

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

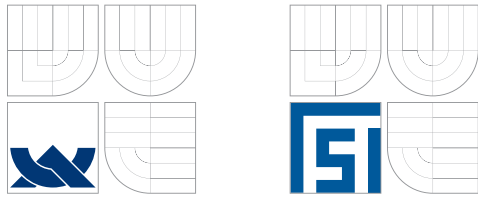
Analýza mazání ventilového rozvodu - vliv rychlosti a zatížení

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Martin Zimmerman**
Author

Brno 2009





Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

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

Analýza mazání ventilového rozvodu - vliv rychlosti a zatížení

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Martin Zimmerman**
Author

Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**
Supervisor

OBSAH

1 ÚVOD	4
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	7
3.1 Proměnné zatížení při stálé rychlosti	7
3.2 Proměnná rychlost při stálém zatížení	19
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE	32
5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	33
6. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	34
6.1 Modifikace experimentálního zařízení pro proměnné zatížení	34
6.1.1 Princip funkce	35
6.1.2 Řešené problémy při návrhu jednotky	35
6.2 Chování mazacího filmu při skokové změně zatížení	36
6.3 Návrh software pro ovládání experimentální aparatury	37
6.4 Návrh nové konstrukce experimentálního zařízení	37
7. ZÁVĚR	38
8 SEZNAM OBRÁZKŮ	39
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	41
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42

1 ÚVOD

Pojednání se zabývá studiem vlivu časově proměnných parametrů rychlosti a zatížení na utváření mazacího filmu u vysoce zatěžovaných strojních součástí. V technické praxi je obvyklé, že zmiňované parametry se při provozu strojů mění. Jako příklad je možno uvést kontakt vačky a zdvihátka, kde v průběhu jedné otáčky vačkové hřídele dochází spojitě k časové změně zatížení, rychlosti a geometrie kontaktních ploch. Výskyt nestacionárních provozních podmínek má negativní vliv na utváření mazacího filmu a může vést až k protržení vrstvy maziva. V okamžiku porušení mazací vrstvy dochází ke kontaktu ploch a tento jev vede k zvýšenému opotřebením součástí ve vzájemném kontaktu.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době je velmi dobře jak analyticky, tak numericky, prozkoumána oblast chování mazacího filmu při stacionárních provozních podmínkách. V technické praxi je však množství součástí pracujících za podmínek neustáleného elastohydrodynamického (EHD) mazání. Teprve nedávno byly publikovány první práce zabývající se experimentálním výzkumem vlivu přechodových jevů na tloušťku a utváření mazacího filmu v EHD kontaktu.

Jedna z prvních prací zabývající se výzkumem chování maziva v EHD kontaktu při nestacionárních podmínkách byla publikována Christensenem v roce 1961 [1]. Šlo o teoretickou práci s cílem objasnit chování maziva pro případ vytlačovaného filmu mezi dvěma válci. Jednalo se o první práci, ve které byl použit model maziva s tlakově viskózní závislostí. Další z prací Christensena se zabývaly numerickým řešením elastických deformací kontaktních kulových ploch včetně tlakově viskózní závislosti maziva pro případ vytlačovaného filmu [2-3].

Na práci Christensena navázali Dowson a Jones svým experimentálním studiem vytlačovaného filmu [4]. Jako kontaktní tělesa byla použita skleněná deska a na ni dopadající ocelová kulička. Výsledky experimentu byly zaznamenány vysokorychlostní videokamerou a z nasnímaných interferogramů byla zpětně určena tloušťka mazacího filmu s využitím metody optické interferometrie. Bylo to poprvé, kdy byla použita metoda optické interferometrie pro zkoumání chování maziva v EHD mazaném kontaktu. V průběhu experimentu byla pozorována ve středu kontaktní plochy tvorba oblasti se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu.

V roce 1970 byla publikována práce Herrebrugha, v níž se autor pokusil numericky popsat chování vytlačovaného mazacího filmu mezi dvěma rovnoběžnými válci. Tak jako v případě vytlačovaného filmu pro dvě kulové kontaktní plochy, tak i pro válcové plochy, byla zjištěna tvorba oblasti se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu, která pro případ dvou válců procházela napříč kontaktní plochou ve směru os válců [5].

Sanborn a Winer studovali chování maziva v bodovém kontaktu při čistém prokluzu a časově proměnném zatížení [6]. Jedním ze závěrů výzkumu bylo zjištění, že náhlé zatížení kontaktu nemá významnější vliv na tvar mazacího filmu.

V roce 1972 byla v článku Paula a Camerona popsána nová metoda měření vlastností maziva v kontaktu [7]. Nová metoda dovolovala měřit index lomu spolu s hustotou, tlakem a viskozitou v kontaktu pro tlaky do 1 GPa. Ve stejném roce publikoval svoji práci Petrousevitch, který se zabýval výzkumem chování mazacího filmu v kontaktu mezi skleněnou deskou a padající ocelovou kuličkou [8]. Další část výzkumu byla zaměřena na vliv prokluzu kontaktních ploch na tvar mazacího filmu.

Na výzkum Christensena navázali Lee a Cheng [9] svojí prací, zabývající se numerickým řešením rozložení tlaku a profilu mazacího filmu v kontaktu dvou válců. Oproti dříve publikované práci Lee a Cheng zahrnuli do svého výzkumu veličiny jako stlačitelnost maziva a vliv maziva s kompozitním tlakově-viskózním koeficientem.

Problémem tvorby oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva uvnitř kontaktu tvořeného dvěma válcovými [10] a dvěma kulovými plochami [11] se ve své práci zabývali Wada a Tsukijihara. Pro výpočtovou část výzkumu byl položen předpoklad, že mazivo se chová obdobně jako Binghamova tekutina. Cílem numerického řešení

bylo zjistit vliv oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva na rozložení tlaku v kontaktu a deformaci kontaktních ploch. Součástí práce byl také experimentální výzkum, při němž byly změny tvaru mazacího filmu snímány vysokorychlostní kamerou a vyhodnoceny metodou optické interferometrie. Experimentálně získané výsledky byly srovnány s výsledky analytickými.

Výzkumem chování maziva v kontaktu vačky a zdvihátka se podrobněji zabýval ve své práci Leeuwen [12]. Pro měření tloušťky byly použity napařované snímače, které byly na kontaktní plochy nanášeny použitím fotolitografie. Měřenou veličinou byla elektrická kapacita, nicméně touto metodou bylo možno zjistit pouze hodnotu průměrné tloušťky maziva, nikoli jeho profil.

První práce studující chování mazacího filmu uvnitř kontaktu při časově proměnné rychlosti třecích povrchů je možno datovat k roku 1971. Tyto teoretické práce se většinou zabývaly chováním mazacího filmu při změně střední rychlosti třecích povrchů pro liniový kontakt [8, 13, 14]. Jedny z prvních experimentálních výsledků z této oblasti byly publikovány Sugimuro a Spikesem [15], kteří se ve své práci zabývali návrhem techniky měření tloušťky filmu v kontaktu při časově proměnné rychlosti povrchů. Sugimura na tuto práci dále navázal a detailněji rozvedl zkoumaný problém [16].

Z uvedených publikací je patrné, že možnosti experimentálního výzkumu chování mazacího filmu v EHD mazaném kontaktu při nestacionárních podmínkách nebyly zcela vyčerpány. I v současné době se pro simulaci reálných tribologických uzlů používají velmi zjednodušené modely, které mohou poskytovat částečně zkrácené představy o dějích probíhajících uvnitř kontaktu vačky a zdvihátka. Možné zkrácení může být způsobeno separací a oddělením zkoumáním vlivu časově proměnných parametrů rychlosti, zatížení a geometrie na utváření a chování mazacího filmu uvnitř kontaktu. Hlavním cílem řešení disertační práce je proto vytvoření metodiky a konstrukce potřebného technického vybavení pro zkoumání chování mazacího filmu v EHD kontaktu při časové změně zatížení a rychlosti kontaktních povrchů. Pro přímé pozorování změn tvaru filmu bude použita kolorimetrická interferometrie [17-18], která umožňuje zpětně rekonstruovat tvar mazacího filmu v průběhu měření a s jejíž pomocí je možno stanovit tvar mazacího filmu pro různé řezy kontaktní oblasti.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3

3.1 Proměnné zatížení při stálé rychlosti

3.1

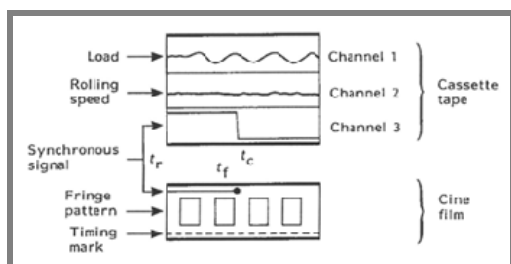
REN, N. – ZHU, D. – WEN, S.Z. Experimental method for quantitative analysis of transient EHL. *Tribology International*, 1991, vol. 24, no. 4, s. 225–230. ISSN: 0301-679X.

Northwestern University, Evanston, Illinois

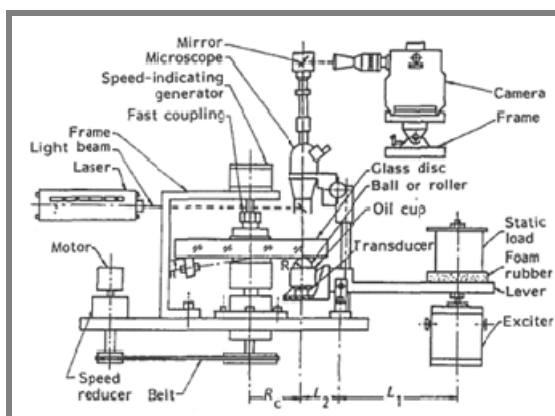
Článek se zabývá chováním mazacího filmu v bodovém i liniovém kontaktu při působení časově proměnného zatížení. Pro snímání tvaru mazacího filmu byla použita metoda optické interferometrie spolu s vysokorychlostní snímací technikou. Změny rychlosti a zatížení třecích povrchů byly sledovány snímači s vysokofrekvenční odezvou. V experimentu byl použit synchronizační signál, pomocí něhož bylo možno pro daný časový okamžik zjistit odpovídající hodnoty rychlosti třecích povrchů, zatížení a tvaru mazacího filmu v kontaktu. Proměnné zatížení v kontaktu bylo generováno elektromagnetickým budičem.

Experiment:

Autoři se ve svém experimentu rozhodli pro záznam měřených veličin na magnetickou pásku a kinofilm. Jak je zobrazeno na obr. 1, tak na magnetickou pásku byly současně zaznamenávány tři signály. Jednalo se o záznam časové změny zatížení, sledování změn rychlosti třecích povrchů a v posledním kanálu byl zaznamenáván řídicí signál. Druhým záznamovým médiem byl kinofilm, na který byly snímány jak interferogramy mapující změny tvaru mazacího filmu, tak řídicí signál. Při skokové změně řídicího signálu v čase t_r dojde k zaznamenání jevu na jednotlivých páskách v časech t_c a t_f . Prodleva je způsobena přenosovou charakteristikou měřicího zařízení.



Obr. 1 Schéma zaznamenávání signálů na pásky.



Obr. 2 Schéma experimentální aparatury.

Výsledné proměnné zatížení v kontaktu se sestávalo ze dvou složek. První složkou byla síla F_1 , která byla časově neměnná, vyvozená závažím a do kontaktu přenášena pomocí pákového mechanismu. Druhou složkou byla dynamická síla $F_2(t)$. Dynamická složka zatěžující síly byla generována elektromagnetickým budičem. Na obr. 2 je schematicky zobrazeno složení experimentální aparatury.

Měření hodnot proměnného zatížení bylo zajištěno snímačem umístěným přímo pod ocelovou kuličkou. Aktuální rychlost třecích povrchů v kontaktu byla zjišťována pomocí snímače otáček, který byl umístěn nad skleněným diskem.

Zpětná rekonstrukce tvaru filmu v kontaktu byla provedena užitím optické interferometrie. Při vysokých rychlostech snímání je potřeba intenzivní zdroj světla, který dokáže za krátký čas dostatečně exponovat film. Jako zdroj světla byl použit HeNe laser s výkonem 18 mW a vlnovou délkou 0,6328 μm . Interferogramy byly snímány vysokorychlostní kinofilmovou kamerou s rozsahem snímacích rychlostí 100 až 8000 snímků za sekundu.

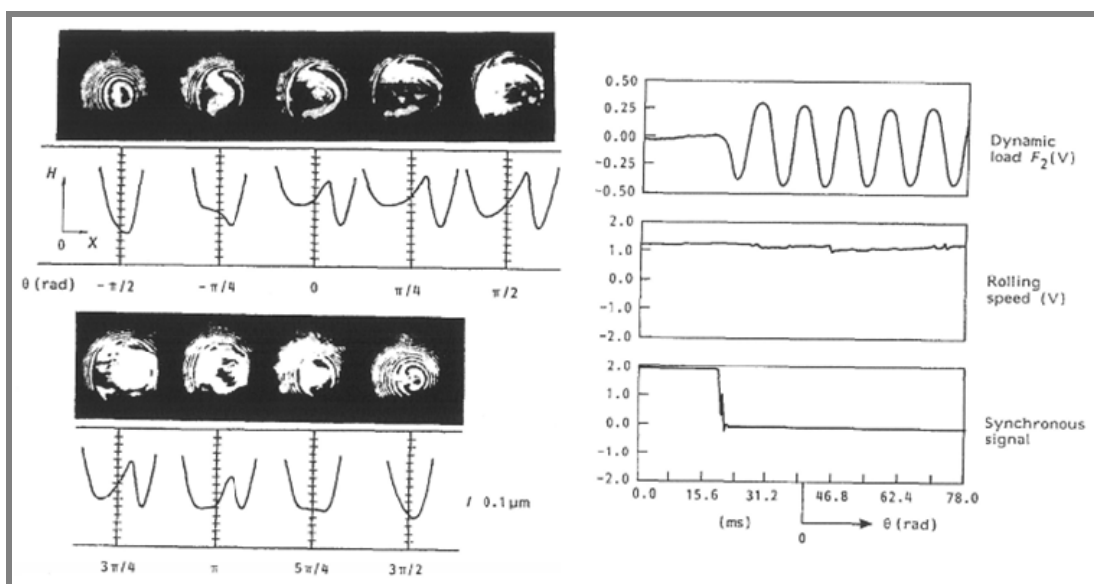
Pro měření tloušťky mazacího filmu v kontaktu za nestacionárních podmínek je potřebná referenční tloušťka mazacího filmu, která je známa a kontaktní plochy jsou tímto filmem na začátku měření odděleny. Referenční tloušťka mazacího filmu použitá u experimentu byla 0,4 μm . Na začátku testu je kontakt zatížen stálou v čase neměnnou silou F_1 .

Výsledky:

Cílem experimentu bylo zjistit vliv časově proměnného zatížení EHD mazaného kontaktu na chování mazacího filmu. Časová změna zatížení měla sinusový průběh a snahou bylo zjednodušeně simulovat kontakt v kuličkovém a válečkovém ložisku.

Bodový kontakt:

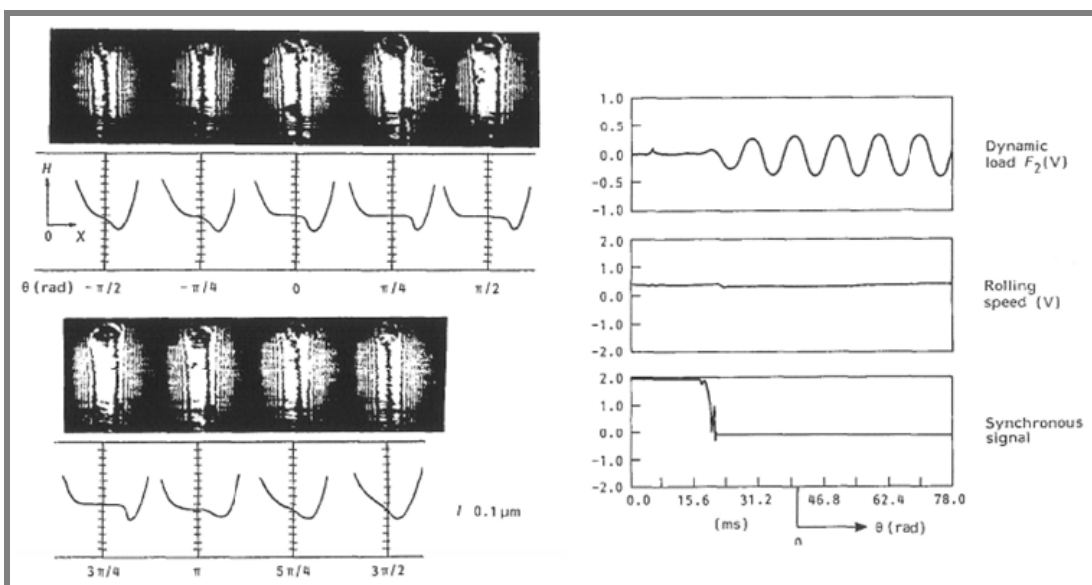
Při snímání bodového kontaktu byly získány interferogramy uvedené na obr. 3, z nichž je možno zpětně rekonstruovat profil mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení. Součástí obr. 3 je také záznam externích parametrů vstupujících do měření. Z obrázku je patrné, že tvar mazacího filmu je značně odlišný od toho, který může být pozorován v EHD kontaktu při ustálených podmínkách. Bylo pozorováno lokální zvýšení tloušťky maziva, jehož největší hodnota v průběhu cyklu byla 0,6 μm . Současně se zvyšujícím se zatížením bylo, v důsledku elastických deformací, pozorováno znatelné zvětšení kontaktní oblasti, aniž by došlo k výraznější změně minimální tloušťky filmu.



Obr. 3 Série interferogramů bodového kontaktu.

Liniový kontakt:

Pro dynamicky zatížený liniový kontakt byly použity stejné hodnoty zatížení, rychlosti třecích povrchů, referenční tloušťky mazacího filmu i rychlost a způsob záznamu naměřených dat, jako v případě bodového kontaktu (obr. 4). Z nasnímaných interferogramů je patrné, že hodnoty minimální a centrální tloušťky mazacího filmu se v průběhu cyklu mění pouze nepatrně. Profil mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení po zatížení kontaktu je tvarově shodný s profilem, který je možno pozorovat u EHD kontaktu při ustálených podmínkách. Autor článku toto chování zdůvodňuje rozdílnou relativní tuhostí jednotlivých soustav. V konfiguraci pro liniový kontakt je relativní tuhost těles v kontaktu mnohem vyšší, než je tomu u kontaktu bodového a proto je liniový kontakt méně citlivý na změny zatížení.



Obr. 4 Série interferogramů liniového kontaktu.

Závěr:

Součástí práce bylo popsání nové metody měření EHD mazaného kontaktu při nestacionárních podmínkách s novou technologií záznamu dat na magnetické pásky s použitím synchronizačního signálu. Použitím optické interferometrie bylo možno zpětně rekonstruovat profil mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení pro odpovídající hodnoty zatížení a rychlosti třecích povrchů v daný okamžik.

Po vyhodnocení naměřených výsledků se prokázalo, že časově proměnné zatížení bodového kontaktu má značný vliv na chování mazacího filmu a profil tohoto filmu v kontaktu je výrazně odlišný od toho, který je možno pozorovat u stacionárního EHD kontaktu. Při pulzující změně zatěžující síly dochází k lokálnímu navýšení tloušťky mazacího filmu.

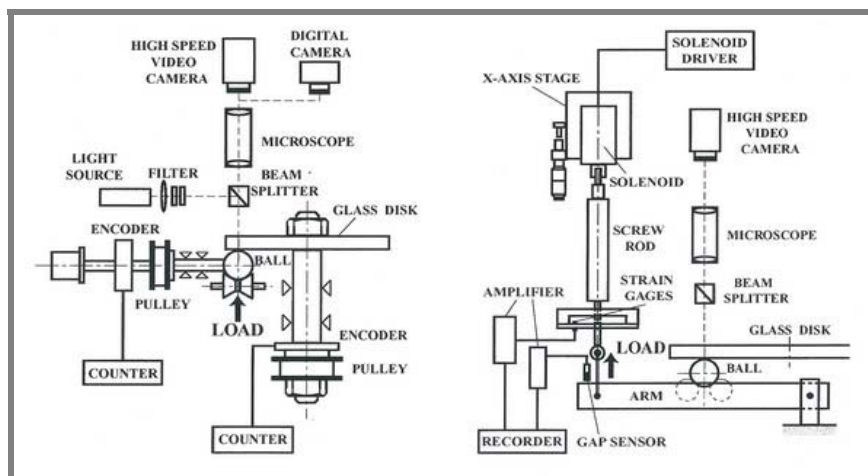
Při experimentu pro liniový kontakt se stejnými vstupními parametry se neprokázal významnější vliv proměnného zatížení na tvar mazacího filmu. Autor současně upozorňuje na možnost odlišného chování liniového kontaktu při proměnném zatížení pro menší referenční tloušťky maziva v kontaktu.

SAKAMOTO, M. – NISHIKAWA, H. – KANETA, M. Behaviour of point contact EHL films under pulsating loads. In *Transient Processes in Tribology, Proc. 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. LUBRECHT, A.A. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004. s. 391–399. ISBN: 04-4451-706-5. Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan

Článek se věnuje experimentálnímu studiu chování mazacího filmu při působení časově proměnného zatížení. Experimenty byly provedeny pro případ vytlačovaného filmu z kontaktu a pro čisté valení kontaktních ploch. Zkoumán byl především vliv skokového zatížení a odlehčení kontaktu, včetně vlivu pulzujícího zatížení. Předmětem zkoumání byl také vliv předzatížení a rychlosti zatěžování kontaktu na maximální tloušťku filmu.

Experiment:

Pro experiment byla použita experimentální aparatura schematicky zobrazená na obr. 5. Jako kontaktní tělesa byla použita ocelová kulička o průměru 25,4 mm a skleněný disk o průměru 180 mm a tloušťce 12 mm, jehož kontaktní strana byla opatřena polopropustnou chromovou vrstvou. Pro generování časově proměnné zatěžující síly byl použit elektromagnet a kontaktní síla byla snímána dvěma tenzometry. Při experimentu byly použity tři typy olejů s rozdílnými hodnotami hustoty, viskozity a tlakově viskózního koeficientu. Konkrétně se jednalo o oleje s označením BS, ST100 a TN320.



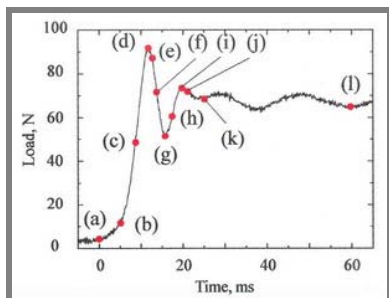
Obr. 5 Schéma měřicí aparatury a systému zatěžování.

Výsledky:

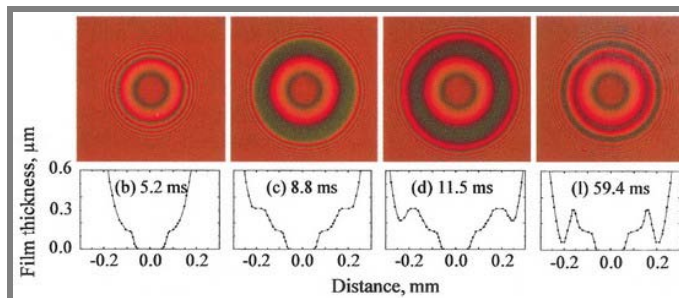
Vytlačovaný film:

Na obr. 6 je zobrazen průběh časové změny zatížení kontaktu pro experiment, při kterém byl použit olej BS. Odpovídající série interferogramů a profilů mazacího filmu v centrální rovině pro vybrané body na křivce průběhu zatížení jsou zobrazeny na obr. 7. Z obrázku je patrné, že při náhlém zatížení dochází k uzavření části maziva v okrajové části kontaktu. Jedná se o část maziva, jehož viskozita se prudce zvýšila při změně zatížení kontaktu. Podobný jev byl sledován i u ostatních druhů olejů s tím, že se zvyšující se hodnotou tlakově viskózního koeficientu docházelo k navýšení jak hodnoty maximální tloušťky filmu, tak množství maziva zachyceného v kontaktu.

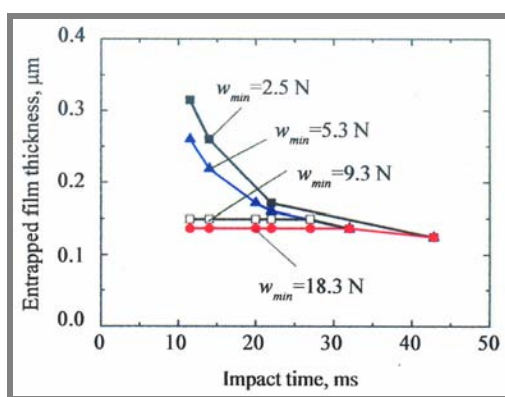
Na obr. 8 je uvedena závislost předzátěžující síly a rychlosti zatěžování kontaktu vzhledem k hodnotám maximální tloušťky filmu v kontaktu. Z obrázku je zřejmé, že nejvyšších hodnot tloušťky mazacího filmu je dosaženo pro nízké hodnoty předzátěžení spolu s vysokou hodnotou rychlosti zatížení kontaktu.



Obr. 6 Časová změna zatížení – BS.

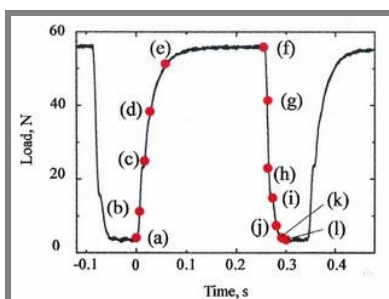


Obr. 7 Interferogramy a profily mazacího filmu pro olej – BS.

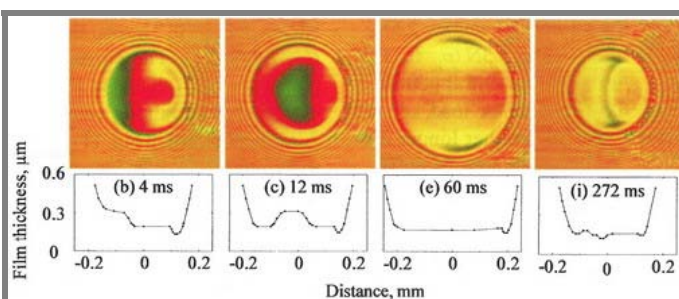
Obr. 8 Vliv w_{min} a rychlosti zatížení na max. tloušťku filmu.

Pulzující zatížení při čistém valení:

Časový průběh zatížení kontaktu je zobrazen na obr. 9. Interferogramy na obr. 10 byly nasnímány při experimentu s použitím oleje BS. Při prudkém zvýšení zatížení kontaktu dojde na vstupu do kontaktu k vytvoření oblasti s vyšší tloušťkou maziva ve tvaru srpku. Tento útvar prochází oblastí kontaktu rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí kontaktních povrchů. Při náhlém odlehčení kontaktu dojde ke zmenšení kontaktní oblasti a tvorbě bublin v mazivu, které zapříčiní hladovění a mírný pokles tloušťky maziva na vstupu do kontaktu. Bylo zjištěno, že vliv pulzujícího zatížení na tloušťku filmu v kontaktu klesá s rostoucí střední rychlostí kontaktních povrchů.



Obr. 9 Časová změna zatížení – BS.



Obr. 10 Interferogramy a profily mazacího filmu pro olej – BS.

Skokové zatížení při čistém valení:

Pro experiment bylo použito experimentální zařízení z obr. 5. Při prudkém nárůstu zatížení byla na vstupu do kontaktu vytvořena oblast tvaru srpku se zvýšenou tloušťkou maziva. Při zakmitnutí síly došlo k vytvoření bublin v mazivu na okraji kontaktní oblasti, což mělo za následek pokles tloušťky maziva na vstupu do kontaktu. Při opětovném nárůstu zatížení a jeho ustálení došlo ke vzniku druhé oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva.

Vliv pulzujícího zatížení na utváření filmu v kontaktu při prokluzu kontaktních ploch:

Bylo provedeno několik experimentů pro různé hodnoty poměru kluz-valení v intervalu $|\Sigma| \leq 2$, jejichž cílem bylo zjistit vliv pulzujícího zatížení na chování mazacího filmu v kontaktu. Při vyhodnocení série interferogramů nebyly zjištěny výrazné odchylky v chování mazacího filmu pro různé hodnoty poměru kluz-valení. Poměr kluz-valení je možno vyjádřit vztahem

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

kde u_D je obvodová rychlost disku ve středu kontaktu a u_B je obvodová rychlost kuličky v místě kontaktu.

Závěr:

Při náhlém nárůstu zatížení kontaktu dochází k vytvoření oblasti se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu, která se pro mazaný Hertzův kontakt nachází na okraji kontaktní oblasti a pro případ čistého valení vzniká na vstupu maziva do kontaktu. Při náhlém poklesu zatížení dochází v mazivu v okolí kontaktu k tvorbě bublin, které u experimentů pro čisté valení měly za následek hladovění a pokles tloušťky maziva na vstupu do kontaktu. Pro případ skokového zatížení kontaktu nemá prokluz kontaktních ploch významnější vliv na chování mazacího filmu.

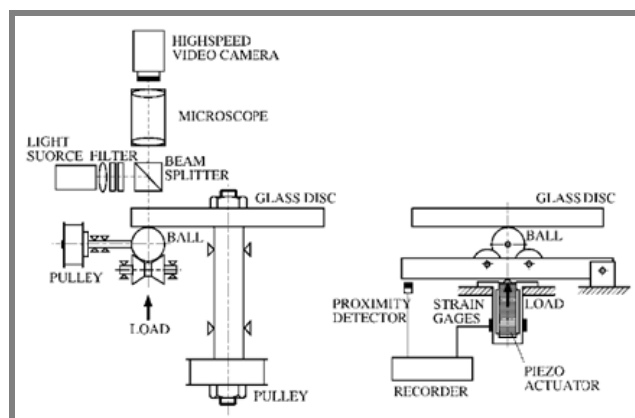
KANETA, M. – OZAKI, S. – NISHIKAWA, H. – GUO, F. Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2007, vol. 221, no. 3, s. 271–278. ISSN: 1350-6501.
Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan

Autoři článku se zabývají zkoumáním vlivu proměnného zatížení v EHD mazaném kontaktu na tvar mazacího filmu v centrální rovině kolmé na směr valení. Studovány byly případy bodového kontaktu při vytlačovaném filmu a za podmínek čistého valení. Použito bylo experimentální zařízení, kde jako budič proměnného zatížení byl použit lineární piezo-motor. Změny tvaru mazacího filmu byly zaznamenávány a vyhodnoceny pomocí metody dichromatické interferometrie, kde z nasnímaných interferogramů je možno zpětně rekonstruovat tvar mazacího filmu.

Experiment:

Článek je dělen na dvě části, přičemž jedna se věnuje zkoumání vytlačovaného filmu v EHD kontaktu a druhá část je zaměřena na EHD kontakt při čistém valení, popř. prokluzu kontaktních ploch. První část věnovaná vytlačovanému filmu se věnuje zkoumání vlivu počáteční mezery mezi kontaktními tělesy na elastickou deformaci povrchů. Spolu s tímto jevem je zkoumán i vliv rychlosti zatížení na množství maziva zachyceného v kontaktu.

Pro kontakt provozovaný za podmínek čistého valení nebo prokluzu je pozornost zaměřena na vznik a chování oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva v kontaktu. Schéma měřicí aparatury je zobrazeno na obr. 11. Jako kontaktní tělesa byla použita ocelová kulička o průměru 25,4 mm a skleněný disk s průměrem 180 mm a tloušťkou 12 mm. Na kontaktní straně disku byla nanesena polopropustná chromová vrstva. Pro experiment byl použit minerální olej s označením BS.



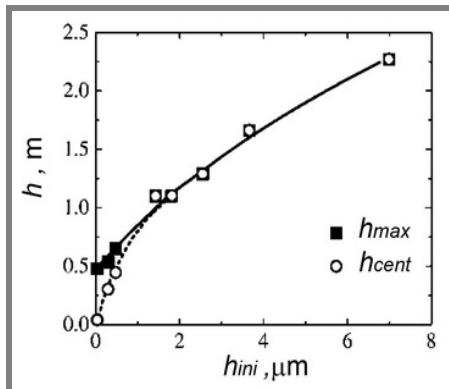
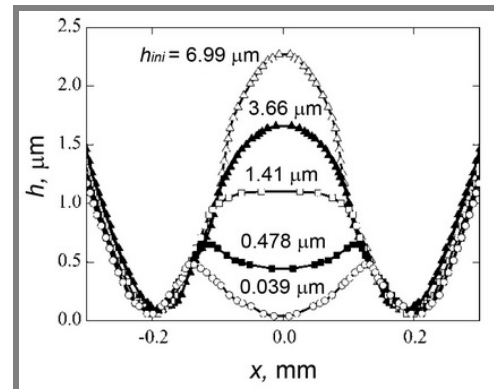
Obr. 11 Schéma měřicí aparatury.

Výsledky:

Vytlačovaný film:

Po zhotovení a vyhodnocení série měření autoři článku došli k závěru, že profil mazacího filmu je citlivý na změnu počáteční mezery mezi tělesy v kontaktu. Jak je patrné z obr. 12, je možno vysledovat závislost mezi počáteční mezerou mezi tělesy v kontaktu a maximální a centrální tloušťkou mazacího filmu. Je zřejmé, že při zmenšení počáteční mezery mezi tělesy dochází k poklesu jak hodnot maximální

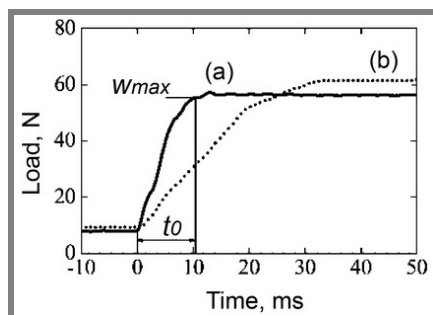
tloušťky mazacího filmu, tak hodnot centrální tloušťky filmu. V jistém bodě dochází k rozdělení průběhů sledovaných veličin a k prudkému poklesu centrální tloušťky filmu. Tento bod popisuje okamžik, kdy vlivem elastických deformací těles je oblast maximální tloušťky mazacího filmu vytěsněna z centra kontaktu na jeho okrajovou část. Podrobnější zobrazení tohoto jevu je možno pozorovat na obr. 13, který zobrazuje centrální profil mazacího filmu ve stejném okamžiku, 50 ms po zatížení, pro různé velikosti počáteční mezery mezi tělesy.

Obr. 12 Závislost mezi h a h_{ini} .Obr. 13 Vliv h_{ini} na profil mazacího filmu.

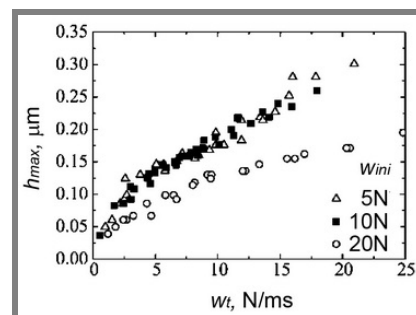
Autoři uvádí, že pro velké počáteční mezery mezi kontaktními tělesy je mazivo ve středu kontaktu „zmrazeno“ vlivem nárůstu tlaku a v okrajových částech kontaktu je dostatečný prostor pro vytlačení maziva z kontaktní oblasti. Proto dochází k vytvoření centrálního důlku, v němž se nachází „zmrazené“ mazivo. V případě, kdy je počáteční mezera malá, dochází k ztuhnutí maziva ve středu kontaktu v okamžiku zatížení a následným přiblížením těles dochází k tuhnutí maziva v okrajové části kontaktu. V tomto případě se maximální tloušťka filmu nachází v okrajové oblasti kontaktu.

Mazaný Hertzův kontakt:

Jedná se o přímý kontakt dvou těles, přičemž mazivo se nenachází uvnitř kontaktu, ale pouze v jeho okolí. Cílem bylo ověřit chování kontaktu při různých rychlostech zatěžování. Na obr. 14 jsou zobrazeny průběhy dvou zatěžujících pulzů s rozdílnou rychlostí zatěžování.



Obr. 14 Průběh zatěžujících pulzů.

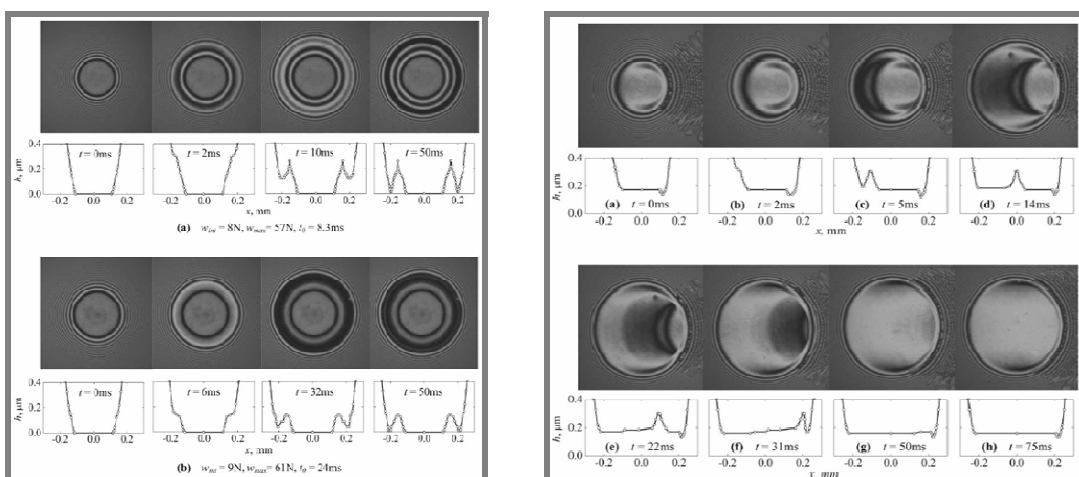
Obr. 15 Závislost h_{max} na rychlosti zatěžování.

S obr. 14 koresponduje obr. 16, který zobrazuje chování kontaktu při použití obou zatěžujících pulzů. Z obrázku je patrné, že při vyšší rychlosti zatěžování dojde k rychlému ztuhnutí maziva a jeho uzavření v okrajové části kontaktu. Při opakovaném experimentu s nižší rychlostí zatěžování má mazivo podstatně více času

k úniku a proto také množství uzavřeného filmu v kontaktu je nižší. Stejný jev je zobrazen i na obr. 15, kde je zobrazena závislost mezi rychlostí zatěžování w_t a maximální tloušťkou maziva h_{\max} uzavřeného v kontaktu. Výsledky ukazují, že maximální tloušťky mazacího filmu je dosaženo při nízké síle předzatižení kontaktu w_{ini} a vysoké rychlosti zatěžování w_t .

Proměnné zatížení při čistém valení:

Cílem experimentu bylo zjistit vliv proměnného zatížení na chování mazacího filmu uvnitř kontaktní oblasti. Na obr. 17 jsou zobrazeny interferogramy pořízené při jednom zatěžujícím pulzu. V okamžiku prudkého nárůstu zatížení dochází na vstupu maziva do kontaktu k vytvoření oblasti srpovitého tvaru. Děje se tak z důvodu stlačení maziva na vstupu do kontaktu, který má za následek jeho okamžité ztuhnutí. Takto zformovaná oblast prochází kontaktem rychlostí, srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu. Středová oblast kontaktní plochy je vlivem vysoké viskozity maziva v kontaktu téměř necitlivá na změnu zatížení.



Obr. 16 Interferogramy pro mazaný Hertzův kontakt. Obr. 17 Interferogramy pro čisté valení.

Závěr:

Vyhodnocením experimentu vytlačovaného filmu bylo zjištěno, že profil mazacího filmu je silně závislý na počáteční mezeře mezi kontaktními plochami. Pro velké hodnoty počáteční mezery mezi kontaktními plochami byla maximální tloušťka filmu nalezena ve středu kontaktu. Při snižování počáteční vzdálenosti kontaktních ploch se oblast maximální tloušťky maziva přesouvá ze středu na okraj kontaktu.

Pro případ mazaného Hertzova kontaktu je mazivo zachyceno na okraji kontaktu. Větší množství maziva je zachyceno při vyšších rychlostech změny zatížení.

V případě čistého valení dochází při skokové změně zatížení k zachycení maziva na vstupu do kontaktu. Oblast zvýšené tloušťky mazacího filmu má tvar srpku a prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu.

NISHIKAWA, H. – MIYAZAKI, H. – KANETA, M. – GUO, F. Effects of two-stage impact load on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2008, vol. 222, no. 7, s. 807–814. ISSN: 1350-6501. Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu, Japan

Odborný článek se věnuje proměnnému zatížení kontaktu a jeho vlivu na chování mazacího filmu. Autoři navazují na dříve publikovaný článek a popisují chování mazacího filmu při dvouúrovňové skokové změně zatížení.

Experiment:

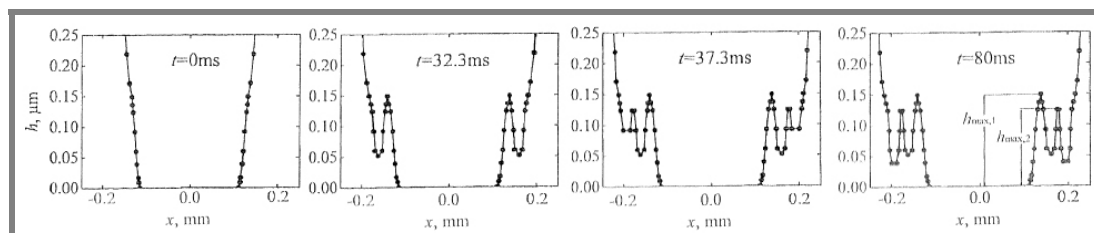
Experiment je dělen do tří částí, které se jednotlivě týkají statického mazaného Hertzova kontaktu, kvazistatického kontaktu a kontaktu při čistém valení.

Pro experiment byla použita stejná měřicí aparatura, jako u článku publikovaného v roce 2007. Schéma aparatury je zobrazeno na obr. 11. Změny tvaru mazacího filmu byly zaznamenávány vysokorychlostní digitální CMOS kamerou a snímky byly vyhodnoceny užitím dichromatické interferometrie. Pro měření byl použit minerální olej s označením BS. Experimenty byly provedeny při teplotě 20°C.

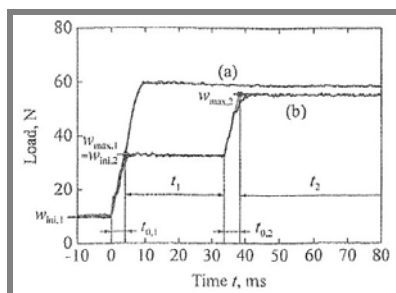
Výsledky:

Mazaný Hertzův kontakt:

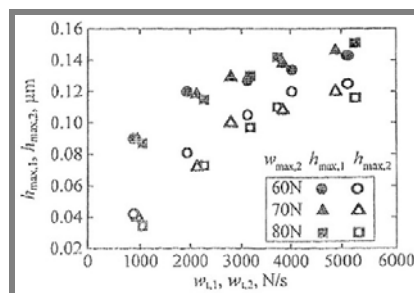
Na obr. 18 je zobrazena série profilů mazacího filmu v centrální rovině pro mazaný Hertzův kontakt. Před skokovým zatížením byl kontakt předzatížen stálou silou 10 N. Na obr. 19 je zobrazen průběh časové změny zatížení kontaktu. Z profilů je patrné, že při prvním stupni skokového zatížení kontaktu dochází k uzavření části mazacího filmu v okrajové části kontaktu. Tento jev je způsoben skokovým zvýšením viskozity maziva v těsném okolí kontaktu. Maximální tloušťka filmu uzavřená při prvním stupni skokového zatížení je $h_{\max,1}$. Stejný jev nastane i při další skokové změně zatížení, ale množství maziva uzavřeného v okrajové části kontaktu je menší. Autor tento jev vysvětluje závislostí poloměru Hertzova kontaktu na zatížení, kde poloměr kontaktní plochy je úměrný třetí odmocnině použitého zatížení. Proto při druhé změně dojde k menšímu nárůstu plochy kontaktu a tudíž



Obr. 18 Interferogramy pro mazaný Hertzův kontakt.



Obr. 19 Průběh zatěžujících pulzů.

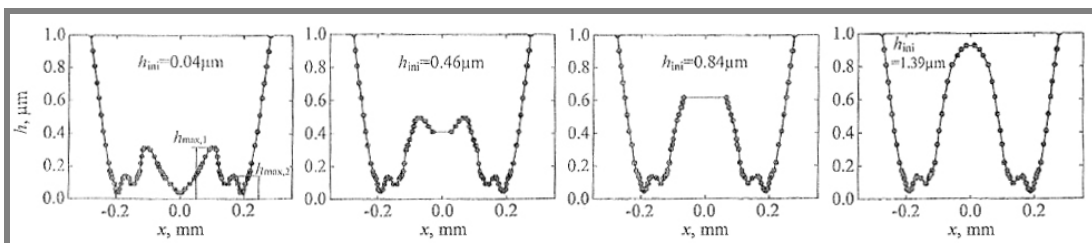


Obr. 20 Závislost h_{\max} na rychlosti zatěžování.

i k zachycení menšího množství maziva. Maximální tloušťka uzavřeného mazacího filmu při druhé změně zatížení je označena $h_{\max,2}$. Na obr. 20 je zobrazena závislost maximální tloušťky uzavřeného maziva na rychlosti zatěžování kontaktu $w_{t,1}$ a $w_{t,2}$ a maximální síle zatížení.

Vytlačovaný film:

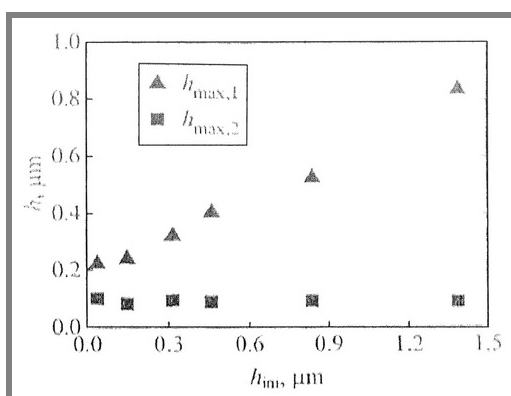
Cílem experimentu bylo posoudit vliv změny velikosti počáteční mezery mezi kontaktními tělesy při dvoustupňové skokové změně zatížení kontaktu. Na obr. 21 je zobrazena série profilů mazacího filmu v centrální rovině pro experimenty s různými počátečními mezerami pro stejný časový okamžik. Výsledky ukazují, že při zvětšování počáteční mezery dochází k přesunu maziva zachyceného v kontaktu při první skokové změně zatížení z okraje do středu kontaktu. Množství maziva a tvar mazacího filmu v okrajové části kontaktu po druhé skokové změně zatížení se téměř nemění. Na obr. 22 je vynesena závislost maximální tloušťky mazacího filmu pro různé počáteční mezery mezi kontaktními plochami.



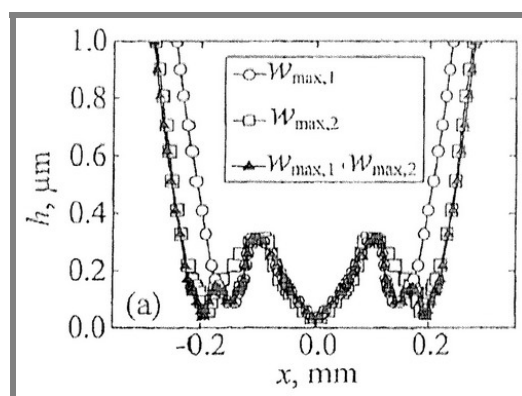
Obr. 21 Vliv počáteční mezery na tvar mazacího filmu.

Vztah mezi jednostupňovým a dvoustupňovým skokovým zatížením:

Byla provedena řada experimentů jednostupňového zatížení kontaktu s koncovými hodnotami zatížení $w_{\max,1}$ a $w_{\max,2}$. Sečtením naměřených hodnot tloušťky filmu pro obě měření byl získán graf na obr. 23. Srovnáním obr. 21 a obr. 23 je možno usoudit, že součtem hodnot tlouštěk filmu pro jednostupňové skokové zatížení je možno získat profil mazacího filmu stejný, jaký by byl získán při dvoustupňovém zatížení kontaktu s odpovídajícími hodnotami zatížení a rychlostí zatěžování.



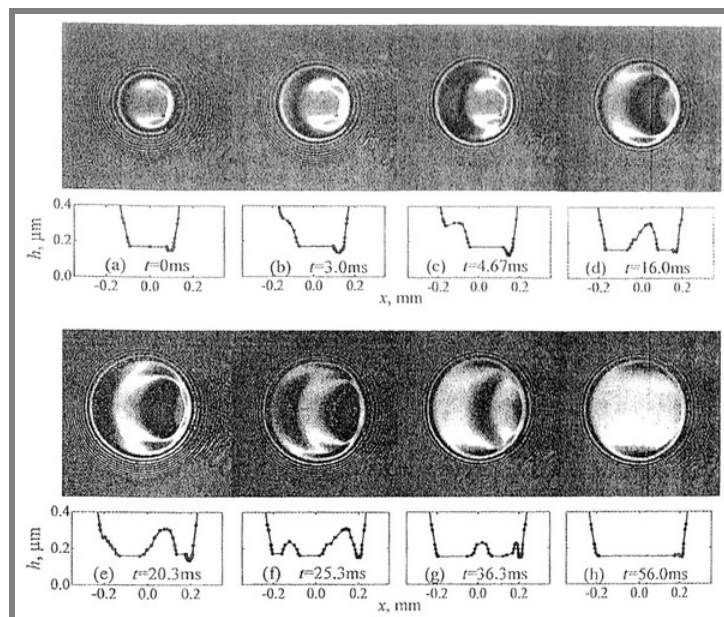
Obr. 22 Závislost h_{\max} na rychlosti zatěžování.



Obr. 23 Součet hodnot tlouštěk filmu.

Proměnné zatížení při čistém valení:

Vliv dvoustupňového skokového zatížení na mazací film byl zkoumán i pro případ čistého valení. Na obr. 24 je zobrazena série interferogramů spolu s příslušnými profily filmu v centrální rovině ve směru valení, které popisují chování mazacího filmu. Z obrázku je patrné, že při první změně zatížení dojde na vstupu maziva do kontaktu k vytvoření oblasti ve tvaru srpku se zvýšenou tloušťkou filmu. V okamžiku druhého zvýšení zatížení došlo opět k zachycení maziva na vstupu do kontaktu. Došlo také k mírnému přiblížení kontaktních ploch bez ovlivnění tvaru filmu. Tento jev je způsoben vysokou viskozitou maziva v kontaktu, která je zapříčiněna vysokým tlakem. Oblasti zvýšené tloušťky mazacího filmu prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu.



Obr. 24 Interferogramy pro čisté valení.

Závěr:

Při použití dvoustupňového skokového zatížení EHD kontaktu dochází k vytvoření dvou oblastí uvnitř kontaktu se zvýšenou tloušťkou maziva. Tloušťka uzavřeného filmu roste s rostoucí rychlostí zatížení. Při zkoumání vytlačovaného filmu bylo zjištěno, že tvar mazacího filmu v centrální rovině je silně závislý na počáteční mezeře mezi kontaktními tělesy. S narůstající velikostí počáteční mezery dochází k posuvu oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva směrem do středu kontaktu a dochází ke zvýšení množství zadrženého maziva uvnitř kontaktu. Pro případ čistého valení dochází při skokovém zvýšení zatížení k vytvoření oblasti se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu ve tvaru srpku, která prochází plochou kontaktu rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu.

3.2 Proměnná rychlost při stálém zatížení

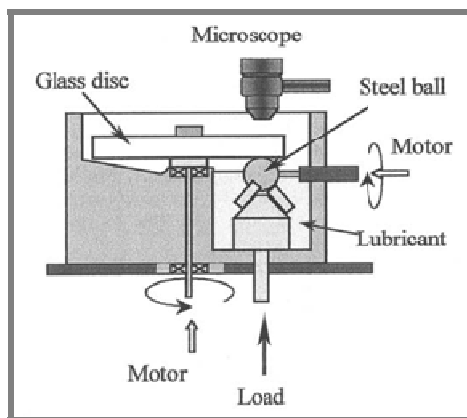
GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. The influence of lubricant upon EHD film behavior during sudden halting of motion. *Tribology Transactions*, 2000, vol. 43, no. 4, s. 731–739. ISSN: 1040-2004.

GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration: Part I - Experimental results. *Journal of tribology-transactions of the ASME*, 2001, vol. 123, no. 2, s. 254–261. ISSN: 0742-4787.
Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, United Kingdom

Články se zabývají studiem chování mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách, jakými jsou změna rychlosti třecích povrchů v čase a náhlé zastavení pohybu třecích ploch.

Experiment:

Jako kontaktní tělesa byla použita ocelová kulička a skleněný disk. Schéma experimentální aparatury je zobrazeno na obr. 25. Experimenty byly prováděny pro čistý prokluz a čisté valení kontaktních ploch. Pro případ čistého prokluzu se otáčela pouze ocelová kulička, která má nižší setrvačnost oproti disku a díky tomu lépe reaguje na změnu rychlosti otáčení. Kontakt byl snímán vysokorychlostní kamerou a snímky byly vyhodnoceny užitím optické interferometrie. V průběhu experimentu byl kontakt zatížen stálou silou 20 N. Experimenty byly provedeny při teplotách maziva 50° C a 70° C.



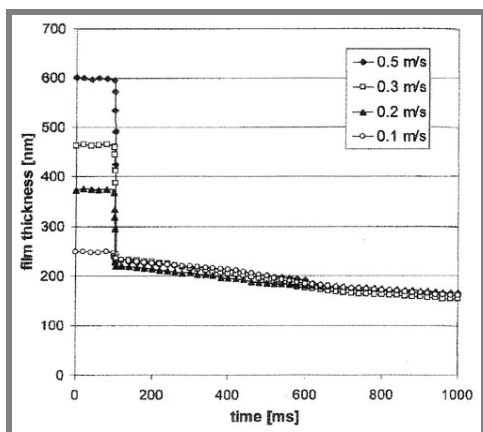
Obr. 25 Schéma experimentální aparatury.

Výsledky:

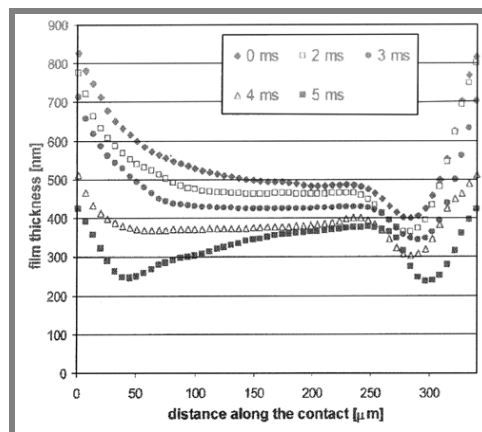
Náhlé zastavení třecích povrchů:

Bylo zjištěno, že při náhlém zastavení třecích ploch dochází k poklesu tloušťky mazacího filmu ve dvou stupních. Jak je patrné z obr. 26, tak pro vyšší hodnoty střední rychlosti třecích povrchů dohází k prudkému poklesu tloušťky maziva téměř okamžitě po jejich zastavení a následném ustálení na dané hodnotě. Druhý stupeň je specifický pomalým snižováním tloušťky filmu vlivem vytlačování maziva z centra kontaktu. Naopak při nižších hodnotách střední rychlosti třecích povrchů nebyl pozorován prudký pokles tloušťky, pouze pozvolný úbytek maziva v kontaktu.

Z obr. 26 je taky zřejmé, že tloušťka filmu na konci prvního stupně úbytku maziva v kontaktu je nezávislá na počáteční střední rychlosti třecích povrchů. Na obr. 27 je zobrazen profil mazacího filmu v centrální rovině ve směru valení. Je zřejmé, že v první fázi poklesu tloušťky filmu dochází k úbytku maziva rovnoměrně v celé ploše kontaktu. Naopak v druhé fázi pozvolného úbytku maziva dochází k snižování tloušťky filmu především v okrajových částech kontaktu a dochází k pozvolnému vytlačování maziva s vysokou viskozitou ze středu kontaktu.



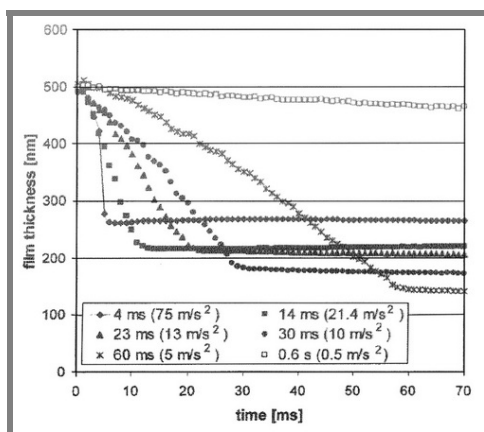
Obr. 26 Časová změna tloušťky mazacího filmu.



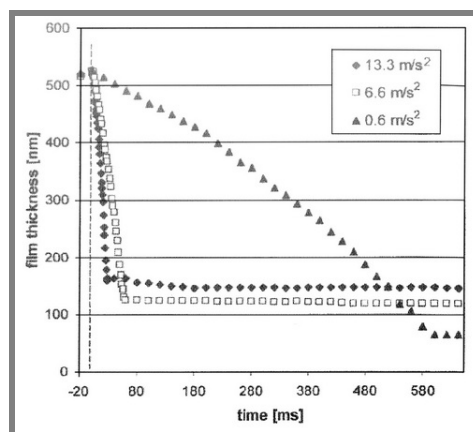
Obr. 27 Časová změna profilu mazacího filmu.

Řízení zpomalování ploch – čistý prokluz:

Při experimentu pro čistý prokluz byla rychlost otáčení kuličky řízena počítačem. Na obr. 28 jsou zobrazeny výsledky šesti měření pro různé hodnoty zpomalení. Je zřejmé, že k ustálení tloušťky mazacího filmu na vyšších hodnotách dochází při velkých hodnotách zpomalení. Výsledkem experimentu bylo také zjištění, že naměřené hodnoty tloušťky mazacího filmu jsou vyšší než ty, které byly získány výpočtem za použití rovnic pro stacionární EHD.



Obr. 28 Změna tloušťky filmu - různá zpomalení.



Obr. 29 Změna tloušťky filmu - různá zpomalení.

Řízené zpomalování ploch – čisté valení:

Hlavním problémem při experimentu bylo zajištění zastavení obou třecích povrchů v jeden okamžik. Vzhledem k podstatně vyššímu momentu setrvačnosti disku ve srovnání s momentem setrvačnosti kuličky byl nejkratší časový interval pro zastavení 30 ms. Na obr. 29 jsou zobrazeny výsledky měření pro tři různé hodnoty zpomalení. Opět je patrné, že k ustálení hodnoty tloušťky filmu na vyšších hodnotách dochází při vyšších hodnotách zpomalení. Shodně jako při předchozím experimentu byly naměřené hodnoty tloušťky filmu vyšší, než hodnoty získané teoreticky na základě rovnic pro stacionární EHD.

Závěr:

Vyhodnocením experimentů se prokázalo, že při zastavování třecích povrchů dochází k úniku maziva v kontaktu ve dvou fázích. V první dochází k velice prudkému poklesu tloušťky filmu až do okamžiku, kdy střední hodnota rychlosti maziva na vstupu do kontaktu poklesne pod hraniční hodnotu $0,002 \text{ ms}^{-1}$. V průběhu první fáze poklesu tloušťky mazacího filmu zůstává profil filmu takřka nezměněn. Při poklesu hodnoty střední rychlosti pod hranici $0,002 \text{ ms}^{-1}$ dochází k poklesu tloušťky filmu v okrajové oblasti kontaktu a k uzavření maziva v kontaktu. V druhé fázi dochází k pozvolnému vytlačování maziva ze středu kontaktu.

Při řízeném zpomalování kontaktních ploch je hodnota tloušťky mazacího filmu na konci první fáze silně závislá na hodnotě zpomalení. Pro velké hodnoty zpomalení je tloušťka filmu v kontaktu na konci první fáze vyšší, naopak pro nízké hodnoty zpomalení se tloušťka mazacího filmu v kontaktu blíží hodnotám získaným výpočtem pro stacionární EHD.

GLOVNEA, R.P., – SPIKES, H.A. The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamic film thickness. In *Tribology Research: From model experiment to industrial problem, Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. s. 485–493. ISBN: 04-4450-581-4.

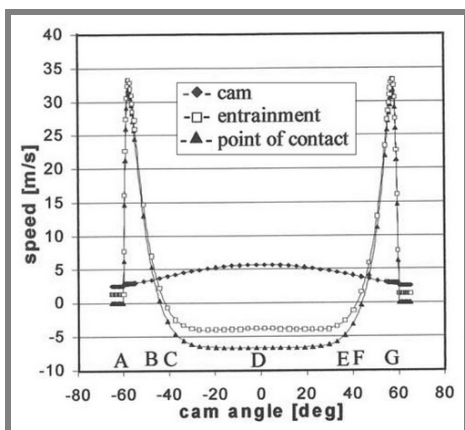
Imperial College of Science, London, United Kingdom

Článek pojednává o experimentu, při kterém se autoři snaží objasnit chování mazacího filmu v kontaktu mezi vačkou a zdvihátkem spalovacího motoru. Autoři článku zanesli do experimentu časově proměnný parametr rychlosti třecích povrchů. Pro řízení rychlosti otáčení kuličky bylo použito schéma, které zajišťovalo průběh střední rychlosti třecích povrchů podobný průběhu rychlosti kontaktního bodu v systému vačka zdvihátko. Účelem článku bylo zhodnotit vliv časově proměnné rychlosti o specifickém průběhu na tloušťku mazacího filmu. Výsledky naměřených hodnot byly srovnány s vypočtenými hodnotami pro EHD kontakt při ustálených provozních podmínkách.

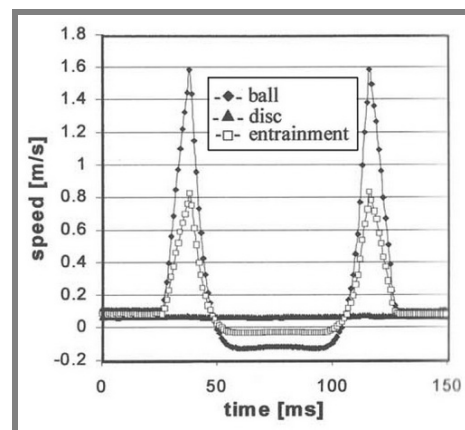
Experiment:

Pro realizaci experimentu bylo použito experimentální zařízení, jehož schematické zobrazení je uvedeno na obr. 25. Kontakt je realizován mezi ocelovou kuličkou o průměru 19 mm a skleněným diskem o průměru 100 mm a tloušťce 10 mm. Kontaktní strana disku byla opatřena polopropustnou chromovou vrstvou a na tuto je nanášena vrstva křemíku. Změny tloušťky mazacího filmu byly zaznamenávány vysokorychlostní kamerou s max. frekvencí snímání 1000 snímků za sekundu. Pro vyhodnocení snímků byla užita optická interferometrie, která umožňuje měřit tloušťku filmu menší než 5 nm.

V průběhu měření bylo zatížení v kontaktu neměnné. Disk i kulička byly nezávisle poháněny servomotory. Proměnná rychlost v kontaktu byla realizována pomocí změny rychlosti otáčení ocelové kuličky, jejíž setrvačnost je mnohem menší než setrvačnost mohutnějšího disku.



Obr. 30 Ideální průběh rychlostí při otáčení vačky.



Obr. 31 Průběhy rychlostí použité v experimentu.

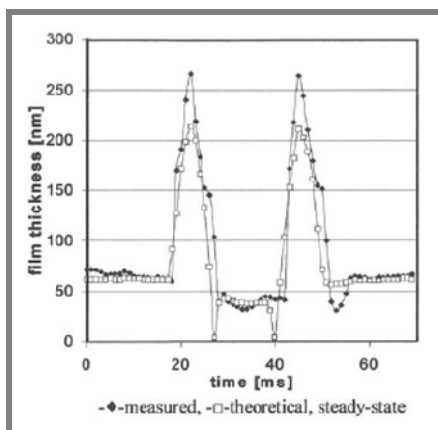
V experimentu byla uvažována vačka, jejíž tvar je popsán polynomem čtvrtého stupně. Změna otáček, použitá v experimentu, byla volena tak, aby průběh rychlosti kontaktního bodu mezi vačkou a zdvihátkem byl podobný průběhu střední rychlosti kuličky s diskem. Grafické znázornění průběhů rychlostí na vačce jsou

zobrazeny na obr. 30. Bod A označuje místo, kde bok vačky přichází do kontaktu se zdvihátkem. Bod C značí okamžik, kdy střední rychlost maziva na vstupu do kontaktu protíná nulovou hranici a přechází do záporných hodnot. V bodě D je v kontaktu se zdvihátkem vrchol vačky. Střední rychlost a rychlost jednotlivých prvků experimentálního řetězce použité při experimentu jsou zobrazeny na obr. 31.

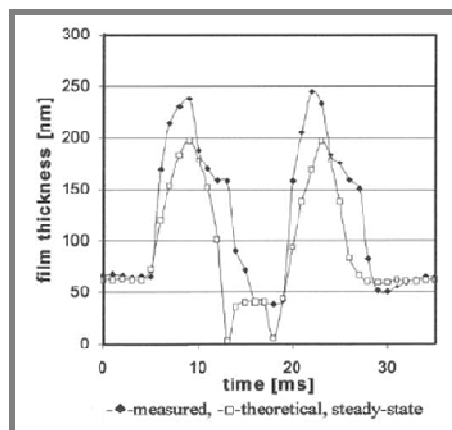
V zobrazeném průběhu rychlostí jsou dva významné úkazy. Jedním z nich je nulová hodnota střední rychlosti maziva na vstupu do kontaktu nacházející se v bodech C a E. Druhým zmiňovaným úkazem je ostrý nárůst a náhlý pokles střední rychlosti v době dotyku boku vačky se zdvihátkem. Vliv těchto jevů je také předmětem zkoumání zmíněného článku.

Výsledky:

V rámci experimentu byla změřena střední tloušťka mazacího filmu v kontaktu pro různé doby trvání cyklu. Na obr. 32 a obr. 33 je zobrazen průběh změny střední tloušťky filmu v kontaktu pro cykly o délce trvání 70 ms a 35 ms.



Obr. 32 Střední tloušťka maziva pro 70 ms cykl.



Obr. 33 Střední tloušťka maziva pro 35ms cykl.

Z obrázků je patrné, že při prudkém nárůstu střední rychlosti, což odpovídá kontaktu boku vačky se zdvihátkem, hodnoty střední tloušťky filmu jsou cca o 20% větší než hodnoty teoretické. Bod maximální střední tloušťky mazacího filmu odpovídá maximální hodnotě střední rychlosti.

V okamžiku prvního průchodu střední rychlosti přes nulovou hranici, viz obr. 30 bod C, dochází k prudkému poklesu tloušťky mazacího filmu. V tomto bodě se výsledky získané měřením a teoretickým výpočtem při ustálených podmínkách značně liší. Zatím co při teoretickém výpočtu tloušťka filmu dosáhne téměř své nulové hodnoty, tak při obou měřeních došlo v tomto bodě k ustálení střední tloušťky filmu na hodnotě cca 150 nm. Tento jev přisoudil autor článku vlivu efektu vytlačovaného filmu, který vznikne při prudkém zpomalení.

V okamžiku druhého průchodu střední rychlosti přes nulovou hranici, viz obr. 30 bod E, nabývá hodnota střední tloušťky mazacího filmu ve všech provedených měřeních své minimální hodnoty. Stále však jsou tyto hodnoty několikanásobně větší, než hodnoty vypočtené při ustálených podmínkách.

Závěr:

Po vyhodnocení naměřených výsledků se prokázalo, že časově proměnná rychlost třecích povrchů má značný vliv na utváření a chování mazacího filmu v kontaktu.

Pokud je v kontaktu dostatečně tlustá vrstva mazacího filmu před prudkým poklesem střední rychlosti, tak v okamžiku průchodu rychlosti přes nulovou hranici dojde vlivem vysoké hustoty maziva k jeho zadržení v kontaktu. Díky tomuto efektu jsou v této kritické fázi kontaktní tělesa oddělena souvislou vrstvou maziva.

Nejmenší tloušťka mazacího filmu byla naměřena při druhém průchodu střední rychlosti skrze nulovou hranici. I v tomto případě byla hodnota tloušťky mazacího filmu dostatečná k tomu, aby spolehlivě oddělila kontaktní plochy.

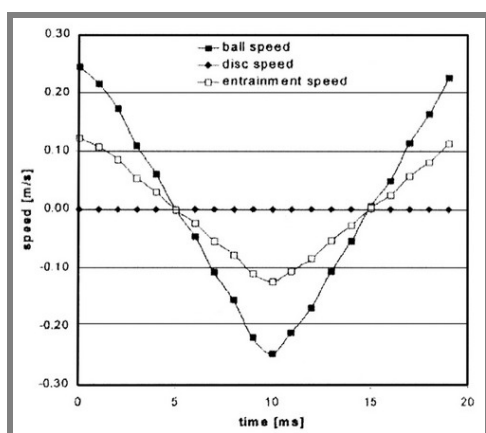
GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. Behavior of EHD films during reversal of entrainment in cyclically accelerated/decelerated motion. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, no. 2, s. 177–184. ISSN: 1040-2004.

Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, United Kingdom

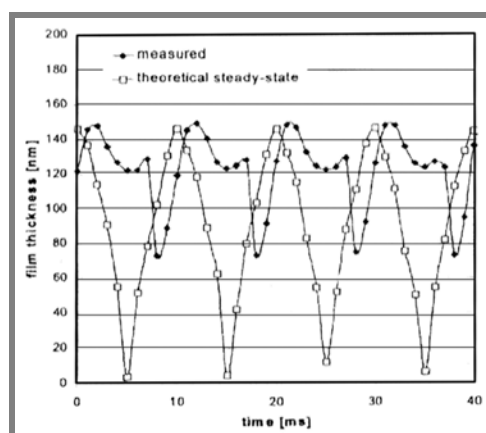
Článek popisuje experimentální studii týkající se reverzace třecích povrchů v EHD mazaném kontaktu. Pozornost je pak zvláště zaměřena na okamžiky, kdy střední rychlost maziva na vstupu do kontaktu je rovna nule. V tomto okamžiku, podle teorie pro stacionární EHD kontakt, by mělo dojít k poklesu tloušťky mazacího filmu na nulovou hodnotu.

Experiment:

Pro experiment byla použita obvyklá sestava kontaktních těles představovaná skleněným diskem a ocelovou kuličkou. Pro snímání kontaktu byla použita vysokorychlostní kamera s frekvencí snímání 1000 Hz. Při experimentu byl použit olej s označením PAO. Byla použita dvě schémata pohybu kontaktních ploch. V prvním případě se jednalo o čistý prokluz, kdy byl disk fixován a otáčela se pouze kulička, jejíž obvodová rychlost oscilovala v intervalu $\pm 0,25 \text{ ms}^{-1}$. V druhém případě se skleněný disk otáčel konstantní rychlostí $0,125 \text{ ms}^{-1}$ a kulička v průběhu měření zrychlovala a zpomalovala, přičemž hodnota obvodové rychlosti oscilovala mezi hodnotami $0,125 \text{ ms}^{-1}$ a $-0,375 \text{ ms}^{-1}$. Cílem bylo dosažení stejné střední rychlosti maziva na vstupu do kontaktu pro různé hodnoty poměru kluz-valení kontaktních ploch.



Obr. 34 Časová změna rychlosti třecích povrchů – 50 Hz.



Obr. 35 Časová změna tloušťky filmu – 50 Hz.

Výsledky:

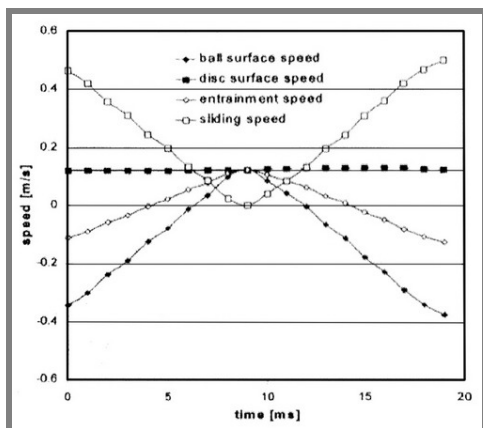
Reverzace za čistého prokluzu:

Experiment pro čistý prokluz byl proveden pro různé frekvence změny smyslu otáčení kuličky. Na obr. 34 je zobrazen průběh rychlostí obou kontaktních ploch v čase spolu se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu pro cyklus s frekvencí 50 Hz. Z obrázku je zřejmé, že v průběhu cyklu dochází dvakrát k průchodu střední rychlosti přes nulovou hranici. Na obr. 35 je zachycen průběh změny centrální tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro cyklus s frekvencí změny smyslu otáčení kuličky 50 Hz. Minimální teoretická hodnota tloušťky filmu udává pozici nulové střední rychlosti v kontaktu. Z grafu je zřejmé, že experimentálně zjištěná tloušťka filmu v bodě nulové střední rychlosti není rovna nule. Tento efekt je

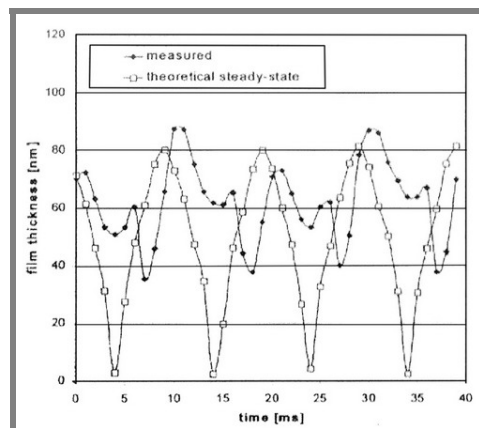
způsoben mazivem s vysokou viskozitou nacházející se v kontaktu, které je pozvolna z kontaktu vytlačováno. K dosažení minimální tloušťky filmu dochází v okamžiku reverzace, kdy na vstupu do kontaktu není dostatek maziva.

Reverzace pro oscilující rychlost kuličky a konstantní rychlost disku:

Grafické znázornění změny rychlosti třecích povrchů v čase pro cyklus s frekvencí 50 Hz je zobrazeno na obr. 36. Pro tento časový průběh rychlostí třecích povrchů se nachází bod nulové střední rychlosti v okamžiku, kdy jsou oba povrchy v pohybu se stejnou hodnotou rychlosti, ale v opačných směrech. Odpovídající centrální tloušťka mazacího filmu je zobrazena na obr. 37. Srovnáním průběhů změn z obr. 35 a obr. 37 je možno konstatovat, že naměřené hodnoty jsou téměř srovnatelné v obou experimentech. Hlavní rozdíl je nesymetričnost změny tloušťky v průběhu cyklu v okamžicích nulové střední rychlosti v obr. 37. Nižší tloušťka filmu odpovídá části cyklu, při které obě kontaktní plochy zpomalují, a vyšší tloušťka cyklu byla naměřena při zrychlování třecích ploch. Autor vysvětluje tento jev snížením efektivní viskozity maziva vlivem tepla vzniklého při prokluzu kontaktních ploch.



Obr. 36 Časová změna rychlosti třecích povrchů – 50 Hz.



Obr. 37 Časová změna tloušťky filmu – 50 Hz.

Závěr:

Chování mazacího filmu v kontaktu závisí na množství maziva v kontaktu v okamžiku nulové střední rychlosti a na frekvenci změny směru otáčení třecích ploch. Při nízkých frekvencích je chování mazacího filmu v kontaktu podobné tomu, které je možno teoreticky určit pro ustálené provozní podmínky. Při nízkých frekvencích nedochází k výraznějšímu projevu efektu vytlačovaného filmu.

Prudký pokles střední tloušťky mazacího filmu byl pozorován okamžik po průchodu střední rychlosti třecích povrchů skrze nulovou hranici. Opoždění oproti teoretickým hodnotám za ustálených podmínek je způsobeno přítomností maziva s vysokou viskozitou uvnitř kontaktu.

GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. The influence of lubricant properties on EHD film thickness in variable speed conditions. In *Transient Processes in Tribology, Proc. 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004. s. 401–408. ISBN: 04-4451-706-5. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, United Kingdom

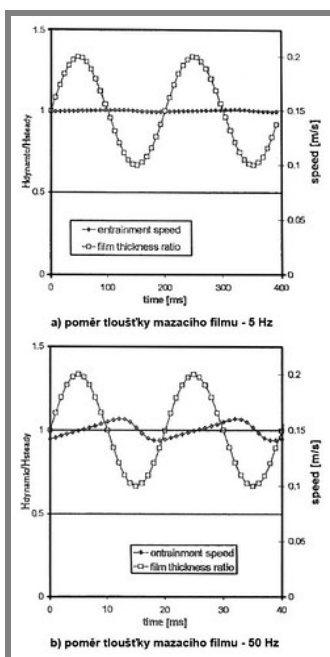
Článek se věnuje experimentálnímu studiu rozdílného chování maziv s nízkým a vysokým tlakově-viskózním koeficientem při nestacionárních provozních podmínkách. Nestacionárními podmínkami je zde myšlena časově proměnná střední rychlost maziva na vstupu do kontaktu.

Experiment:

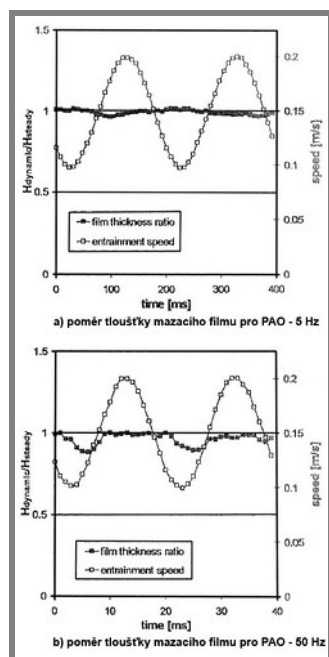
Při experimentu jako kontaktní tělesa byla použita ocelová kulička o průměru 19 mm a safírový disk s průměrem 100 mm. Na kontaktní stranu disku byla nanášena křemíková a polopropustná chromová vrstva. Kulička i disk byly řízeny nezávisle, přičemž v čase poměná byla pouze rychlost kuličky s frekvencí 5 Hz a 50 Hz. Změna tvaru filmu byla zaznamenána vysokorychlostní kamerou a snímky z kamery byly vyhodnoceny za použití techniky optické interferometrie. Pro experimenty byly použity dva druhy maziv PAO a 5P4E, které mají podobnou závislost viskozity na teplotě, ale odlišné tlakově-viskózní koeficienty.

Výsledky:

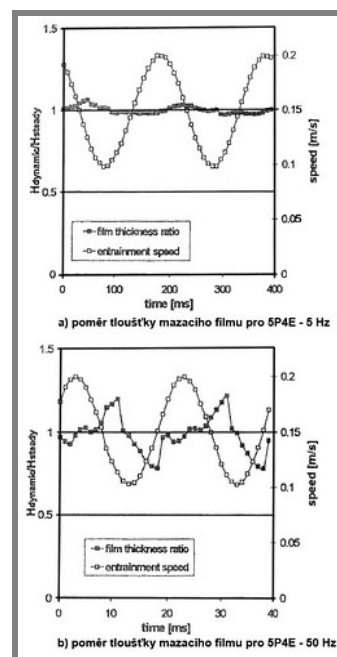
Cílem experimentu bylo srovnat chování dvou typů maziv v kontaktu s podobnou závislostí hustoty na teplotě, ale s odlišnou hodnotou tlakově-viskózního koeficientu. Naměřené hodnoty jsou srovnávány s hodnotou tloušťky mazacího filmu vypočtenou pro stacionární EHD. V grafech je pak vyneseno podíl hodnoty naměřené a teoretické vypočtené pro stacionární EHD.



Obr. 38 Teoretické hodnoty.



Obr. 39 Mazivo PAO.



Obr. 40 Mazivo 5P4E.

Na obr. 38 je zobrazen průběh střední rychlosti pro frekvenci změny 5 Hz a 50 Hz spolu s podílem tloušťky mazacího filmu, vypočteného dle Hamrock-Dowsonových rovnic pro okamžitou hodnotu střední rychlosti, vzhledem k tloušťce filmu zjištěné pro stacionární EHD. V případě pro 5 Hz je patrné, že poměr tloušťky filmu je téměř roven jedné. Pro případ změny střední rychlosti s frekvencí 50 Hz je kolísání poměru tloušťky filmu markantnější a je patrný nárůst tloušťky filmu v okamžiku snižování střední rychlosti. Tento jev může být způsoben zachycením maziva s vysokou viskozitou uvnitř kontaktu.

Na obr. 39 jsou zobrazeny výsledky experimentu pro olej PAO. Pro případ frekvence změny střední rychlosti 5 Hz je patrný mírný pokles tloušťky mazacího filmu při zrychlení a naopak nárůst tloušťky mazacího filmu při zpomalení. Pro frekvenci změny střední rychlosti 50 Hz byl pozorován významný pokles naměřené tloušťky filmu vzhledem k teoretickým hodnotám pro stacionární EHD. Pokles nastává v okamžiku, kdy střední rychlost dosáhne své minimální hodnoty a k navrácení na původní hodnotu dochází při zrychlení.

Chování maziva 5P4E v kontaktu za podmínek proměnné střední rychlosti je zobrazeno na obr. 40. Pro frekvenci změny střední rychlosti 5 Hz byly pozorovány jen malé změny tloušťky mazacího filmu, kolísající kolem hodnoty tloušťky filmu pro stacionární EHD. Pro frekvenci 50 Hz dochází k značnému odchýlení naměřených hodnot od hodnoty tloušťky filmu při stacionárních podmínkách, kde při zrychlení dochází k úbytku maziva v kontaktu a při zpomalení naopak tloušťka filmu roste.

Závěr:

Byl proveden experiment zkoumající chování dvou typů maziv s podobnou závislostí viskozity na teplotě, ale s rozdílnou hodnotou tlakově-viskózního koeficientu. Pro nízké frekvence změny střední rychlosti nebyly pozorovány výrazné odchylky tloušťky mazacího filmu od hodnot vypočtených pro stacionární EHD. Při vyšších frekvencích změny střední rychlosti se výrazněji projevilo odchýlení naměřených hodnot od teoretických, zvláště pak pro mazivo s vyšším tlakově-viskózním koeficientem. Toto chování je z části způsobeno mazivem s vysokou viskozitou, které je při snižování rychlosti kontaktních ploch uzavřeno v kontaktu.

SUGIMURA, J. – JONES, W.R. – SPIKES, H.A. EHD film thickness in non-steady state contacts. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1998, vol. 120, no. 3, s. 442–452. ISSN: 0742-4787.

SUGIMURA, J. Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 2002, vol. 47, no. 10, s. 752–757. ISSN: 0915-1168.

Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, Japan

V článcích se autoři snaží objasnit chování mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách, které konkrétně zahrnují situaci proměnné rychlosti třecích povrchů, náhlého zastavení a reverzace třecích povrchů.

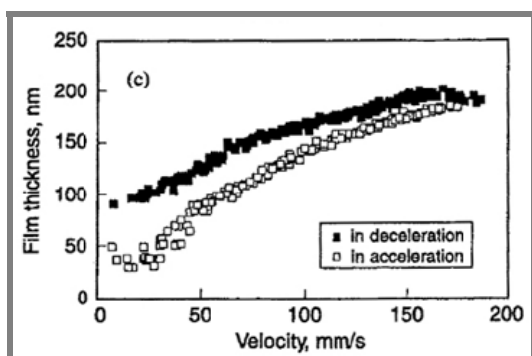
Experiment:

Experiment byl prováděn na přístroji, kde byl kontakt simulován mezi ocelovou kuličkou, která se částečně brodila v mazivu, a skleněným diskem. Kontakt byl v průběhu měření zatížen konstantní silou vyvozenou závažím. Pro experimenty byly použity minerální a syntetické oleje při pokojové teplotě. Pro sledování změn tvaru mazacího filmu v průběhu experimentu byla použita vysokorychlostní video kamera, která snímala oblast kontaktu s frekvencí 50 Hz. Pro zjištění hodnot tloušťky mazacího filmu byla použita autory navržená metoda SLIM.

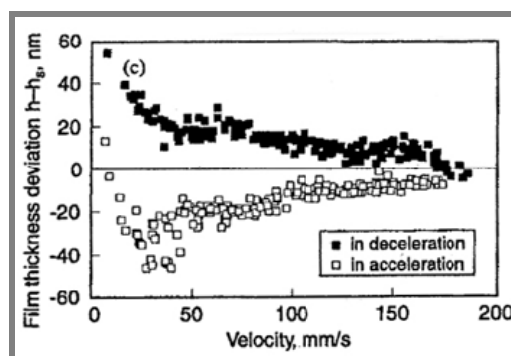
Výsledky:

Střídavě zrychlený a zpomalený pohyb:

Změna střední rychlosti třecích povrchů byla řízena změnou rychlosti skleněného disku. Na obr. 41 je zobrazena závislost střední rychlosti třecích povrchů vzhledem k tloušťce mazacího filmu pro cyklus se změnou rychlostí třecích povrchů s frekvencí 2 Hz. Je patrné, že při zvýšení rychlosti třecích povrchů dochází k nárůstu tloušťky mazacího filmu a při snižování rychlosti třecích povrchů dochází následovně k jeho poklesu. Tato však neklesne pod hodnoty naměřené při zvyšování rychlosti třecích povrchů. Na obr. 41 a obr. 42 jsou zobrazeny shodné naměřené výsledky, přičemž na obr. 42 jsou tyto vztaženy k hodnotě h_s reprezentující tloušťku mazacího filmu v kontaktu při stacionárních podmínkách.



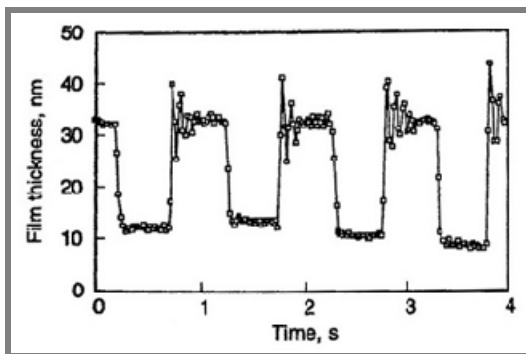
Obr. 41 Závislost tloušťky filmu na rychlosti povrchů.



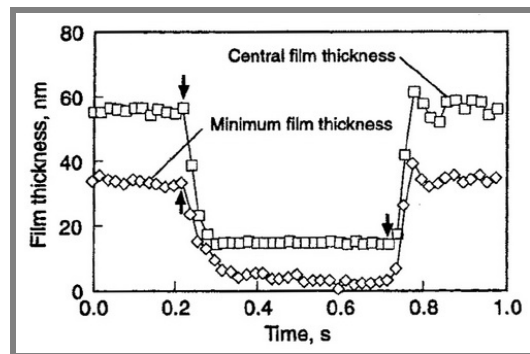
Obr. 42 Srovnání tloušťky filmu s hodnotou h_s .

Jednosměrný stop – start pohyb:

Z obr. 43 je patrné, že po zastavení disku dochází k náhlému poklesu centrální tloušťky mazacího filmu mezi třecími povrchy. V okamžiku nulové rychlosti však nedochází k poklesu tloušťky filmu na nulovou hodnotu, nýbrž se ustálí na hodnotě cca 10 nm a v čase pozvolně klesá. Po znovu roztočení disku dochází k okamžitému nárůstu tloušťky filmu spojené s počáteční oscilací a posléze ustálením na hodnotě cca 33 nm. V později publikované práci autoři přisuzují oscilaci tloušťky mazacího filmu rozběhu motoru, který při startu na okamžik překročí předvolenou hodnotu otáček a při následném zpomalení na konstantní hodnotu způsobí vibrace a tím ovlivní tloušťku mazacího filmu. Na obr. 44 je zobrazen časový průběh změny střední a minimální tloušťky mazacího filmu v kontaktu.



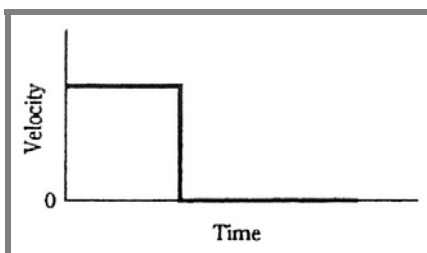
Obr. 43 Profil filmu pro stop-start pohyb.



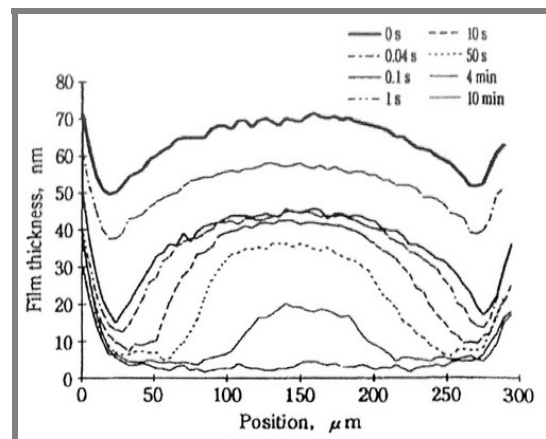
Obr. 44 Časová změna střední a min. tloušťky filmu

Náhlé zastavení třecích ploch:

Výsledky chování mazacího filmu v kontaktu při náhlém zastavení třecích ploch jsou publikovány v novějším z uvedených odborných článků. Na obr. 45 je zobrazen ideální průběh rychlosti v čase pro daný experiment.



Obr. 45 Časová změna rychlosti třecích povrchů



Obr. 46 Časová změna profilu mazacího filmu

Pro danou změnu rychlosti jsou na obr. 46 zobrazeny profily mazacího filmu v rovině kolmé na směr valení v různých časových intervalech od okamžiku skokové změny rychlosti třecích povrchů. Snižování tloušťky mazacího filmu je možno rozdělit do dvou fází. V první fázi dochází k rovnoměrnému snižování tloušťky mazacího filmu napříč celým kontaktem. Druhá fáze se vyznačuje stabilizací tloušťky maziva na okraji kontaktu a vytlačováním maziva z jeho středu.

Závěr:

V průběhu experimentu byly změny v kontaktu snímány s frekvencí 50 Hz. Kontakt byl osvětlen zdrojem bílého světla a pro zpětnou rekonstrukci tvaru mazacího filmu byla v obou pracích použita metoda SLIM.

V prvním experimentu, zkoumajícím střídavě zrychlený-zpomalený pohyb, bylo zjištěno, že tloušťka mazacího filmu při zrychlování pohybu třecích povrchů je nižší než při jejich zpomalování viz obr. 41. Při snížení frekvence změny smyslu otáčení kontaktních ploch dochází k zmenšení rozdílů v tloušťkách filmu pro stejnou rychlost.

Při jednosměrném stop-start pohybu dochází při zastavení třecích povrchů k prudkému poklesu tloušťky mazacího filmu, nikoli však na nulovou hodnotu, jak by se dalo očekávat dle teorie pro stacionární EHD mazání.

Při náhlém zastavení ploch dochází v první fázi k úniku maziva v celé oblasti kontaktu. V druhé fázi dochází k ustálení tloušťky mazacího filmu v okrajových částech kontaktu a pokračuje vytlačování maziva ze středu kontaktu.

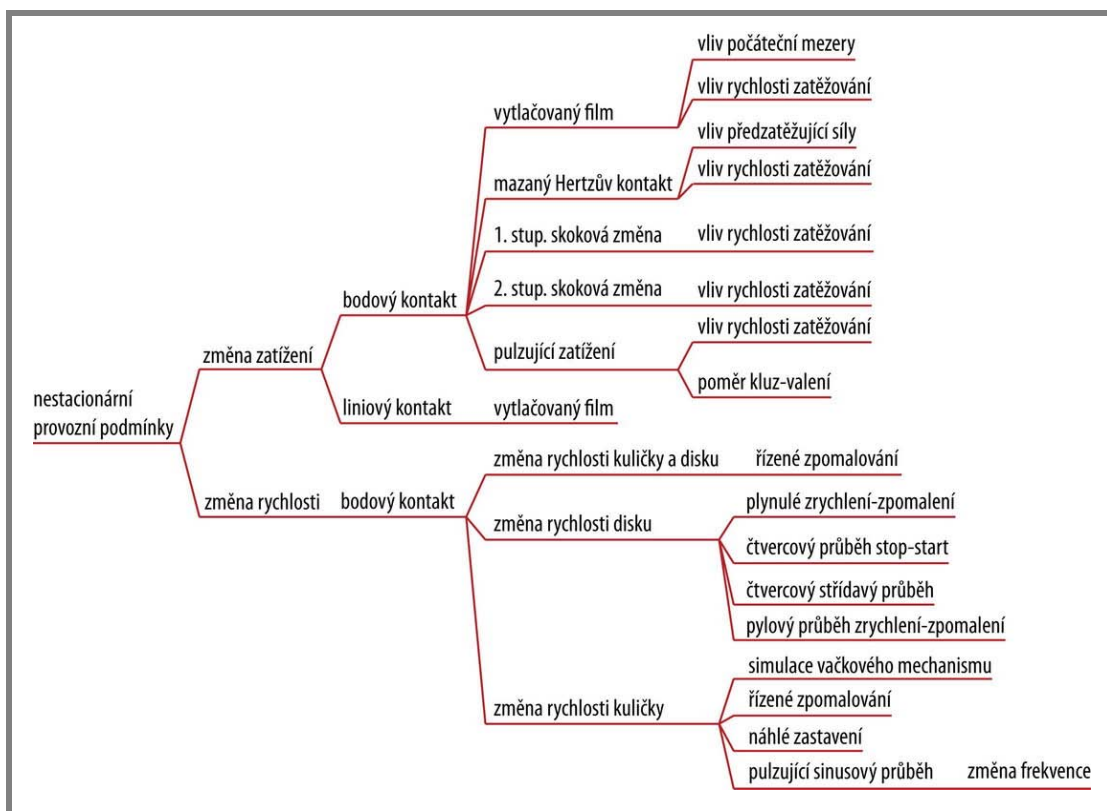
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Z historického přehledu publikovaných prací zabývajících se chováním maziva v kontaktu při nestacionárních provozních podmínkách je patrné, že vlivy proměnné rychlosti a zatížení třecích povrchů byly vždy studovány odděleně. Zprvu se jednalo o studie čistě numerické. Postupem času vyvstala potřeba srovnat výsledky získané numericky s hodnotami experimentálními. Jednalo se o experimenty simulující EHD kontakt při nestacionárních podmínkách, ale vzhledem k složitosti takových tribologických uzlů byly realizovány experimenty zjednodušené, které braly v potaz pouze jeden časově proměnný parametr. Jednalo se o parametry časově proměnné rychlosti a zatížení kontaktních ploch. Do současné doby nebyla publikována práce, která by oba přístupy spojovala a objasnila chování mazacího filmu za současného působení časově proměnné rychlosti a zatížení.

Vyvstává tak otázka, zdali výsledky, získané z takto zjednodušených modelů skutečných tribologických uzlů, v sobě nenesou příliš velké chyby zapříčiněné právě snižováním složitosti problému.

Cílem disertační práce je spojit oba výše zmiňované přístupy a vypracovat postup, s pomocí něhož bude možno sledovat, zaznamenávat a vyhodnocovat změny mazacího filmu při současné změně rychlosti třecích povrchů a zatížení kontaktu.

Obr. 47 sumarizuje poznatky získané na základě rešerše a zobrazuje případy nestacionárních provozních podmínek, které již byly zkoumány a jejichž výsledky byly publikovány.



Obr. 47 Přehled současného stavu poznání.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

5

Cílem disertační práce je navržení metodiky pro experimentální analýzu chování mazacího filmu v EHD kontaktu při časové změně parametrů rychlosti a zatížení kontaktních ploch. Pro splnění cíle disertační práce bude potřeba provést úpravy stávající experimentální aparatury popř. navržení nové experimentální aparatury, která bude konstrukčně plně vyhovovat potřebám experimentu.

Realizace cíle disertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

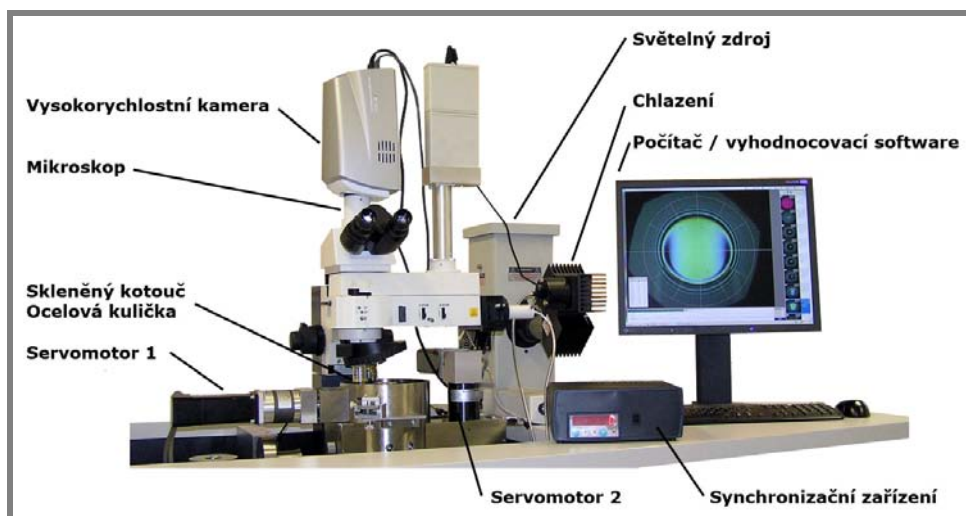
- Modifikace stávajícího experimentálního zařízení pro možnost sledování změny tloušťky filmu EHD mazaného kontaktu při časové změně zatížení.
- Provedení série ověřovacích experimentů s časově proměnným parametrem zatížení a porovnání s již publikovanými výsledky.
- Vytvoření software, umožňujícího skrze uživatelské rozhraní nezávislé ovládání krokových motorů řídících rychlosti třecích povrchů, spolu s nastavením průběhu zatížení a spouštění snímací techniky.
- Modifikace stávající aparatury pro možnost sledování změny tloušťky filmu v EHD mazaném kontaktu při současné časové změně zatížení a rychlosti třecích povrchů. V případě potřeby navržení a vytvoření speciální experimentální aparatury konstrukčně vhodné pro účely měření.
- Provedení série experimentů a jejich vyhodnocení za účelem zjištění chování mazacího filmu v EHD kontaktu při současně časové změně rychlosti a zatížení třecích povrchů.

Vzhledem k tematické náplni rešeršní části pojednání ke státní doktorské zkoušce, věnující se simulaci vačkového mechanismu ve zjednodušené formě bodového kontaktu, a po dohodě se školitelem, byl navržen nový název disertační práce „Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení kontaktních ploch“. Bylo tak učiněno z důvodu, aby nový název přesněji vystihoval obsah a cíl řešení disertační práce.

6. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

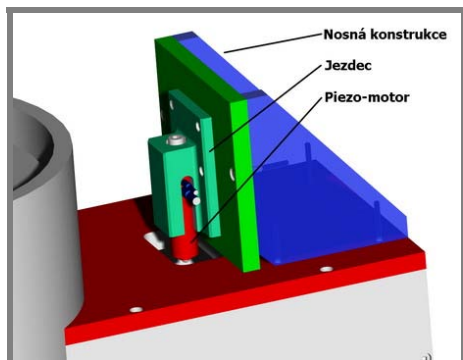
6.1 Modifikace experimentálního zařízení pro proměnné zatížení

Pro výzkum chování mazacího filmu v EHD kontaktu při proměnném zatížení bylo potřeba upravit stávající experimentální aparaturu (obr. 48), již je vybavena laboratoř Ústavu konstruování. Stávající experimentální aparatura je navržena pro výzkum chování mazacího filmu při podmínkách EHD mazání. Tato aparatura umožňuje nezávislý pohon obou třecích povrchů konstantní rychlostí v průběhu experimentu, spolu se zatížením kontaktu konstantní silou vyvozenou závažím.



Obr. 48 Stávající experimentální aparatura [31].

Úprava zařízení spočívala v navržení nové modulární jednotky (obr. 49), kterou je možno dle potřeby upevnit na stávající experimentální aparaturu (obr. 50). Modulární jednotka se skládá ze tří hlavních částí. První z nich je nosná konstrukce, pomocí níž je možno jednotku připevnit k aparatuře a která je navržena tak, aby zajistila dostatečnou tuhost celé soustavy. Druhým prvkem jednotky je jezdec, s jehož pomocí je možno nastavit piezo-motor do požadované pozice a tuto pak aretovat šrouby. Třetím prvkem je již zmíněný lineární piezo-motor. Jedná se o jediný akční prvek popisované jednotky a pomocí řízeného ovládání délky piezo-motoru je možno skrze pákový systém řídit zatížení kontaktu.



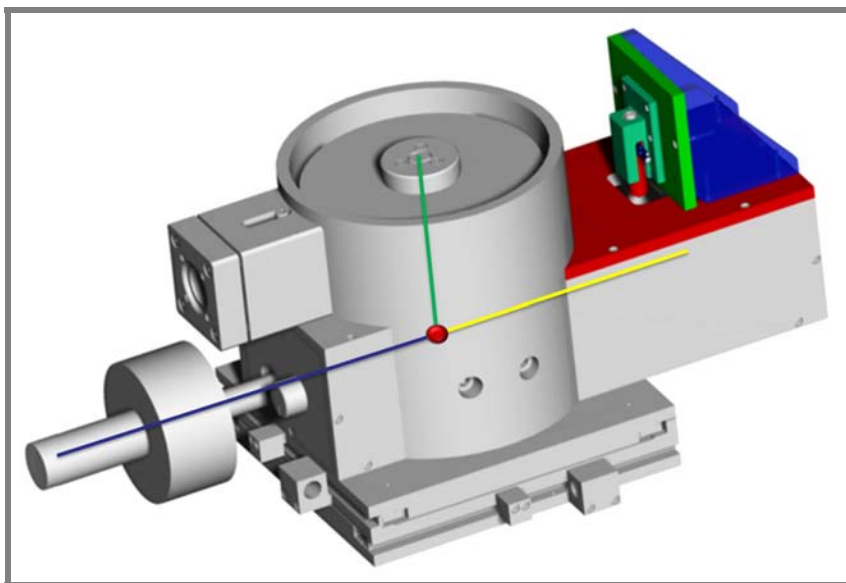
Obr. 49 Modulární jednotka.



Obr. 50 Montáž jednotky na experimentální aparaturu.

6.1.1 Princip funkce

Princip funkce experimentálního zařízení s instalovanou modulární jednotkou je schematicky zobrazen na obr. 51. Zjednodušeně lze princip funkce popsat pomocí dvojitě vratné páky s třemi rameny. Pokud je na první rameno umístěno závaží, tak dojde k natočení celého systému kolem bodu rotace páky. Přenos zatěžující síly do kontaktu je realizován naklopením skleněného disku na druhém rameni. Celý systém uzavírá piezo-motor, jehož kulový konec je zapřen o třetí rameno pákového mechanismu. V okamžiku kdy dojde k zvětšení délky piezo-motoru tak dochází k odlehčení kontaktu a naopak.



Obr. 51 Princip funkce experimentálního zařízení.

6.1.2 Řešené problémy při návrhu jednotky

Jedním z problémů řešených v rámci provozu jednotky bylo postupné odlehčování kontaktu při skokové změně zatížení. Při analýze problému bylo zjištěno, že tlak, který byl vyvíjen kulovým zakončením piezo-motoru na konstrukci experimentální aparatury, byl příliš velký a v důsledku toho došlo k lokální plastické deformaci konstrukce zařízení. Problém byl vyřešen vložením broušeného mezičlenu z kalené nástrojové oceli, který má za úkol rozložit tlak vyvíjený koncem piezo-motoru na větší plochu a zabránit tak deformacím rámu experimentálního zařízení.

Další z řešených problémů je rozkmitání aparatury během experimentu. Problém byl pozorován při experimentu skokové změny zatížení kontaktu, kde z nasnímaných interferogramů je patrná cyklická změna kontaktní plochy po změně zatížení. Příčinou problému je samotná konstrukce experimentální aparatury, kde při jejím návrhu nabylo počítáno s aplikací proměnné síly v kontaktu.

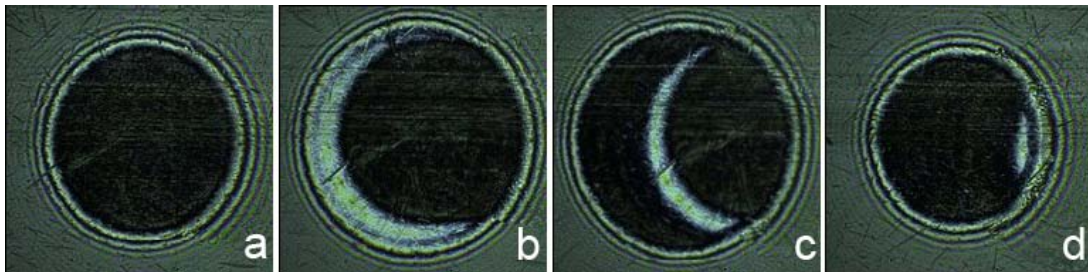
Problém je shledáván v rozložení pohyblivých hmot experimentální aparatury a přílišné vzdálenosti mezi místem uložení zátěže a místem, kde působí lineární piezo-motor. Při skokové změně zatížení dochází k elastickým formacím pákového mechanismu a vlivem setrvačných sil dochází k nežádoucímu rozkmitání aparatury. Řešení zmíněného problému je shledáváno v návrhu nové experimentální aparatury, která by umožňovala zatěžování kontaktu posuvem kuličky. Tímto by došlo k redukci hmot, které by se při změně zatížení pohybovaly a tak i k snížení vlivu setrvačných sil na zatížení kontaktu.

6.2 Chování mazacího filmu při skokové změně zatížení

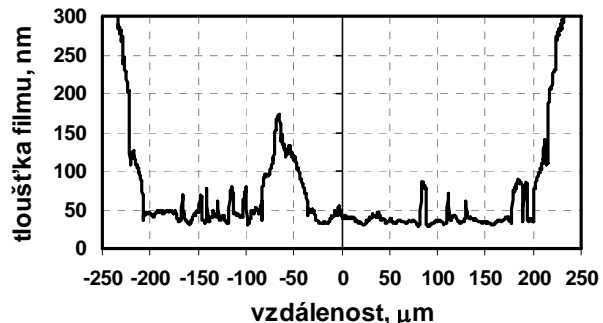
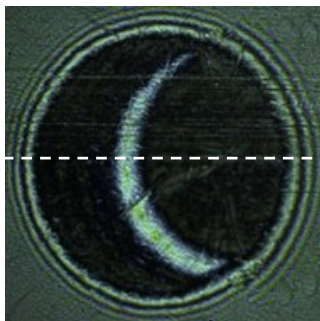
Po návrhu a vytvoření modulární jednotky byla provedena série experimentů, které měly jednak ověřit funkčnost jednotky a také zjistit chování mazacího filmu v kontaktu při skokové změně zatížení. Při instalaci jednotky je potřeba sejmout z experimentální aparatury pohon disku, a proto aparatura pracuje v režimu, kdy je poháněna ocelová kulička a skleněný disk je pouze unášen.

Pro ovládání piezo-motoru je používán software Wave Generator dodávaný výrobcem. Pomocí tohoto software je možno aplikovat několik režimů změny délky piezo-motoru a volit mezi plynulými nebo skokovými změnami délky s možností volby a nastavení jednotlivých parametrů průběhu změny.

Pro experiment byla použita jako kontaktní tělesa ocelová kulička s průměrnou aritmetickou úchylkou povrchu R_a 0,025 mm a skleněný disk, opatřený na kontaktní straně polopropustnou chromovou vrstvou. Pro osvětlení oblasti kontaktu byla použita xenonová výbojka o maximálním světelném výkonu 1 kW, která je schopná poskytnout dostatečné množství světla pro zaznamenání rychlých přechodových dějů uvnitř kontaktu. Pro snímání oblasti kontaktu byla použita vysokorychlostní CMOS kamera X-Stream™ VISION XS-3 se snímací frekvencí 400 Hz a expozičním časem 2,5 ms. Z otáček elektromotoru s použitou převodovkou byla vypočtena obvodová rychlost kuličky v místě středu kontaktu $u_B = 0,369 \text{ mms}^{-1}$. Na obr. 52 jsou zobrazeny vybrané chromatické interferogramy popisující změnu chování mazacího filmu při skokové změně zatížení z hodnoty $F_1 = 35 \text{ N}$ na hodnotu $F_2 = 64,5 \text{ N}$. Pro experiment byl použit minerální olej LSBS při pokojové teplotě 25° C .



Obr. 52 Chromatické interferogramy kontaktu při skokové změně zatížení v časech $t_A = 0 \text{ ms}$, $t_B = 32,5 \text{ ms}$, $t_C = 197,5 \text{ ms}$, $t_D = 975 \text{ ms}$, $u_B = 0,369 \text{ mms}^{-1}$, $f = 400 \text{ Hz}$, $exp = 2,5 \text{ ms}$, $F_1 = 35 \text{ N}$, $F_2 = 64,5 \text{ N}$, $t_F = 0,055 \text{ s}$ [28].



Obr. 53 Vybraný interferogram spolu s profilem tloušťky mazacího filmu v kontaktu [28].

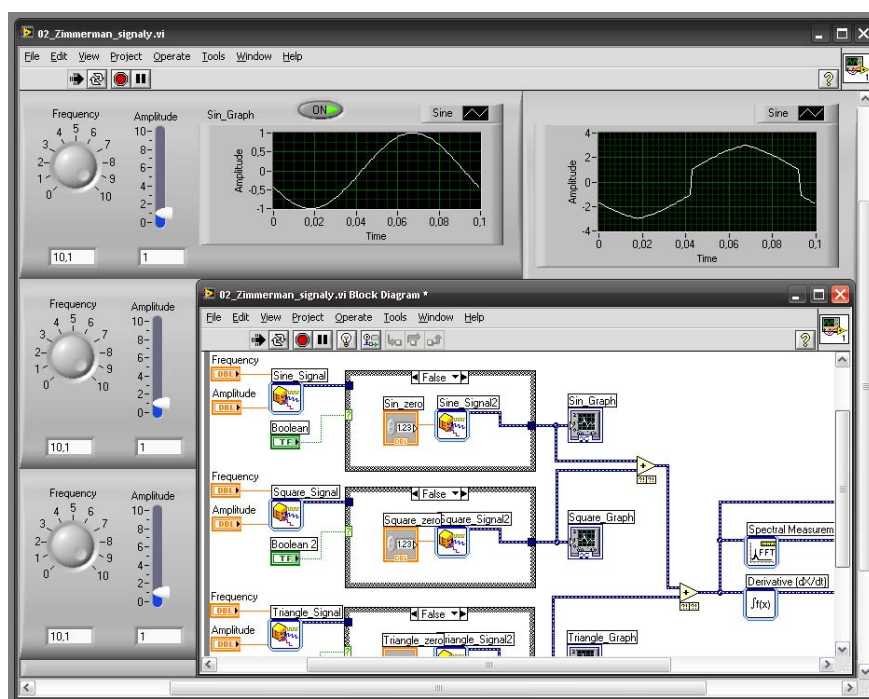
Z obr. 52 je patrné, že při aplikaci proměnného zatížení dojde v místě vstupu maziva do kontaktu k vytvoření oblasti tvaru srpku. Obr. 53 zobrazuje jeden z uvedených interferogramů i spolu s řezem oblasti kontaktu ve směru valení. Z řezu,

kteřý zobrazuje profil tloušťky mazacího filmu, je jasně patrný nárůst tloušťky maziva ve zmiňované oblasti. Tento efekt je zapříčiněn tlakově-viskózním chováním maziva.

6.3 Návrh software pro ovládání experimentální aparatury

6.3

V současné době probíhají přípravy a shromažďování informací potřebných k vytvoření řídicího software, pomocí něhož bude možno ovládat celou experimentální aparaturu. Program bude vyvíjen za pomoci grafického programovacího jazyku LabWiev (obr. 54). Účelem je sjednotit doposud používané programy pro oddělené ovládání servomotorů pohonu kuličky a disku, ovládání kamery, ovládání piezo-motoru a snímání dat z tenzometrů. Docílí se tak zjednodušení ovládání celého zařízení a možnost simulace různých průběhů rychlostí kontaktních těles a zatížení kontaktu.



Obr. 54 Prostředí programu LabWiev.

6.4 Návrh nové konstrukce experimentálního zařízení

6.4

Z výše popsaných řešených problémů je zřejmé, že pro správnou funkci bude potřeba návrh nového experimentálního zařízení. Se současnou modifikací stávajícího experimentálního zařízení je možné řídit pouze rychlost otáčení ocelové kuličky, protože prostor po umístění motoru ovládajícího skleněný disk je zastaven modulární jednotou. Při novém návrhu bude také myšleno na redukci pohyblivých hmot aparatury a tím dojde ke snížení negativního vlivu setrvačných sil na zatížení kontaktu. Zatím je uvažována varianta, kde by se zatěžování kontaktu realizovalo pomocí posuvu ocelové kuličky. Posuv kuličky bude řízen piezo-motorem. Tato konstrukce umožní opatřit lůžko pro uložení kuličky tenzometry, pomocí nichž bude možno zaznamenat změnu velikosti síly působící v kontaktu v průběhu celého experimentu.

7. ZÁVĚR

Tato práce shrnuje především experimentální studie popisující chování mazacího filmu uvnitř bodového kontaktu při časové změně zatížení, nebo rychlosti kontaktních ploch. Smyslem těchto studií je lépe pochopit procesy probíhající uvnitř mazaného kontaktu a napomoci tak návrhu nových, nebo modifikaci stávajících tribologických uzlů tak, aby byla snížena jejich energetická náročnost a zvýšila se bezpečnost proti přímému kontaktu třecích ploch. V pojednání jsou zahrnuty dvě hlavní oblasti výzkumu chování maziva v kontaktu při nestacionárních podmínkách. Oba přístupy značně zjednodušují zkoumaný problém a proto je potřeba míru zjednodušení snížit tím, že se oba přístupy sjednotí a prošetří se jejich společný vliv na chování maziva.

Ze současného stavu řešení disertační práce vyplývá, že byly splněny první dva body z výčtu dílčích cílů disertační práce. Touto skutečností je dán reálný předpoklad splnění zbývajících cílů disertační práce.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma zaznamenávání signálů na pásky.	7
Obr. 2 Schéma měřicí aparatury.	7
Obr. 3 Série interferogramů bodového kontaktu.	8
Obr. 4 Série interferogramů liniového kontaktu.	9
Obr. 5 Schéma měřicí aparatury a systému zatěžování.	10
Obr. 6 Časová změna zatížení – BS.	11
Obr. 7 Interferogramy a profily mazacího filmu pro olej – BS.	11
Obr. 8 Vliv w_{\min} . a rychlosti zatížení na max. tloušťku filmu.	11
Obr. 9 Časová změna zatížení – BS.	11
Obr. 10 Interferogramy a profily mazacího filmu pro olej – BS.	11
Obr. 11 Schéma měřicí aparatury.	13
Obr. 12 Závislost mezi h a h_{\min} .	14
Obr. 13 Vliv h_{\min} na profil mazacího filmu.	14
Obr. 14 Průběh zatěžujících pulzů.	14
Obr. 15 Závislost h_{\max} na rychlosti zatěžování.	14
Obr. 16 Interferogramy pro mazaný Hertzův kontakt.	15
Obr. 17 Interferogramy pro čisté valení.	15
Obr. 18 Interferogramy pro mazaný Hertzův kontakt.	16
Obr. 19 Průběh zatěžujících pulzů.	16
Obr. 20 Závislost h_{\max} na rychlosti zatěžování.	16
Obr. 21 Vliv počáteční mezery na tvar mazacího filmu.	17
Obr. 22 Závislost h_{\max} na rychlosti zatěžování.	17
Obr. 23 Součet hodnot tloušťek filmu.	17
Obr. 24 Interferogramy pro čisté valení.	18
Obr. 25 Schéma experimentální aparatury.	19
Obr. 26 Časová změna tloušťky mazacího filmu.	20
Obr. 27 Časová změna profilu mazacího filmu.	20
Obr. 28 Změna tloušťky filmu - různá zpomalení.	20
Obr. 29 Změna tloušťky filmu - různá zpomalení.	20
Obr. 30 Ideální průběh rychlostí při otáčení vačky.	22
Obr. 31 Průběhy rychlostí použité v experimentu.	22
Obr. 32 Střední tloušťka maziva pro 70 ms cykl.	23
Obr. 33 Střední tloušťka maziva pro 35ms cykl.	23
Obr. 34 Časová změna rychlosti třecích povrchů – 50 Hz.	25
Obr. 35 Časová změna tloušťky filmu – 50 Hz.	25
Obr. 36 Časová změna rychlosti třecích povrchů – 50 Hz.	26
Obr. 37 Časová změna tloušťky filmu – 50 Hz.	26
Obr. 38 Teoretické hodnoty.	27
Obr. 39 Mazivo PAO.	27
Obr. 40 Mazivo 5P4E.	27
Obr. 41 Závislost tloušťky filmu na rychlosti povrchů.	29
Obr. 42 Srovnání tloušťky filmu s hodnotou h_s .	29
Obr. 43 Profil filmu pro stop-start pohyb.	30
Obr. 44 Časová změna střední a min. tloušťky filmu	30
Obr. 45 Časová změna rychlosti třecích povrchů	30
Obr. 46 Časová změna profilu mazacího filmu	30

Obr. 47 Přehled současného stavu poznání.	32
Obr. 48 Stávající experimentální aparatura [Svoboda P., VUT].	34
Obr. 49 Modulární jednotka.	34
Obr. 50 Montáž jednotky na experimentální aparaturu.	34
Obr. 51 Princip funkce experimentálního zařízení.	35
Obr. 52 Chromatické interferogramy kontaktu při skokové změně zatížení v časech $t_A = 0$ ms, $t_B = 32,5$ ms, $t_C = 197,5$ ms, $t_D = 975$ ms, $u_B = 0,369$ mms-1, $f = 400$ Hz, $exp = 2,5$ ms, $F_1 = 35$ N, $F_2 = 64,5$ N, $t_F = 0,055$ s [28].	36
Obr. 53 Vybraný interferogram spolu s profilem tloušťky mazacího filmu v kontaktu [28].	36
Obr. 54 Prostředí programu LabWiev.	37

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F_1	N	síla předzatížení kontaktu
F_2	N	konečná zatěžující síla
$F_2(t)$	N	dynamická síla
exp	ms	expoziční čas
f	Hz	frekvence snímání interferogramů
h_{cent}	nm	tloušťka mazacího filmu ve středu kontaktu
h_{ini}	mm	počáteční mezera mezi kontaktními tělesy
h_{max}	nm	maximální tloušťka mazacího filmu v kontaktu
h_{max1}	nm	výška mazacího filmu uzavřeného v kontaktu při první změně zatížení
h_{max2}	nm	výška mazacího filmu uzavřeného v kontaktu při druhé změně zatížení
h_s	nm	tloušťka mazacího filmu v kontaktu při stacionárních podmínkách
t_A	ms	čas počátku změny zatížení
t_B	ms	čas od změny zatížení po sejmutí příslušného interferogramu
t_c	s	čas záznamu skokové změny na magnetckou pásku
t_C	ms	čas od změny zatížení po sejmutí příslušného interferogramu
t_D	ms	čas od změny zatížení po sejmutí příslušného interferogramu
t_f	s	čas záznamu skokové změny na kinofilm
t_F	ms	doba trvání změny zatížení
t_r	s	čas skokové změny řídicího signálu
u_B	mms^{-1}	obvodová rychlost kuličky v místě kontaktu
u_D	mms^{-1}	obvodová rychlost disku ve středu kontaktu
w_{ini}	N	síla předzatížení kontaktu
w_{max}	N	maximální síla zatěžující kontakt
$w_{max,1}$	N	konečná zatěžující síla první změny dostupňového zatížení
$w_{max,2}$	N	konečná zatěžující síla druhé změny dostupňového zatížení
w_{min}	N	minimální síla zatěžující kontakt
w_t	$Nm^{-1}s^{-1}$	rychlost zatěžování kontaktu
$w_{t,1}$	ms	doba trvání první změny dvoustupňového zatížení
$w_{t,2}$	ms	doba trvání druhé změny dvoustupňového zatížení

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHRISTENSEN, H. The Oil Film in a Closing Gap. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1962, vol. 266, no. 1326, s. 312–328.
- [2] CHRISTENSEN, H. Elastohydrodynamic theory of spherical bodies in normal approach. *Mechanical Engineering*, 1969, vol. 91, no. 10, s. 86–95. ISSN: 0025-6501.
- [3] CHRISTENSEN, H. Elastohydrodynamic theory of spherical bodies in normal approach. *Journal of Lubrication Technology*, 1970, vol. 92, no. 1, s. 145–154.
- [4] DOWSON, D. – JONES, D.A. Lubricant entrapment between approaching elastic solids. *Nature*, 1967, vol. 214, no. 5091, s. 947–948. ISSN: 0028-0836.
- [5] HERREBRUGH, K. Elastohydrodynamic squeeze films between two cylinders in normal approach. *Journal of Lubrication Technology*, 1970, vol. 92, no. 1, s. 292–302.
- [6] SANBORN, D.M. – WINER, W.O. Fluid rheological effects in sliding elastohydrodynamic point contacts with transient loading: 1-film thickness. *Journal of Lubrication Technology*, 1971, vol. 93, no. 2, s. 262–271.
- [7] PAUL, G.R. – CAMERON, A. Absolute high-pressure microviscometer based on refractive-index. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1972, vol. 331, no. 1585, s. 171–184. ISSN: 1364-5021.
- [8] PETROUSEVITCH, A.I. – KODNIR, D.S. – SALUKVADZE, R.G. – BAKASHVILI, D.L. – SCHWARZMAN, V.SH. The investigation of oil film thickness in lubricated ball-race rolling contact. *Wear*, 1972, vol. 19, no. 4, s. 369-389. ISSN: 0043-1648.
- [9] LEE, K.M. – CHENG, H.S. The pressure and deformation profiles between two normally approaching lubricated cylinders. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1973, vol. 95, no. 1, s. 308–320.
- [10] WADA, S. – TSUKIJIHARA, M. Elastohydrodynamic lubrication of squeeze films; Part 1 Two Cylinders Lubricated with Grease. *Bulletin of the JSME*, 1978, vol. 21, no. 159, s. 1408–1415. ISSN: 0021-3764.
- [11] WADA, S. – TSUKIJIHARA, M. Elastohydrodynamic lubrication of squeeze films; Part 2, Two spherical bodies lubricated with grease. *Bulletin of the JSME*, 1980, vol. 23, no. 179, s. 766–778. ISSN: 0021-3764.
- [12] LEEUWEN, Van H. – MEIJER, H. – SCHOUTEN, M. Elastohydrodynamic film thickness and temperature measurements in dynamically loaded concentrated contacts: eccentric cam-flat follower. In *Fluid Film Lubrication - Osborne Reynolds centenary, Proc. 13th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DOWSON, D. – TAYLOR, C.M. – GODET, M. – BERTHE, D. Leeds: Leeds University, 1986. s. 611 – 625. ISBN 04-4442-856-9
- [13] VICHARD, J.P. Transient effects in the lubrication of Hertzian contacts. *Mechanical engineering*, 1971, vol. 13, s. 173–189.

- [14] AI, X. – ZHU, D. A full numerical solution for general transient elastohydrodynamic line contacts and its application. *Wear*, 1988, vol. 121, s. 143-159.
- [15] SUGIMURA, J. – SPIKES, H.A. Technique for measuring EHD film thickness in non-steady state contact conditions. In *Elastohydrodynamics - '96 Fundamentals and applications in lubrication and traction, Proc. 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DOWSON, D. a kol. Leeds: Leeds University, 1996. s. 91–100. ISBN: 04-4482-809-5.
- [16] SUGIMURA, J. – JONES, W.R. – SPIKES, H.A. EHD film thickness in non-steady state contacts. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1998, vol. 120, no. 3, s. 442–452. ISSN: 0742-4787.
- [17] HARTL, M. – KŘUPKA, I. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M. An automatic system for real-time evaluation of EHD film thickness and shape based on the colorimetric interferometry. *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42, no. 2, s. 303-309. ISSN: 1040-2004.
- [18] HARTL, M. – KŘUPKA, I. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M. – MOLIMARD, J. – QUERRY, M. – VERGNE, P. Thin film colorimetric interferometry. *Tribology Transactions*, 2001, vol. 44, no. 2, s. 270-276. ISSN: 1040-2004.
- [19] REN, N. – ZHU, D. – WEN, S.Z. Experimental method for quantitative analysis of transient EHL. *Tribology International*, 1991, vol.24, no. 4, s. 225–230. ISSN: 0301-679X.
- [20] SAKAMOTO, M. – NISHIKAWA, H. – KANETA, M. Behaviour of point contact EHL films under pulsating loads. In *Transient Processes in Tribology, Proc. 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. LUBRECHT, A.A. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004. s. 391–399. ISBN: 04-4451-706-5.
- [21] KANETA, M. – OZAKI, S. – NISHIKAWA, H. – GUO, F. Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2007, vol. 221, no. 3, s. 271–278. ISSN: 1350-6501.
- [22] NISHIKAWA, H. – MIYAZAKI, H. – KANETA, M. – GUO, F. Effects of two-stage impact load on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*, 2008, vol. 222, no. 7, s. 807–814. ISSN: 1350-6501.
- [23] GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. The influence of lubricant upon EHD film behavior during sudden halting of motion. *Tribology Transactions*, 2000, vol. 43, no. 4, s. 731–739. ISSN: 1040-2004.
- [24] GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration: Part I - Experimental results. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2001, vol. 123, no. 2, s. 254–261. ISSN: 0742-4787.
- [25] GLOVNEA, R.P., – SPIKES, H.A. The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamic film thickness. In *Tribology Research: From model experiment to industrial problem, Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. s. 485–493. ISBN: 04-4450-581-4.

- [26] GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. Behavior of EHD films during reversal of entrainment in cyclically accelerated/decelerated motion. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, no. 2, s. 177–184. ISSN: 1040-2004.
- [27] GLOVNEA, R.P. – SPIKES, H.A. The influence of lubricant properties on EHD film thickness in variable speed conditions. In *Transient Processes in Tribology, Proc. 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. DALMAZ, G. a kol. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004. s. 401–408. ISBN: 04-4451-706-5.
- [28] SUGIMURA, J. – JONES, W.R. – SPIKES, H.A. EHD film thickness in non-steady state contacts. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1998, vol. 120, no. 3, s. 442–452. ISSN: 0742-4787.
- [29] SUGIMURA, J. Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 2002, vol. 47, no. 10, s. 752–757. ISSN: 0915-1168.
- [30] ZIMMERMAN, M. – SVOBODA, P. Experimental study of lubrication films under non-steady state conditions. In *FSI Junior konference 2008 - Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů - sborník*. Brno: VUT FSI v Brně, 2009. s. 134-141. ISBN: 978-80-214-3834-7.
- [31] ZIMMERMAN, M. – SVOBODA, P. A research of behavior of lubrication film under non-steady state conditions. In *Engineering Mechanics 2009*. Praha: Academy of Sciences of the Czech Republic, 2009. s. 1513-1523. ISBN: 978-80-86246-35-2.

