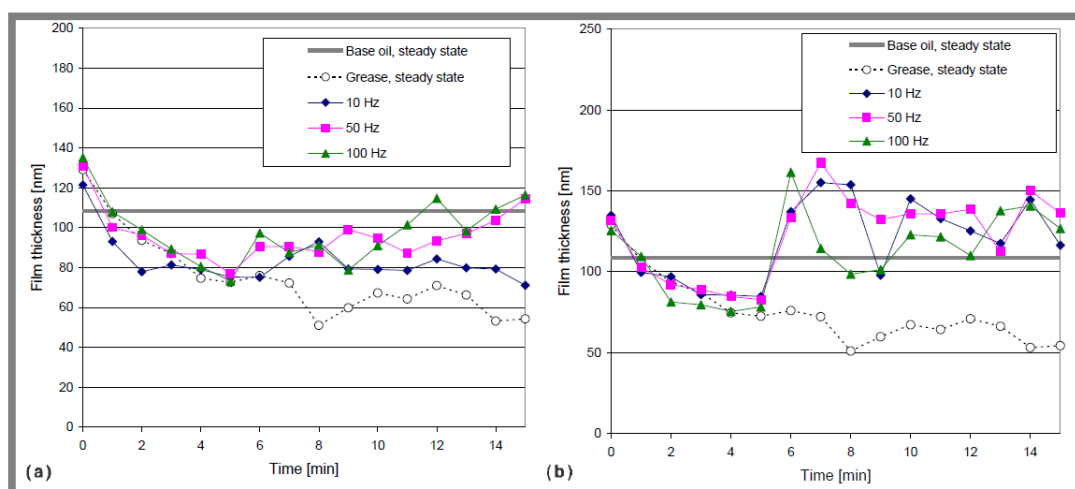
#### Výsledky

Během záběhu došlo k vytlačení maziva na strany dráhy kontaktu a k hladovění kontaktu. Ihned po spuštění příčných vibrací byl kontakt vlivem změny trajektorie zásobován původně vytlačeným mazivem a mazací film se doplnil na úroveň plně zaplaveného EHD kontaktu. V průběhu zdvihu byla tloušťka filmu nejnižší v místě původní dráhy kontaktu, kde byla v režimu hladovějícího kontaktu. K dalšímu snižování tloušťky (prohloubení efektu hladovění) ale nedošlo po zbylou dobu testu (15 minut).



**Obr. 20** Tloušťka mazacího filmu při skluzovém harmonickém pohybu v příčném směru: (a) vývoj v čase; (b) tloušťka během zdvihu [44]

Dále bylo pozorováno [45], že pro nízký poměr 0.185 velikosti zdvihu k velikosti kontaktu nedocházelo k plnohodnotné obnově tloušťky filmu (viz Obr. 21a, tloušťky odčítány ze střední polohy zdvihu), kde vývoj tloušťky filmu byl srovnatelný s testy za ustálených podmínek (hladovění) bez ohledu na frekvenci vibrací. Na druhou stranu, ale rovněž nedošlo k umocnění hladovění kontaktu, takže vibrace udržovaly stálou tloušťku maziva v kontaktu. Pro poměr zdvihu 1.3 docházelo opět k plnohodnotnému obnovení mazacího filmu. Avšak pokud byla podélná rychlost výrazně vyšší (5x) než rychlost skluzu, tak efekt vibrací byl zanedbatelný a kontakt začínal znovu stabilně hladovět obdobně jako za čistého valení, i když snižování tloušťky filmu v čase bylo pozvolnější.



**Obr. 21** Centrální tloušťka mazacího filmu při skluzovém harmonickém pohybu v příčném směru při valivé rychlosti 0.1 m/s a poměru velikosti zdvihu k velikosti kontaktu (a) 0.185; (b) 1.3 [45]

## Závěr

Výsledky prací ukazují, že příčné vibrace mohou být jedním z důležitých mechanismů pro znovu-doplňování kontaktů plastickým mazivem. Tento mechanismus hraje významnou pozitivní roli při mazání kontaktů ve strojích, zvláště ve valivých ložiscích. V článku sami autoři přiznávají, že byl použit celkem velký poměr zdvihu k velikosti kontaktu (1.54), kdežto u valivých ložisek je tento poměr menší než jedna. Vliv menšího poměru zdvihu byl pak studován v [45], kde se ukázalo, že poměr zdvihu je pro tento mechanismus podstatným parametrem. V práci byly použity jen dvě hodnoty poměru zdvihu a tak není zřejmá závislost mezi tímto parametrem a efektem znovu-doplnění kontaktu mazivem. Pro nalezení této závislosti je potřeba více studií v dané oblasti.

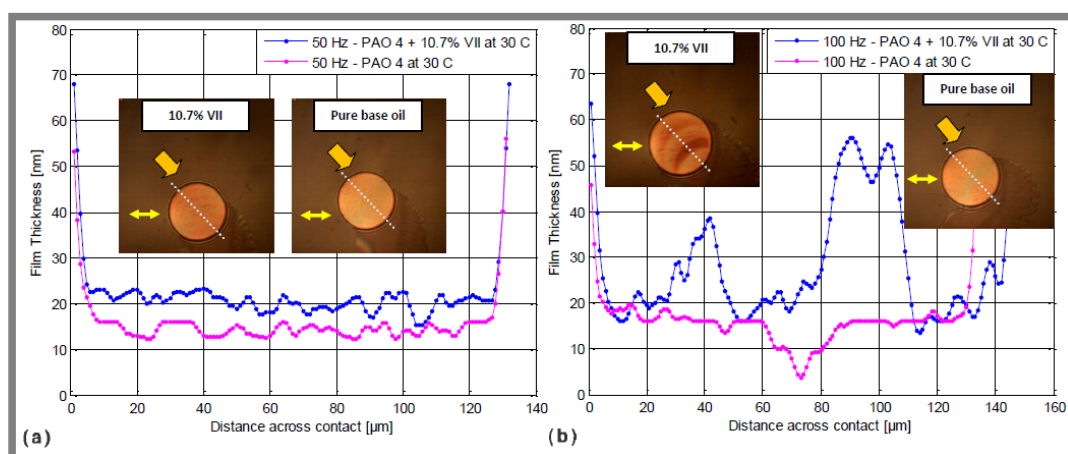
**KALOGIANNIS, K.** *Behaviour of elastohydrodynamic films subjected to oscillatory motion*. Brighton, 2013. Doctoral thesis. University of Sussex. [45]

Kalogiannis v rámci své disertační práce [45] pod vedením profesora Glovnea zjišťoval vliv harmonických vibrací v normálním (v tomto pojednání vynecháno) a příčném směru na tloušťku EHD mazacího filmu, kdy motivací byla odezva filmu na podmínky vyskytující se ve strojních prvcích. Za tímto účelem provedl sérii testů pro

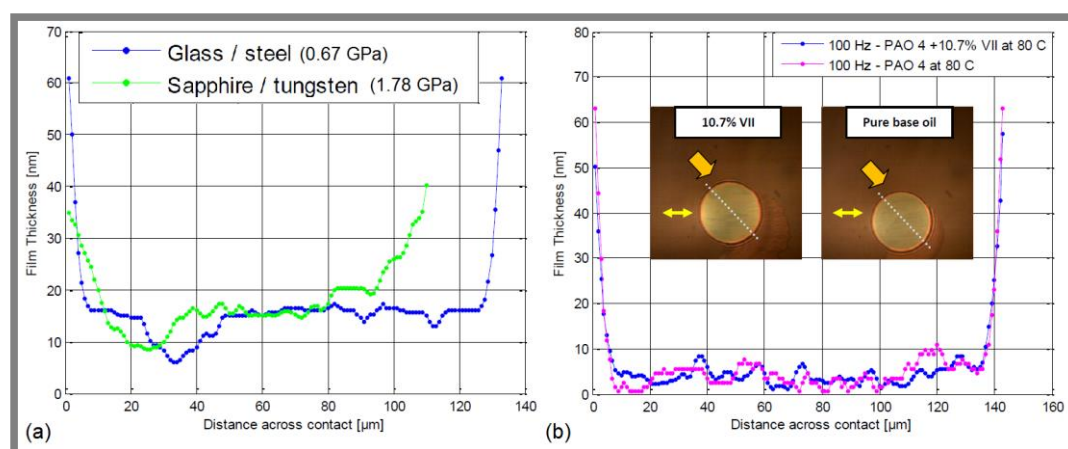
posouzení efektu kombinací rychlosti hlavního čistě valivého pohybu od 0.05 do 1 m/s, frekvence příčného smykového pohybu 10, 50 a 100 Hz, kontaktního tlaku 0.67 GPa (ocel-sklo) a 1.78 GPa (wolfram-safír), viskozity maziva PAO4 pro 30 °C (0.027 Pa·s) a 80 °C a nakonec i aditiv poly-alkylmethakrylátu pro zvýšení viskozitního indexu (VI) v koncentraci 10.7 %hm. Použitý zdvih příčného pohybu byl pro kombinaci materiálů ocel-sklo přibližně o velikosti kontaktní oblasti, kdežto pro wolfram-safír byl téměř třinásobkem velikosti kontaktu.

## Výsledky

Pro čisté PAO4 a rychlost valení 0.05 m/s se při frekvenci vibrací 100 Hz (maximální příčná rychlost 0.13 m/s byla více jak dvojnásobkem podélné rychlosti) tvořily na úvratích pohybu 3 až 13 nm výchylky tloušťky filmu podkovitého tvaru, které se šířily ve směru valivého pohybu. Rychlost průchodu fluktuací kontaktem odpovídala střední rychlosti povrchů. S nárůstem poměru rychlosti valení ke skluzové rychlosti od vibrací se velikost fluktuací snižovala. Rozdílná velikost tlaku neměla výrazný vliv na velikost fluktuací filmu (Obr. 23a).



Obr. 22 Profily filmů ve směru unášivé rychlosti při teplotě 30 °C, valivé rychlosti 0.05 m/s a frekvenci příčných vibrací (a) 50 a (b) 100 Hz [45]



Obr. 23 Profily filmů ve směru unášivé rychlosti při valivé rychlosti 0.05 m/s a frekvenci příčných vibrací 100 Hz při (a) rozdílném kontaktním tlaku a (b) teplotě 80 °C [45]

Přidáním aditiv VI do maziva se chování filmu výrazně změnilo. Při 100 Hz byly zřetelné velké fluktuace (30 až 50 nm), i když byla příčná rychlost téměř třetinová oproti rychlosti valení 0.3 m/s. Velikost fluktuací při nižších frekvencích pohybu byla pro mazivo s a bez přísad VI srovnatelná. Při testech za vyšší teploty 80 °C jsou hodnoty tloušťky filmu velmi nízké (pod 10 nm) bez ohledu na použití aditiv pro zvýšení VI. Také při takto tenkých filmech zde nejsou pozorovány žádné fluktuace ani pro nejvyšší použitou frekvenci 100 Hz.

### **Závěr**

Význam práce spočívá v jejím rozsahu a v zaměření na posouzení vlivu příčných vibrací na chování mazacího filmu, jelikož počet takto orientovaných studií je velmi omezený. Zjištěné lokální výkyvy filmu vznikaly v důsledku nižší unášivé rychlosti na úvratích pohybu a tím i tvorbou tenčího filmu maziva na vstupu do kontaktu unášeného dále skrz kontakt, kdežto při zvyšování příčné rychlosti v průběhu zdvihu se tvořil film tlustější. Ukázalo se, že když byla valivá rychlost výrazně větší než příčná rychlost od vibrací, tak vliv vibrací na unášivou rychlost byl zanedbatelný a odchylky v tloušťce filmu již nevznikaly. Přesný poměr rychlostí, kdy začíná docházet k fluktuaci filmu, ale není zjištěn a ukazuje se, že je závislý na chemickém složení maziva, kde po přidání aditiv se tato hranice změnila. Větší hodnota fluktuací pro aditivované mazivo je přisuzována nestabilitě viskozity maziva vlivem opakovaného smykového namáhání (shear thinning). Naopak absence fluktuací u tenkých filmů je vysvětlena omezením squeeze efektu. Bohužel v práci není diskutována rozlišitelnost a přesnost použité metody, kde zejména pro velmi tenké filmy mohou být výsledky zavádějící. Podobně i u nižších frekvencí vibračního pohybu není jasné, zda jsou zřetelné výchylky filmu (viz Obr. 22a) způsobeny nerovnostmi kontaktních povrchů, nebo vlivem vibrací, i když je tvrzeno, že se výchylky ve filmu za těchto frekvencí netvořily.

Experimentální pozorování podložil autor i teoretickou studií založenou na tloušťce filmu za ustálených podmínek s ohledem na čas průchodu maziva kontaktem a poměr rychlosti v podélném a příčném směru, kdy teoretické fluktuace filmu byly okolo 7 nm. V modelu ale nebyl zahrnut účinek squeeze efektu, jehož absencí autor vysvětluje rozdíl od změřených odchylek filmu (13 nm). Teoretické hodnoty se od naměřených liší výrazně pro vyšší rychlosti, kde je predikovaná tloušťka nižší než naměřená. Tento rozdíl autor práce objasňuje jevem inlet shear heating, jenže v tom případě by naměřená tloušťka byla nižší než predikovaná a ne obráceně. Také tvrzení, že rozdílný tlak neovlivňuje chování filmu nelze aplikovat obecně, ale je potřeba zahrnout do tohoto tvrzení alespoň hodnotu tlakově-viskózního koeficientu, jež není v práci vůbec uvažována. Rovněž je potřeba zohlednit elasticitu těles, kdy pro stejně velké fluktuace filmu pro obě materiálové konfigurace budou výsledné rozdíly v tlakovém poli pro konfiguraci wolfram-safir významnější než pro ocel-sklo. To může v praxi mít negativní dopad na kontaktní únavu materiálů. Je zřejmé, že tato oblast poznání je prozatím poměrně omezena a k plnohodnotnému objasnění tranzientních jevů jsou nezbytné další a parametricky rozsáhlejší experimentální studie.

## 4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

4

Z provedené rešerše publikovaných prací je patrné, že nestacionární podmínky mohou jak pozitivně, tak i negativně ovlivnit chování EHD mazacího filmu. V současné době ale neexistuje žádný univerzálně aplikovatelný teoretický model, který by toto chování popsal, a obecné modely pro stacionární podmínky v těchto případech často selhávají. Mnohé studie v této oblasti končí hypotézami, které je nutné prokázat či vyvrátit a také mnoho autorů se dožaduje většího množství experimentálních výsledků pro rozmanité provozní parametry. Tyto skutečnosti pouze potvrzují aktuálnost řešeného tématu.

Předchozí autoři ukázali, že kritickými parametry, které významně ovlivňují chování nestacionárních EHD kontaktů, jsou zrychlení [28, 29, 31, 33-35, 37] a frekvence pohybů [18, 20, 23, 24, 38, 42, 44, 45], poměr velikosti zdvihu a velikosti Hertzovy oblasti kontaktu [23, 45], poměr podélné a příčné rychlosti [45], velikost skluzu [18, 24, 35, 37, 42] a reologické vlastnosti maziv (zejména chemické složení a tlakově-viskózní koeficient) [23, 28, 31, 35, 38, 45].

Vlivem dynamických pohybů kontaktních těles dochází ke změně tloušťky filmu a k řadě jevů, které nebyly za ustálených podmínek pozorovány:

- Po náhlém zastavení, při velké hodnotě decelerace či při reverzaci pohybu na úvratí může dojít v závislosti na podmínkách k uvěznění maziva v centrální oblasti kontaktu [18, 20, 23, 24, 27-29, 31, 33, 34, 37, 38, 42, 45]. Výsledná tloušťka filmu je dána kombinací reologie maziva, smykového (vtahování maziva) a tlakového toku spolu s tokem od squeeze efektu (vytlačování maziva).
- Kombinace vysokých frekvencí a malých zdvihů u vratných pohybů vede na ovlivnění chování EHD filmu kavitačními bublinami [18-21, 28, 29], kdy hrozí protřžení mazacího filmu, zvláště v kombinaci s nerovnostmi [19]. Chování takto postižené oblasti kontaktu je velmi problematické predikovat [20, 21].
- Centrální tloušťka filmu je při akceleraci v okamžiku počátku pohybu vyšší než predikovaná hodnota pro ustálené podmínky při totožné rychlosti [35].
- Naopak pro déle trvající pohyb daným zrychlením je centrální tloušťka filmu nižší při akceleraci pohybu a vyšší při jeho deceleraci [27-29, 42]. Toto je pravděpodobně zapříčiněno kombinací squeeze efektu, Poiseuillova a Couettova toku a jevu časové prodlevy. Časová prodleva způsobuje, že odčítaná centrální tloušťka filmu neodpovídá tloušťce za ustálených podmínek, protože vznikla v okamžiku odlišné rychlosti na vstupu do kontaktu, než je při jejím odčítání v centrální oblasti.
- Plnohodnotná separace povrchů po celou dobu zdvihu vratného pohybu je zajištěna překročením kritické hodnoty poměru velikosti zdvihu a velikosti kontaktu [23]. Toto experimentální pozorování je prozatím potvrzeno jen pro specifické kontaktní podmínky. Hodnota tohoto poměru je rovněž podstatným faktorem při příčných vibracích pro znovu-doplňování kontaktu plastickým mazivem a tím pro redukci či úplné zamezení hladovění kontaktu [44, 45].

- Tvorba a kolaps mazacího filmu po startu či zastavení pohybu se skládají z několika odlišných fází [31, 33-35, 37]. Průběh těchto fází je určen především aplikovaným zrychlením a reologií maziva, které podmiňují toky maziva v kontaktu.

Spolu s těmito tranzientními jevy jsou tloušťka a chování filmu dále ovlivněny molekulárními (shear thinning [10], limiting shear stress [6]), termálními (inlet shear heating [39], bulk heating, flash temperature [40], temperature-viscosity wedge effect [43]) a specifickými (glassy state [4], wall-slip [7], plug flow [42]) jevy spojenými zejména s přítomností skluzu. Část těchto jevů je stále předmětem dohadů a hypotéz, kde se vědecká komunita dělí na tábory příklánějící se k určitému jevu či skupině jevů.

Naprostá většina autorů dosavadních prací použila pro studium nestacionárních jevů dynamické či vibrační pohyby pouze ve směru hlavního pohybu kontaktního tělesa. Téměř neprozkoumanou oblastí je ale studium příčných vibrací, kterou se zabývali pouze v [44, 45] a jen při čistě valivém pohybu v podélném směru kontaktu. Není zde objasněn účinek mnoha kritických parametrů, které měly markantní dopad na chování mazacího filmu v případě nestacionárních pohybů v podélném směru. Také nebylo vyhověno námětům ostatních autorů o vyšetření účinků zejména vysokých frekvencí (zrychlení) a malých zdvihů pohybů, popř. o použití širšího spektra ne-newtonských maziv. Tato oblast poznání nestacionárních dějů v EHD kontaktech je tak neprávem opomíjena, a to i přesto, že v reálných strojních uzlech vibrace nepůsobí jen ve směru hlavního pohybu prvku a příčný skluz či vibrace tak mohou mít významný vliv na jejich funkci.

## 5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

---

**5**

### 5.1 Vymezení cíle práce

---

5.1

Podstatou disertační práce je studium elastohydrodynamicky mazaných kontaktů za nestacionárních podmínek s využitím metody optické interferometrie. Cílem práce je experimentálně stanovit vliv parametrů nestacionárního příčného smykového pohybu na chování mazacího filmu v bodovém kontaktu. Provozní parametry zahrnují zrychlení a frekvenci pohybů, poměr velikosti zdvihu a velikosti kontaktu a poměr skluzové a valivé rychlosti.

Splnění cíle disertační práce je podmíněno dílčími cíli:

- Modifikace a doplnění měřicí aparatury nezbytné pro realizaci nestacionárních podmínek v příčném směru kontaktu.
- Provedení úvodních měření za účelem ověření přesnosti řízení provozních parametrů a určení jejich aplikovatelného rozsahu.
- Provedení systematické série experimentů při změně provozních parametrů s cílem stanovení jejich dopadu na tloušťku a chování mazacího filmu.
- Posouzení vlivu reologie maziva pro vybrané tranzientní podmínky s ohledem zejména na viskozitu, tlakově-viskózní koeficient a chemické složení maziva.
- Porovnání tloušťky a chování mazacího filmu za tranzientních a ustálených podmínek zjištěných při obdobných okamžitých hodnotách provozních parametrů.
- Vyhodnocení experimentů a vyvození závěrů, porovnání výsledků s dosud publikovanými studiemi a zobecnění získaných poznatků na reálnou situaci.

### 5.2 Vědecká otázka a pracovní hypotéza

---

5.2

Vědecká otázka a pracovní hypotézy vycházejí z analýzy poznatků, které byly získány na základě kritické rešerše.

**Vědecká otázka je dána následovně:**

*„Jaký je vliv jednotlivých parametrů nestacionárního příčného smykového pohybu na chování a tloušťku mazacího filmu elastohydrodynamického bodového kontaktu?“*

**Formulace pracovních hypotéz:**

*„Při nestacionárních podmínkách je chování mazacího filmu ovlivňováno pouze termálními jevy a toky maziva (Poiseuillův, Couettův, tok od squeeze efektu). Míra těchto efektů je závislá na zatížení, dynamice pohybů kontaktních ploch a reologických vlastnostech použitého maziva. Mazivo je unášeno kontaktem vektorem střední rychlosti povrchů nezávisle na vektoru skluzové rychlosti. Nestacionární smykové namáhání vede jen k redukci tloušťky mazacího filmu.“*

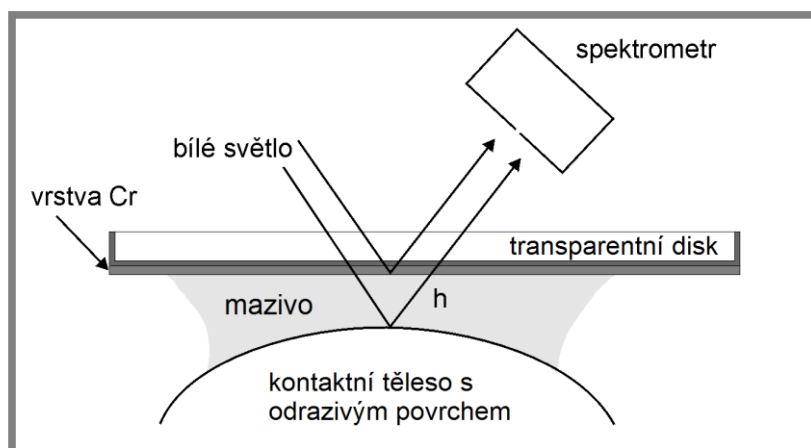
### 5.3 Způsob řešení a použité metody

Vědecká část práce se skládá ze sběru dat, analýzy výsledků a jejich kritického posouzení vzhledem k dané pracovní hypotéze, přičemž je hledána odpověď na vědeckou otázku. Při řešení práce jsou použity empirické metody a Kolbův experimentální cyklus. Sběr potřebných dat se provádí experimenty s empirickou metodou zkoumání. Aplikuje se zde deskriptivní přístup, tedy skutečný popis dějů experimentu na základě živého obrazu reality. Pro analýzu, interpretaci a vyhodnocení poznatků se uplatňuje kombinace indukce a dedukce (tzv. Kolbův experimentální cyklus). Indukcí, vycházející ze současného stavu poznání, je stanovena obecná pracovní hypotéza. Dedukcí je potom tato hypotéza testována. Podle výsledku dedukce se cyklus opakuje s nově formulovanou hypotézou nebo je ukončen.

Rizikem při řešení práce může být problematické ověření dané hypotézy vzhledem k parametrickým omezením měřicí aparatury a použité měřicí metody. V případě potvrzení tohoto rizika při úvodních experimentech je nutné přeformulovat pracovní hypotézu.

#### Měřicí metoda

Pro studium chování a tloušťky mazacího filmu je v práci použita metoda kolorimetrické interferometrie tenkých filmů (*Thin Film Colorimetric Interferometry*, zkráceně TFCI [46, 47]). Tato měřicí metoda byla vyvinuta na pracovišti autora pojednání a umožňuje stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu mezi kontaktními tělesy pro každý bod (pixel) snímku kontaktu. Jedná se o kombinaci optické interferometrie a následného softwarového zpracování obrazu.



Obr. 24 Princip optické interferometrie (upraveno z [48])

Princip optické interferometrie je zobrazen na Obr. 24 a je dále popsán s ohledem na použitou měřicí aparaturu. Stabilizovaný svazek bílého světla je optikou osvětlovacího systému Köhlerova typu a polopropustným zrcadlem promítán do obrazové roviny objektivu mikroskopu a na transparentní disk aparatury, který plní funkci děliče svazku světla. Část světla se odráží na rozhraní spodní strany disku a další část prochází mazacím filmem a je odražena od deformovaného povrchu

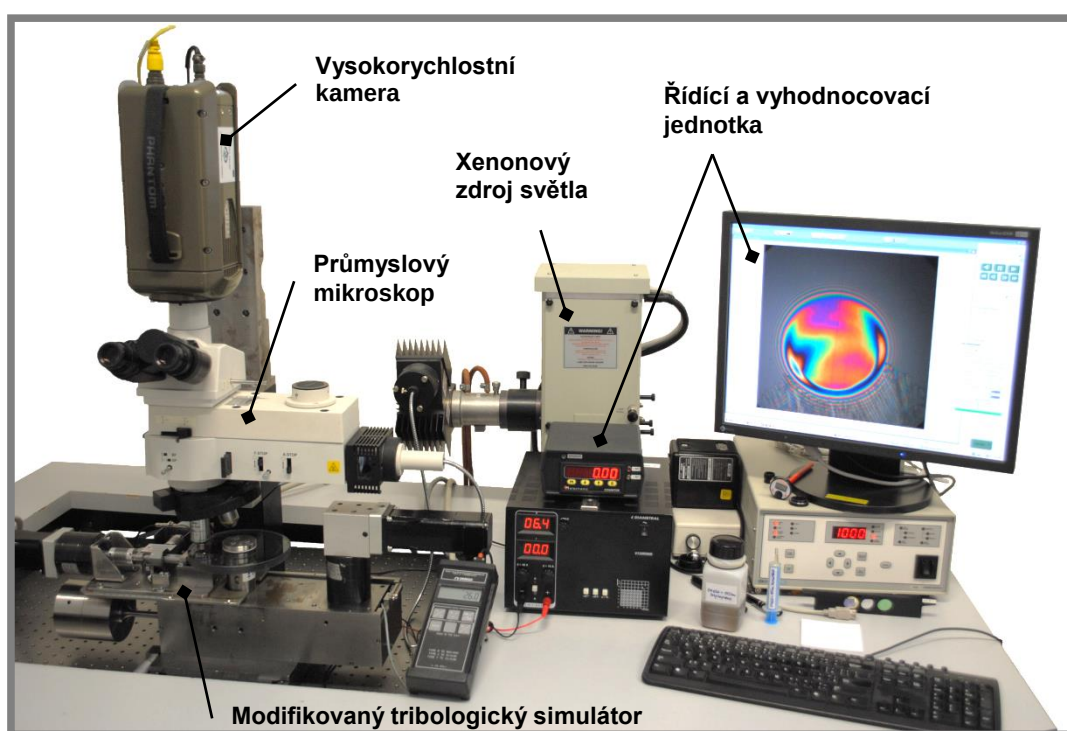
kontaktního tělesa. Při překrytí takto vzniklých paprsků dochází k jejich koherentní superpozici (tzv. interferují). Rozdíl v délkách optických drah, které různé části svazku urazily, ovlivňují fázový rozdíl, se kterým dochází k jejich opětovnému skládání. Důsledkem je vznik interferenčních proužků lokalizovaných v pozorované oblasti, které nesou informaci o tloušťce a tvaru mazacího filmu.

Aby bylo možné přiřadit jednotlivým barvám snímku tloušťku filmu, je nutné provést kalibraci měřicího softwaru AChILES [49]. Ta spočívá v propojení údajů nesených v monochromatickém snímku statického Hertzova kontaktu (tloušťky) s chromatickým snímkem téhož kontaktu (barvy). Přitom je uvažován index lomu použitého maziva a vlnová délka světla pro vytvoření monochromatického snímku. Výsledkem je referenční tabulka (etalon), která je numericky porovnávána s interferenčními snímky. Rozsah etalonu (tj. pracovní rozsah metody) je omezen na blízké okolí koherenční délky zdroje světla. V případě interference v bílém světle je rozsah TFCI od 1 do 800 nm. Mimo tyto hodnoty již výrazně klesá interferenční kontrast a rozlišovací schopnost TFCI. Pro zlepšení kontrastu interferenčních obrazců je horní strana disku (blíže k mikroskopu) pokryta antireflexní vrstvou a na spodní stranu disku (v místě kontaktu) je napařena polopropustná vrstva chromu. U mazacích filmů pod hranicí 100 nm se spolu s tloušťkou již výrazně nemění barva, ale tloušťka filmu je dána etalonem na základě intenzitní složky obrazu. Rozlišitelnost TFCI metody je 1 nm.

## 6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

### 6.1 Modifikace měřicí aparatury a úvodní měření

Původní měřicí aparatura (obecně označována jako optický tribometr) byla sestavena v tribologické laboratoři Ústavu konstruování během 90. let 20. století a byla od té doby již několikrát upravována. Současná aparatura se skládá z mikroskopového zobrazovacího systému, tribologického simulátoru a řídicí a vyhodnocovací jednotky (tj. osobní počítač a elektronika s moduly pro napájení a komunikaci jednotlivých zařízení aparatury). Zobrazovací systém je tvořen průmyslovým mikroskopem Nikon Optiphot 150, xenonovým zdrojem bílého světla o výkonu 1 kW a vysokorychlostní CMOS kamerou Phantom v710.

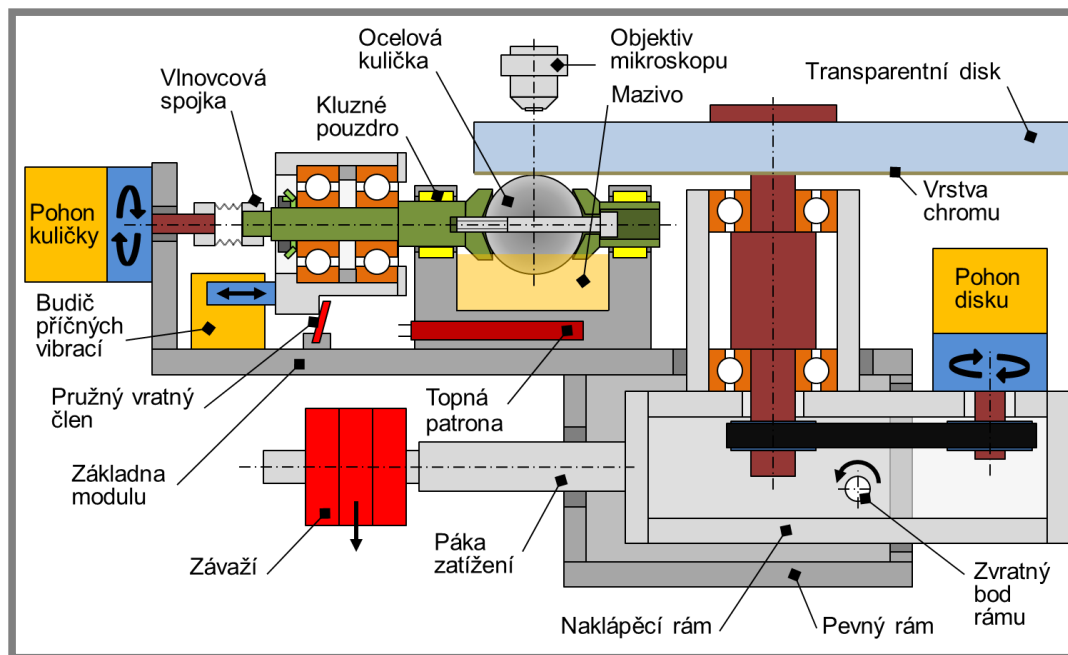


Obr. 25 Modifikovaná měřicí aparatura s nastavbou pro simulaci příčných vibrací

Tribologický simulátor vychází z koncepce dle Gohara [50] a realizuje kontakt v konfiguraci Ball-on-disk mezi otáčejícím se transparentním diskem a rotující ocelovou kuličkou o průměru 25.4 mm. Kontakt je zatěžován přes disk, který je spolu se závažím nesen v naklápěcím rámu (viz Obr. 26). Maximální zatížení kontaktu je přibližně 150 N, což odpovídá Hertzovu tlaku 0.89 GPa pro kombinaci materiálů ocel-sklo a 1.55 GPa pro ocel-safír. Nezávislé pohony kuličky a disku jsou řízeny zpětnovazebně pomocí měničů, které jsou ovládány softwarově z PC. To umožňuje nastavení různých poměrů skluzu a valení v podélném směru kontaktu. Rychlost třecích povrchů v tomto směru může dosahovat až 4 m/s v závislosti na zvolených převodovkách servomotorů.

Tribologický simulátor je vybaven novým modulem pro vyvození čistě skluzového vratného pohybu kuličky v příčném směru kontaktu. K buzení příčného

harmonického pohybu se zdvihem do 1 mm a frekvencí pohybu až 300 Hz je použit vysokootáčkový stejnosměrný motor v kombinaci s vačkovým mechanismem. Změna zdvihu je umožněna jednoduchou výměnou excentrické části hřídele. Motor je řízen změnou napětí pomocí laboratorního zdroje a aktuální frekvence otáčení hřídele motoru je odčítána z otáčkoměru. Odchylka nastavené a skutečné frekvence příčného pohybu je  $\pm 1$  %. Tyto údaje byly ověřeny při úvodních experimentech.



Obr. 26 Schéma modifikovaného tribologického simulátoru

### 6.1.1 Limity měřicí aparatury a její další vývoj

6.1.1

U nově modifikovaného zařízení bylo během úvodních měření zjištěno několik více či méně závažných problémů či omezení, které se vyskytují téměř vždy v prvotních verzích řešení konstrukce. Původní snahou bylo využít pro buzení vibrací spolu se stávajícím pohonem i piezoelektrického aktuátoru. Ten by umožnil aplikovat velmi malé zdvihy a i jiné než harmonické průběhy rychlosti pohybu. Při úvodních měřeních se ale tento způsob buzení příčných vibrací neosvědčil, protože bylo dosahováno jen nízkých frekvencí pohybu z důvodu nedostatečného výkonu aktuátoru, respektive vysoké setrvačnosti pohybujících se hmot a ztrát v důsledku nízké tuhosti systému. Z tohoto důvodu bylo od tohoto řešení odstoupeno.

Dále vlivem uložení hřídelů kuličky v kluzných pouzdrech a jejich výrobních nepřesnostech, kdy je kulička svírána mezi vnitřními kuželi na hřídelích, dochází k obvodovému házení kuličky. Toto házení způsobuje pohyb pozorovaného kontaktu v ose podélného pohybu a může ovlivňovat zatížení kontaktu. Řešením je letmé uložení hřídele do samostatné jednotky s lineárním valivým ložiskem s nastavitelnou vůlí, kdy na místa původních kluzných pouzder budou umístěna těsnění.

Aparatura je také omezena dolní hranicí zatížení a velikosti zdvihu. Při nízkém zatížení v kombinaci s vysokou frekvencí příčného pohybu dochází k fluktuaci velikosti kontaktu (zatížení), kdy zatěžovací mechanismus nemá dostatečně rychlou odezvu na působící vibrace. Tento jev nelze jednoduše odstranit, a proto bude v práci

používáno zatížení větší než 60 N. Toto omezení nicméně neohrožuje splnění cíle disertační práce. Obdobného charakteru je limitace minima zdvihu příčného pohybu, který je dán výrobními a montážními nepřesnostmi součástí modulu.

Bylo také pozorováno, že dochází k odchylkám od ideálního harmonického průběhu a k mírné asymetrii vratného pohybu, kdy pohyb zapříčiněný excentrem se liší od pohybu daného vratným členem. To může být způsobeno buď odskokem kontaktu excentru, nebo kolísáním otáček motoru, kdy motor musí v jednom směru pohybu překonávat sílu od vratného členu a v druhém směru mu tato akumulovaná síla pomáhá k návratu do výchozí pozice. Rovněž je průběh ovlivněn výrobními a montážními nepřesnostmi. Proto bude modul ještě doplněn kapacitním senzorem polohy, pomocí kterého budou analyzovány odchylky skutečného průběhu pohybu v příčném směru kontaktu od teoretického.

Pro možnost použití maziv o velmi nízké viskozitě musí být aparatura doplněna okapovou vanou obklopující ze stran a zdola transparentní disk, v opačném případě dochází k znečištění prostoru tribometru odstříkem maziva z disku při jeho vyšších otáčkách. Současně je tento problém řešen stíráním maziva z disku za výstupní oblastí kontaktu, což je dostatečné řešení pro běžně viskózní maziva, ale při aplikaci maziv s velmi nízkou viskozitou dochází v důsledku stírání maziva k hladovění kontaktu, kdy brodicí kulička není schopná zajistit dostatečný přísun maziva.

## 6.2 Teoretická analýza kontaktních podmínek a model distribuce maziva

Aby bylo možné porovnávat tloušťku filmu pro ustálené a tranzientní podmínky získané při obdobných okamžitých hodnotách provozních parametrů, je nejdříve nutné analyzovat časové průběhy těchto parametrů. V analýze se předpokládá použití shodného zatížení, materiálů těles i maziva a je tedy zaměřena výhradně na vyšetření účinků změn rychlosti povrchu kuličky  $u_b$  a disku  $u_d$  v místě kontaktu. Z Obr. 27a je zřejmé, že celková rychlost povrchu kuličky  $u_b$  je při příčných vibracích přímo ovlivněna rychlostí příčného skluzového pohybu  $u_{by}$ . Nepřímo je příčným pohybem kuličky ovlivněna i rychlost povrchu disku  $u_d$ , kdy i přes konstantní otáčky disku se mění poloměr dráhy kontaktu kuličky na disku a tím obvodová rychlost v místě kontaktu disku. Pro ustálené podmínky ( $u_{by} = 0$ ) jsou charakteristickými provozními parametry unášivá rychlost  $u_e = (u_d + u_b)/2$ , skluzová rychlost  $u_s = (u_d - u_b)$  a jejich poměr  $\Sigma = 2(u_d - u_b)/(u_d + u_b)$ . Při tranzientních podmínkách se hodnota i směr těchto vektorů rychlostí mění v čase. Jejich okamžitá hodnota je pro odlišení označena apostrofem ( $u_e', u_s', \Sigma'$ ), přičemž jejich směr je dán úhly  $\delta$  a  $\varepsilon$ , viz rovnice (3) až (6). Hodnota poměru  $\Sigma$  je kladná, pokud je rychlost povrchu disku větší než rychlost kuličky (zvolená orientace skluzové rychlosti působí ve stejném směru jako rychlost unášivá),  $\Sigma = 0$  odpovídá čistému valení a  $\Sigma = 2$  čistému skluzu. Okamžitá hodnota poměru  $\Sigma'$ , kde je skluzová rychlost  $u_s'$  promítnuta do směru unášivé rychlosti  $u_e'$ , je dána vztahem (7).

$$u_e' = \left| \frac{u_{by}}{2} \right| \sqrt{1 + \left( \frac{2u_e}{u_{by}} \right)^2}, u_{by} = 0 \Rightarrow u_e' = u_e \quad (3)$$

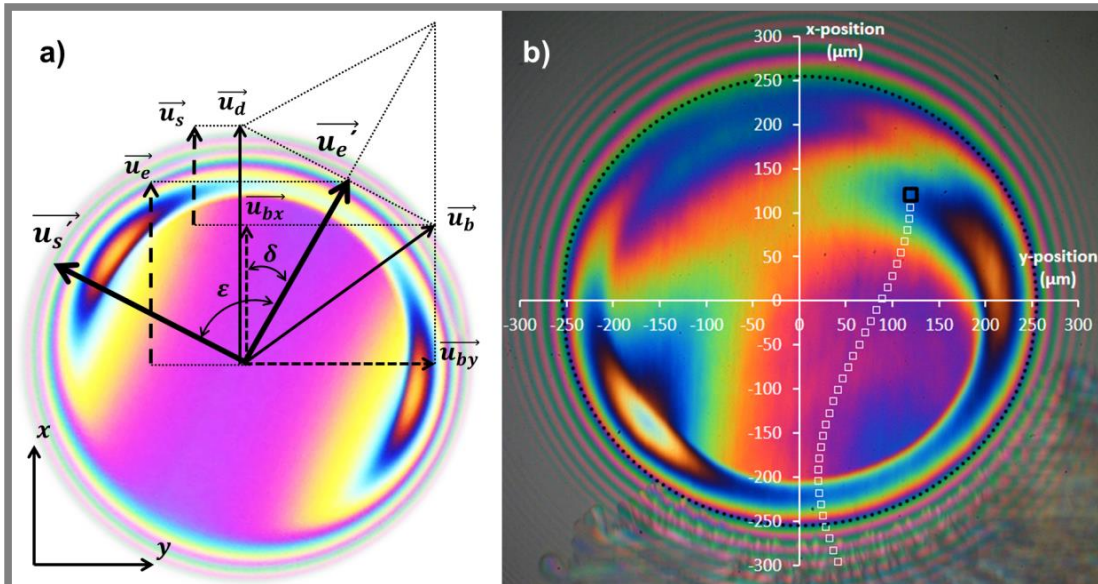
$$u_s' = |u_{by}| \sqrt{1 + \left(\frac{u_s}{u_{by}}\right)^2}, u_{by} = 0 \Rightarrow u_s' = u_s \quad (4)$$

$$\delta = \left| \tan^{-1} \left( \frac{u_{by}}{2u_e} \right) \right|, u_e = 0 \Rightarrow \delta = 0 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 90 + \delta - \tan^{-1} \left( \frac{u_s}{|u_{by}|} \right), u_{by} = 0 \Rightarrow \varepsilon = 0 \quad (6)$$

$$\Sigma' = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2u_e}{u_{by}}\right)^2} \sec \left( \left| \tan^{-1} \left( \frac{u_{by}}{2u_e} \right) \right| - \tan^{-1} \left( \frac{u_s}{|u_{by}|} \right) + 90 \right) / \sqrt{1 + \left(\frac{u_s}{u_{by}}\right)^2} \quad (7)$$

Na základě analýzy kontaktních podmínek je vytvořen jednoduchý model průchodu maziva kontaktem. V modelu se předpokládá dle pracovní hypotézy, že mazivo je unášeno kontaktem vektorem střední rychlosti povrchů bez ohledu na vektor skluzové rychlosti. Do modelu kromě kontaktních podmínek vstupuje nastavení počáteční polohy sledovaného maziva a snímkovácí rychlost kamery, která udává počet zaznamenaných snímků (poloh) v rámci jednoho zdvihu příčného pohybu a v rámci průchodu maziva kontaktem. Díky tomuto je umožněno zvolit vhodné nastavení kamery pro zachycení tranzientních jevů. Analýza, a tím i model, vychází z teoretického harmonického průběhu příčného pohybu, který se ale od skutečného průběhu může lišit (viz 6.1.1).

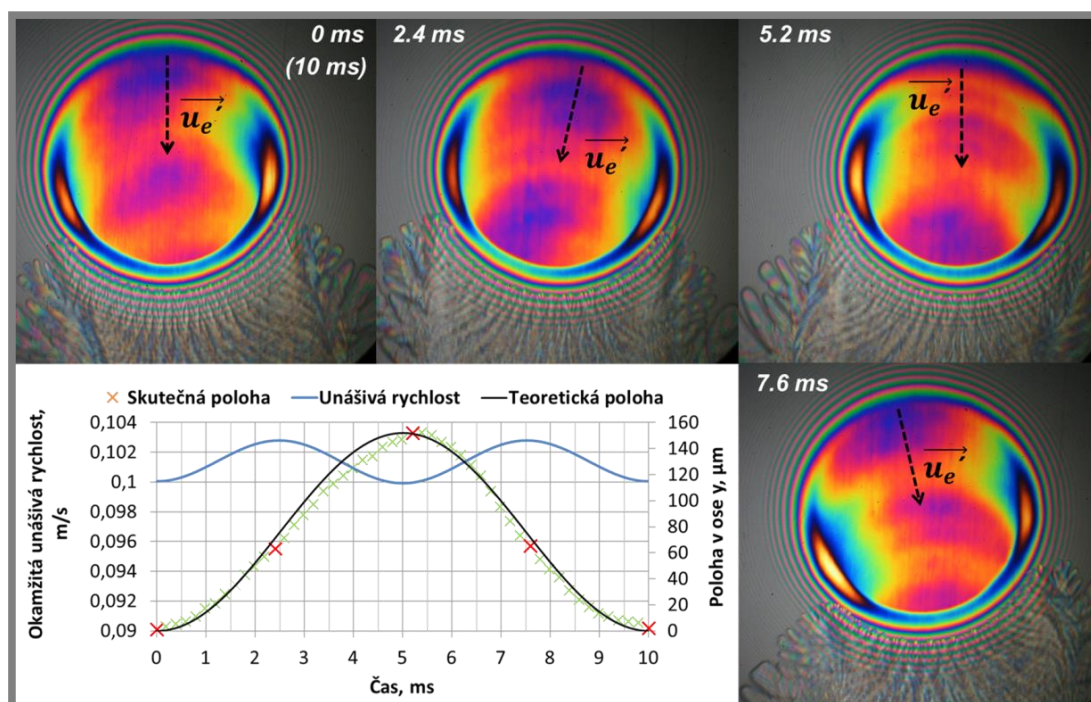


**Obr. 27** (a) Vektory charakteristických rychlostí tranzientního EHD bodového kontaktu; (b) model pohybu maziva v kontaktu

### 6.3 Předběžné výsledky

S ohledem na zjištěné nedostatky měřicího zařízení, je potřebné následující výsledky brát s jistou rezervou, z tohoto důvodu jsou označovány za předběžné. Experimenty měli za cíl ověřit hypotézu o unášení maziva vektorem střední rychlosti povrchů a udělat prvotní popis chování EHD filmu za vysokých frekvencí příčného skluzu.

Při experimentech byl kontakt skleněného disku a ocelové kuličky zatěžován silou 85 N, čemuž odpovídá Hertzův tlak 0.715 GPa a průměr kontaktu 477  $\mu\text{m}$ . Měření proběhla při teplotě 30 °C. Jako mazivo byla použita směs minerálního oleje SN 650 (viskozita 0.242 Pa·s,  $\alpha = 25 \text{ GPa}^{-1}$ ) s 15 %hm polyisoprenu (syntetický kaučuk), který se používá jako zahušťovadlo moderních maziv. Pohyb v podélném směru kontaktu byl pro ustálené podmínky čistě valivý s unášivou rychlostí 0.1 m/s. Příčný pohyb byl buzen s frekvencí 100 Hz při zdvihu 150  $\mu\text{m}$  (maximální zrychlení v příčném směru 30  $\text{m/s}^2$ ) a s frekvencí 300 Hz se zdvihem 200  $\mu\text{m}$  (příčné zrychlení 357  $\text{m/s}^2$ ). Poměry velikosti zdvihu a velikosti kontaktu jsou 0.31, respektive 0.42. Okamžitá hodnota poměru skluzu a valení se pro frekvenci 100 Hz pohybovala v rozmezí  $-0.11 < \Sigma' < 0$ , pro 300 Hz  $-0.95 < \Sigma' < 0$ .

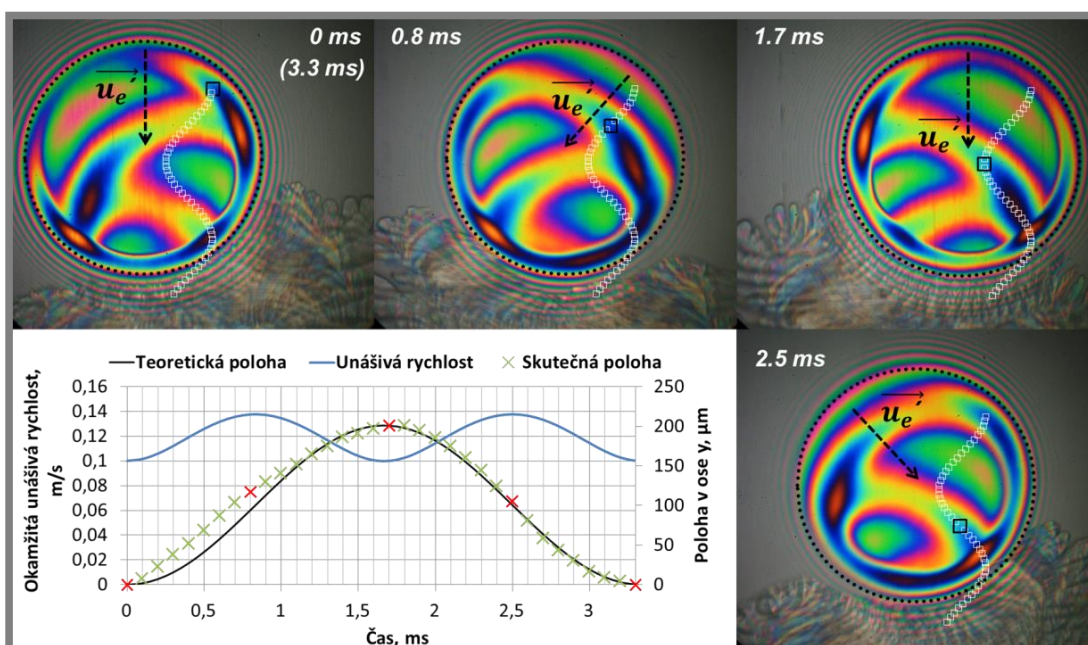


**Obr. 28** Chování EHD filmu pro unášivou rychlost  $u_e = 0.1 \text{ m/s}$ , SRR  $\Sigma = 0$ , frekvenci příčného pohybu 100 Hz se zdvihem 150  $\mu\text{m}$

Na obrázku Obr. 28 a Obr. 29 je pro jednotlivé frekvence znázorněno chování EHD filmu v průběhu jednoho cyklu vratného pohybu. Interferenční snímky odpovídají místům úvratí a maximům okamžité unášivé rychlosti  $u_e'$ . Její průběh v čase je zakreslen v příslušných grafech a okamžitý směr působení vyznačen ve snímcích kontaktu. V grafech je rovněž porovnávána teoretická zdvihová charakteristika excentru, ze které vychází model distribuce maziva, a skutečné polohy kontaktu v čase získané porovnáním interferenčních snímků. Je zde zřejmá asymetrie, kdy první přibližně polovina průběhu křivky je dána vratným členem mechanismu

a zbylá část excentrem. Průběh části zdvihu od excentru je mnohem blíže teoretickému průběhu, než je tomu u průběhu od vratného členu.

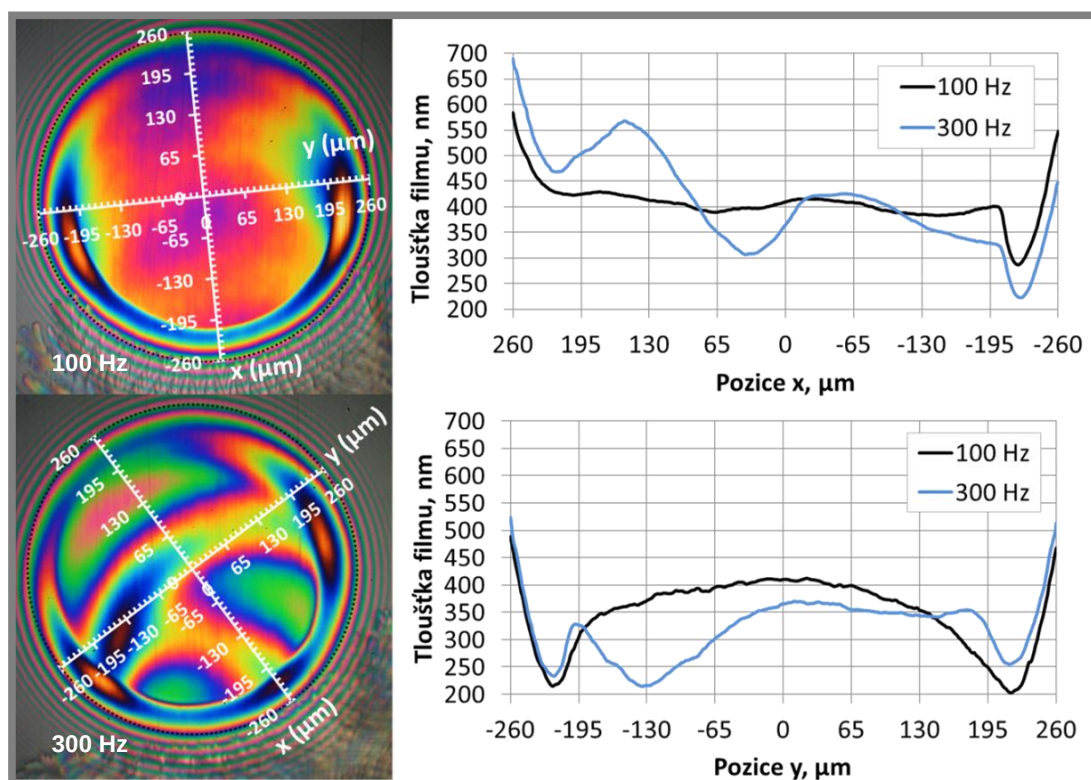
Model distribuce maziva je aplikován pro vyšší frekvenci pohybu. V interferogramech je zakreslena predikce pohybu místa počátku podkovité konstrikce EHD filmu. V prvním snímku je zvolen výchozí bod a v následujících snímcích je zvýrazněna predikovaná poloha původního bodu dle odpovídajícího časového posunu pořízení snímku. Z Obr. 29 je zřejmá dobrá shoda modelu s pozorovaným chováním filmu a to i přes mírně odlišný průběh teoretického a skutečného zdvihu. Za povšimnutí také stojí, že v čase 2.5 ms se ve výchozí poloze trasování maziva opět tvoří nový počátek podkovité konstrikce a celý cyklus distribuce maziva se tak při dalším zdvihu opakuje. Pracovní hypotézu pohybu maziva řízeného pouze vektorem unášivé rychlosti tak lze pro tyto kontaktní podmínky a použité mazivo považovat za platnou.



**Obr. 29** Chování EHD filmu pro unášivou rychlost  $u_e = 0.1 \text{ m/s}$ ,  $\text{SRR } \Sigma = 0$ , frekvenci příčného pohybu 300 Hz se zdvihem  $200 \text{ } \mu\text{m}$

Na Obr. 30 jsou znázorněny profily filmů v podélné a příčné rovině kontaktu, dle jeho symetrie (nikoliv ve směru  $u_e$ ) pro dané frekvence. Interferenční snímky odpovídají levé úvrati vratného pohybu (0 ms). Pro odpovídající ustálené podmínky za čistého valení byla změřena centrální tloušťka filmu 398 nm a minimální tloušťka 180 nm. To se shoduje s minimální a centrální tloušťkou pro frekvenci 100 Hz, kdežto pro 300 Hz je výchozí tloušťka maziva (tj. tloušťka mimo fluktuace filmu) v centrální oblasti 365 nm (viz příčný řez, pozice  $x = 0 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $y = 30 \text{ } \mu\text{m}$ ) a minimální tloušťka filmu rovněž 180 nm. Výchozí tloušťka v centrální oblasti pro 300 Hz odpovídá centrální tloušťce za ustálených podmínek při  $\Sigma = 1$ , ale minimální tloušťka (180 nm) se vlivem vibrací nezměnila, ačkoliv pro ustálené podmínky při  $\Sigma = 1$  byla zjištěna minimální tloušťka filmu 130 nm. Toto chování naznačuje přítomnost smykového řídnutí či tepelnému ovlivnění maziva na vstupu do kontaktu

vlivem skluzu. Potvrzuje se, že se zvýšením frekvence a zrychlení pohybů rostou i fluktuace filmu distribuované ve tvaru půlměsíce, které byly pozorovány v [45]. Pro 100 Hz jsou odchylky od výchozí tloušťky filmu v podélné rovině kontaktu +30 a -17 nm a pro 300 Hz významnějších +200 a -58 nm. Odchylky filmu jsou dány změnou rychlosti vtahování maziva do kontaktu, kdy pro vyšší rychlosti  $u_e'$  vzniká tlustější film, ale zároveň při nejvyšších rychlostech unášení působí i největší skluz, který tak nejspíše vzniklé odchylky redukuje. Rovněž vlivem změny směru vektoru unášivé rychlosti  $u_e'$  (s rostoucí frekvencí příčného pohybu se zvětšuje úhel  $\delta$ ) dochází k natočení podkovité konstrikce. Pro frekvenci 300 Hz je toto natočení takové, že lokální minimum tloušťky filmu v místě počátku konstrikce se nachází ve vstupní oblasti kontaktu. Tento tenký film maziva je do kontaktu vtahován a následně prochází skrz kontakt dle vektoru unášivé rychlosti, čímž udává zmiňovanou zápornou hodnotu odchylky filmu (viz podélný řez, pozice  $x = 38 \mu\text{m}$ ,  $y = 0 \mu\text{m}$ ). Navíc, když se takto unášený tenký film maziva dostane až k výstupní oblasti kontaktu, je jím ovlivněna střední část podkovité konstrikce, kde dochází k dalšímu lokálnímu snížení tloušťky filmu (viz podélný řez, pozice  $x = -222 \mu\text{m}$ ,  $y = 0 \mu\text{m}$ ). Pro přesnější objasnění pozorovaného chování je nicméně potřeba dalších měření.



**Obr. 30** Podélné a příčné profily tloušťky mazacího filmu pro dané interferenční snímky z úvratí harmonického pohybu o frekvenci 100 a 300 Hz

## 7 ZÁVĚR

---

**7**

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současný stav poznání z oblasti chování elastohydrodynamických mazacích filmů za tranzientních podmínek. Pozornost je především věnována experimentálním a teoretickým studiím, které se zabývali účinky nestacionárních pohybů působících ve směru unášivé rychlosti třecích povrchů či ve směru bočního skluzu. Na základě analýzy řešeršní části práce jsou stanoveny jevy a provozní parametry, které významně ovlivňují chování mazacího filmu za tranzientních podmínek. Rovněž se ukázalo, že velmi opomíjenou oblastí této problematiky je studium tranzientních pohybů v příčném směru kontaktu. S ohledem na tato zjištění je vymezen hlavní cíl disertační práce včetně dílčích cílů, je dána vědecká otázka a jsou formulovány pracovní hypotézy. Dále je navržen metodický postup řešení práce. Poslední částí pojednání je současný stav řešení disertační práce, v němž je shrnuta modifikace měřicí aparatury se specifikací dosažitelných parametrů a omezení, je provedena teoretická analýza tranzientních podmínek s vytvořením modelu distribuce maziva dle pracovní hypotézy a jsou uvedeny předběžné výsledky práce. Při řešení práce byly již částečně splněny její dílčí cíle, které tvoří předpoklad pro úspěšné splnění primárního cíle disertační práce.

---

## 8 LITERATURA

---

- [1] EMRICH, Miloslav. *Predikce mechanických ztrát spalovacích motorů*. Praha, 2010. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel.
- [2] HAMROCK, Bernard J. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York: McGraw-Hill, c1988, 690 s. ISBN 00-702-5956-9.
- [3] LARSSON, Roland. EHL Film Thickness Behavior. *Encyclopedia of Tribology*. 2013. Boston, MA: Springer US, s. 817-827. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5\_639. ISBN 978-0-387-92896-8.
- [4] BAIR, Scott a W. O. WINER. Shear Strength Measurements of Lubricants at High Pressure. *Journal of Lubrication Technology*. 1979, vol. 101, issue 3, s. 251-. DOI: 10.1115/1.3453339.
- [5] DOWSON, D. Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication. *Wear*. 1995, vol. 190, issue 2, s. 125-138. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06660-8.
- [6] PLINT, M A. Traction in elastohydrodynamic contacts. *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols 1-196)*. 1967-6-1, vol. 182, issue 1967, s. 300-306. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1967\_182\_028\_02.
- [7] KANETA, M., H. NISHIKAWA a K. KAMEISHI. Observation of Wall Slip in Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Tribology*. 1990, vol. 112, issue 3, s. 447-. DOI: 10.1115/1.2920280.
- [8] EHRET, P., D. DOWSON a C. M. TAYLOR. On lubricant transport conditions in elastohydrodynamic conjunctions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998, vol. 454, issue 1971, s. 763-787. DOI: 10.1098/rspa.1998.0185.
- [9] DOWSON, D a P EHRET. Past, present and future studies in elastohydrodynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 317-333. DOI: 10.1243/1350650991542703.
- [10] BAIR, S. a F. QURESHI. The high pressure rheology of polymer-oil solutions. *Tribology International*. 2003, vol. 36, issue 8, s. 637-645. DOI: 10.1016/s0301-679x(03)00008-2.
- [11] CIULLI, E a R BASSANI. Influence of vibrations and noise on experimental results of lubricated non-conformal contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006-1-1, vol. 220, issue 3, s. 319-331. DOI: 10.1243/13506501jet138.
- [12] CHRISTENSEN, H. The Oil Film in a Closing Gap. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1962, vol. 266, issue 1326, s. 312-328. DOI: 10.1098/rspa.1962.0064.
- [13] SPIKES, H A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 335-352. DOI: 10.1243/1350650991542712.

- [14] VICHARD, J P. Transient effects in the lubrication of hertzian contacts. *ARCHIVE: Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982 (vols 1-23)*. 1971, vol. 13, issue 3, s. 173-189. DOI: 10.1243/jmes\_jour\_1971\_013\_030\_02.
- [15] AI, Xiaolan a Haiqing YU. A full numerical solution for general transient elastohydrodynamic line contacts and its application. *Wear*. 1988, vol. 121, issue 2, s. 143-159. DOI: 10.1016/0043-1648(88)90039-7.
- [16] HOOKE, C. J. The Minimum Film Thickness in Line Contacts During Reversal of Entrainment. *Journal of Tribology*. 1993, vol. 115, issue 1, s. 191-199. DOI: 10.1115/1.2920975.
- [17] CIULLI, E. Non-steady state non-conformal contacts: friction and film thickness studies. *Meccanica*. 2009, vol. 44, issue 4, s. 409-425. DOI: 10.1007/s11012-008-9178-7.
- [18] NISHIKAWA, H. a M. KANETA. Behavior of EHL films in reciprocating motion. *Jsmc International Journal Series C-Dynamics Control Robotics Design and Manufacturing*. 1995, vol. 38, issue 3, s. 558-567. DOI: 10.1299/jsmec1993.38.558.
- [19] KANETA, M. a H. NISHIKAWA. Experimental study on microelastohydrodynamic lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 371-381. DOI: 10.1243/1350650991542749.
- [20] WANG, J., T. HASHIMOTO, H. NISHIKAWA a M. KANETA. Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion. *Tribology International*. 2005, vol. 38, 11-12, s. 1013-1021. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.022.
- [21] STADLER, K., N. IZUMI, T. MORITA, J. SUGIMURA a B. PICCIGALLO. Estimation of Cavity Length in EHL Rolling Point Contact. *Journal of Tribology*. 2008, vol. 130, issue 3, s. 031502-. DOI: 10.1115/1.2919780.
- [22] WIJNANT, Y. H. *Contact dynamics in the field of elastohydrodynamic lubrication*. Enschede, 1998. ISBN 90-36512239. PhD-thesis. University of Twente.
- [23] MARUYAMA, T. a T. SAITOH. Oil film behavior under minute vibrating conditions in EHL point contacts. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 8, s. 1279-1286. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.11.004.
- [24] GLOVNEA, Romeo P. a Hugh A. SPIKES. Behavior of EHD Films During Reversal of Entrainment in Cyclically Accelerated/Decelerated Motion. *Tribology Transactions*. 2002, vol. 45, issue 2, s. 177-184. DOI: 10.1080/10402000208982537.
- [25] SCALES, L., J. RYCROFT, N. HORSWILL a B. WILLIAMSON. Simulation and Observation of Transient Effects in Elastohydrodynamic Lubrication. *SAE Technical Paper*. 1996, 961143. DOI:10.4271/961143.
- [26] RUTLIN, H. C, et al. 1997. An optical ehd study using a reciprocating Hertzian contact rig designed to simulate the kinematics of constant velocity joints. DOWSON, D. *Elastohydrodynamics '96: Fundamentals and Applications in Lubrication and Traction*. Amsterdam: Elsevier, s. 297-303. ISBN 0-444-82809-5.

- [27] LI, Gang, Chenhui ZHANG, Jianbin LUO, Shuhai LIU, Guoxin XIE a Xinchun LU. Film-forming Characteristics of Grease in Point Contact under Swaying Motions. *Tribology Letters*. 2009, vol. 35, issue 1, s. 57-65. DOI: 10.1007/s11249-009-9433-7.
- [28] SUGIMURA, J., W. R. JONES a H. A. SPIKES. EHD Film Thickness in Non-Steady State Contacts. *Journal of Tribology*. 1998, vol. 120, issue 3, s. 442-452. DOI: 10.1115/1.2834569.
- [29] SUGIMURA, J. Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2002, vol. 47, issue 10, s. 752-757. ISSN: 0915-1168.
- [30] OHNO, N., N. KUWANO a F. HIRANO. Bulk Modulus of Solidified Oil at High Pressure as Predominant Factor Affecting Life of Thrust Ball Bearings. *Tribology Transactions*. 1995, vol. 38, issue 2, s. 285-292. DOI: 10.1080/10402009508983406.
- [31] GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES. The Influence of Lubricant Upon EHD Film Behavior During Sudden Halting of Motion. *Tribology Transactions*. 2000, vol. 43, issue 4, s. 731-739. DOI: 10.1080/10402000008982402.
- [32] SUGIMURA, J., T. OKUMURA, Y. YAMAMOTO a H.A. SPIKES. Simple equation for elastohydrodynamic film thickness under acceleration. *Tribology International*. 1999, vol. 32, issue 2, s. 117-123. DOI: 10.1016/s0301-679x(99)00022-5.
- [33] GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES. Elastohydrodynamic Film Collapse During Rapid Deceleration. Part I—Experimental Results. *Journal of Tribology*. 2001, vol. 123, issue 2, s. 254-. DOI: 10.1115/1.1308011.
- [34] GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES. Elastohydrodynamic Film Collapse During Rapid Deceleration. Part II—Theoretical Analysis and Comparison of Theory and Experiment. *Journal of Tribology*. 2001, vol. 123, issue 2, s. 262-. DOI: 10.1115/1.1308012.
- [35] GLOVNEA, R. P. a H. A. SPIKES. Elastohydrodynamic film formation at the start-up of the motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001-1-1, vol. 215, issue 2, s. 125-138. DOI: 10.1243/1350650011541774.
- [36] OSBORN, K. F. a F. SADEGHI. Time Dependent Line EHD Lubrication Using the Multigrid/Multilevel Technique. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, issue 1. DOI: 10.1115/1.2920870.
- [37] KANETA, M. For the Establishment of a New EHL Theory. *Lubrication at the Frontier: The Role of the Interface and Surface Layers in the Thin Film and Boundary Regime*. 1999, vol. 29, s. 25–36. DOI: 10.1016/S0167-8922(99)80025-X.
- [38] GLOVNEA, R.P. a H.A. SPIKES. The influence of lubricant properties on EHD film thickness in variable speed conditions. *Transient Processes in Tribology: Proceedings of the 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. 2004, vol. 43, s. 401-408. DOI: 10.1016/S0167-8922(03)80067-6.
- [39] WILSON, W. R. D. a S. SHEU. Effect of Inlet Shear Heating Due to Sliding on Elastohydrodynamic Film Thickness. *Journal of Lubrication Technology*. 1983, vol. 105, issue 2. DOI: 10.1115/1.3254563.

- [40] OLVER, A. V. Testing transmission lubricants: the importance of thermal response. *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 1989-1996 (vols 203-210)*. 1991, vol. 205, issue 17, s. 35-44. DOI: 10.1243/pime\_proc\_1991\_205\_235\_02.
- [41] VENNER, C. H. a R. HAGMEIJER. Film thickness variations in elasto-hydrodynamically lubricated circular contacts induced by oscillatory entrainment speed conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2008, vol. 222, issue 4, s. 533-547. DOI: 10.1243/13506501jet306.
- [42] CIULLI, E., K. STADLER a T. DRAEXL. The influence of the slide-to-roll ratio on the friction coefficient and film thickness of EHD point contacts under steady state and transient conditions. *Tribology International*. 2009, vol. 42, issue 4, s. 526-534. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.04.005.
- [43] QU, S., P. YANG a F. GUO. Theoretical investigation on the dimple occurrence in the thermal EHL of simple sliding steel-glass circular contacts. *Tribology International*. 2000, vol. 33, issue 1, s. 59-65. DOI: 10.1016/S0301-679X(00)00031-1.
- [44] NAGATA, Yuichiro, Konstantinos KALOGIANNIS a Romeo GLOVNEA. Track Replenishment by Lateral Vibrations in Grease-Lubricated EHD Contacts. *Tribology Transactions*. 2012, vol. 55, issue 1, s. 91-98. DOI: 10.1080/10402004.2011.629404.
- [45] KALOGIANNIS, Konstantinos. *Behaviour of elastohydrodynamic films subjected to oscillatory motion*. Brighton, 2013. Dostupné z: [http://sro.sussex.ac.uk/44542/1/Kalogiannis%2C\\_Konstantinos.pdf](http://sro.sussex.ac.uk/44542/1/Kalogiannis%2C_Konstantinos.pdf). Doctoral thesis. University of Sussex.
- [46] HARTL, M., I. KŘUPKA a M. LIŠKA. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering*. 1997, vol. 36, issue 9, s. 2384-2391. DOI: 10.1117/1.601415.
- [47] HARTL, M., et al. Thin film lubrication study by colorimetric interferometry. *Tribology Series*. 2000, vol. 38, s. 695-704. DOI: 10.1016/S0167-8922(00)80172-8.
- [48] SPIKES, H. *Advances in the Study of Thin Lubricant Films*. New directions in tribology: plenary and invited papers from the First World Tribology Congress. Bury St Edmunds: Mechanical Engineering Publications for the Institution of Mechanical Engineers, 1997, s. 355-369. ISBN 9781860580994.
- [49] POLIŠČUK, R. *Aplikace barevného vidění při studiu elastohydrodynamického mazání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 63 s. Disertační práce.
- [50] GOHAR, R. A ball-and-plate machine for measuring elastohydrodynamic oil films. *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings 1964-1970 (vols 178-184)*. 1967, vol. 182, issue 37, s. 43-45. DOI: 10.1243/pime\_conf\_1967\_182\_176\_02.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

| Zkratka | Význam                                                                                        |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5P4E    | Polyphenyl ether, základový olej skupiny Group V                                              |
| BS      | Bright Stock, základový olej skupiny Group I                                                  |
| CMOS    | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor                                                       |
| EHD     | Elastohydrodynamický                                                                          |
| PAO     | Polyalfaolefin, základový olej skupiny Group IV                                               |
| PFPE    | Perfluorovaných polyether, základový olej skupiny Group V                                     |
| SRR     | Poměr skluzu a valení ( <i>Slide to Roll Ratio</i> )                                          |
| THCI    | Koloremetrická interferometrie tenkých filmů ( <i>Thin Film Colorimetric Interferometry</i> ) |
| VI      | Viskozitní index                                                                              |

| Symbol    | Jednotka                       | Popis                                                   |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $U$       | 1                              | bezrozměrný parametr rychlosti                          |
| $a$       | $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | zrychlení                                               |
| $b$       | m                              | délka poloosy kontaktu                                  |
| $h$       | m                              | tloušťka mazacího filmu                                 |
| $h_i$     | m                              | počáteční tloušťka filmu                                |
| $h_s$     | m                              | tloušťka filmu při stacionárních podmínkách             |
| $p$       | Pa                             | tlak, měrný tlak                                        |
| $t$       | s                              | čas                                                     |
| $u$       | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | aktuální střední rychlost třecích povrchů               |
| $u_b$     | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | rychlost povrchu kuličky v místě kontaktu               |
| $u_{by}$  | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | rychlost příčného skluzového pohybu kuličky             |
| $u_d$     | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | rychlost povrchu disku v místě kontaktu                 |
| $u_e$     | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | unášivá rychlost                                        |
| $u_e'$    | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | okamžitá unášivá rychlost                               |
| $u_s$     | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | skluzová rychlost                                       |
| $u_s'$    | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | okamžitá skluzová rychlost                              |
| $\Sigma$  | 1                              | poměr skluzové a valivé rychlosti pro ustálené podmínky |
| $\Sigma'$ | 1                              | okamžitá hodnota poměru skluzové a valivé rychlosti     |

|               |                  |                                                                                    |
|---------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | $\text{Pa}^{-1}$ | tlakově-viskózní koeficient                                                        |
| $\delta$      | $^{\circ}$       | úhel směru vektoru okamžité unášivé rychlosti                                      |
| $\varepsilon$ | $^{\circ}$       | úhel mezi vektory okamžité unášivé a skluzové rychlosti                            |
| $\xi$         | 1                | konstanta reprezentující místo tvorby filmu v násobcích poloměrů Hertzova kontaktu |

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 1</b> Profil tloušťky filmu s rozložením tlaku ve střední rovině EHD kontaktu a interferogram kontaktu s vyznačením směrů pohybů v tečné rovině kontaktu .....                              | 7  |
| <b>Obr. 2</b> Nejčastěji používané průběhy rychlostí v experimentálních studiích .....                                                                                                              | 9  |
| <b>Obr. 3</b> Profily tloušťky filmu maziva TN 320 v polovině a na úvrati zdvihu pro podmínky čistého valení (a) a čistého skluzu (b) .....                                                         | 10 |
| <b>Obr. 4</b> Profily tloušťky filmu maziva TN 320 na úvratích pohybu při změně délky zdvihu pro podmínky čistého valení (a) a čistého skluzu (b) .....                                             | 11 |
| <b>Obr. 5</b> Modely průběhu centrální tloušťky filmu (a) a tlaku (b) během jednoho cyklu harmonického pohybu o rozdílné frekvenci, kde $t$ je čas a $T$ je perioda pohybu .....                    | 12 |
| <b>Obr. 6</b> Vliv amplitudového poměru na minimální tloušťku mazacího filmu pro (a) rozdílné rychlosti a pro (b) rozdílné viskozity maziva .....                                                   | 14 |
| <b>Obr. 7</b> Centrální tloušťka mazacího filmu při čistém skluzu pro frekvence vratného pohybu (a) 10 a (b) 50 Hz .....                                                                            | 15 |
| <b>Obr. 8</b> Podélné profily (a) tloušťky filmu při deceleraci a vývoj centrální tloušťky filmu (b) během jednoho cyklu vratného pohybu .....                                                      | 16 |
| <b>Obr. 9</b> Centrální a minimální tloušťka filmu při vratném pohybu pro (a) PFPEA při 40 mm/s; (b) PFPEZ při 123 mm/s .....                                                                       | 18 |
| <b>Obr. 10</b> Profily tloušťky filmu maziva PFPEA (a) při zastavení pohybu a průběhy tlouštěk filmu pro (b) SN100 při 157 mm/s; (c) PFPEA při 9.7 mm/s a (d) PFPEZ při 90 mm/s .....               | 20 |
| <b>Obr. 11</b> Chování mazacího filmu minerálního oleje HVI 650: (a) centrální tloušťka po náhlém zastavení pohybu z rozdílných rychlostí; (b) vývoj profilu filmu v čase po zastavení pohybu ..... | 21 |
| <b>Obr. 12</b> (a) Efekt viskozity na centrální tloušťku filmu maziva; (b) detail vývoje predikované a změřené centrální tloušťky ihned po zastavení pohybu s průběhem rychlosti v čase .....       | 22 |
| <b>Obr. 13</b> (a) Odchylky tloušťky filmu maziva PFPEZ při akceleraci-deceleraci pohybu oproti ustáleným podmínkám při frekvenci 2 Hz; (b) model změny tloušťky filmu s rychlostí .....            | 23 |
| <b>Obr. 14</b> (a) Centrální tloušťka mazacího filmu při řízeném zastavení pohybu pro rozdílné hodnoty decelerace; (b) porovnání výsledků s predikcí .....                                          | 25 |
| <b>Obr. 15</b> Tvorba mazacího filmu při začátku pohybu pro 80 °C a akceleraci (a) 5 a (b) 10 m/s <sup>2</sup> ; interferogramy kontaktu pro 60 °C a akceleraci 5 m/s <sup>2</sup> .....            | 26 |
| <b>Obr. 16</b> (a) Porovnání predikované a změřené tloušťky filmu v okamžiku separace povrchů; (b) rychlostní profily první vlny maziva při čistém valení a čistém skluzu .....                     | 27 |

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 17</b> Poměr měřené a predikované centrální tloušťky mazacího filmu při frekvenci změny rychlosti pohybu 50 Hz pro mazivo (a) PAO a (b) 5P4E .....                                                  | 29 |
| <b>Obr. 18</b> Predikované pseudo-interferogramy s profily tloušťky filmu a tlaku v okamžiku harmonické změny rychlosti dle (a) pro frekvence změny rychlosti (b) 5, (c) 50 a (d) 500 Hz.....               | 30 |
| <b>Obr. 19</b> Tloušťky filmů při harmonickém pohybu, kde tlusté čáry odpovídají centrální tloušťce filmu a tenké čáry minimální tloušťce při frekvenci 1 Hz (plná čára) a 0.25 Hz (přerušovaná čára) ..... | 32 |
| <b>Obr. 20</b> Tloušťka mazacího filmu při skluzovém harmonickém pohybu v příčném směru: (a) vývoj v čase; (b) tloušťka během zdvihu.....                                                                   | 33 |
| <b>Obr. 21</b> Centrální tloušťka mazacího filmu při skluzovém harmonickém pohybu v příčném směru při valivé rychlosti 0.1 m/s a poměru velikosti zdvihu k velikosti kontaktu (a) 0.185; (b) 1.3.....       | 34 |
| <b>Obr. 22</b> Profily filmů ve směru unášivé rychlosti při teplotě 30 °C, valivé rychlosti 0.05 m/s a frekvenci příčných vibrací (a) 50 a (b) 100 Hz .....                                                 | 35 |
| <b>Obr. 23</b> Profily filmů ve směru unášivé rychlosti při valivé rychlosti 0.05 m/s a frekvenci příčných vibrací 100 Hz při (a) rozdílném kontaktním tlaku a (b) teplotě 80 °C .....                      | 35 |
| <b>Obr. 24</b> Princip optické interferometrie.....                                                                                                                                                         | 40 |
| <b>Obr. 25</b> Modifikovaná měřicí aparatura s nástavbou pro simulaci příčných vibrací.....                                                                                                                 | 42 |
| <b>Obr. 26</b> Schéma modifikovaného tribologického simulátoru.....                                                                                                                                         | 43 |
| <b>Obr. 27</b> (a) Vektory charakteristických rychlostí tranzientního EHD bodového kontaktu; (b) model pohybu maziva v kontaktu .....                                                                       | 45 |
| <b>Obr. 28</b> Chování EHD filmu pro unášivou rychlost $u_e = 0.1$ m/s, $SRR \Sigma = 0$ , frekvenci příčného pohybu 100 Hz se zdvihem 150 $\mu\text{m}$ .....                                              | 46 |
| <b>Obr. 29</b> Chování EHD filmu pro unášivou rychlost $u_e = 0.1$ m/s, $SRR \Sigma = 0$ , frekvenci příčného pohybu 300 Hz se zdvihem 200 $\mu\text{m}$ .....                                              | 47 |
| <b>Obr. 30</b> Podélné a příčné profily tloušťky mazacího filmu pro dané interferenční snímky z úvratí harmonického pohybu o frekvenci 100 a 300 Hz. ....                                                   | 48 |

