

A close-up photograph of a Zeiss microscope. The main body is silver-colored metal. A prominent feature is a thick, red, curved handle or grip attached to the side. On the upper part of the microscope, there is a label with the Zeiss logo and the text "West Germany" and "147779". The background is a plain, light color.

Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení

Martin Zimmerman

Školitel: prof. Ing. Martin Hartl Ph.D.

Ústav konstruování – Odbor konstruování strojů

Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně

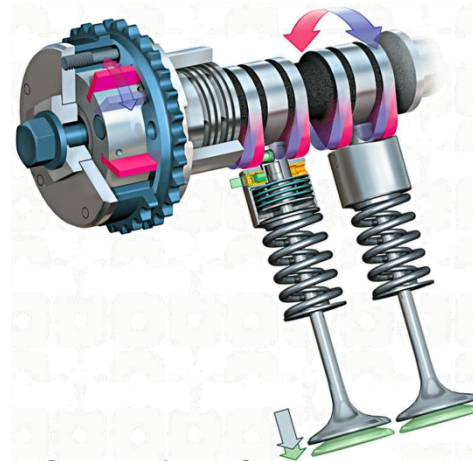
- úvod do problematiky
- přehled současného stavu poznání
- analýza a zhodnocení poznatků
- cíle disertační práce
- metody přístupu a návrh způsobu řešení
- výsledky a diskuse
- závěr

Úvod do problematiky

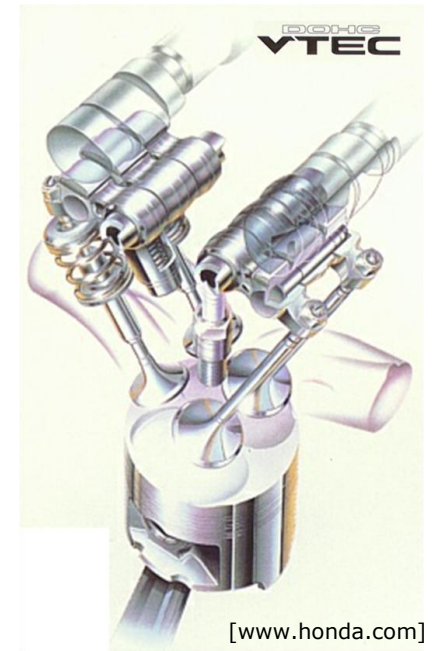
- reálné tribologické uzly – proměnné parametry rychlosti, zatížení, geometrie
- styk kontaktních ploch – příčina opotřebení a energetických ztrát
- nutnost zajištění funkčnosti mazaných kontaktů v kritických fázích provozu
- pochopení chování maziva při dynamické změně provozních parametrů
 - experimentální přístup
 - numerické simulace



[www.nke.at]



[www.porsche.com]



[www.honda.com]

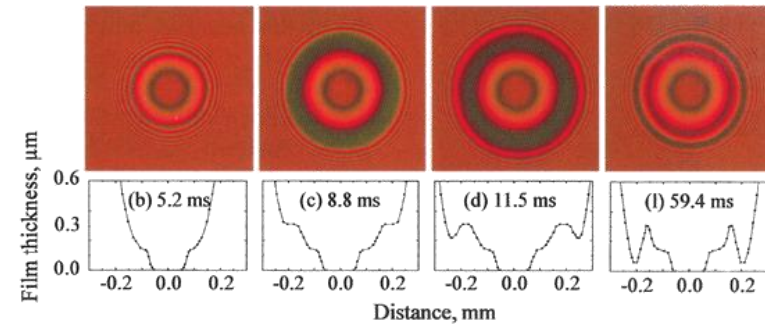
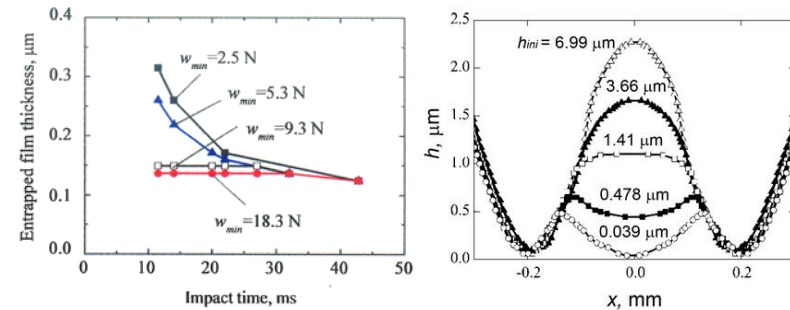
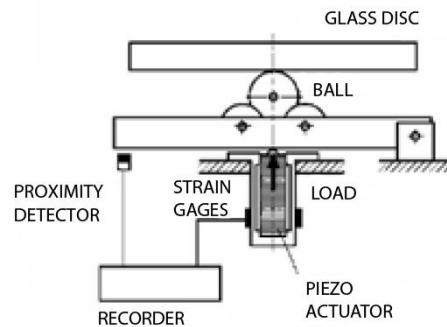
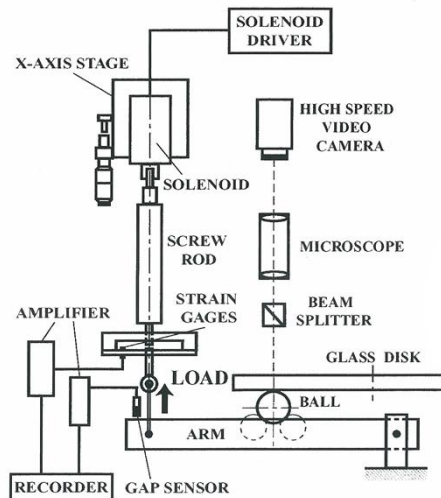
Přehled současného stavu poznání – proměnné zatížení

- studie chování maziva za podmínek

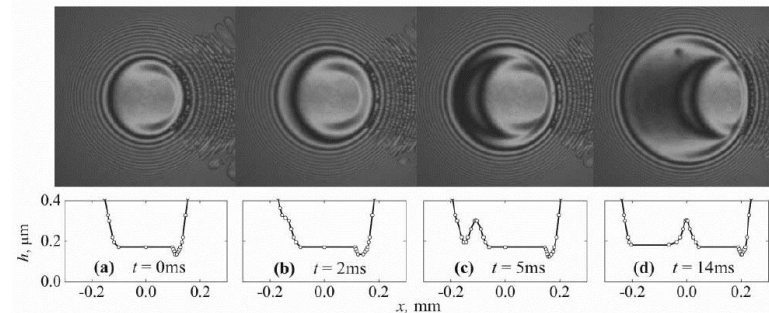
- kvazistatický kontakt
- mazaný Hertzův kontakt
- čisté valení + skluz

- profil filmu závislý na parametrech

- vzdálenost kontakt. ploch
- rychlost zatěžování



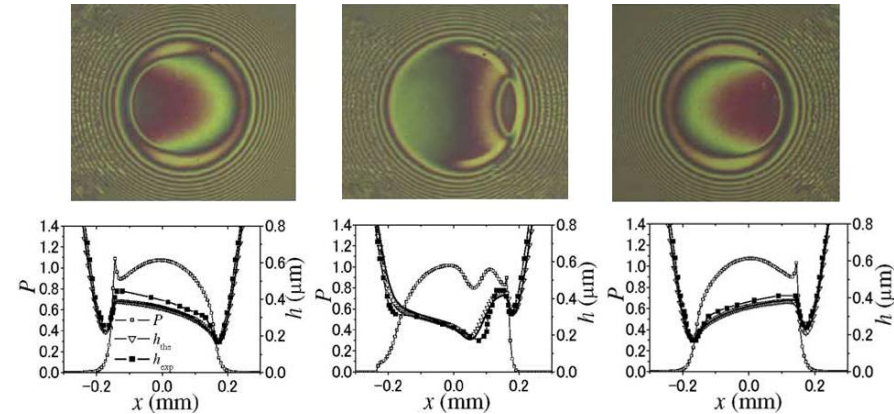
SAKAMOTO, M. et al.: Behaviour of point contact EHL films under pulsating loads, 2004.



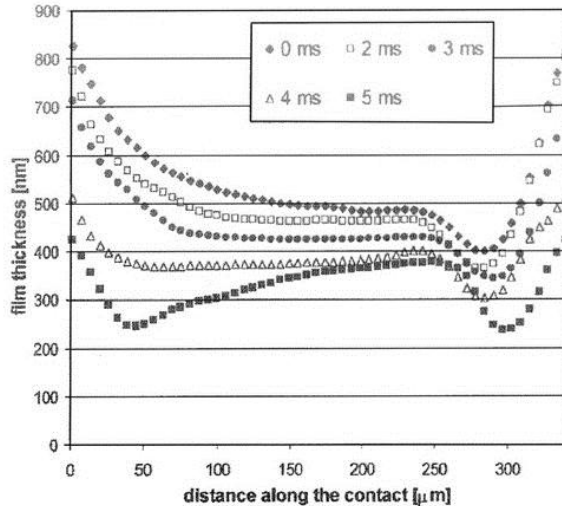
KANETA, M. et al.: Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films, 2007.

Přehled současného stavu poznání – proměnná rychlost

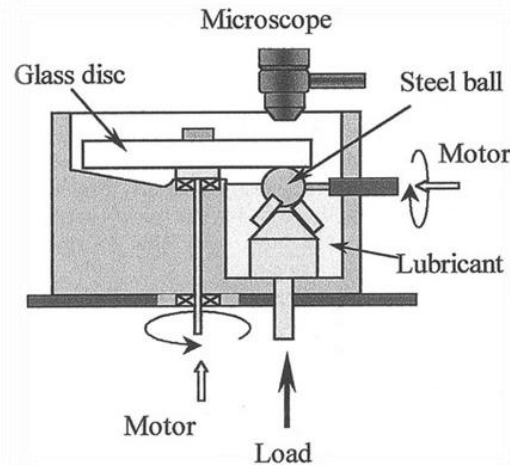
- studie chování maziva za podmínek
 - náhlé zastavení třecích ploch
 - změna smyslu otáčení
 - nulová hodnota střední rychlosti
- profil filmu závislý na parametrech
 - frekvence změny rychlosti
 - viskozitně-tlakový koeficient



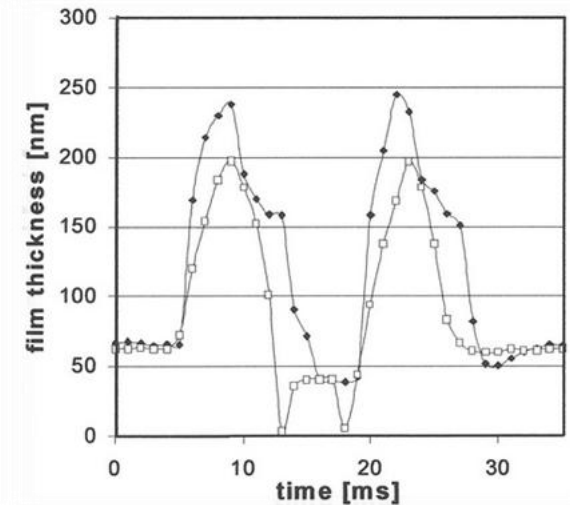
WANG, J. et al.: Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion, 2005.



GLOVNEA, R.P. et al.: Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration, 2001.

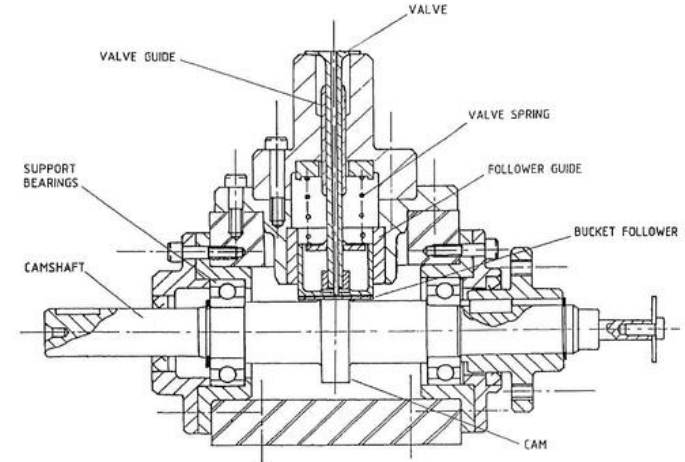


GLOVNEA, R.P. et al.: The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamical film thickness, 2001.

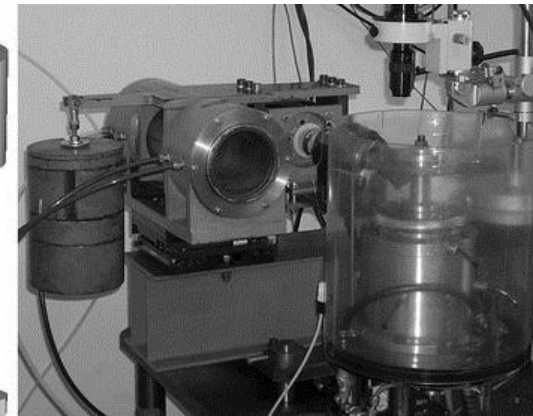
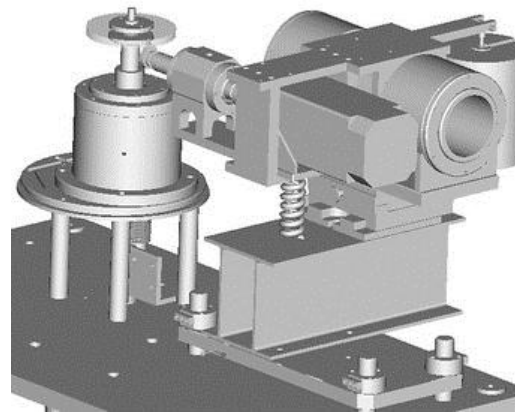


Přehled současného stavu poznání – vačka a zdvihátko

- studie chování maziva pro kontakt vačka - zdvihátko
 - využití nepřímých metod
 - Hamilton, G.M. (1980) – kapacitní metoda
 - Dowson, D. et al. (1990) – měření el. odporu
 - Van Leeuwen, H. et al. (1987) – napařené snímače tloušťky mazacího filmu
 - přímé metody pozorování
 - Glovnea, D. et al. (2001) – optická interferometrie
 - Vela, D. et al. (2011) – optická interferometrie
 - zkoumané parametry
 - tloušťka mazacího filmu
 - energetické ztráty
 - profil filmu závislý na parametrech
 - frekvence otáčení vačkového hř.
 - zatížení kontaktu
 - reologické vlastnosti maziva



DOWSON, D. et al.: The lubrication of automotive cams and followers, 1986.



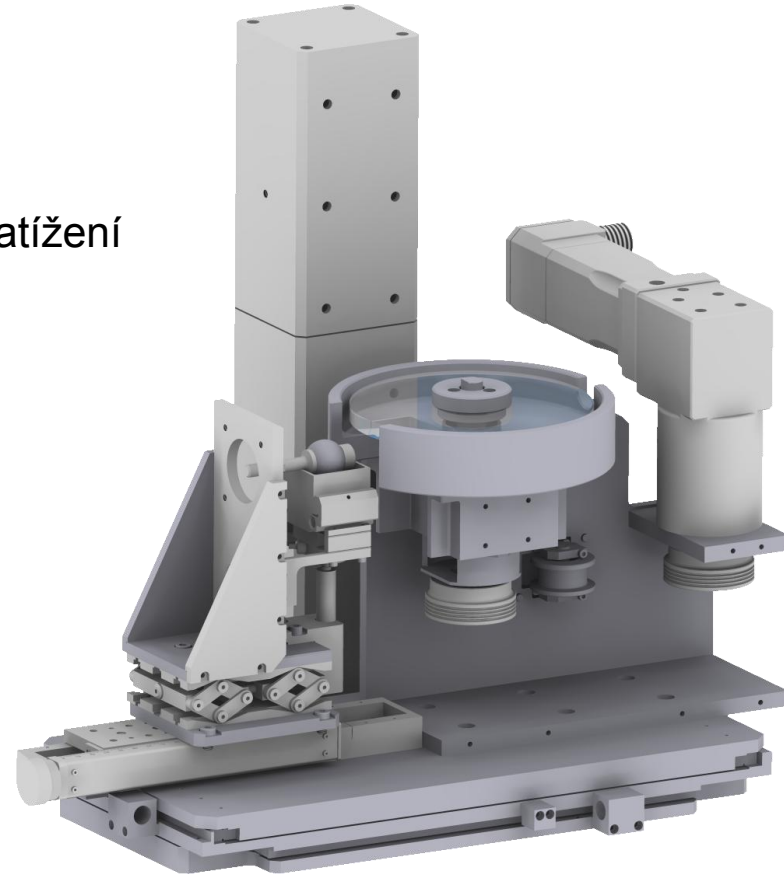
VELA, D. et al.: Investigation on cam-follower lubricated contacts, 2009.

Cíl disertační práce

- Experimentální objasnění chování mazacího filmu v EHD mazaném kontaktu při časové změně parametrů rychlosti a zatížení kontaktních ploch.

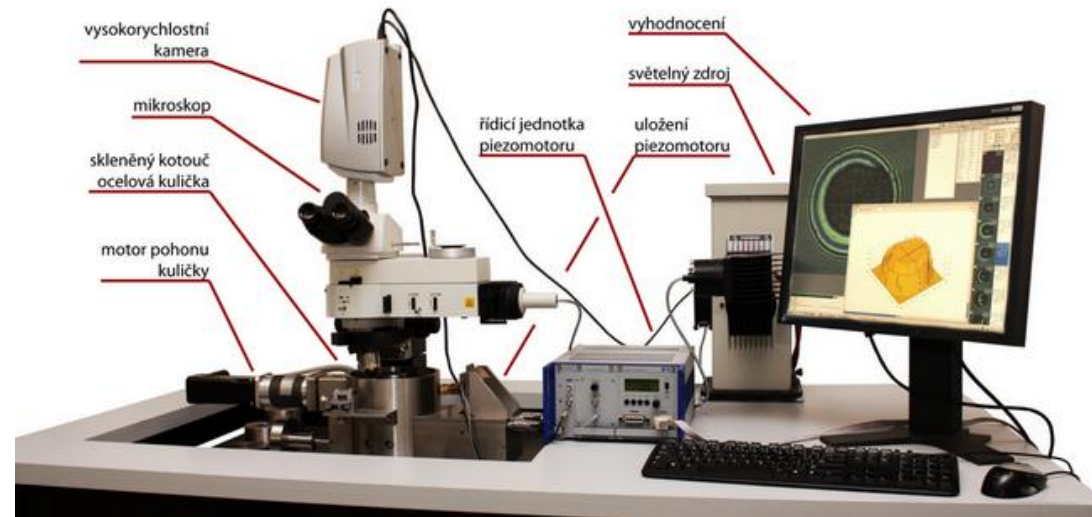
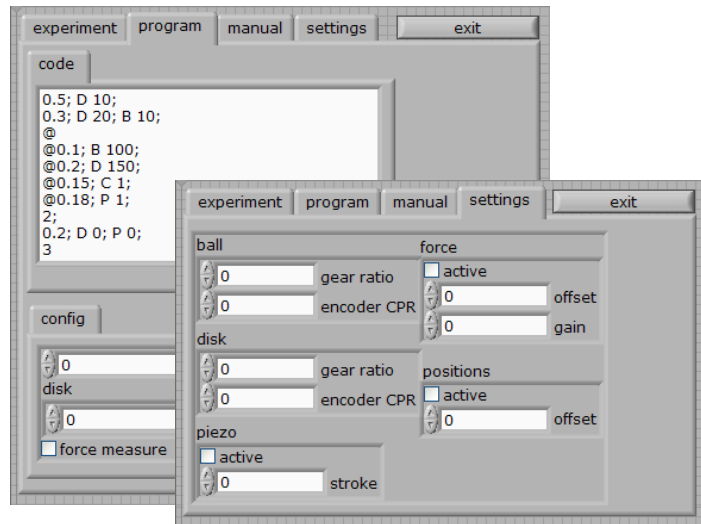
Dílčí cíle disertační práce

- modifikace stávajícího zařízení – proměnné zatížení
- série ověřovacích experimentů – proměnné zatížení
- návrh software pro řízení experimentu – proměnné zatížení a rychlost
- série ověřovacích experimentů – proměnná rychlost
- návrh nové experimentální aparatury



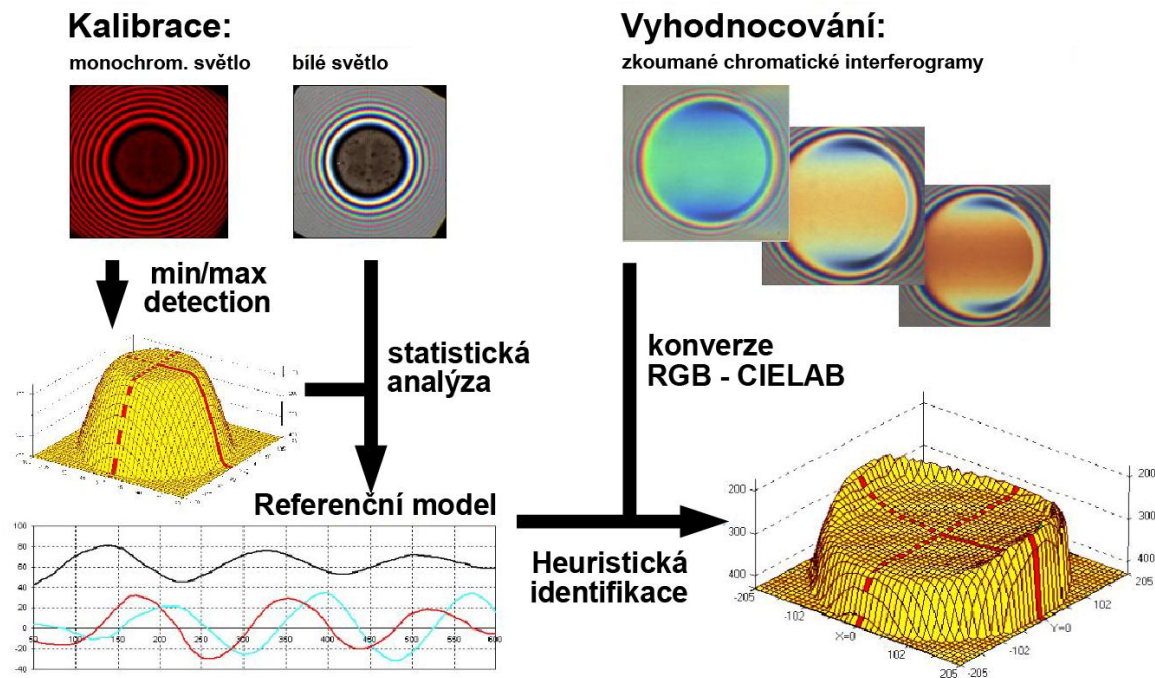
Metody přístupu a návrh způsobu řešení

- změna zatížení piezo-motorem
- generování základních pulzů – Wave Generator
- buzení parazitních vibrací
- poháněna pouze ocelová kulička
- neucelené softwarové řízení experimentu
- nemožnost simulace dvou proměnných parametrů

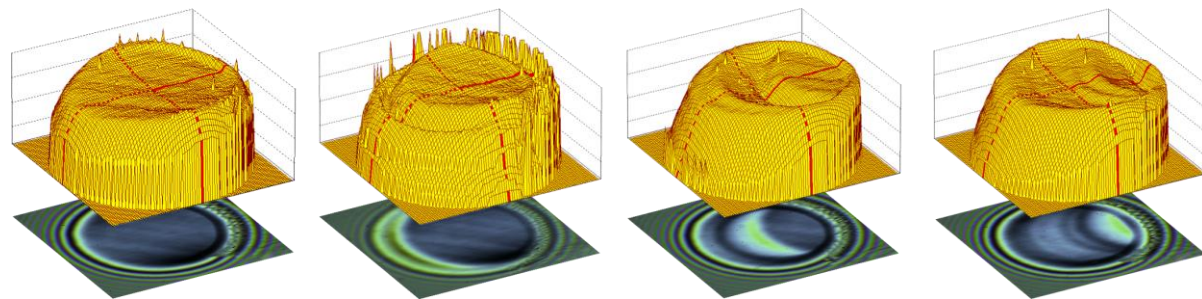


Metody přístupu a návrh způsobu řešení

- chromatická interferometrie
- kalibrace
 - monochromatické světlo
 - chromatické světlo
- min./max. detekce
- přiřazení hodnot
 - barva \leftrightarrow tl. mazacího filmu
- vyhodnocení zkoumaných chromatických interferogramů



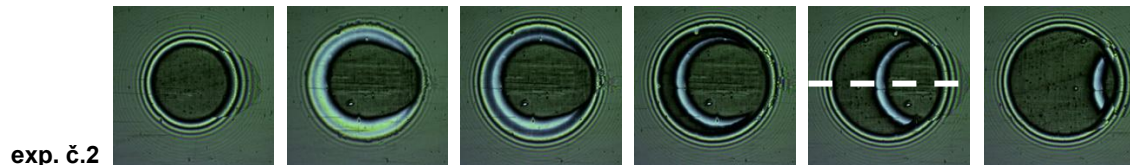
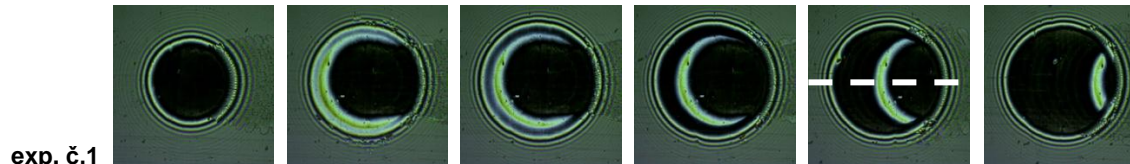
ČUDEK, V. Studium tenkých mazacích filmů spektroskopickou reflektometrií, 2010.



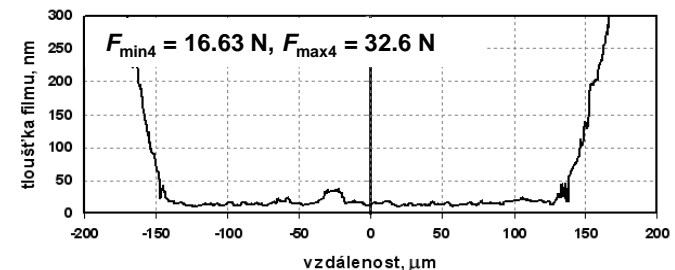
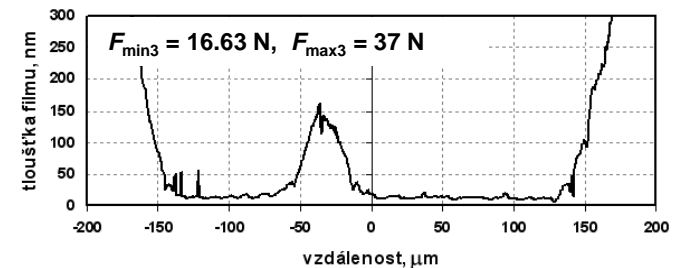
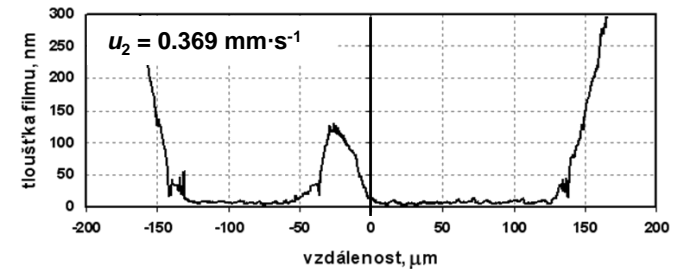
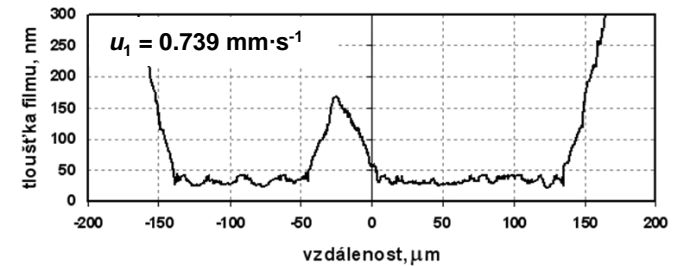
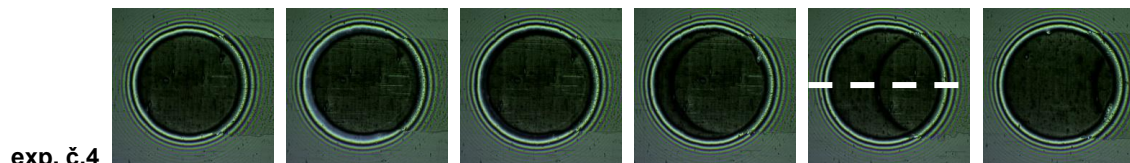
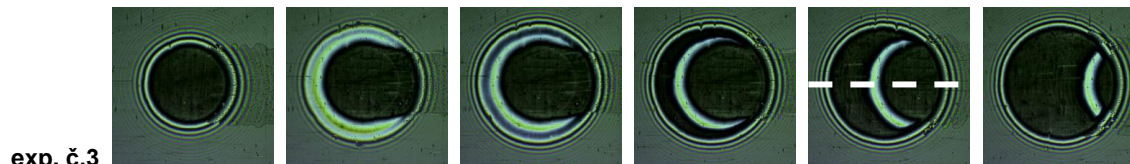
Výsledky a diskuse – skoková změna zatížení

- pozorován vliv změny zatížení a rychlosti kont. ploch
- sledováno zachycení části maziva na vstupu do kontaktu
- změna rychlosti
 - posun profilu filmu; bez vlivu na výšku maziva v U oblasti
- změna zatížení
 - ovlivňuje množství zachyceného maziva

load: $F_{\min} = 13.63 \text{ N}$; $F_{\max} = 37 \text{ N}$



entrainment speed: $u = 0.369 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Výsledky a diskuse – harmonická změna zatížení

■ použité materiály

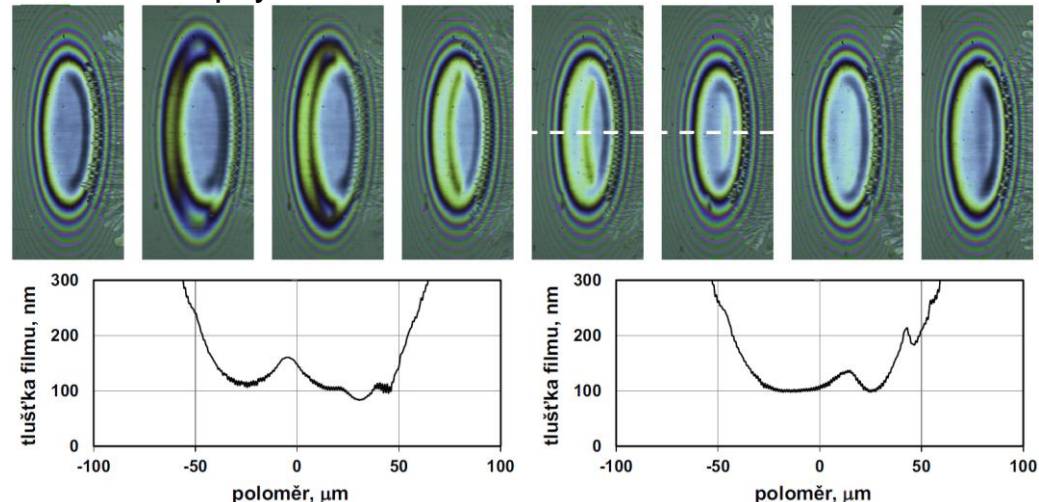
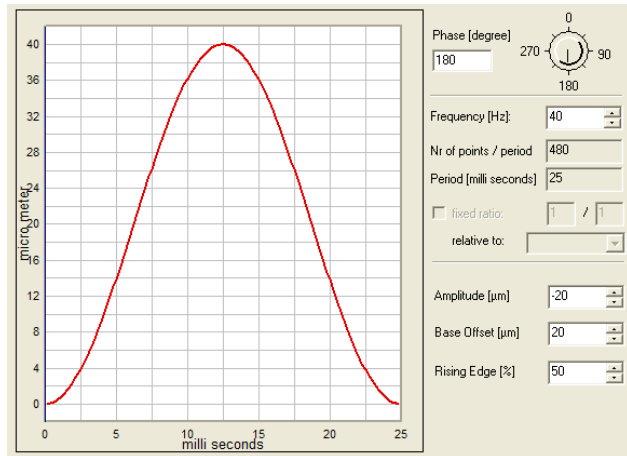
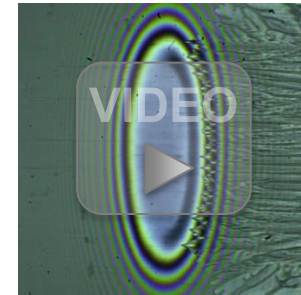
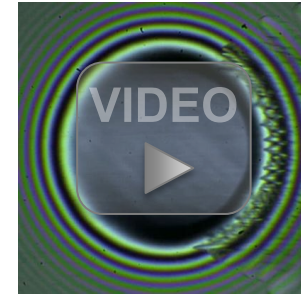
- skleněný disk – ocelová kulička, ocelový soudeček
- mazivo – LSBS, $\eta = 0,69 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 24 \text{ GPa}^{-1}$

■ kruhový kontakt

- $p_{\min} = 0,38 \text{ GPa}$, $p_{\max} = 0,48 \text{ GPa}$, $u = 4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
- uzavření maziva na vstupu do kontaktu
- při odlehčení pokles tl. maziva na vstupu

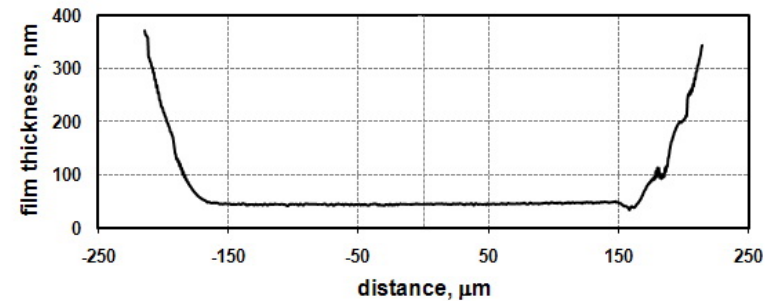
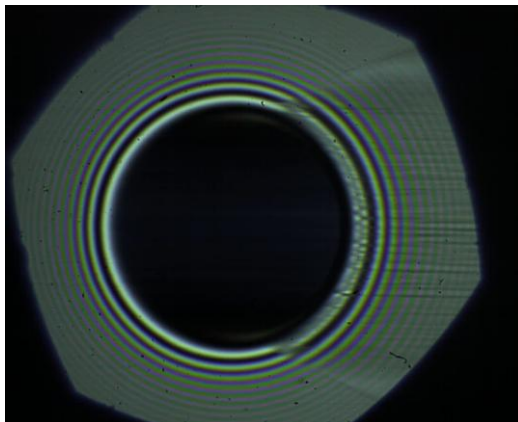
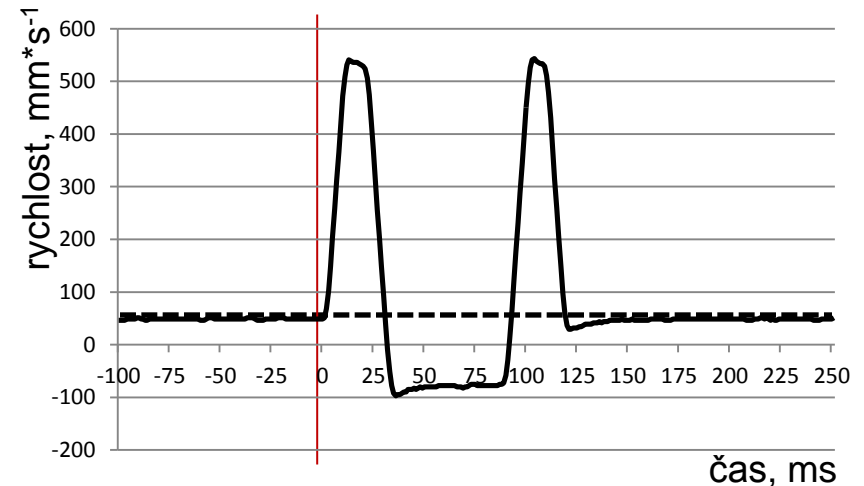
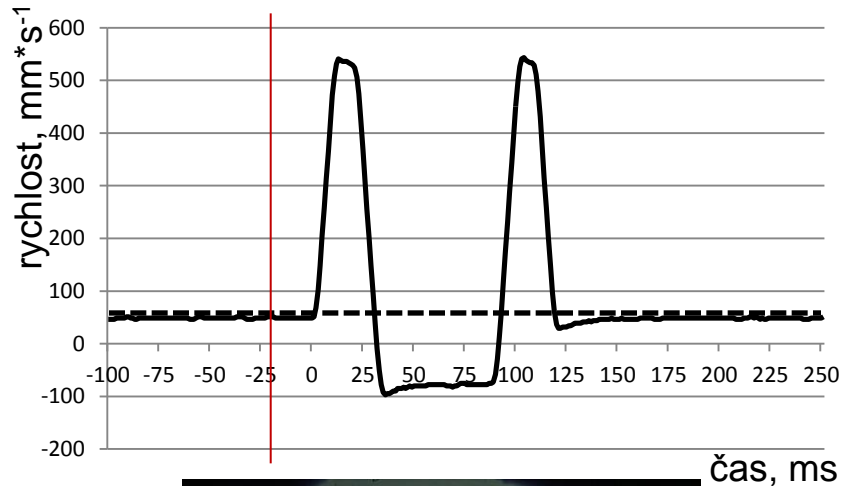
■ eliptický kontakt

- $p_{\min} = 0,24 \text{ GPa}$, $p_{\max} = 0,32 \text{ GPa}$, $u = 4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
- menší množství zachyceného maziva
- nepozorován pokles tl. filmu při odlehčení
- pozorován únik maziva v místě hlavních vrcholů elipsy



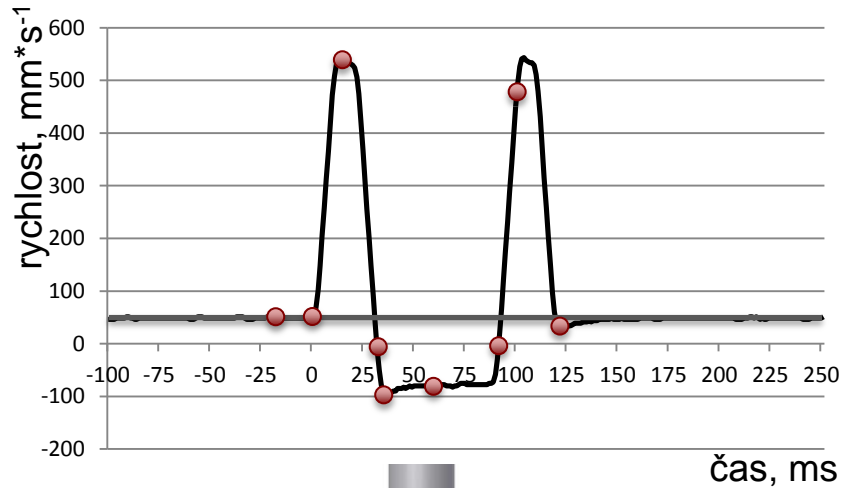
Dynamická změna rychlosti (simulace vačky a zdvihátka)

- konstantní zatížení + dynamická změna rychlosti
- mazivo – HPO200, $\eta = 0,065 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 19 \text{ GPa}^{-1}$
- zatížení – $p_{\text{max}} = 0,505 \text{ GPa}$



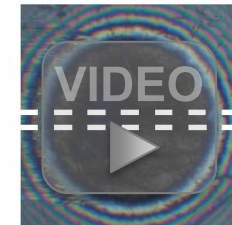
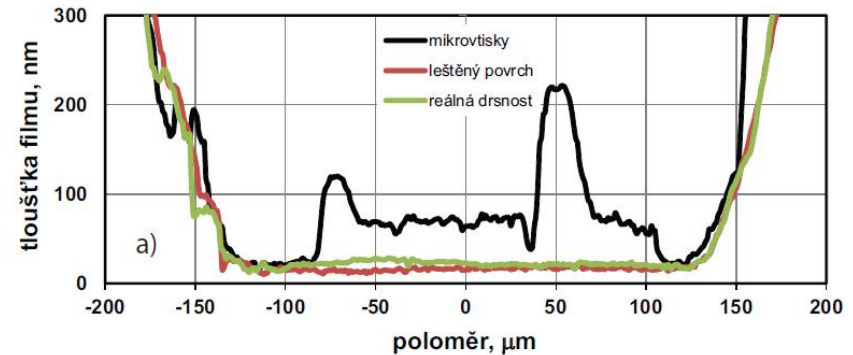
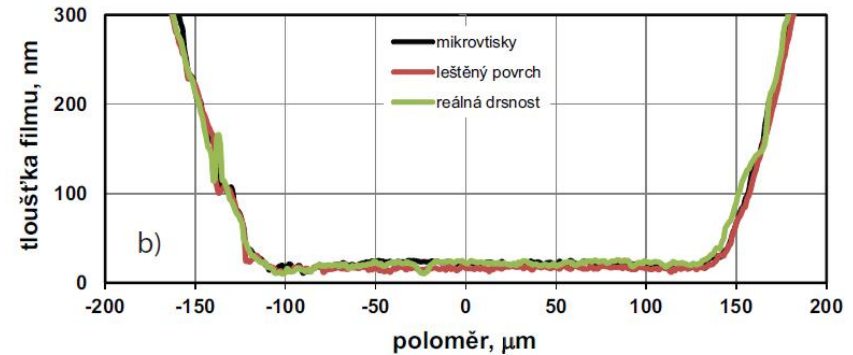
Dynamická změna rychlosti (simulace vačky a zdvihátka)

- konstantní zatížení + dynamická změna rychlosti
- mazivo – HPO200, $\eta = 0,065 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, $\alpha = 19 \text{ GPa}^{-1}$
- zatížení – $p_{\text{max}} = 0,505 \text{ GPa}$



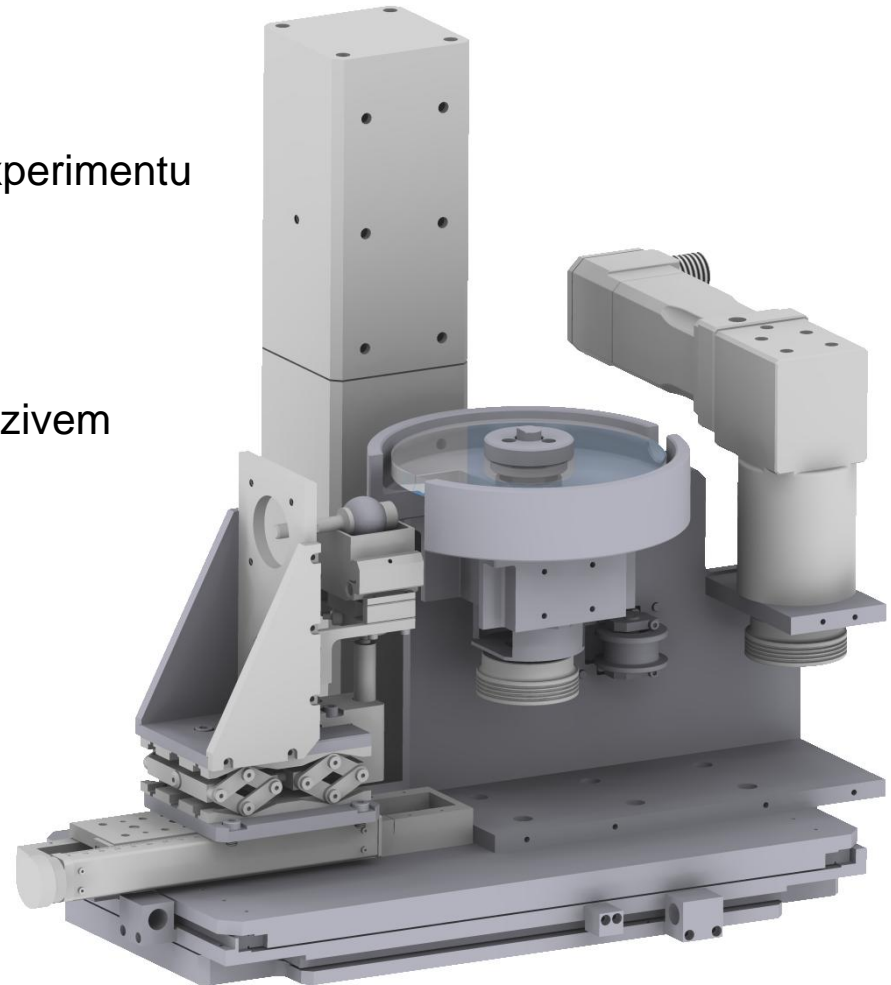
$$\Sigma = \frac{2 \cdot (u_D - u_B)}{u_D + u_B}$$

$$\Sigma = -1\text{Ø}$$



Návrh nové experimentální aparatury

- možnost simultánní změny dvou provozních parametrů (zatížení a rychlost)
- monitorování kontaktního zatížení v průběhu experimentu
- zatěžování kontaktu pohybem ocelové kuličky
- redukování pohyblivých hmot
- snazší čištění komponent kontaminovaných mazivem
- snazší manipulace s kontaktními tělesy
- možnost řízení teploty olejové lázně



- pro případ zjednodušené simulace vačky a zdvihátka popsáno chování mazacího filmu
 - s ověřením vlivu topografie kontaktních těles – zjištěn výrazný vliv modifikované topografie na tvar mazacího filmu
 - pro maziva s odlišnou viskozitou
- z provedených měření vyplývá pozitivní vliv cílené modifikace povrchu na utváření mazacího filmu v EHD mazaném kontaktu v kritických fázích provozu (reverzace, $u_e = 0 \text{ m.s}^{-1}$ atd.)
- pro dynamickou změnu zatížení byl studován vliv
 - typu zatěžujícího pulzu
 - konfigurace kontaktních těles – vliv relativní tuhosti
- z provedených měření vyplývá
 - ΔF ovlivňuje velikost h_{\max} , nemá vliv na tl. maziva v kontaktu
 - změna rychlosti – množství zachyceného maziva
- na základě provedených měření byly formulovány požadavky na nové zařízení
- návrh nové experimentální aparatury umožňující změnu dvou provozních parametrů

Publikace v časopisech (impaktovaných, recenzovaných)

- KŘUPKA, I., HARTL, M., ZIMMERMAN, M., HOUŠKA, P., SIYOUL, J. Effect of surface texturing on elastohydrodynamically lubricated contact under transient speed conditions. Tribology International. 2011, 44, 10, s. 1144-1150. ISSN: 0301-679X.
- ŠAMÁNEK, O., ZIMMERMAN, M., SVOBODA, P., KŘUPKA, I., VRBKA, M. Influence of Surface Texturing on Lubricant Film Formation and Surface Fatigue. Engineering Mechanics. 2010, 17, 1, s. 27-36. ISSN: 1802-1484.



■ FRVŠ

- 2505/2009 G1 - Využití vizualizace nestacionárních tribologických procesů vysokorychlostní záznamovou technikou v konstrukčních předmětech
- 2241/2010 G1 - Vliv proměnného zatížení na chování mazacího filmu uvnitř elastohydrodynamicky mazaného kontaktu
- 3261/2011 G1- Možnosti propojení programu National Instruments LabVIEW a databáze

■ Fond vědy FSI

- 1383003 - Experimentální studium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách
- 1393009 - Vliv plynulé změny zatížení elastohydrodynamického mazaného kontaktu na profil mazacího filmu



Děkuji za pozornost

M. Zimmerman

 Institute of Machine
and Industrial Design

Institute of Machine and Industrial Design

Faculty of Mechanical Engineering
University of Technology

Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení

1. prosince 2011, Vysoké učení technické v Brně

- Je možné definovať „univerzálné“ kritéria na jednoznačné určenie hraníc medzi medzným, EHD a zmiešaným trením?

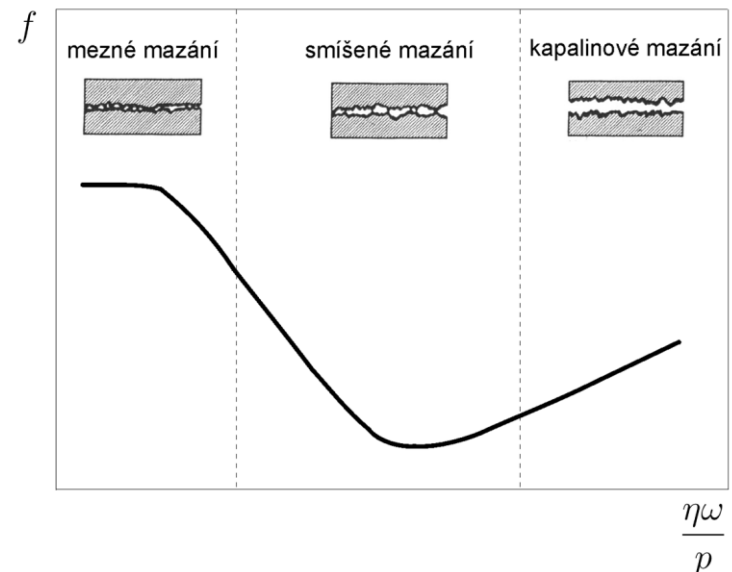
Režim mazání	Tloušťka mazacího filmu h_{\min} (μm)	Parametr mazání Λ	Součinitel tření f
mezné	0,005 – 0,1	< 1	0,03 – 1
smíšené	0,01 – 1	1 – 3	0,02 – 0,15
elastohydrodynamické	0,01 – 10	3 – 10	0,01 – 0,1
hydrodynamické	1 – 100	6 – 100	0,001 – 0,01

BHUSHAN, B., GUPTA, B. K., Handbook of Tribology (Materials, Coatings, and Surface Treatments). New York, McGraw-Hill, Inc. 1991, s. 2.32.

- Ktoré parametre materiálové alebo záťažové (tlak, rýchlosť, teplota) sú významnejšie (ak je to vôbec možno určiť) pre definovanie prevládajúceho mechanizmu mazania?

■ Stribeckova křivka

- přímá úměra - η [Pa.s], ω [s⁻¹]
- nepřímá úměra - p [Pa]



- Aké môžu byť teoretické hodnoty šmykových napätí vo vrstve mazacieho oleja pri EHD kontakte ak pri predpokladanom Hertzovom zaťažení existujú tlaky radovo v GPa?

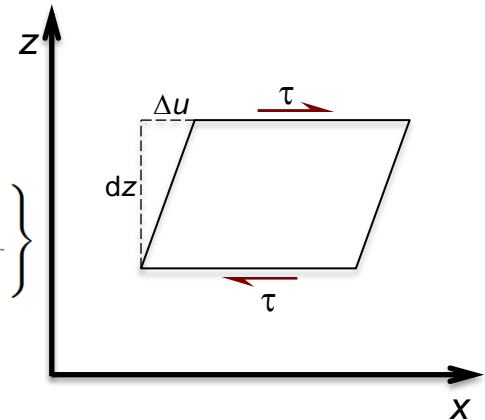
■ Roleans

$$\tau = \eta_R \dot{\gamma} = \eta_R \frac{\partial u}{\partial z}$$

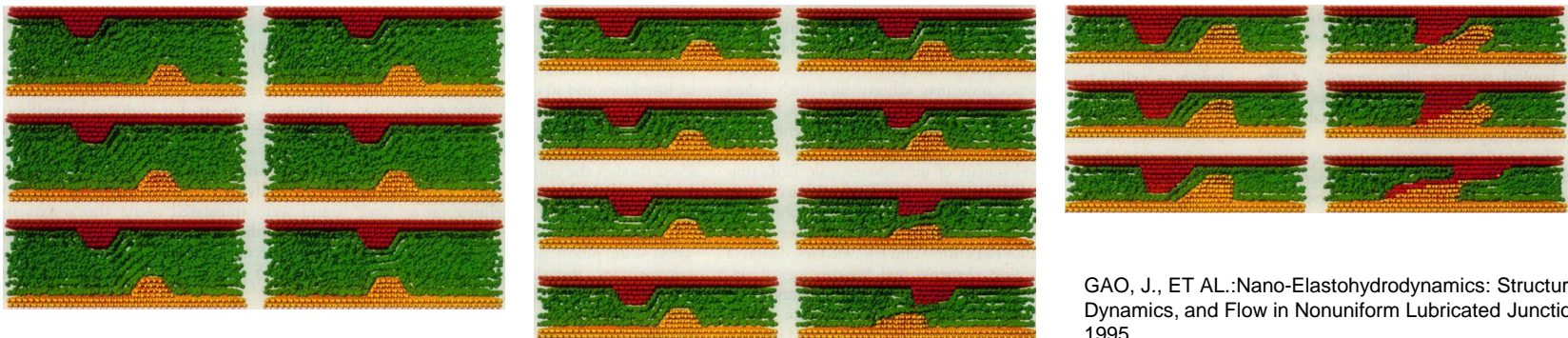
$$\eta_R = \eta_0 e^{\alpha^* p}$$

$$\alpha^* p = [\ln(\eta_0) + 9.67] \left\{ \left(\frac{\theta - 138}{\theta_0 - 138} \right)^{-S_0} (1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^Z - 1 \right\}$$

$$Z = \frac{\alpha}{5.1 \times 10^{-9} [\ln(\eta_0) + 9.67]}$$



- Je možné uvažovať s výskumom v oblasti EHD kontaktov pre MEMS? Akým významným faktorom je vplyv zotrvačných a adhézných síl?



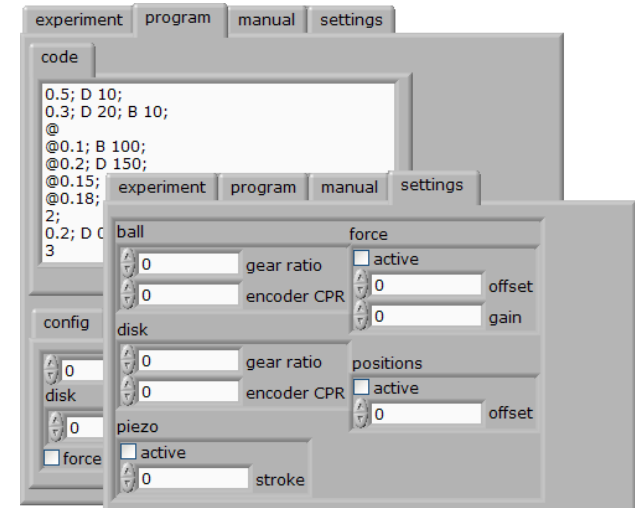
GAO, J., ET AL.: Nano-Elastohydrodynamics: Structure, Dynamics, and Flow in Nonuniform Lubricated Junctions, 1995.

- V práci jsou na různých místech používány dvě zkratky, totiž EHD a EHL. Jakou odlišnou souvislost má jejich paralelní použití vyjadřovat?
 - EHD – elastohydrodynamic
 - EHL – elastohydrodynamic lubrication

- Při experimentech byly použity dva základové oleje s řádově odlišnými viskozitami při jedné teplotě. Olej LSBS odpovídá VG 220, zatímco olej HPO200 je na úrovni VG 32. Proč nebyla provedena zkouška i za zvýšené teploty? Nedochozelo během jednotlivých zkušebních běhů ke vzrůstu teploty třecího uzlu?

- V rešeršní části práce je zmíněna situace, kdy na třecích površích vzniká z použitého maziva adsorpční vrstva, která má vliv na vlastnosti EHD kontaktu. Dá se očekávat, že používaná metoda optické interferometrie by takový vliv/jev mohla kvalifikovat nebo dokonce kvantifikovat?
 - str. 23 - CHU, L.M. Thin film elastohydrodynamic lubrication of circular contacts at pure squeeze motion. Industrial Lubrication and Tribology. 2010, vol. 62, no. 4, s. 238-244. ISSN 0036-8792.
 - numerické řešení problému – cílená aplikace adsorbční vrstvy
- V práci je několikrát zmiňována možnost tvorby vzduchových bublin při odlehčení EHD kontaktu. Bylo možno během provedených experimentů takové bubliny pozorovat? A pokud ano, jak jinak, než poklesem tloušťky filmu?
 - generování bublin v okolí stopy kontaktu při snížení zatížení maziva
 - pokles tloušťky filmu = následek výskytu bublin v mazivu
 - opticky zaznamenatele pouze s nepovlakovaným diskem

- V úvodu kapitoly 5.1 je uvedeno, že experimentální studium je zaměřeno na výzkum chování maziva v kontaktu vačky a plochého zdvihátka. Pak autor uvádí, že provedl zjednodušení řešeného problému a některé parametry zanedbává. Na základě čeho bylo zjednodušení provedeno?
 - zanedbané parametry
 - změna zatížení kontaktu
 - změna poloměru křivosti kontaktních ploch
 - důvod zanedbání parametrů
 - nemožnost současné změny zatížení a rychlosti kontaktních povrchů vlivem konstrukce experimentálního zařízení
 - úprava zařízení a ovládacího software
 - možnost simulovat dynamické změny rychlosti a zatížení – s omezeními



- Může se autor vyjádřit, které veličiny podstatně ovlivňují chování maziva v kontaktu a které lze z hlediska řešeného problému zanedbat? Jaká je věrohodnost použitého zjednodušeného modelu vačky a plochého zdvihátka?

- eliptický kontakt

$$H_{min} = 3,68U^{0,68}W^{-0,073}G^{0,49}(1 - e^{-0,68k})$$

$$H_{cen} = 2,69U^{0,67}W^{-0,067}G^{0,53}(1 - 0,61e^{-0,73k})$$

$$U = \frac{\eta_0 u}{E' R_x}$$

- liniový kontakt

$$H_{min} = 2,65U^{0,7}W^{-0,13}G^{0,54}$$

$$H_{cen} = 3,06U^{0,69}W^{-0,10}G^{0,56}$$

$$W = \frac{F}{E' R_x^2}$$

$$G = \alpha E'$$

■ Jak byl určen průběh rychlostí na obr. 5.1.?

$$y = h \left[C_p \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^p + C_q \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^q + C_r \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^r + C_s \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^s \right]$$

$$y' = \frac{h}{\beta} \left[C_p p \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{p-1} + C_q q \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{q-1} + C_r r \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{r-1} + C_s s \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{s-1} \right]$$

$$y'' = \frac{h}{\beta^2} \left[C_p p(p-1) \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{p-2} + C_q q(q-1) \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{q-2} + C_r r(r-1) \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{r-2} + C_s s(s-1) \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^{s-2} \right]$$

$$C_p = \frac{C_0 q r s \dots}{(q-p)(r-p)(s-p) \dots}$$

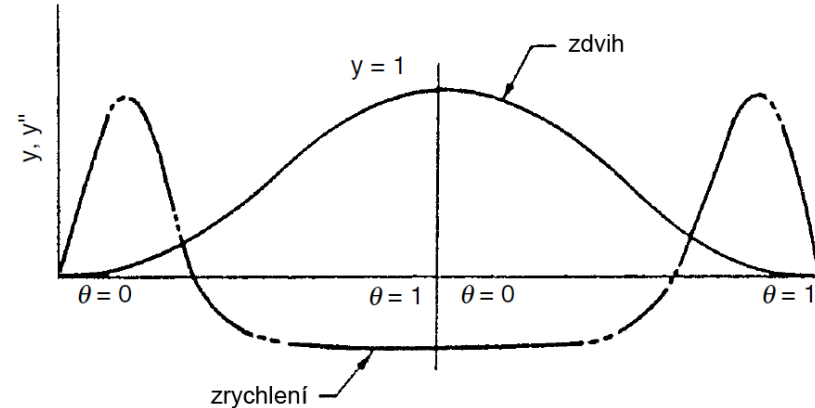
⋮

$$\theta = 0, y = 0, y' = 0, y'' = 0$$

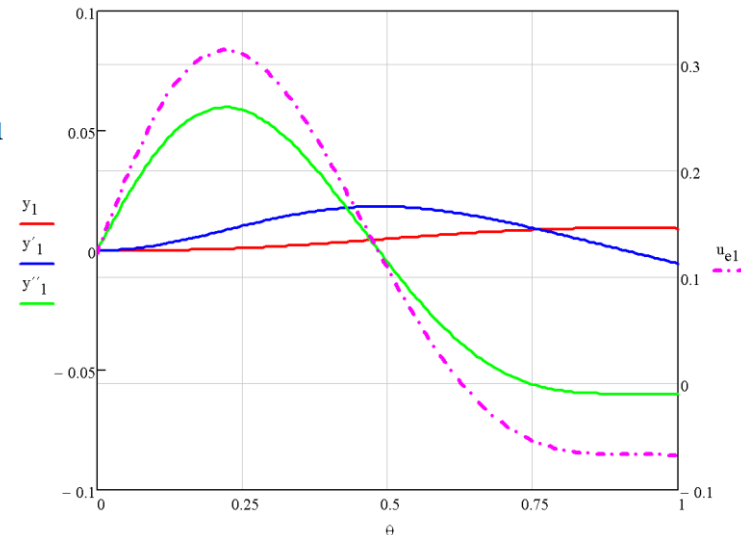
$$\theta = 1, y = 1, y' = \text{dle typu}, y'' = \text{dle typu}$$

$$R_c = R_b + y + \frac{y''}{\Omega^2}$$

$$u_e = \left(R_c + \frac{y''}{\Omega^2} \right) \frac{\Omega}{2}$$



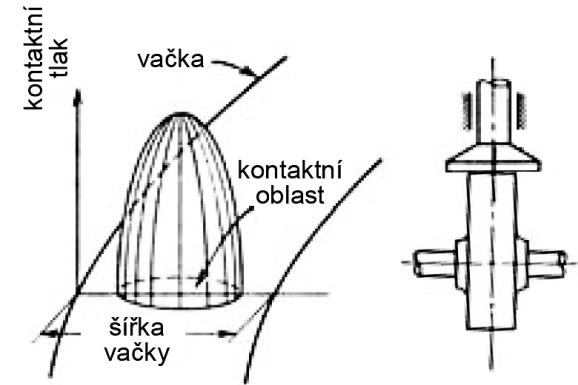
ROTHBART, H. :Cam Design Handbook: Dynamics and Accuracy, 2003.



- Při experimentální studii chování mazacího filmu při dynamické změně rychlosti povrchů byla použita kulička s cílenou modifikací povrchu. Podle čeho byla provedena úprava povrchu (rozmístění, velikost vtisků), když v rešeršní studii není o úpravách povrchů zmínka?

- Autor v práci uvádí, že modifikovaný povrch zlepšuje podmínky mazání. Proč nebylo připraveno více variant a provedena detailní analýza? Má smysl hledat optimální velikost a rozložení vtisků na kuličce nebo jsou jiné vlivy podstatnější pro chování mazacího filmu?
 - detailní analýza
 - vliv na chování maziva
 - vliv na kontaktní únavu

- Proč byl pro experimentální studium chování mazacího filmu při dynamické změně zatížení použit ocelový soudeček?
 - zjištění vlivu geometrie kontaktních těles na chování maziva
 - vyšší relativní tuhost → menší deformace
 - nižší množství zachyceného maziva
 - shoda tvaru kontaktní plochy s příkladem vačka - zdvihátko
 - spolupráce se zahraničním partnerem na řešení projektu



ROTHBART, H. :Cam Design Handbook: Dynamics and Accuracy, 2003.

- Kdy bude realizován nový návrh experimentálního zařízení? Bude možné na novém zařízení simulovat libovolný zátěžný cyklus včetně synchronizace s cyklem určujícím rychlostní poměry v kontaktu?

