

A RESEARCH OF BEHAVIOR OF LUBRICATION FILM UNDER NON-STEADY STATE CONDITIONS

M. Zimmerman*, P. Svoboda*

Summary: *This paper concerns a study of the formation and behavior of a lubricant film of a point contact under non-steady state conditions. Transient EHD lubrication, in which operating parameters such as speed and load vary over time, occurs in many machine elements including cams, gears and roller bearings. Therefore, an attention in last few years focused on behavior and formation of a lubricant film in EHL contact under non-steady state conditions. The critical running sequences of EHL contacts include e.g. starting or halting of contact surfaces and also sudden increases or decreases of surface speed and load. This cases which are described above can cause a rupture of a lubricant film and in consequence of this action also damage of contact surfaces.*

1. Úvod

Většina strojních součástí (valivá ložiska, ozubená soukolí a vačky) pracuje za podmínek elastohydrodynamického mazání (EHD), kdy jsou třecí povrchy elasticky deformovány a viskozita maziva v oblasti kontaktu se výrazně zvyšuje vlivem kontaktního tlaku. Tento jev nastává během deformace nekonformních povrchů při vysokém zatížení. Vysoké zatížení je přenášeno relativně malou plochou. Při relativním pohybu kontaktních těles dochází na rozhraní třecích prvků k vytváření koherentního mazacího filmu, který odděluje třecí povrchy, a tím snižuje jejich tření a následné opotřebení. V minulých letech byl velký počet studií zaměřen na výzkum procesů probíhajících v mazaných kontaktech za ustálených podmínek. V praxi nejsou provozní podmínky (zatížení, rychlost třecích povrchů a jejich geometrie) konstantní, ale nestacionární.

První studie vlivu změny rychlosti třecích povrchů na utváření mazacího filmu byly zaměřeny pouze na chování mazaných kontaktů za ustálených provozních podmínek, a to s ohledem na dostupné měřicí a výpočetní prostředky (Vichard, 1971; Petrusevitch et al., 1972; Ai et al., 1988). Teprve nedávno byly modelovány komplexnější podmínky vyskytující se např. u vaček (Taylor, 1991; Jang et al., 2000; Messe et al., 2000). Další práce zabývající se nestacionárními jevy v mazaných kontaktech publikovali Kudish (2004), Chang (2000) a popsali chování minimální tloušťky mazacího EHD filmu. V druhé polovině 90. let 20. století byl započat systematický výzkum nestacionárních jevů v EHD mazaných kontaktech, kdy Sugimura et al. (1998; 2005) použili optickou interferenční metodu pro experimentální

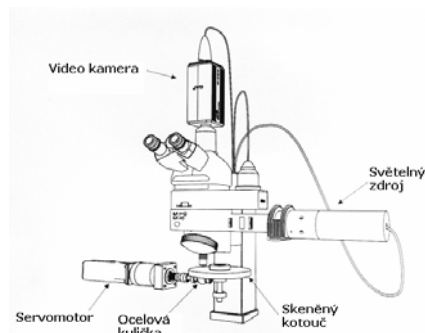
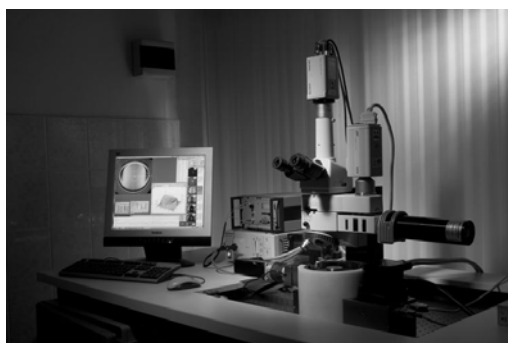
* Ing. Martin Zimmerman, Ing. Petr Svoboda: Institute of machine and industrial design, Brno University of Technology; 616 69 Technická 2; tel: 54114 3238; yzimme00@stud.fme.vutbr.cz

studium. Zjistili, že náhlé zrychlení třecích prvků způsobuje zmenšení tloušťky mazacího filmu a zpomalováním tloušťka filmu roste. Kaneta, Nishikawa a Tashimoto [11] studovali vliv reverzace pohybu třecích ploch na utváření mazacího filmu a ukázali význam frekvence změny pohybu.

Dalším jevem, který je možno zahrnout mezi nestacionární podmínky, a který se běžně v technické praxi vyskytuje u EHD kontaktů, je časová změna zatížení. Jedná se o jev, který v současné době není dostatečně prozkoumán. Typickým příkladem je kontakt vačky a zdvihátka ventilu. Otázkou časově proměnného zatížení v kontaktu se zabývají ve svém článku Glovnea & Spikes (2001) nebo Dowson & Taylor (1986), kteří pro svá měření sestavili speciální experimentální aparaturu simulující přímo kontakt vačky a zdvihátka. Jednodušší variantou tohoto problému je studie profilu mazacího filmu bodového kontaktu při proměnném zatížení. Podrobněji se tímto problémem zabývali Kaneta at al. (2007). Studovali tvar mazacího filmu u statického kontaktu a pohyb menisku napříč kontaktem za dynamických podmínek s použitím optické interferometrie.

2. Experimentální zařízení

K modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách je používán simulátor provozních podmínek (obr. 1) určený k výzkumu mazacích filmů. V simulátoru je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou. Osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak vrstvou chrómu. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvratné páce. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny servomotory, které jsou řízeny programovatelnými měniči frekvence. To umožňuje experimentální modelování provozních podmínek (prokluz, rozběh, reverzace třecích povrchů) vyskytujících se ve strojních uzlech. Xenonový zdroj bílého světla v kombinaci s barevnou vysokorychlostní kamerou IDT X-Vision 3 umožňuje zaznamenat až 630 snímků za sekundu v rozlišení 1280×1024 pixelů.



Obr. 1 Experimentální zařízení pro měření tloušťky mazacího filmu

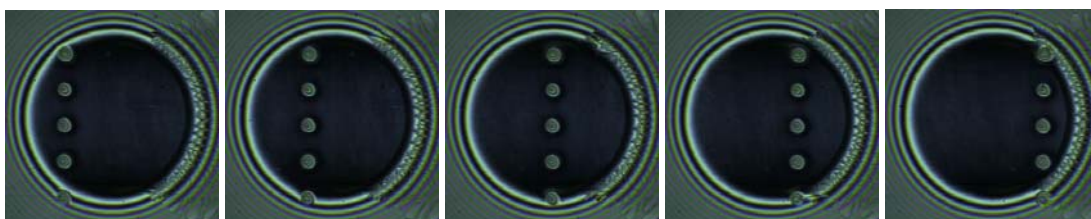
Tvar mazacího filmu je stanovován kolorimetrickou interferometrií, měřicí metodou určenou k stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém mazaném kontaktu. Jedná se o metodu s podstatně vyšší přesností a prostorovou rozlišitelností, než je tomu u konvenční interferometrie. Metoda umožňuje opakovaně rekonstruovat tvar mazacího filmu z velkého množství chromatických interferogramů získaných pro různé experimentální podmínky.

3. Mikrovrtisky v EHD mazaném kontaktu

Vnější zdroje, jakými jsou např. prach či písek, mohou kontaminovat mazivo. Velikost znečišťujících částic (až 50 μm) je obvykle mnohem větší než tloušťka mazacího filmu (méně než 1 μm), takže při jejich průchodu kontaktní oblastí dochází k jejich zamáčknutí do třecích povrchů. Tento jev popisujeme, jako přirozenou modifikaci povrchu.

Pozornost je věnována i dalším postupům k zajištění lepšího utváření mazacího filmu i za kritických podmínek, jako je např. reverzace třecích povrchů. Mezi ně patří i cílená modifikace topografie, kdy se třecí povrchy opatří soustavou mikroductin, které v mazaném kontaktu mají funkci mikrozásobníků maziva (obr. 2). Při vhodném navržení rozměrů mikroductin a jejich uspořádání v kontaktu by tento přístup mohl napomoci zamezit náhlému snížení tloušťky mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách.

Proto je snaha experimentálně objasnit a zmapovat procesy probíhající při EHD mazání za dynamických podmínek, zejména při rozběhu třecích povrchů a reverzaci pohybu na vzorcích s cíleně modifikovanou topografií třecích povrchů. Při rozběhu totiž dochází k postupnému nárůstu mazacího filmu, takže třecí povrchy nejsou po určitou dobu odděleny mazacím filmem. Rovněž při reverzaci pohybu dochází k redukci tloušťky mazacího filmu, což v závislosti na provozních podmínkách může způsobit prolomení mazacího filmu.



Obr. 2 Chromatické interferogramy během průchodu mikrovrtisků EHD mazaným kontaktem

4. Reverzace pohybu

Reverzace třecích povrchů představuje jeden z přechodových jevů se zvýšeným rizikem poškození třecích povrchů, který se běžně vyskytuje u strojních soustav. Experimenty byly zaměřeny na porovnání chování uměle vytvořených a skutečných nerovností nekonformních povrchů. Chromatické interferogramy zaznamenané během reverzace třecích ploch umožnily sledovat probíhající změny v mazacím filmu.

4.1 Popis experimentu

Byla provedena řada experimentů s cíleně vytvořenými mikrovrtisky na kuličce za nestacionárních provozních podmínek. Mikrovrtisky na kuličce byly vytvořeny pomocí diamantového hrotu. Hloubka cíleně vytvořených mikrovrtisků byla 250 nm. Mikrovrtisky byly vytvářeny s roztečí 50 μm v šesti řadách. Experimenty byly provedeny se základovým minerálním olejem LSBS za pokojové teploty 25 $^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě má olej dynamickou viskozitu 0,69 Pa.s. Zatížení kontaktu bylo 22 N, tomu odpovídá maximální Hertzův tlak 0,466 GPa. Rychlost disku u_D a kuličky u_B byla volena s ohledem na dosažení konstantní hodnoty:

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

4.2 Modifikace stávajícího zařízení

Krouticí moment přenáší ze servomotoru na disk víceřadý klínový řemen. Přítomnost tohoto pryžového řemene má při reverzaci pohybu za následek zpoždění disku vzhledem k pohybu kuličky, což bylo pozorováno při úvodních experimentech. Kontakt se při reverzaci pohybu s konstantním prokluzem choval podobně jako při čistém valení. Tento nežádoucí efekt se podařilo z větší části eliminovat napínacími kladkami.

4.3 Série experimentů s uměle vytvořenými mikrovrtisky na kuličce

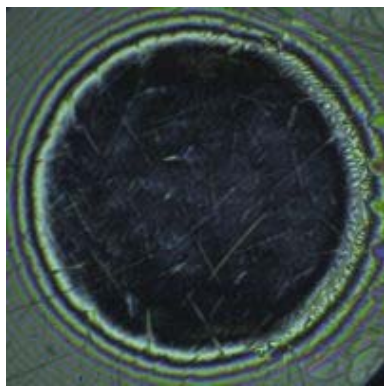
Na obr. 3 jsou zachyceny chromatické interferogramy a profil tloušťky filmu během reverzace pohybu na reálné kuličce s cíleně modifikovanou topografií povrchu. Vysokorychlostní kamera byla nastavena na záznam 440 snímků za sekundu při expozičním čase 2,272 ms. Rychlost kuličky a disku před reverzací pohybu dosahovala při konstantním prokluzu $\Sigma = 0,5$ hodnot 0,00265 a 0,00443 m.s⁻¹.

Chromatický interferogram na obr. 3a představuje plně zaplavený kontakt v okamžiku zahájení reverzace pohybu ($u_B = 0$ m.s⁻¹, $u_D = 0$ m.s⁻¹) s odpovídající tloušťkou mazacího filmu. Po reverzaci pohybu v čase 75 ms (obr. 3b) můžeme pozorovat nedostatek maziva na vstupu do kontaktu a odpovídající snížení tloušťky mazacího filmu. Dále je možno sledovat lokální zvýšení tloušťky mazacího filmu vlivem mikrovrtisku. Kontakt se v tomto okamžiku chová jako při čistém valení, nedochází k prokluzu třecích ploch a vytečení maziva z mikrovrtisku. Po vymezení vůlí řemene v čase 97,7 ms po změně pohybu (obr. 3c) vytlačuje na výstupu zachycené mazivo a tloušťka filmu se postupně zvětšuje. Je možné pozorovat lokální zvýšení tloušťky filmu vlivem maziva zachyceného v mikrovrtiscích. V čase 143,1 ms (obr. 3d) pozorujeme výtok maziva z mikrozásobníků vlivem prokluzu třecích povrchů. Je zřejmé, že hodnota rychlosti třecích ploch je velmi malá. Nicméně i při nízkých rychlostech bylo možno pozorovat změny v tloušťce mazacího filmu po celou dobu reverzace pohybu.

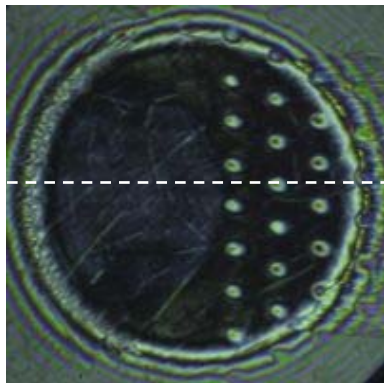
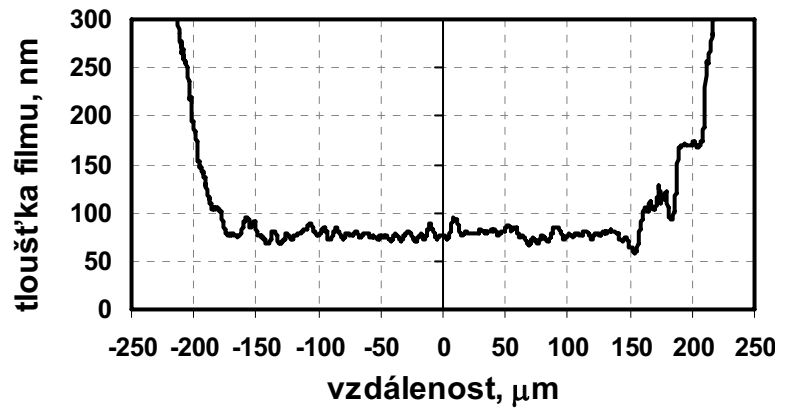
V rámci projektu proběhla celá řada měření reverzace pohybu při různých hodnotách prokluzu Σ . Nebylo však pozorováno prolomení mazacího filmu na nulovou hodnotu.

4.4 Série experimentů na reálném povrchu kuličky

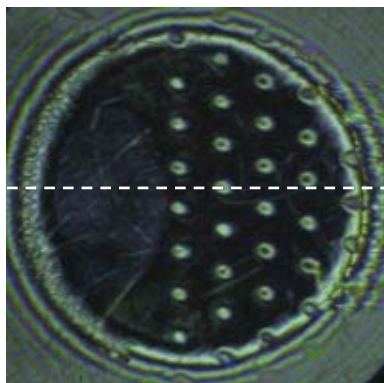
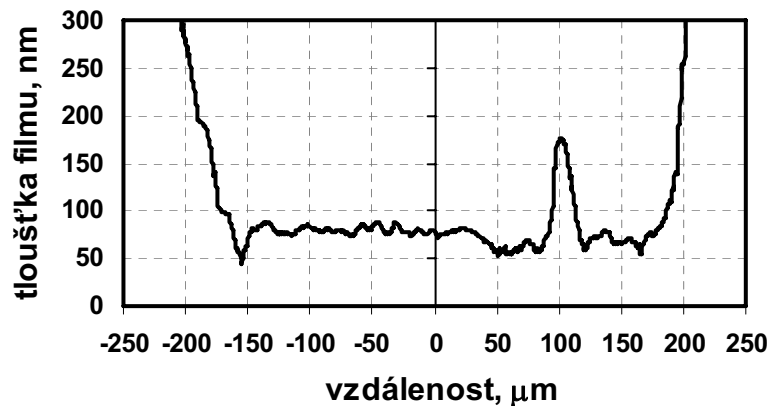
Sérii chromatických interferogramů na reálném povrchu kuličky bez cílené topografie povrchu popisuje obr. 4. Byla použita komerčně dodávaná kulička s náhodně umístěnými nerovnostmi povrchu vzniklými při obrábění, jejichž hloubka, šířka a uspořádání tvoří převládající povrchovou texturu s $R_a = 0,025$ μm . Při měření byly použity stejné provozní podmínky jako u předchozího experimentu s cíleně modifikovanou topografií povrchu. Byla zaznamenána řada chromatických interferogramů v čase 0 ms (obr. 4a); 75 ms (obr. 4b); 97,7 ms (obr. 4c); 188,6 ms (obr. 4d) po reverzaci pohybu. V čase „nula“, kdy jsou rychlosti třecích povrchů nulové (obr. 4a), je zachyceno mazivo v kontaktu a po změně smyslu otáček se začíná tvořit typický meniskus mazacího filmu v třecím kontaktu. Tloušťka filmu v centrální oblasti kontaktu nemá minimální hodnotu v okamžiku nulových rychlostí třecích povrchů, ale nějaký čas po tomto momentu. Toto zpoždění závisí na míře akcelerace.



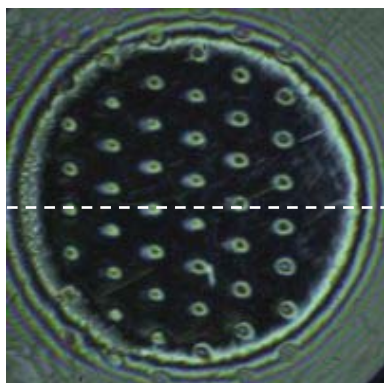
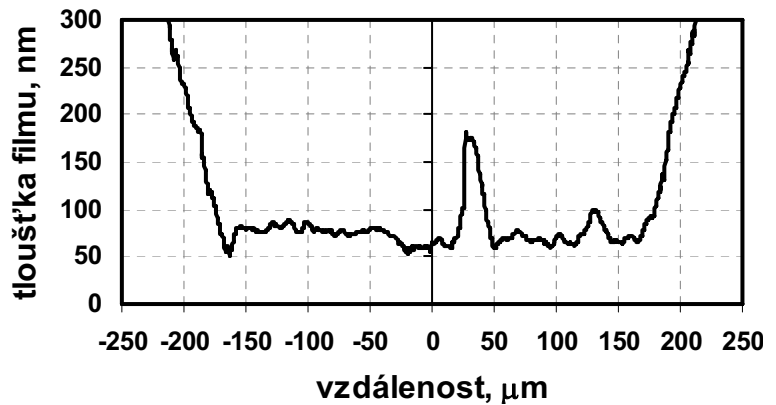
(a)



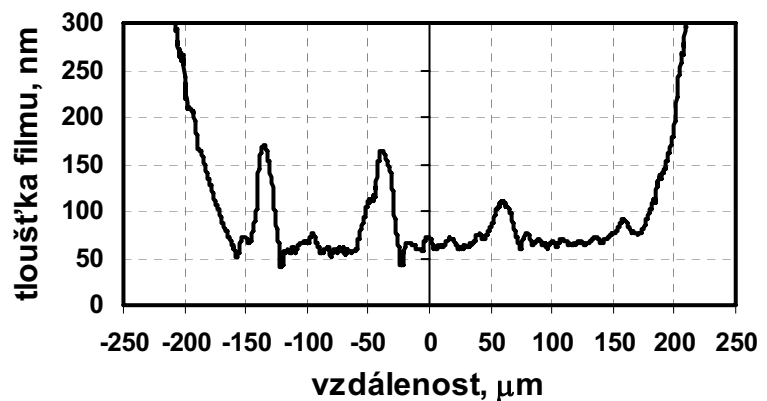
(b)



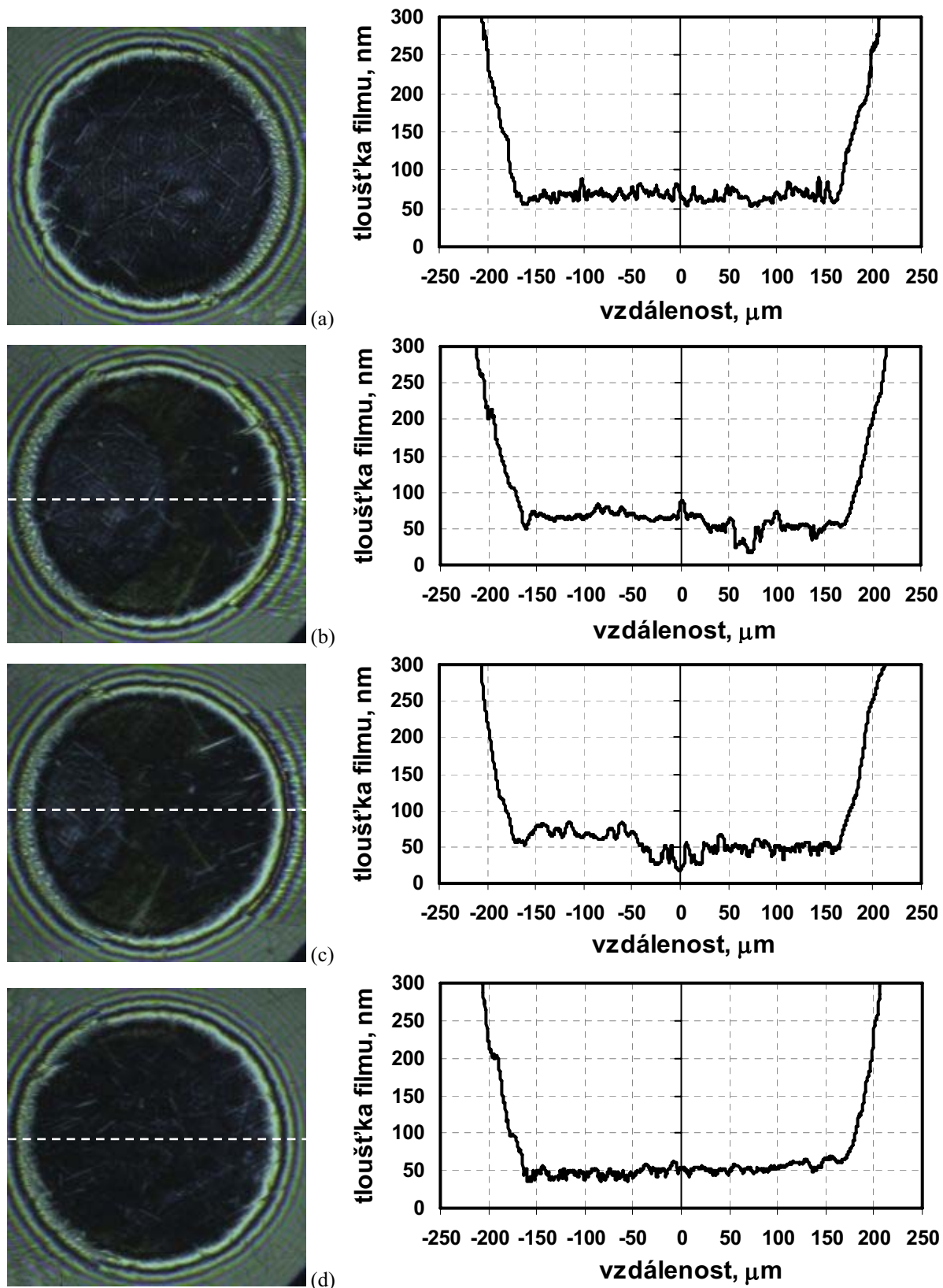
(c)



(d)



Obr. 3 Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu s cíleně modif. kuličkou.
 (Mikrovrtisky: hloubka 250 nm, rozteč 50 μm , Základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms,
 22 N zatížení, $u_B = 0,00265$ ms^{-1} , $u_D = 0,00443$ ms^{-1}) (Zimmerman & Svoboda, 2009)



Obr. 4 Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu na reálné kuličce. (Základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms, 22 N zatížení, $u_B = 0,00265$ ms⁻¹, $u_D = 0,00443$ ms⁻¹)
(Zimmerman & Svoboda, 2009)

Výrazné snížení tloušťky filmu po reverzaci pohybu popisuje obr 4b – 4c, kde tloušťka mazacího filmu klesá na hodnotu 18 nm. Tento efekt je způsoben nedostatkem maziva na vstupu kontaktu. Dále je možno sledovat malé zvýšení tloušťky filmu vlivem mikronerovností povrchu kuličky. Tloušťka mazacího filmu se postupně zvětšuje (obr. 4d) až na hodnoty, které byly pozorovány před změnou pohybu třecích ploch.

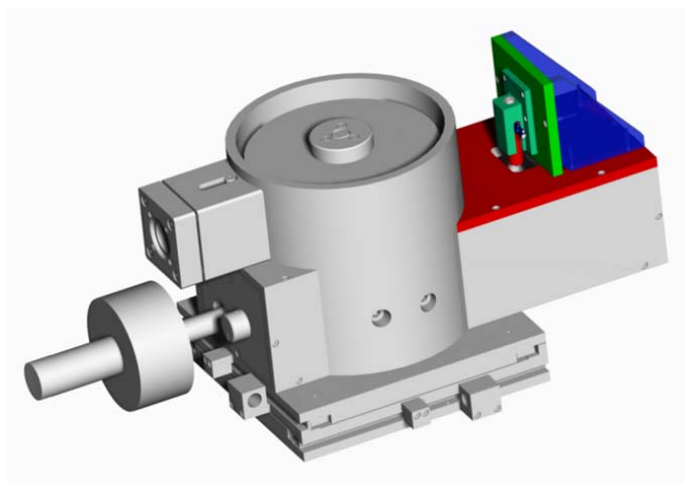
Při experimentech na reálném povrchu kuličky bylo také zjištěno, že v průběhu celého cyklu nedochází k prolomení mazacího filmu a třecí povrchy jsou separovány souvislou vrstvou maziva. Podobné chování pozoroval také Wang at al. (2005).

5. Proměnné zatížení v kontaktu

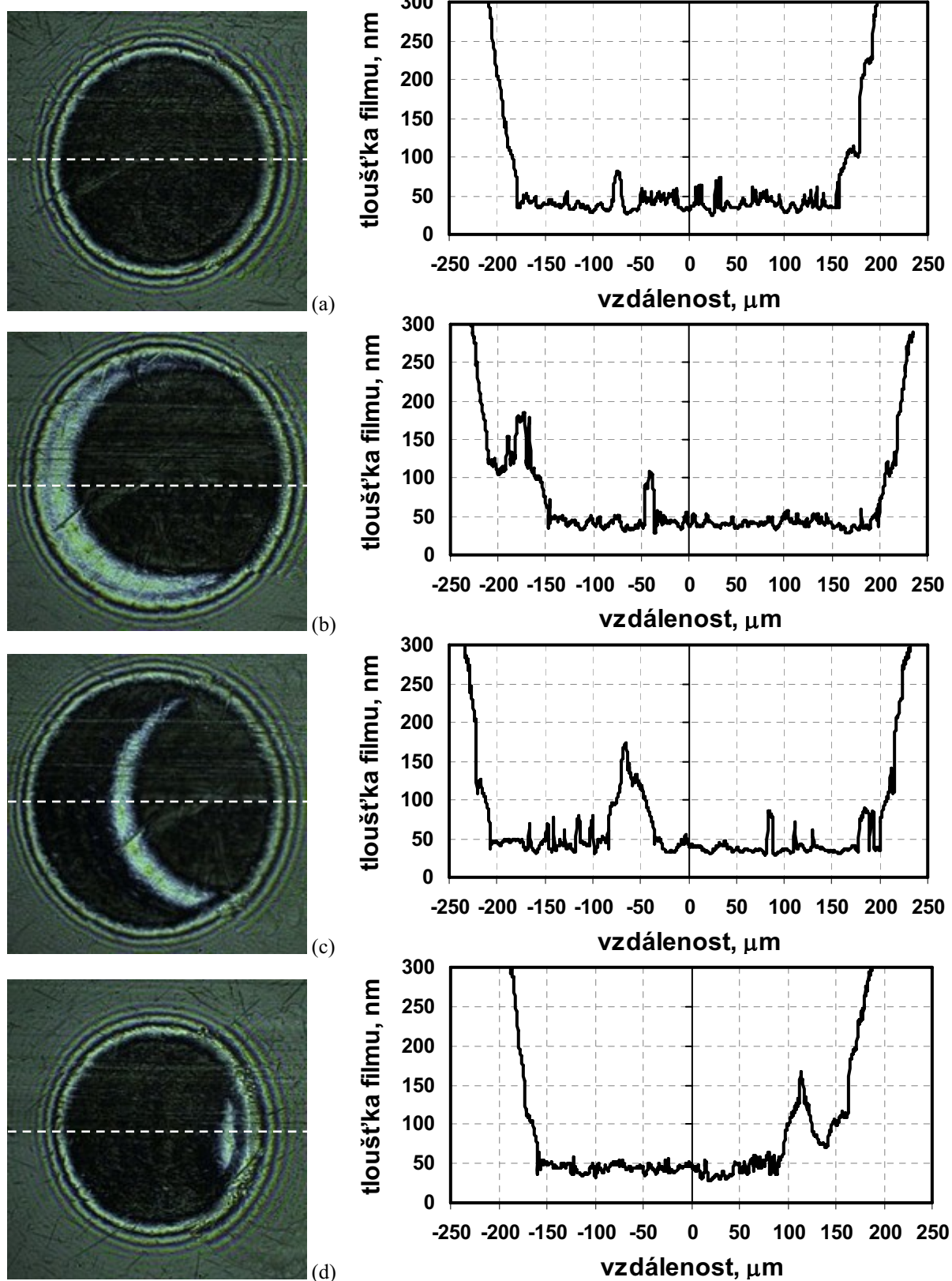
Druhá část výzkumu je zaměřena na výzkum chování mazacího filmu v EHD mazaném kontaktu při působení skokové změny zatížení. Proměnné zatížení v EHD mazaném kontaktu je v praxi běžně pozorovatelný jev, který je možno nalézt např. v kontaktu zubů ozubených kol nebo vačky a zdvihátka ventilového rozvodu. Účelem výzkumu je použít časově proměnné zatížení, jakožto jediný časově proměnný parametr v experimentu, a zjistit odezvu systému ve formě chování mazacího filmu při daných podmínkách experimentu.

5.1 Popis experimentu a modifikace stávajícího zařízení pro účely proměnného zatížení

Pro výzkum bylo použito stejné experimentální zařízení jako pro výzkum časově proměnných rychlostí třecích ploch včetně stejné konfigurace kontaktních těles. Jediným rozdílem bylo dovybavení experimentálního zařízení modulární jednotkou zajišťující proměnné zatížení v kontaktu. Akčním prvkem jednotky je lineární piezo-motor, kde ovládním délky piezo-motoru je možno využitím pákového mechanismu měnit zatížení v kontaktu (Zimmerman, 2008). Experimentální zařízení i s jednotkou je zobrazeno na obr. 5. Jako kontaktní těleso byla použita kulička s reálným povrchem a drsností povrchu $R_a 0,025 \mu\text{m}$. Pro experiment proměnného zatížení byl použit základový minerální olej LSBS za pokojové teploty $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Otáčky obou kontaktních těles, disku a kuličky, byly voleny tak, aby obvodová rychlost obou kontaktních povrchů v kontaktu u_D disku a u_B kuličky byly shodné.



Obr. 5 Úprava tribometru pro časově proměnné zatížení kontaktu



Obr. 6 Interferogramy a profil filmu - proměnné zatížení kontaktu na reálné kuličce.
 (Základový olej – LSBS, $f = 400$ Hz, exp: 2,2 ms, $u_D = 0,0007$ ms⁻¹, $u_B = 0,0007$ ms⁻¹)
 (Zimmerman & Svoboda, 2009)

5.2 Výsledky a vyhodnocení experimentu

Na obr. 6 jsou zobrazeny interferogramy, které mapují chování mazacího filmu v průběhu experimentu. Interferogramy jsou grafickými výstupy experimentu a pro získání profilů mazacího filmu v jednotlivých okamžicích experimentu je potřeba tyto výstupy vyhodnotit za použití metody kolorimetrické interferometrie.

Jednotlivé snímky z obr. 6 byly zachyceny v časech 0 ms (obr. 6a), 32,5 ms (obr. 6b), 197,5 ms (obr. 6c) a 975 ms (obr. 6d) po skokové změně zatížení.

V okamžiku $t = 0$ ms je kontakt nasnímán těsně před skokovou změnou zatížení. Pro tento okamžik je možno z centrálního profilu mazacího filmu vyčíst, že v tomto okamžiku byly obě kontaktní plochy separovány dostatečnou vrstvou maziva a lokální minima a maxima jsou prisuzovány nerovnostem na povrchu kuličky.

Druhý ze série interferogramů zachycuje tvar maziva v okamžiku $t = 32,5$ ms po změně zatížení. V oblasti vstupu maziva do kontaktu je patrná oblast se zvýšenou hodnotou tloušťky mazacího filmu. Při změně zatížení dojde ke zvětšení kontaktní oblasti a v místě vstupu maziva do kontaktu dojde k prudkému stlačení maziva. Vlivem tlakově viskózního chování maziva dojde k vytvoření oblasti srpkovitého tvaru, která je vyplněna mazivem o vysoké viskozitě.

Další ze snímků v čase $t = 197,5$ ms dokumentuje průchod oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva napříč kontaktem. Oblast prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu, kterou je možno vyjádřit následovně:

$$u_E = \frac{u_D + u_B}{2} \quad (2)$$

Poslední ze série snímků zachycuje situaci, kdy oblast, v níž je uzavřeno mazivo s vysokou viskozitou, opouští kontakt. Jedná se o okamžik v čase $t = 975$ ms po skokové změně zatížení.

Ze série snímků je tedy patrné, že při aplikaci rázového zatížení dochází na vstupu do kontaktu k vytvoření oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva. Tato oblast prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí třecích povrchů. Zároveň nebyla pozorována žádná výraznější změna tloušťky maziva uvnitř kontaktu před a těsně po skokové změně zatížení. Tento jev je způsoben mazivem, které se nachází v kontaktu, a které má díky vysokému kontaktnímu tlaku vysokou viskozitu. Toto mazivo nacházející se uvnitř kontaktu už je téměř necitlivé na změnu zatížení.

6. Závěr

Při vhodném navržení rozměrů mikrodutin a jejich uspořádání v kontaktu by tento přístup mohl napomoci zamezit náhlému snížení tloušťky mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách.

Při rázovém zatížení kontaktu dochází v místě vstupu maziva do kontaktu k vytvoření oblasti se zvýšenou tloušťkou maziva srpkovitého tvaru, které prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí maziva na vstupu do kontaktu. Tato oblast napomáhá lokálně zvýšit množství maziva v kontaktu a chová se jako zásobník maziva. V průběhu experimentu při daných podmínkách nebylo pozorováno porušení mazací vrstvy.

7. Poděkování

Výsledky byly získány za podpory projektu FRVŠ č. 2505.

6. Literatura

- Ai, X. & Yu, H. (1988) A full numerical solution for general transient elastohydrodynamic line contacts and its application. *Wear*, 121, 2, pp. 143-159.
- Dowson, D., Harrison, P. & Taylor, C.M. (1986) The lubrication of automotive cams and followers, in: *Proc. 12th Leeds-Lyon Symposium on Tribology* (D. Dowson eds), Leeds University, Leeds, pp. 305-322.
- Glovnea, R.P. & Spikes, H.A. (2001) The influence of cam follower motion on elastohydrodynamic film thickness, in: *Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology* (D. Dowson eds), Leeds University Institut National des Science Appliquées de Lyon, Lyon, pp. 485-499.
- Chang, L.A. (2000) A simple and accurate method to calculate transient EHL film thickness in machine components undergoing operation cycles. *Tribology transactions*, 43, 1, pp. 116-122.
- Jang, S. & Park, K. (2000) Dynamic EHL film thickness in cam and follower contacts of various valve lifts, in: *Advances in powertrain tribology*, Warrendale, pp. 101-107.
- Kaneta, M., Ozaki, S., Nishikawa, H. & Guo, F. (2007) Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of engineering tribology*, 221, 3, pp. 271-278.
- Kudish, I.I. (2004) On formulation of a non-steady lubrication problem for a non-conformal contact. *STLE Tribol.*, 42, 1, pp. 53-57.
- Messe, S. & Lubrecht, A. (2000) Transient elastohydrodynamic analysis of an overhead cam/tappet contact. *Proceedings IMechE Journal of Engineering Tribology*, 214, J5, pp. 415-425.
- Petrusevitch, A.I., Kodnir, R.S., Salukvadze, R.G., Bakashvili, D.L. & Schwarzman, V.Sh. (1972) The investigation of oil film thickness in lubricated ball-race rolling contact. *Wear*, 19, 4, pp. 369-389.
- Sugimura, J. & Spikes, H.A. (1997) Technique for measuring EHD film thickness in non-steady state contact conditions, in: *Proc. 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology* (D. Dowson eds), Leeds University, Leeds, pp. 91-100.
- Sugimura, J. & Spikes, H.A. (1998) EHD film thickness in non-steady state contacts. *ASME Trans. Jour. of Trib.*, 120, 3, pp. 442-452.
- Taylor, C.M. (1991) Valve train lubrication analysis, in: *Proc. 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology* (D. Dowson & C.M.Taylor eds), Leeds University, Leeds, pp. 119-131.
- Vichard, J.P. (1971) Transient effects of the lubrication of Hertzian contacts. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 13, 3, pp. 173-189.
- Wang, J., Hasimoto, T., Nishikawa, H. & Kaneta, M. (2005) Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion. *Tribology Internacional*, 2005, 38, 11-12, pp. 1013-1021.

Zimmerman, M. (2008) Vliv nestacionárních podmínek na bodový EHD kontakt, in: 49. *Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, pp. 285-288.

Zimmerman, M. & Svoboda, P. (2009) Experimental study of lubrication films under non-steady state conditions, in: *Sborník prací FSI Junior konference 2008*, FSI VUT v Brně, Brno, plánovaný termín vydání – 31.3 2009.