

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Martin Zimmerman

**CHOVÁNÍ EHD MAZACÍHO FILMU PŘI NÁHLÝCH
ZMĚNÁCH RYCHLOSTI A ZATÍŽENÍ**

**EHD LUBRICATION FILM BEHAVIOUR UNDER
RAPID CHANGE OF VELOCITY AND LOAD**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

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

Oponenti: prof. Ing. Marián Dzimko, CSc.
Ing. Petr Dobeš, CSc.
Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.

Klíčová slova:

EHD mazání, tloušťka mazacího filmu, nestacionární podmínky, mazací film.

Keywords:

EHL, film thickness, non-steady state condition, lubrication film.

Místo uložení práce:

Oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně.

© Ing. Martin Zimmerman

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
2.1	Studium EHD mazaných kontaktů při změně zatížení	6
2.2	Studium EHD mazaných kontaktů při změně rychlosti třecích povrchů	7
2.3	Studium EHD mazaných kontaktů při simulaci kontaktu vačky a zdvihátka	9
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
4	METODY PŘÍSTUPU A NÁVRH ZPŮSOBU ŘEŠENÍ	12
4.1	Experimentální zařízení	12
4.2	Návrh nového experimentálního zařízení	13
5	VÝSLEDKY A DISKUSE	15
5.1	Experimentální studium chování mazacího filmu při dynamické změně rychlosti třecích povrchů	15
5.1.1	Popis experimentu	15
5.1.2	Maziva s nízkou viskozitou – HPO 200	16
5.1.3	Maziva s vysokou viskozitou – LSBS	20
5.2	Experimentální studium chování mazacího filmu při dynamické změně zatížení třecích povrchů	21
5.2.1	Popis experimentu	21
5.2.2	Kruhový kontakt	21
5.2.3	Eliptický kontakt	24
6	ZÁVĚR	26
7	LITERATURA	27
8	PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	30
9	CURRICULUM VITAE	31

1 ÚVOD

Disertační práce se zabývá studiem vlivu časově proměnných parametrů rychlosti a zatížení na utváření mazacího filmu u vysoce zatěžovaných strojních součástí. V technické praxi je běžné, že se zmiňované parametry při provozu strojů mění. Přestože je známo, že nestacionární provozní podmínky mají zásadní vliv na utváření mazacího filmu, není tato oblast dostatečně experimentálně popsána a doposud publikované práce se převážně zaměřují na jednoduché případy změny provozních podmínek, přičemž složitější průběhy zůstávají opomíjeny. V rámci řešení disertační práce byl v případě změny parametru rychlosti zkoumán ve zjednodušené formě kontakt vačky a zdvihátka, který je specifický náhlou změnou rychlostí ve velice krátkém časovém úseku. Studie daného problému byla dále rozšířena o problematiku vlivu topografie třecích povrchů na chování maziva uvnitř kontaktu. Za účelem zjištění chování maziva v EHD mazaném kontaktu při změně zatížení byly použity dva typy zátěžného pulzu pro různé konfigurace kontaktních těles.

Tato disertační práce předkládá ucelený soubor poznatků získaných na základě experimentálního studia. Obdržené výsledky zhodnocují chování maziva v EHD mazaném kontaktu při dynamické změně rychlosti popř. zatížení kontaktních povrchů. Pro dané okrajové podmínky byl prokázán pozitivní vliv cíleně vytvořené textury na jednom z kontaktních povrchů na tloušťku mazacího filmu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Většina strojních součástí, jako jsou např. valivá ložiska, ozubené soukolí aj., pracuje za podmínek elastohydrodynamického (EHD) mazání, které se vyznačuje tenkým mazacím filmem oddělujícím elasticky deformovaná kontaktní tělesa. Výše popsané strojní součásti však pracují za podmínek nestacionárního EHD mazání, kdy v průběhu pracovního cyklu dochází ke změně provozních parametrů, které mohou významnou měrou ovlivnit chování maziva a tloušťku mazacího filmu

Studie zabývající se popisovanou problematikou lze dle zaměření rozdělit do tří hlavních oblastí. První, a z časového hlediska zároveň nejstarší, dvě oblasti se zabývají vlivem změny rychlosti popř. zatížení kontaktních povrchů na chování maziva uvnitř kontaktu. Třetí oblast je zaměřena na experimentální výzkum chování maziva v kontaktu vačky a zdvihátka.

2.1 Studium EHD mazaných kontaktů při změně zatížení

Jednu z prvních experimentálních vědeckých prací využívající optickou interferometrii jakožto metodu pro studium chování mazacího filmu v EHL kontaktu za nestacionárních podmínek publikoval Ren a kol. [1]. Experimenty byly zaměřeny na výzkum chování mazacího filmu při dynamické změně zatížení bodového nebo liniového kontaktu při čistého valení.

Pro případ bodového kontaktu došlo v okamžiku změny zatížení k lokálnímu navýšení tloušťky mazacího filmu. Tato oblast tvaru srpku prochází plochou kontaktu rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí povrchů. V případě liniového kontaktu byla zaznamenána pouze nepatrná změna v tloušťce filmu.

Oblast výzkumu byla dále rozšířena o studium kvazistatického kontaktu a mazaného Hertzova kontaktu [2], [3].

Nejčastějšími studovanými okrajovými podmínkami pro kvazistatický kontakt je vliv rychlosti zatěžování a vliv počáteční mezery mezi tělesy na tvar filmu a množství zachyceného maziva. Experimentálně bylo prokázáno, že pro vyšší rychlosti změny zatížení dochází k zachycení většího množství maziva. Pozice maximální tloušťky mazacího filmu však závisí na počáteční vzdálenosti mezi kontaktními tělesy. Pro velkou počáteční vzdálenost mezi tělesy, řádově v jednotkách mikrometrů, byla největší tloušťka mazacího filmu pozorována v centrální

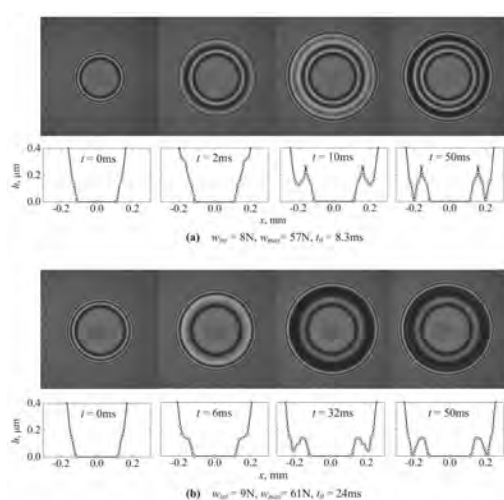
oblasti kontaktu. Při zmenšování počáteční vzdálenosti dochází vlivem elastických deformací k postupnému snižování množství zachyceného maziva a k vytlačení polohy maximální tloušťky filmu do okrajové části kontaktu [3].

V případě mazaného Hertzova kontaktu byl zkoumán vliv rychlosti zatěžování, na množství maziva zachyceného v okrajové části kontaktu. Z obr. 2.1 je patrné, že pro vyšší rychlosti změny zatížení dochází v důsledku viskózně-tlakového chování maziva k uzavření většího množství maziva v okrajové části kontaktu. Pro nižší rychlosti má mazivo více času uniknout z oblasti kontaktu.

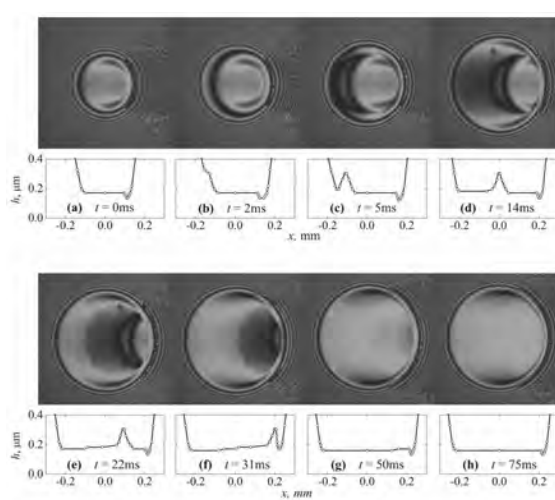
Nejnovější práce zabývající se změnou zatížení jsou převážně orientovány na numerické řešení daného problému. Zaměřeny jsou především na studium kvazistatického kontaktu, kde pro vyšší rychlosti změny zatížení dochází k vytlačování polohy maximální tloušťky mazacího filmu směrem k okraji kontaktu. Zároveň pro vyšší hodnoty viskózně-tlakového koeficientu bylo zjištěno zachycení většího množství maziva [4].

2.2 Studium EHD mazaných kontaktů při změně rychlosti třecích povrchů

Jako nejčastěji zkoumané jevy, v rámci výzkumu vlivu časově proměnné rychlosti na tloušťku mazacího filmu v EHL kontaktu, je možno označit náhlé zastavení třecích povrchů, střídavé zastavení a rozběh třecích povrchů popř. řízenou



Obrázek 2.1 Mazaný Hertzův kontakt [3].

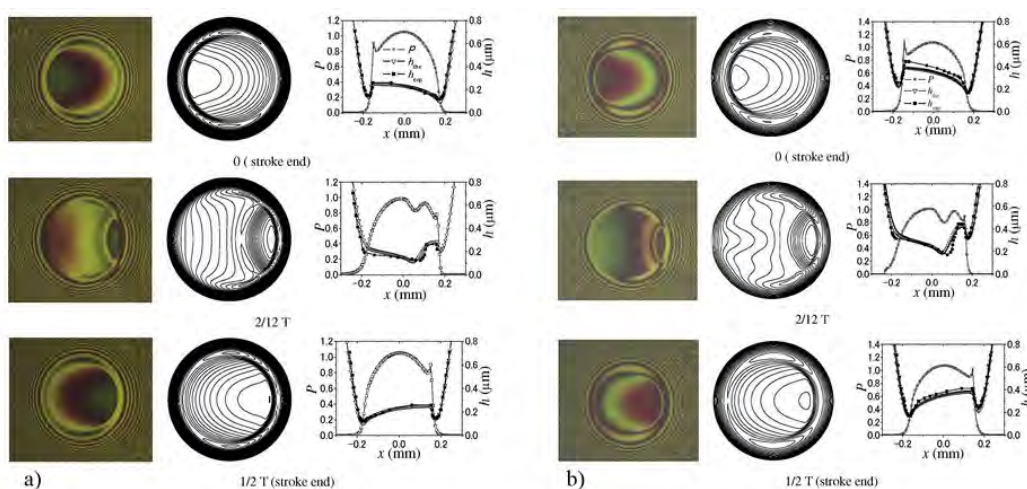


Obrázek 2.2 Změna zatížení – čisté valení [3].

periodickou změnu smyslu otáčení těchto povrchů. Jedná se o kritické fáze provozního cyklu, kdy vlivem zastavení třecích povrchů popř. vlivem periodické změny vstupu a výstupu maziva z kontaktu dochází k redukci tloušťky mazacího filmu, která může vyústit až v přímý dotyk kontaktních těles.

Pro případ střídavě zrychleného a zpomaleného pohybu byl zjištěn nárůst tloušťky mazacího filmu v okamžiku nárůstu hodnoty střední rychlosti a naopak pokles tloušťky filmu při poklesu hodnoty střední rychlosti. Důležitým faktorem je také frekvence změny rychlosti, která má značný vliv zejména na tloušťku mazacího filmu ve fázi zpomalování třecích povrchů. Zároveň byly pozorovány vyšší tloušťky mazacího filmu pro danou rychlost ve fázi zpomalování než ve fázi zvyšování rychlosti třecích povrchů [5].

Výsledky experimentálních studií zároveň prokázaly, že pro případ náhlého zastavení kontaktních ploch dochází v první fázi k náhlému poklesu tloušťky mazacího filmu v celé ploše kontaktu a poté k pozvolnému úbytku maziva z jeho centrální oblasti. Bylo také prokázáno, že hodnota tloušťky mazacího filmu, která se nachází v kontaktu po první fázi úbytku maziva, je nezávislá na počáteční a střední rychlosti třecích povrchů. Nízká rychlost poklesu tloušťky filmu v druhé fázi je zapříčiněna vysokou viskozitou maziva v centrální oblasti kontaktu [6]. Při řízeném zpomalování bylo pozorováno ustálení tloušťky mazacího filmu na vyšších hodnotách při vysokých hodnotách zpomalení. Naopak při řízeném zpomalování v rámci delšího časového úseku dochází při pohybu kuličky k vytlačování maziva z kontaktu, a tudíž k ustálení tloušťky maziva na podstatně nižších hod-



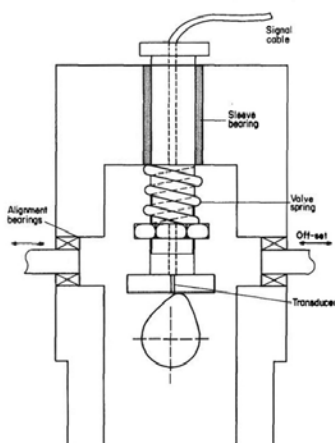
Obrázek 2.3 Srovnání profilů mazacího filmu a) 7,78 Hz, b) 14,4 Hz [7].

notách [8].

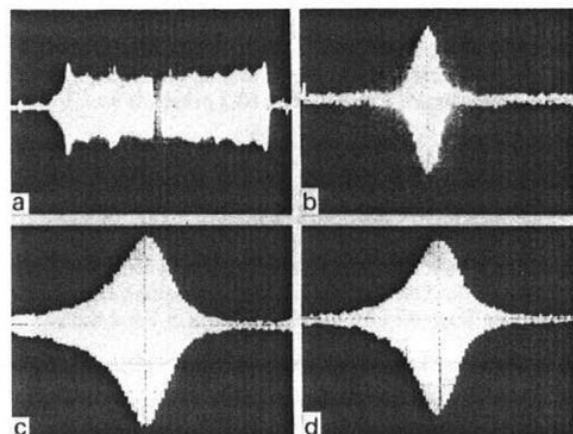
Vliv recipročního pohybu a frekvence změny střední rychlosti povrchů na sílu efektu hladovění byl popsán v práci, kterou publikoval Wang a kol. [7]. Práce zároveň poskytuje srovnání experimentálních výsledků s numerickým řešením. Z obr. 2.3 je zřejmé, že zvyšující se frekvence změny rychlosti má vliv na tloušťku mazacího filmu, která roste se vzrůstající frekvencí. Pro vyšší hodnoty frekvence změny otáčení byl pozorován výraznější projev hladovění, jehož následkem je náhlý pokles tloušťky mazacího filmu na vstupu do kontaktu v okamžiku reverzace. Obrázek, mimo rozložení tlaku v centrální rovině ve směru valení, také podává informaci o míře shody mezi výsledky získanými numerickou simulací, jak pro matematický model s popř. bez uvažování efektu hladovění, a výsledky, které byly získány vyhodnocením experimentálního měření. Je patrné, že použitý matematický model je, pro dané okrajové podmínky, schopen spolehlivě predikovat vývoj tloušťky mazacího filmu.

2.3 Studium EHD mazaných kontaktů při simulaci kontaktu vačky a zdvihátka

Kontakt vačky a zdvihátka, který je možno pozorovat např. u spalovacích motorů, je často označován jako komplexní příklad EHD mazání, kde v průběhu jednoho pracovního cyklu dochází spojitě ke změně všech tří základních provozních parametrů jako jsou rychlost, zatížení a poloměr křivosti stýkajících se ploch.



Obrázek 2.4 Schéma experimentální aparatury [9].



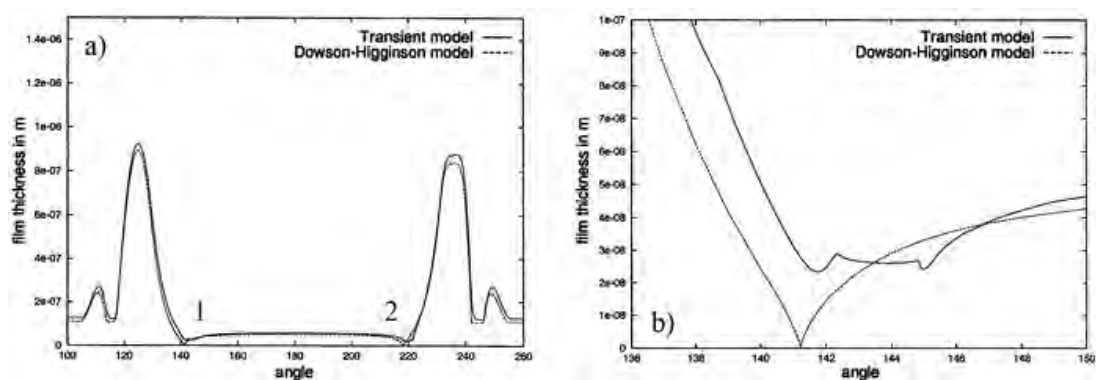
Obrázek 2.5 Záznam výstupního signálu z kapacitního snímače [9].

Snahou výzkumu v oblasti mazání vačkového mechanismu, konkrétně kontaktu vačky a zdvihátka, je snížení výkonových ztrát a zároveň snížení opotřebení povrchu součástí v kontaktu. První práce zabývající se výše zmíněnou problematikou popisují vývoj tloušťky mazacího filmu spolu s kontaktním tlakem v průběhu jednoho pracovního cyklu.

V roce 1980 publikoval Hamilton [9] práci využívající kapacitní metodu pro určení tloušťky mazacího filmu. Použitá experimentální aparatura je zobrazena na obr. 2.4. Vyhodnocením naměřených hodnot z kapacitních snímačů (obr. 2.5) bylo zjištěno, že největší tloušťky mazacího filmu byly pozorovány v okamžiku kontaktu boku vačky se zdvihátkem, tedy v okamžiku, kdy střední rychlost povrchů dosahuje své maximální hodnoty. Naopak minimální tloušťky mazacího filmu byly pozorovány v okamžiku kontaktu vrcholu vačky se zdvihátkem.

Návrat k původní myšlence studia výkonových ztrát na rozhraní kontaktu vačky a zdvihátka prezentovali ve své práci Dowson a kol. [10]. Zkoumán byl vliv frekvence otáčení vačkového hřídele na míru výkonových ztrát. Bylo prokázáno, že s narůstajícími otáčkami vačkového hřídele narůstá i ztrátový výkon.

Nejnovější práce v dané oblasti výzkumu jsou zaměřeny především na numerické řešení daného problému. Tranzientní analýzu, umožňující řešit celý provozní cyklus pro kontakt vačky a zdvihátka představili Messé a Lubrecht [11]. Tato analýza využívá multi-grid, multi-level a multi-integration techniky pro snížení časové náročnosti výpočtu. Profil mazacího filmu zobrazený na obr. 2.6 prezentuje schopnost navržené metody řešit i kritická místa cyklu, které odpovídají průchodu hodnoty střední rychlostí povrchů skrze nulovou hranici.



Obrázek 2.6 Změna tl. mazacího filmu, a) zobrazení cyklu pro jednu otáčku vačkové hřídele, b) detail pozice 1 pro okamžik nulové střední rychlosti povrchů [11].

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je experimentální objasnění chování mazacího filmu v EHD mazaném kontaktu při časové změně parametrů rychlosti a zatížení kontaktních ploch. Účelem je přiblížení experimentálního výzkumu EHD mazaných kontaktů, skrze vhodně volené okrajové podmínky, reálným tribologickým uzlům, s kterými je možno se v technické praxi setkat. Cílená modifikace topografie byla uvažována jako prostředek pro zlepšení podmínek mazání při náhlých změnách rychlosti.

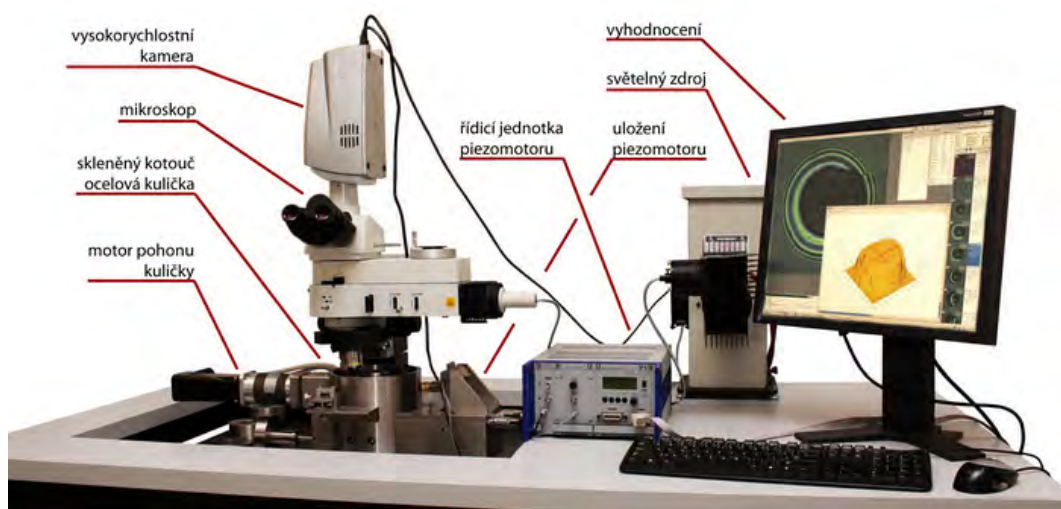
Realizace cíle disertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- Modifikace stávajícího experimentálního zařízení pro možnost sledování změny tloušťky filmu v EHD mazaném kontaktu při časové změně zatížení.
- Provedení série ověřovacích experimentů s časově proměnným parametrem zatížení a porovnání s již publikovanými výsledky.
- Návrh software, umožňujícího skrze uživatelské rozhraní nezávislé ovládání servo-motorů řídících rychlosti třecích povrchů, spolu s nastavením průběhu zatížení a spouštění snímací techniky. Řídicí software musí zároveň poskytovat možnost snímání provozních parametrů rychlosti a zatížení v průběhu experimentu.
- Provedení série experimentů s časově proměnným parametrem rychlosti kontaktních ploch a posouzení jeho vlivu na utváření a tloušťku mazacího filmu.
- Návrh experimentální aparatury umožňující sledování změny tloušťky filmu v EHD mazaném kontaktu při současné časové změně zatížení a rychlosti třecích povrchů.

4 METODY PŘÍSTUPU A NÁVRH ZPŮSOBU ŘEŠENÍ

4.1 Experimentální zařízení

Pro simulaci podmínek vyskytujících se v reálných tribologických uzlech je využíván optický tribometr (obr. 4.1). Tenký mazací film je utvářen ve styku otáčející se ocelové kuličky a rotujícího skleněného disku. Osy rotace obou kontaktních povrchů jsou mimoběžné a vůči sobě navzájem kolmé. Konstrukce experimentálního zařízení umožňuje nezávislý pohon obou kontaktních povrchů, což umožňuje pozorovat změny chování mazacího filmu pro různé hodnoty poměru kluz – valení. Kontaktní strana skleněného disku je pokryta napařenou vrstvou chromu, který zvyšuje kontrast snímaných interferogramů, a protilehlá strana disku je opatřena antireflexní vrstvou. Pro případ vyšších zatížení, které by mohly zapříčinit poškození skleněného disku, je možno použít safírový disk a kuličku z karbidu wolframu.



Obrázek 4.1 Konstrukce experimentálního zařízení pro studium tenkých mazacích filmů.

Zatěžování kontaktu, pro stávající experimentální zařízení, je realizováno naklápěním skleněného disku, jehož osa slouží jako rameno dvojitě vratné páky. Požadovaná hodnota zatížení je nastavena umístěním závaží na druhé rameno pákového mechanismu. Tato konstrukce umožňuje pouze statické, v čase neměnné, zatížení kontaktní oblasti.

Ocelová kulička je upnuta mezi kuželové čelisti, které zajišťují přenos krouticího momentu z výstupního hřídele převodovky na kuličku. Zkoumané mazivo je

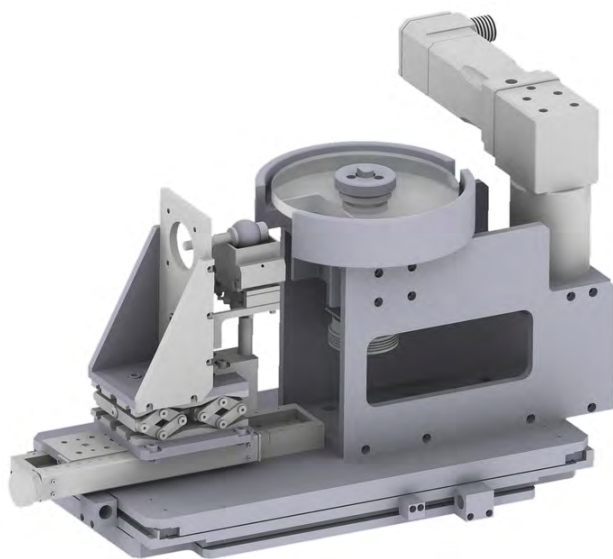
do kontaktu dopravováno otáčivým pohybem ocelové kuličky, na jejímž povrchu mazivo ulpívá. Změny v chování maziva jsou sledovány pomocí mikroskopového zobrazovacího systému, jehož základem je průmyslový mikroskop Nikon Optiphot 150, který je dále vybaven vysokorychlostní kamerou Phantom v710. Tato konfigurace umožňuje snímat změny v chování maziva s frekvencí 35 kHz při rozlišení 500 x 500 pixelů.

Pro vysoké frekvence snímání, které zároveň vyžadují krátkou dobu expozice čipu kamery v řádech jednotek ms, je nutné využít vysoce výkonný světelný zdroj. Pro potřeby experimentů byl využit xenonový zdroj bílého světla o maximálním výkonu 1000 W.

Pro vyhodnocení nasnímaných interferogramů je využita metoda kolorimetrické interferometrie [12], která umožňuje zpětnou rekonstrukci tvaru mazacího filmu.

4.2 Návrh nového experimentálního zařízení

Využití stávajícího experimentálního zařízení pro simulaci EHD mazaného kontaktu při nestacionárních provozních podmínkách je značně omezené. Proto byl proveden návrh nového experimentálního zařízení (obr. 4.2), jehož účelem je umožnit obsluhu snazší nastavení a řízení experimentu spolu s možností snímat důležité parametry v průběhu experimentu.



Obrázek 4.2 Návrh nové konstrukce experimentálního zařízení.

Nová experimentální aparatura je členěna do tří hlavních částí tvořených optickou soustavou, částí ovládající skleněný disk a částí ovládající ocelovou kuličku. Nový systém zatěžování kontaktu uvažuje pouze s pohybem ocelové kuličky a olejové vaničky při změně zatížení. Novou konstrukcí bylo značně zredukováno množství pohyblivých hmot a tím snížen vliv setrvačných sil na průběh změny zatížení kontaktu. Pro přesné polohování ocelové kuličky ve vertikálním směru a vyvození počátečního zatížení kontaktu slouží nůžkový zvedák firmy Thorlabs. Změna zatížení kontaktu je realizována piezo-motorem, který se nachází pod středem ocelové kuličky. Průběh změny zatížení je zaznamenán snímačem síly uloženým v ose piezo-motoru, jehož vzorkovací frekvence 2 kHz je dostačující pro sledování náhlých změn zatížení. Návrh také počítá s vyšším využitím plochy skleněného disku, než je tomu u stávajícího experimentálního zařízení. Do návrhu byla zapracována i možnost softwarové regulace teploty testovaného maziva. K vyhřívání olejové náplně slouží dvě topné patrony umístěné v neodnímatelné základně olejové vaničky. Při návrhu nové aparatury byl také kladen důraz na zjednodušení procesu čištění součástí kontaminovaných mazivem. Uvolněním dvou stavěcích šroubů lze vysunout olejovou vaničku z prizmatického vedení spolu s ocelovou kuličkou a čištění celé jednotky, včetně suportu pro kuličku, může být provedeno v ultrazvukové lázni.

Nové konstrukční řešení, oproti stávajícímu experimentálnímu zařízení, nabízí možnost simulování EHD mazaného kontaktu za podmínek souběžné změny střední rychlosti povrchů a kontaktního zatížení v průběhu experimentu. Zároveň je možno snímat provozní parametry jako je rychlost povrchů, zatížení kontaktu a teplota testovaného maziva. Redukcí pohyblivých hmot byl značně snížen vliv parazitních vibrací, způsobený setrvačnými silami, na plánovaný průběh změny zatížení. Systém dvou oddělených jednotek, zvláště pro kuličku a pro disk, umožňuje záměnu ocelové kuličky za jiný typ tělesa s odlišným tvarem popř. průměrem bez nutnosti zásahu do konstrukce.

Zároveň byl navržen nový ovládací software v prostředí LabView, který umožňuje s využitím potřebných hardwarových I/O modulů ovládat vysokorychlostní kameru, nezávisle řídit změnu otáček až čtyř servomotorů dle nastaveného schématu, snímat údaje z rotačních enkodérů pro zpětné ověření průběhu změny rychlosti, ovládat lineární piezo-motor a zároveň ukládat a zpracovávat data ze snímače síly.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

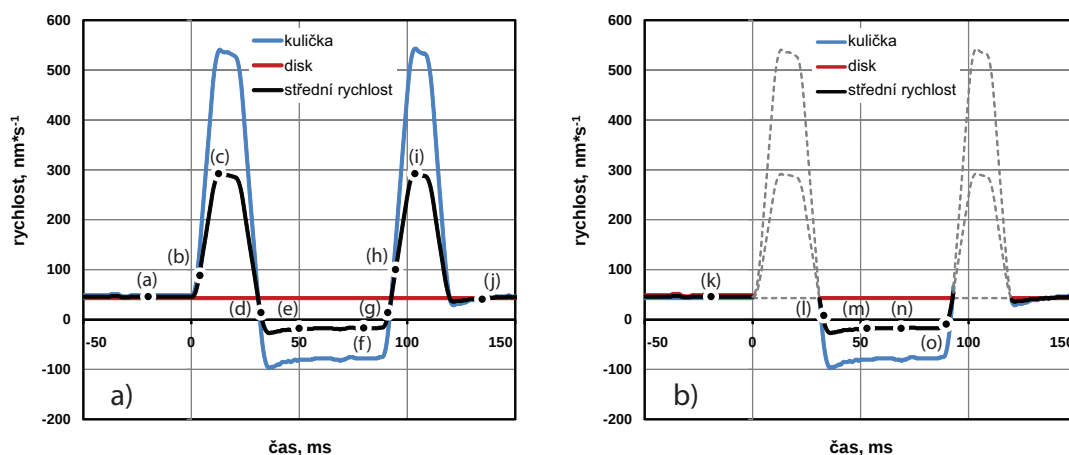
5.1 Experimentální studium chování mazacího filmu při dynamické změně rychlosti třecích povrchů

Experimentální studium je zaměřeno na výzkum chování maziva v kontaktu vačky a plochého zdvihátka. Pro experiment byl použit, ve vhodném měřítku, rychlostní profil popisující změnu rychlosti kontaktního bodu v průběhu jedné otáčky vačkového hřídele. Za účelem zjednodušení řešeného problému byla, jako jediný časově proměnný parametr, uvažována pouze střední rychlost povrchů. Zatížení a poloměry křivosti povrchů v kontaktu byly v průběhu experimentu konstantní.

5.1.1 Popis experimentu

Pro shodné okrajové podmínky, zahrnující provozní parametry rychlosti a zatížení, byl simulován průběh rychlosti kontaktního bodu mezi vačkou a plochým zdvihátkem viz obr. 5.1 pro různé typy povrchu kontaktních těles. Byl pozorován vývoj tloušťky mazacího filmu v závislosti na změně viskozity maziva a také vzhledem ke změně struktury povrchu kontaktních těles. Na obr. 5.1 b) je šedou barvou vyznačena oblast, kterou nebylo možno pomocí optické interferometrie vyhodnotit. Vzhledem k vysokým obvodovým rychlostem kontaktních povrchů došlo ve vyznačených oblastech k nárůstu tloušťky mazacího filmu nad hodnotu $1\text{ }\mu\text{m}$ a v důsledku toho k poklesu kontrastu získaných interferogramů. Pozorovaný pokles kontrastu znemožňuje kvantitativně vyhodnotit získané interferogramy za účelem stanovení tloušťky mazacího filmu v daném okamžiku.

Jako kontaktní tělesa byla použita kulička z ložiskové oceli (AISI 52100, ekvivalent ČSN 14 109) o průměru 25,4 mm a disk ze skla BK7 o průměru 180 mm a tloušťce 12,7 mm. Youngův modul kontaktních těles je pro skleněný disk 81 GPa, v případě ocelové kuličky 212 GPa. Kontaktní strana disku je opatřena napařenou vrstvou chromu, která zvyšuje kontrast snímaných interferogramů a protilehlá strana disku je opatřena antireflexní vrstvou, která zabraňuje odrazu světelného paprsku na rozhraní vzduch – sklo. Pro experiment byly použity tři typy povrchů ocelové kuličky. Prvním typem povrchu je povrch neupravený, který nese stopy po dokončovacích operacích a typ a tvar nerovností je typický

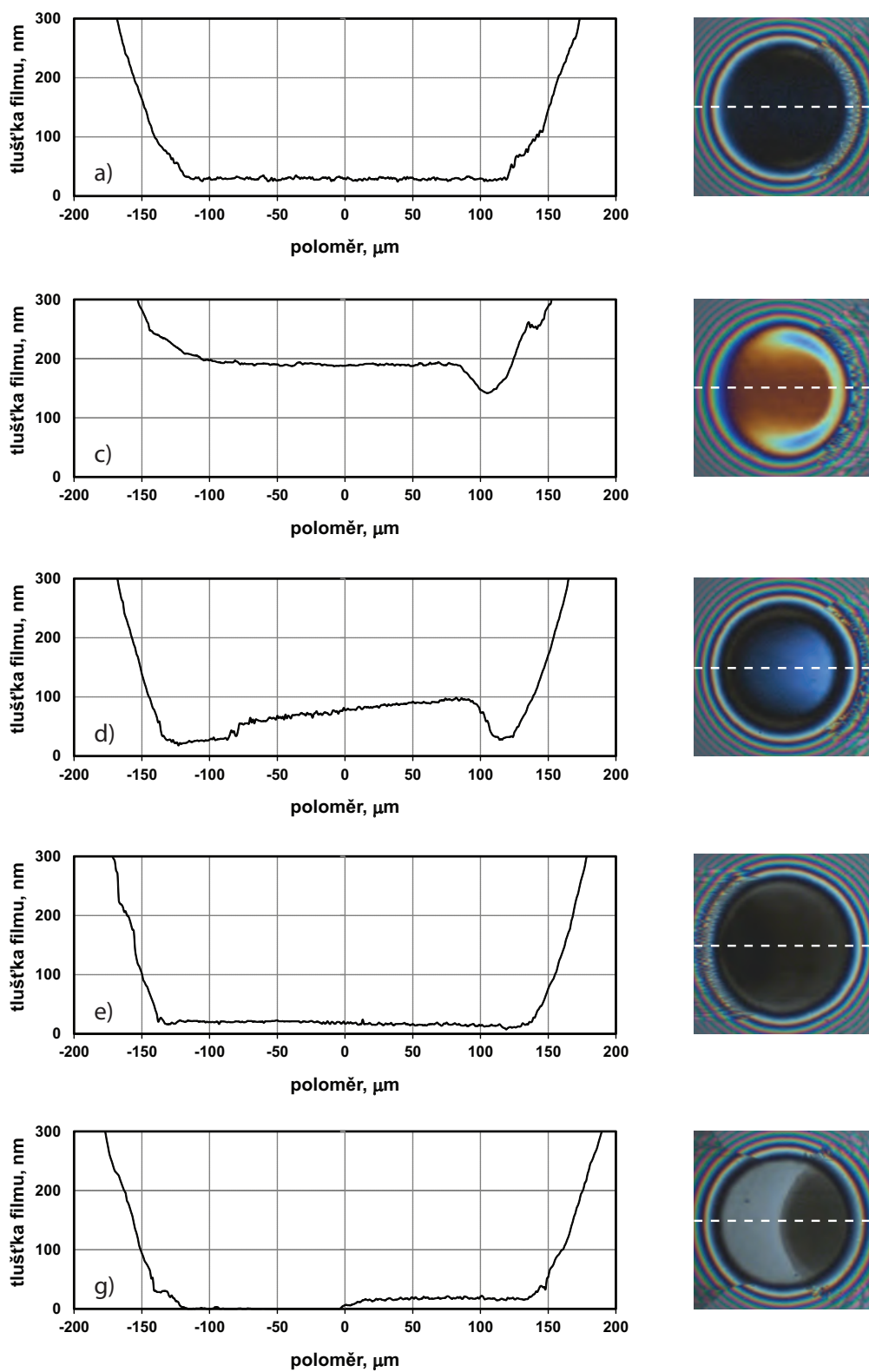


Obrázek 5.1 Průběh změny rychlosti kontaktních těles, a) pro mazivo HPO 200, b) pro mazivo LSBS.

pro valivé elementy ložisek. Průměrná aritmetická úchylka profilu daného povrchu je cca $R_a = 0,018 \mu\text{m}$. Druhý typ povrchu je dodatečně upraven leštěním a pro tento je průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu cca $R_a = 0,003 \mu\text{m}$. Třetí typ povrchu vzniká upravením prvního typu, který je cíleně modifikován maticí mikrovrtisků. K mechanickému vyrážení mikrovrtisků slouží vnikací tělísko s diamantovým hrotem o poloměru $R = 0,2 \text{ mm}$. Geometrie diamantového vrcholu vnikacího tělíska odpovídá geometrii hrotu Rockwellova tvrdoměru. Pro vyrážení mikrovrtisků bylo použito zatížení 5 N , které vytvoří vtisk o hloubce cca 400 nm . Ocelové kuličky pro všechny tři typy použitých povrchů jsou plně prokaleny v celém svém objemu a hodnota tvrdosti kuliček se pohybuje v intervalu $60 - 66 \text{ HRC}$.

5.1.2 Maziva s nízkou viskozitou – HPO 200

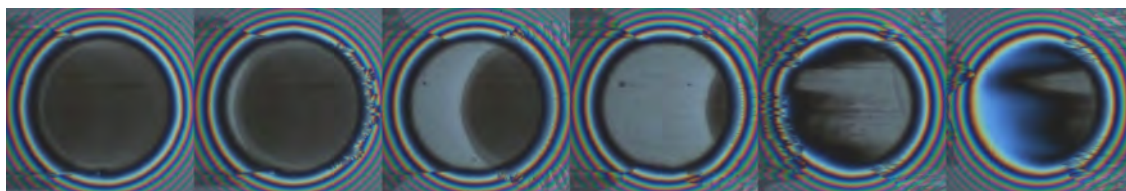
Chování maziva HPO 200 pro leštění povrch ocelové kuličky při změně rychlosti kontaktních povrchů, uvedené na obr. 5.1 a), lze popsat sérií profilů tloušťky mazacího filmu uvedenými na obr. 5.2. Vybrané časové okamžiky popisují chování maziva v klíčových fázích experimentu. Před začátkem změny rychlosti, který je na obr. 5.1 a) označen $t = 0 \text{ ms}$, se oba třecí povrchy pohybují ve stejném smyslu konstantní rychlostí. Z přiloženého řezu je patrné, že oba povrchy jsou odděleny konstantní tloušťkou maziva o hodnotě cca 30 nm . Následující bod v čase $t = 5 \text{ ms}$ popisuje prudký nárůst obvodové rychlosti kuličky.



Obrázek 5.2 Chromatické interferogramy a korespondující profily tloušťky mazacího filmu pro vyznačené časové okamžiky, a) -20 ms, c) 17 ms, d) 33 ms, e) 50 ms, g) 91 ms.

Maximální hodnoty tloušťky mazacího filmu, které se pro dané okrajové podmínky pohybují kolem hodnoty 195 nm, byly pozorovány v bodech c) a i) (viz obr. 5.1), ve kterých střední rychlost povrchů dosahuje svých maximálních hodnot. V bodě d) v čase $t = 35$ ms je zachycen okamžik těsně po změně smyslu otáčení ocelové kuličky. V tento okamžik se kontaktní plochy otáčení v opačném smyslu a střední rychlost povrchů klesá k nulové hodnotě. Z obr. 5.2 d), který popisuje tento okamžik, je patrné, že vlivem efektu vtlačeného filmu nedochází k poklesu tloušťky maziva v kontaktu na nulovou hodnotu, jak stanovuje teorie pro stacionární EHD mazání [13]. V bodech e) a f) se kontaktní plochy pohybují relativně nízkou rychlostí s opačným smyslem otáčení. Průmětná pozorovaná tloušťka mazacího filmu v tomto úseku je 15 nm.

Zásadní změnu v chování mazacího filmu je možno pozorovat v čase $t = 90$ ms, kdy opět dochází ke změně smyslu otáčení ocelové kuličky. Tato situace je blíže popsána na obr. 5.2 g). Z obrázku je patrné, že při druhé změně smyslu otáčení ocelové kuličky došlo k prolomení mazacího filmu a tím k přímému kontaktu kuličky a disku. Prolomení mazacího filmu bylo pozorováno v 50 % experimentů provedených za totožných okrajových podmínek. Okamžik protržení mazacího filmu a znovuzaplavení kontaktu mazivem je zobrazen na obr. 5.3.



Obrázek 5.3 *Série interferogramů popisující protržení a znovuoobnovení mazacího filmu.*

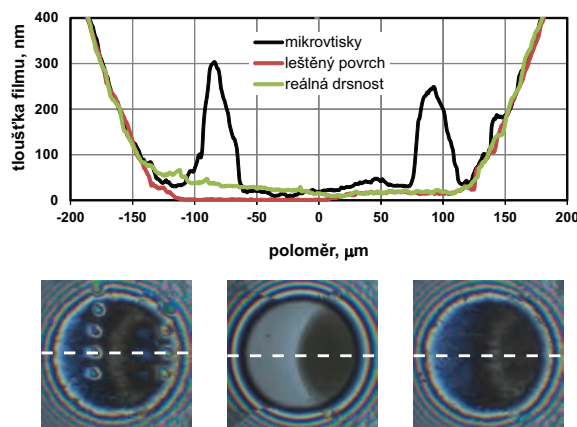
Obdobné chování maziva pro jiný případ okrajových podmínek prezentoval ve své práci Kaneta [14]. Bylo zjištěno, že vlivem vysokého smykového napětí v mazivu může dojít k porušení adhezních sil a k oddělení vrstvy maziva od třecího povrchu. Zároveň při překročení meze smykové kapacity maziva, může dojít k porušení soudržnosti vrstvy maziva jako takové. Předpokládá se, že hodnota smykové kapacity maziva je závyslá na kombinaci okrajových podmínek jako je teplota maziva v kontaktu, drsnost kontaktních povrchů, poměr kluz – valení, zatížení a reologické vlastnosti maziva [15], [16].

Pro zbývající dva typy povrchů, povrch s reálnou drsností a povrch cíleně modifikovaný, byly provedeny série experimentů pro shodné okrajové podmínky. Pro žádný z těchto povrchů nebylo pozorováno prolomení mazacího filmu. Na základě předchozí studie pro leštěný povrch byly určeny dvě kritická místa rychlostního cyklu.

Prvním z těchto míst je pozice g) z obr. 5.1. Pro tuto bylo v případě leštěného povrchu pozorováno protržení mazacího filmu. Srovnání profilů mazacího filmu pro tento okamžik pro všechny tři typy povrchů je uvedeno na obr. 5.4. Je patrné, že pro případ povrchu s reálnou drsností nedochází k prolomení mazacího filmu a v případě cíleně modifikovaného povrchu mazivo emitované z mikrovrtisků napomáhá oddělení třecích povrchů navýšením tloušťky filmu.

Druhou kritickou fází je úsek d) – f) v níž se kontaktní povrchy pohybují proti sobě relativně nízkou rychlostí. Srovnání profilů mazacího filmu v čase $t = 62$ ms, který leží přesně v polovině úseku d) – f), je uvedeno na obr. 5.5. Pro komplexnější popis chování maziva bylo provedeno vyhodnocení nasnímaných interferogramů ve dvou řezech, které pro případ povrchu s cíleně modifikovanou topografií vedou středem mikrovrtisku a v rovině mezi stopami mikrovrtisků. Z obrázku je patrné, že pro oba řezy byla největší tloušťka mazacího filmu pozorována pro případ povrchu s mikrovrtisky. Tyto se chovají jako mikrozásobníky maziva a pro $\Sigma \neq 0$ dochází k jeho vyplavení. Nejnižší tloušťka filmu byla naopak pro oba řezy pozorována pro povrch upravený leštěním.

Zhodnocením výsledků z naměřených dat je možno prohlásit, že pro zlepšení



Obrázek 5.4 Srovnání profilů mazacího filmu pro kritickou fázi cyklu pro tři typy povrchů ocelové kuličky v čase $t = 91$ ms.

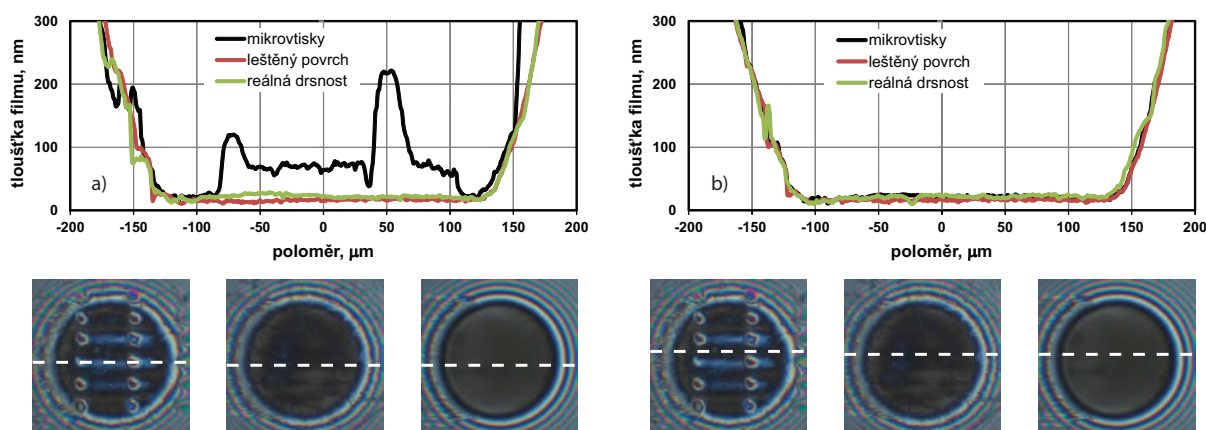
podmínek mazání v průběhu cyklu by bylo vhodnější trojúhelníkové uspořádání mikrovrtisků [17] namísto použitého obdélníkového, které neumožňuje ovlivnit tloušťku mazacího filmu v celé ploše kontaktu.

5.1.3 Maziva s vysokou viskozitou – LSBS

Pro okrajové podmínky popsané v kap. 5.1.1 byla provedena série experimentů, zkoumající vliv dynamické změny střední rychlosti povrchů na tloušťku mazacího filmu, přičemž pro experiment bylo použito mazivo LSBS s dynamickou viskozitou řádově vyšší, než tomu bylo u experimentů s mazivem HPO200.

Pro případ vývoje centrální tloušťky mazacího filmu bylo pozorováno obdobné chování jako u maziva HPO200 jen s podstatně většími tloušťkami mazacího filmu. V úseku l) – o) z obr. 5.1 dochází k tvorbě tzv. centrálního důlku, který byl pozorován a popsán Kanetou [18]. Pro případ experimentu dochází k periodické tvorbě centrálního důlku. Tento jev může být způsoben mírným kolísáním hodnoty kluz – valení v úseku l) – o).

Experimentálně získané výsledky byly, ve spolupráci se zahraničním partnerem použity jako srovnávací data pro stanovení míry shody mezi experimentálním měřením a numerickou simulací pro shodné okrajové podmínky [19].



Obrázek 5.5 Srovnání profilů mazacího filmu pro minimální hodnotu střední rychlosti povrchů pro tři typy povrchů ocelové kuličky v čase $t = 62$ ms.

5.2 Experimentální studium chování mazacího filmu při dynamické změně zatížení třecích povrchů

5.2.1 Popis experimentu

Kontaktní tělesa použitá pro experimenty s proměnným zatížením jsou svými materiálovými charakteristikami, geometrií a strukturou povrchu shodné s těmi, které jsou detailně popsány v kap. 5.1.1. Pro simulaci eliptického kontaktu při proměnném zatížení byl použit ocelový soudeček, jehož hlavní průměr ve směru valení je 25,4 mm a parametr elipticity $k = 2,95$. Struktura povrchů, jak v případě ocelové kuličky tak pro případ ocelového soudečku, odpovídá povrchu druhého typu z předcházející kapitoly, kdy je povrch upraven leštěním a průměrná aritmetická úchylna povrchu je cca $R_a = 0,003\mu\text{m}$.

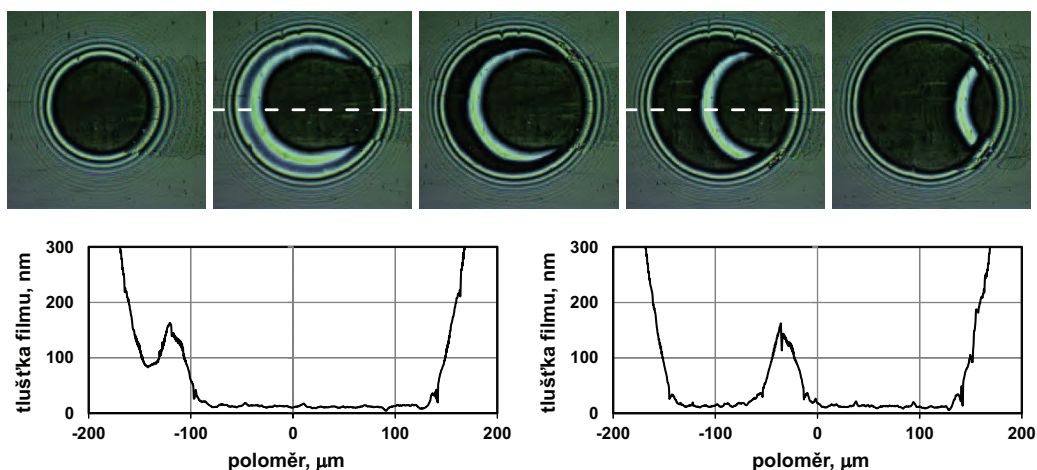
Pro experimentální výzkum byly použity dva typy zátěžného pulzu. První typ odpovídá skokové změně zatížení, kde změna zatížení je provedena v časovém intervalu 0,12 s. Druhým typem je harmonická změna zatížení, svým tvarem odpovídající kvazi-sinusoidě, s různými frekvencemi pulzu, které vymezují jeho časové trvání. Pro experiment byl použit vždy jeden pulz z důvodu snahy zabránění vzniku parazitních vibrací, které by mohly pozměnit plánovaný model změny zatížení.

Pro všechny typy experimentů zabývajících se změnou zatížení byl použit základový minerální olej s označením LSBS. Experimenty byly provedeny při pokojové teplotě 23 °C, pro niž je dynamická viskozita maziva $\eta_{LSBS} = 0,69 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

5.2.2 Kruhový kontakt

Prvním typem experimentu byla skoková změna zatížení kruhového kontaktu. Provedeny byly dvě série experimentů zkoumající vliv změny střední rychlosti povrchů a rozdílu minimální a maximální zatěžující síly na tloušťku a profil mazacího filmu.

Pro první sérii experimentů byla fixována hodnota minimálního a maximálního zatížení kontaktu, přičemž jednotlivé experimenty se lišily pouze hodnotou střední rychlosti povrchů, která byla v průběhu celého měření konstantní. Experimenty byly provedeny za podmínek čistého valení ($\Sigma = 0$) s počáteční hodnotou zatížení kontaktních ploch $F_{min} = 13,63 \text{ N}$ ($p_{min} = 397,5 \text{ MPa}$) a maximální



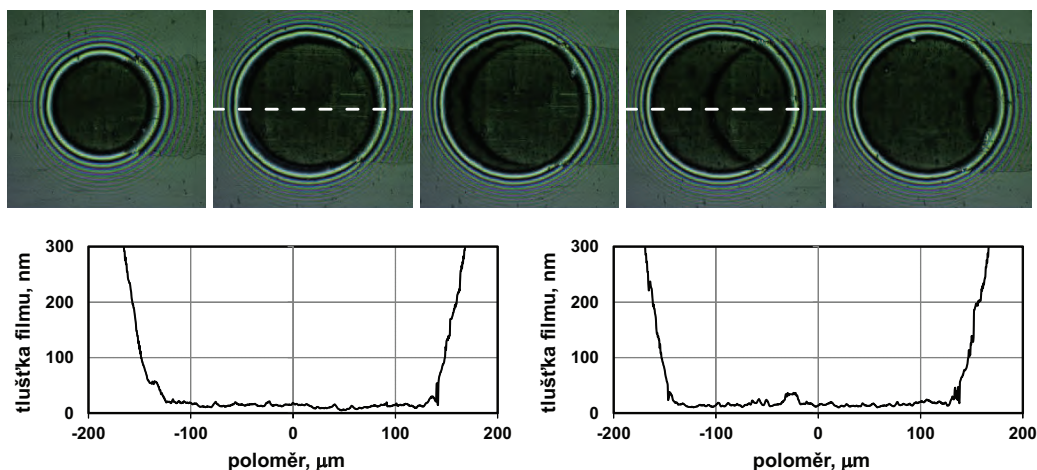
Obrázek 5.6 Chromatické interferogramy a korespondující profily tloušťky mazacího filmu pro skokovou změnu zatížení pro $F_{min} = 13,63 \text{ N}$, $F_{max} = 37 \text{ N}$, $u = 0,369 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

hodnotou zatížení $F_{max} = 37 \text{ N}$ ($p_{max} = 554,6 \text{ MPa}$).

Bylo zjištěno, že při použití vyšší střední rychlosti povrchů dochází k navýšení tloušťky mazacího filmu nad celou plochou kontaktu. Při nejnižší hodnotě rychlosti jsou kontaktní plochy odděleny mazacím filmem o tloušťce v řádu jednotek nanometrů. Změna střední rychlosti však nemá žádný vliv na maximální výšku maziva, které je uzavřeno oblastí tvaru srpku. Srovnáním jednotlivých profilů bylo zjištěno navýšení tloušťky mazacího filmu v místě srpkovité oblasti o cca 135 nm nezávisle na hodnotě střední rychlosti. Důležitým jevem je také snížení objemu zachyceného maziva s klesající střední rychlostí povrchů. Mezi faktory, popsané v dosavadních publikacích zabývajících se vlivem náhlé změny zatížení na tvar mazacího filmu, se řadí rozdíl minimálního a maximálního zatížení kontaktu, rychlost změny zatížení, dynamická viskozita maziva při atmosferickém tlaku η_0 a viskózně-tlakový koeficient α [1], [2], [3].

Žádná ze známých publikací se nezabývá vlivem střední rychlosti povrchů na množství zachyceného maziva. Analýzou výsledků bylo zjištěno, že při snižování hodnoty střední rychlosti dochází ke zužování oblasti s navýšenou tloušťkou mazacího filmu. Zároveň roste strmost stěn ohraničujících danou oblast. Předpokládá se, že při nižší rychlosti třecích povrchů má mazivo více času uniknout z oblasti kontaktu v okamžiku změny zatížení.

Druhá série experimentů je zaměřena na zjištění vlivu rozdílu minimální a maximální zatěžující síly za podmínek čistého valení, kdy pro všechny experimenty

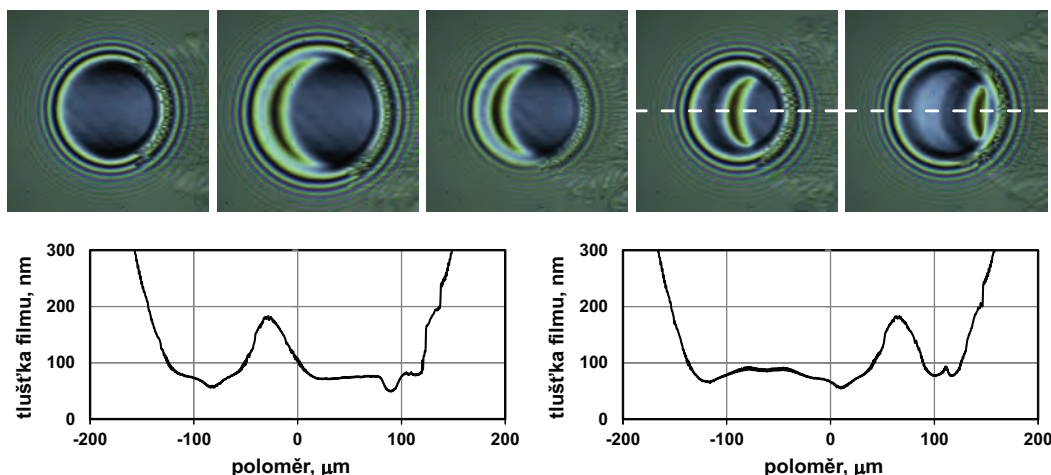


Obrázek 5.7 Chromatické interferogramy a korespondující profily tloušťky mazacího filmu pro skokovou změnu zatížení pro $u = 0,369 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $F_{min} = 13,63 \text{ N}$ a $F_{max} = 32,6 \text{ N}$.

dané série byla zachována hodnota střední rychlosti povrchů. Na obr. 5.7 jsou graficky shrnuty výsledky jednoho ze série měření pro $\Delta F = 18,97 \text{ N}$. Bylo zjištěno, že v žádném z provedených experimentů nedochází ke změně základní tloušťky filmu oddělujícího kontaktní povrchy, která pro rychlost $u = 0,369 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nabývá hodnoty cca 20 nm . Změna rozdílu zatěžujících sil má však zásadní vliv na množství maziva, které je zachyceno na vstupu do kontaktu. Bylo prokázáno, že se snižujícím se hodnotou ΔF dochází k úbytku v množství zachyceného maziva.

Pro případ harmonické změny zatížení bylo pozorováno mírně odlišné chování maziva, zejména pak v okamžiku poklesu zatížení. Sledováno bylo zejména chování maziva v návaznosti na změnu frekvence pulzu popř. vliv střední rychlosti povrchů na množství zachyceného maziva a tvar mazacího filmu. Na obr. 5.8 jsou zobrazeny zpracované výsledky jednoho ze série měření s frekvencí pulzu $f = 30 \text{ Hz}$. Experimenty byly provedeny za podmínek čistého valení ($\Sigma = 0$) s konstantní hodnotou střední rychlosti povrchů $u = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ v průběhu celého experimentu.

Zpracováním výsledků naměřených dat bylo zjištěno, že s klesající hodnotou frekvence pulzů dochází k zachycení menšího množství maziva. Předpokládá se, že pro nižší frekvence změny zatížení je rychlost přibližování kontaktních ploch natolik malá, že namísto efektu vtlačeného filmu dochází k postupnému vytlačení maziva vstupujícího do kontaktu. Mazivo je vytlačeno pomalu přibližujícími se kontaktními plochami do okolí kontaktu.



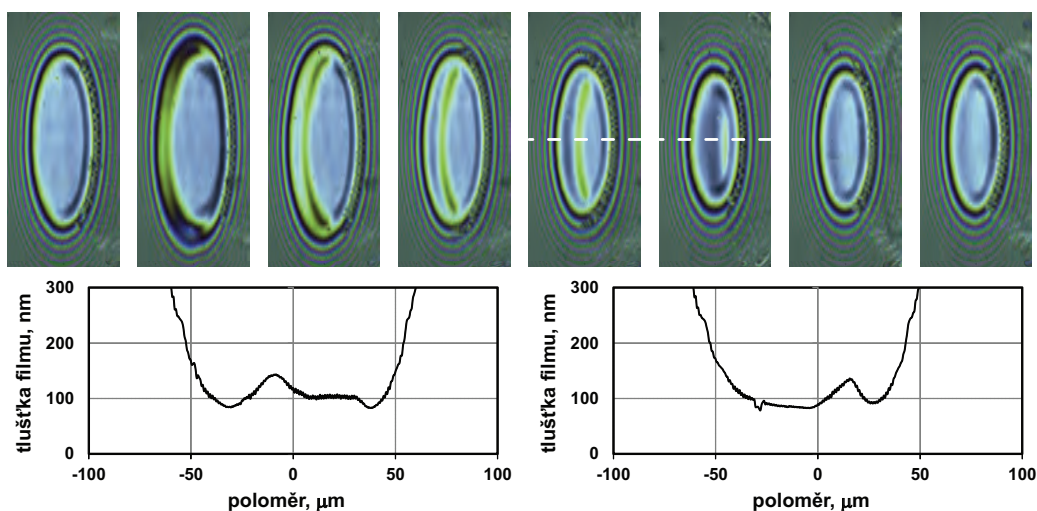
Obrázek 5.8 Chromatické interferogramy a korespondující profily tloušťky mazacího filmu pro harmonickou změnu zatížení pro $u = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $F_{min} = 12,15 \text{ N}$ a $F_{max} = 24,4 \text{ N}$, $f = 30 \text{ Hz}$ ($t_2 = 0,033 \text{ s}$).

Zaznamenan byl také mírný pokles tloušťky maziva ve fázi odlehčování kontaktu. Tento jev byl pozorován pro všechny použité frekvence zátěžného pulzu. Příčinu náhlého poklesu tloušťky filmu ve své práci diskutoval Kaneta [2] jako následek vytvoření vzduchových bublin při náhlém snížení zatížení kontaktu. Bubliny uvnitř maziva způsobují pokles tloušťky mazacího filmu na vstupu do kontaktu, kde dochází k vytvoření oblasti s nižší tloušťkou mazacího filmu. Tato prochází plochou kontaktu rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí povrchů.

Zároveň, obdobně jako v předchozím případě pro skokovou změnu zatížení, byl zaznamenan vliv střední rychlosti povrchů na množství zachyceného maziva. Pro nízké hodnoty střední rychlosti dochází k posunu profilu mazacího filmu směrem k nižším hodnotám a zároveň dochází k redukci množství zachyceného maziva v okamžiku změny zatížení.

5.2.3 Eliptický kontakt

Za účelem detailnějšího popisu chování maziva v EHD mazaném kontaktu bylo přistoupeno k simulaci dynamického zatížení pro eliptický kontakt. Tento je tvořen mezi ocelovým soudečkem s parametrem elipticity $k = 2,95$ a skleněným diskem. Série experimentů, zkoumajících odděleně vliv střední rychlosti a doby trvání zátěžného pulzu na chování mazacího filmu, byly provedeny za podmínek čistého valení ($\Sigma = 0$). Pro změnu zatížení byl použit harmonický pulz.



Obrázek 5.9 Chromatické interferogramy a korespondující profily tloušťky mazacího filmu pro harmonickou změnu zatížení pro $u = 4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $F_{min} = 12,15 \text{ N}$ a $F_{max} = 24,4 \text{ N}$, $f = 30 \text{ Hz}$ ($t_2 = 0,033 \text{ s}$).

Z obr. 5.9 je patrné, že při změně zatížení dochází k zachycení části maziva na vstupu do kontaktu. Jeho množství je však podstatně nižší, než tomu bylo v případě kruhového kontaktu. Při poklesu zatížení dochází k poklesu tloušťky mazacího filmu na vstupu do kontaktu. Bylo zjištěno, že pro delší dobu trvání pulzu je redukce tloušťky filmu podstatně výraznější nežli pro pulzy, které proběhly v kratším časovém úseku.

Pro nízké hodnoty střední rychlosti povrchů a frekvence zátěžného pulzu byl pozorován pokles v množství zachyceného maziva. V okamžiku poklesu zatížení byl zaznamenán boční výtok maziva z kontaktu, který lze identifikovat pomocí kavitace nacházející se na okrajích hlavních vrcholů eliptického kontaktu. Jedná se o mazivo, které se vlivem poklesu zatížení dostalo za hranici kontaktu a tudíž mimo oblast vysokého tlaku. Náhlým poklesem tlaku dochází k poklesu viskozity maziva a toto je uvolněno do okolí kontaktu.

6 ZÁVĚR

Disertační práce shrnuje výsledky experimentálního studia EHD mazaného kontaktu za podmínek dynamické změny provozních parametrů střední rychlosti povrchů a zatížení kontaktních těles. Smyslem 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.

- Pro případ zjednodušené simulace kontaktu vačky a plochého zdvihátka byl analyzován vliv topografie povrchu na chování mazacího filmu. Bylo zjištěno, že pro konfigurace povrchů s nízkou hodnotou průměrné aritmetické úchyly profilu, dochází k tvorbě tenčích mazacích filmů ve srovnání s povrchem s reálnou drsností popř. cíleně modifikovaným povrchem.
- Část výsledků, popisujících vliv změny rychlosti na chování mazacího filmu, byla využita pro stanovení odchylky výsledků získaných numerickým řešením daného problému pro shodné okrajové podmínky.
- V případě dynamické změny zatížení bylo zaznamenáno zachycení maziva na vstupu do kontaktu v okamžiku nárůstu zatížení. Tato oblast se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu ve tvaru srpku prochází kontaktem rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí povrchů. Bylo potvrzeno, že mazací film uvnitř eliptického kontaktu je méně citlivý na změny zatížení v důsledku vyšší relativní tuhosti kontaktních těles.
- Zaznamenán byl také vliv střední rychlosti povrchů na množství zachyceného maziva v kontaktu při změně zatížení. Pro vyšší hodnoty střední rychlosti bylo pozorováno zachycení většího množství maziva.
- V okamžiku poklesu zatížení, pro harmonický typ zátěžného pulzu, byl zaznamenán pokles tloušťky mazacího filmu, který je přisuzován vzduchovým bublinám, k jejichž tvorbě dochází při náhlém odlehčení kontaktu.
- Na základě provedených měření byly formulovány požadavky kladené na nové experimentální zařízení tak, aby došlo k odstranění nepříznivých vlivů aparatury na probíhající experimentální měření.
- V rámci disertační práce byl proveden návrh nového experimentálního zařízení, které je vhodné pro simulaci EHD mazaného kruhového a eliptického kontaktu, umožňujícího současnou změnu provozních parametrů rychlosti a zatížení.

7 LITERATURA

- [1] REN, M.; ZHU, D.; WEN, S.Z. Experimental method for quantitative analysis of transient EHL. *Tribology International*, 1991, 24, 4, s. 225-230. ISSN: 0301-679X.
- [2] SAKAMOTO, M.; NISHIKAWA, H.; KANETA, M. Behaviour of point contact EHL films under pulsating loads. In LUBRECHT, A.A., et al. *Transient Processes in Tribology, Proc. 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004. s. 391-399. ISBN: 04-4451-706-5.
- [3] KANETA, M., et al. Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films. *Journal of Engineering Tribology-Part J*. 2007, 221, 3, s. 271-278. ISSN: 1350-6501.
- [4] KANETA, M., et al. Impact elastohydrodynamics in point contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2011, 255, 1, s. 1-12. ISSN 1350-6501.
- [5] SUGIMURA, J.; JONES, W.R.; SPIKES, H.A. EHD film thickness in non-steady state contacts. *Journal of Tribology – Transactions of the ASME*. 1998, 120, 3, s. 442-452. ISSN: 0742-4787.
- [6] SUGIMURA, J. Elastohydrodynamic lubrication films in non-steady state conditions. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2002, 47, 10, s. 752-757. ISSN: 0915-1168.
- [7] WANG, J., et al. Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion. *Tribology International*. 2005, 38, 11-12, s. 1013-1021. ISSN 0301-679X.
- [8] GLOVNEA, R.P.; SPIKES, H.A. Elastohydrodynamic film collapse during rapid deceleration: Part I – Experimental results. *Journal of tribology – Transactions of the ASME*. 2001, 123, 2, s. 254-261. ISSN: 0742-4787.
- [9] HAMILTON, G.M. The hydrodynamics of a cam follower. *Tribology International*. 1980, 13, 3, s. 113-119. ISSN 0301-679X.

- [10] DOWSON, D., et al. Experimental observation of lubricant film state between a cam and bucket follower using the electrical resistivity technique. In *Proceedings of the Japan international tribology conference*. [s.l.] : [s.n.], 1990. s. 119-124.
- [11] MESSÉ, S.; LUBRECHT, A.A. Transient elastohydrodynamic analysis of an overhead cam/tappet contact. In *Proceedings of the Institution fo Mechanical Engineers Part J : Journal of Engineering Tribology*. Suffolk, England: Professional Engineering Publishing LTD, 2000. s. 415-425. ISSN 1350-6501.
- [12] HARTL, M.; KŘUPKA, I.; LIŠKA, M. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering*. 1997, 36, 9, s. 2384-2391. ISSN 0091-3286.
- [13] GLOVNEA, R.P.; SPIKES, H.A. The influence of cam-follower motion on elastohydrodynamic film thickness. In DALMAZ, G., et al. *Tribology Research: From model experiment to industrial problem, Proc. 27th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001. s. 485-493. ISBN: 04-4450-581-4.
- [14] KANETA, M. For the establishment of a new EHL theory. In DOWSON, D., et al. *Proc. 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology : Tribology Series*. Amsterdam: Elsevier, 1999. s. 25-36. ISBN 0-444-50267-X.
- [15] ZHANG, Y.B.; WEN, S.Z. An analysis of elastohydrodynamic lubrication with limiting shear stress: Part I. - Theory and solutions. *Tribology Transactions*. 2002, 45, 2, s. 135-144. ISSN 1040-2004.
- [16] ZHANG, Y.B.; WEN, S.Z. An analysis of elastohydrodynamic lubrication with limiting shear stress: Part II. - Load influence. *Tribology Transactions*. 2002, 45, 2, s. 211-216. ISSN 1040-2004.
- [17] ŠAMÁNEK, O., et al. Influence of Surface Texturing on Lubricant Film Formation and Surface Fatigue. *Engineering Mechanics*. 2010, 17, 1, s. 27-36. ISSN: 1802- 1484.
- [18] KANETA, M., et al. Abnormal Phenomena Appearing in EHL Contacts. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*. 1996, 118, 4, s. 886-892. ISSN 0742-4787.

- [19] KRUPKA, I., et al. Effect of surface texturing on elastohydrodynamically lubricated contact under transient speed conditions. *Tribology International*. 2011, 44, 10, s. 1144-1150. ISSN: 0301-679X.

8 PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

1. 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.
2. 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.
3. ZIMMERMAN, M. Vliv dynamické změny rychlosti třecích povrchů na tvar a tloušťku mazacího filmu v EHD kontaktu. In *Zborník referátov, 51. Medzinárodná vedecká konferencia katedier časti a mechanizmov strojov*. Košice: C-PRESS - Vydavateľstvo a tlačiareň, Košice, 2010. s. 349-352. ISBN: 978-80-970-294-1- 8.
4. ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. A research of behavior of lubrication film under non- steady state conditions. In *Engineering mechanics 2009. 1*. Praha: Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i., 2009. s. 1513-1523. ISBN: 978-80-86246-35- 2.
5. ZIMMERMAN, M. Vliv proměnného zatížení na bodový EHD kontakt. In *50. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině - EDIS, 2009. s. 107-112. ISBN: 978-80-7043-718- 6.
6. ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. Experimentální studium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. In *FSI Junior conference 2008 - Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů - sborník*. Brno: VUT FSI v Brně, 2009. s. 134-141. ISBN: 978-80-214-3834- 7.
7. ZIMMERMAN, M. Vliv nestacionárních podmínek na bodový EHD kontakt. In *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. s. 285-288. ISBN: 978-80-7043-718- 6.

9 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Ing. Martin Zimmerman, nar. 1983 v Přílepych.

Vzdělání:

- 2007–2011 Doktorské studium na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně. Téma disertační práce: Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení
- 2002–2007 Magisterské studium na FSI VUT v Brně, obor Aplikovaná mechanika, specializace Počítačová podpora konstruování. Téma diplomové práce: Návrh mobilní věže pro Savoniův větrný generátor o malém výkonu.
- 1998–2002 Střední průmyslová škola Edvarda Beneše, obor Strojírenství.

Praxe:

Výuka, cvičení v předmětech:

- Konstruování strojů - Strojní součásti (5KS)
- Konstruování strojů - Převody (6KT)
- Konstruování strojů - Mechanismy (6KM)
- Konstruování strojů a strojních součástí (CKP)
- Tribologie (ZTR)

Výzkumná činnost:

- 2011–2013 Vliv povrchových nerovností na utváření mazacího filmu. Grant FRVŠ 3261/2011. Spoluřešitel.
- 2010 Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacích filmů. Specifický výzkum. Spoluřešitel.
- 2010 Vliv proměnného zatížení na chování mazacího filmu uvnitř elastohydrodynamicky mazaného kontaktu. Grant FRVŠ 2241/2010. Hlavní řešitel.
- 2009 Využití vizualizace nestacionárních tribologických procesů vysokorychlostní záznamovou technikou v konstrukčních předmětech. Grant FRVŠ 2505/2009. Hlavní řešitel.
- 2009 Vliv plynulé změny zatížení elastohydrodynamického mazaného kontaktu na profil mazacího filmu. Grant Fondu vědy FSI, BD 139 3009. Hlavní řešitel.

- 2008 Experimentálnístudium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. Grand Fondu vědy FSI, BD 138 3003. Hlavní řešitel.

Tvůrčí aktivity:

- ZIMMERMAN, M.: Fallen v01; Program pro ovládání měničů servomotorů. místnost A02/ 423, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká republika. (software).
- ZIMMERMAN, M.: Genrátor proměn. zatížení; Zařízení pro generování proměnného zatížení v EHD kontaktu. laboratoř č. A2/ 423, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika. (funkční vzorek).

Pracovní historie:

- 09/2011–doposud - FSI VUT v Brně, ÚK-odbor konstruování strojů – asistent.
- 02/2009–08/2011 - FSI VUT v Brně, Technicko hospodářský pracovník.
- 09/2009–12/2010 - Top Language Centre, s.r.o., školitel IT skills.
- 07/2007–12/2008 - VUTR a.s., konstruktér.
- 09/2006–12/2006 - Královopolská RIA a.s., projektant.
- 06/2006–09/2006 - Mugler AG. Deutschland, praktikant.

Jazykové znalosti:

Angličtina.

ABSTRAKT

Tato disertační práce je zaměřena na experimentální studium chování mazacího filmu při náhlých změnách provozních parametrů. Ve většině reálných tribologických uzlů dochází v průběhu pracovního cyklu ke změně provozních podmínek jako jsou rychlost, zatížení a poloměry křivosti stýkacích se ploch. Změna provozních podmínek může představovat zvýšené riziko porušení mazacího filmu. Přímý dotyk kontaktních těles, v okamžiku porušení mazacího filmu, s sebou nese zvýšení tření a opotřebení. Pro sledování dynamických změn v kontaktu byla použita vysokorychlostní CMOS kamera. Z nasnímaných interferogramů, s pomocí metody optické interferometrie, byla provedená zpětná rekonstrukce mazacího filmu. Bylo potvrzeno, že provozní parametry mají zásadní vliv na utváření mazacího filmu a na jeho tloušťku a pro jistou kombinaci okrajových podmínek může dojít k porušení spojitosti vrstvy maziva.

ABSTRACT

This dissertation is focused on experimental study of lubricant film behavior under transient conditions. For real machine parts such as gears, roller bearings and cam mechanism the operating conditions such as speed, load and radius of curvature of rubbing surfaces are vary during the working cycle. Change in operating conditions may pose an increased risk of the lubricating film breakdown. Direct contact of rubbing surfaces at the time of the lubricating film breakdown causes an increase in friction and wear. The high-speed CMOS camera was used to record the dynamic changes in lubricating film thickness during the experiment. The optical interferometry method has been used for reverse reconstruction of lubricating film thickness of the recorded interferograms. It was confirmed that the operating parameters have a major impact on the formation of lubricant film and its thickness and a certain combination of boundary conditions can cause lubricating film rupture. The obtained results showed, that modified topography of the rubbing surfaces can help to increase the lubrication film thickness especially in critical phases of working cycle.