

Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

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

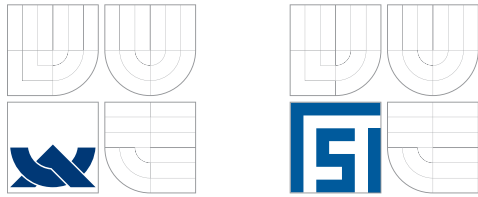
Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou

Dizertační práce
Dissertation Thesis

Autor práce: **Ing. Petr Svoboda**
Author

Brno 2009





Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

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

Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou

Dizertační práce
Dissertation Thesis

Autor práce: **Ing. Petr Svoboda**
Author

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.**
Supervisor

OMYLY V CITÁTECH

Tyto následující omyly v citátech jsou zajímavým dokladem toho, jak křivolaké můžou být cesty lidské fantazie a vědeckých teorií:

„Prezident Akademie je dále povinen ze všech svých sil přispívat k vyhubení vlkodlaků, permoniků, draků, vodních žínek a bludiček. Aby byl lid účinně pobídnut k této bohulibé činnosti, vypisuje se na vypátrání každé z těchto příšer, ať už je odhalena v děrách, jamách, jeskyních, nebo jezerech, odměna šesti tolarů.“

Ze zakládací listiny berlínské Akademie věd, 1700

„Navrhuji zrušení patentního ústavu. Všechno už bylo vynalezeno a nic nového už nelze objevit.“

Ředitel patentního úřadu ve Washingtonu, 1832

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především Prof. Ing. Ivanu Křupkovi, Ph.D., vedoucímu disertační práce, za odborné vedení a všestrannou pomoc při řešení daného tématu. Dále děkuji svým rodičům za podporu ve studiu a přátelům, kteří mi dodávali energii při psaní disertační práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele Prof. Ing. Ivana Křupky, Ph.D.

V Brně dne: 31. 8. 2009

Petr Svoboda

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, P. *Experimentální studium utváření mazacích filmů při reverzaci a rozběhu třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 85s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

ABSTRAKT

Tato disertační práce je zaměřena na experimentální studium chování mazacího filmu během rozběhu a reverzace nekonformních třecích povrchů. Tyto podmínky totiž představují zvýšené riziko poškození strojních součástí, protože mazací film není schopen zajistit úplné oddělení třecích povrchů. Tak dochází k jejich styku, zvýšenému tření a opotřebení. Chromatické interferogramy pořízené vysokorychlostní CMOS kamerou během rozběhu třecích povrchů umožnily detailně sledovat změny v tloušťce mazacího filmu způsobené povrchovými nerovnostmi. Bylo zjištěno, že přítomnost mělkých povrchových nerovností na třecím povrchu napomáhá oddělit třecí povrchy pomocí maziva emitovaného z povrchových nerovností. Experimentální studium chování mikrotisků na povrchu ocelové kuličky pomohlo lépe porozumět i chování skutečné topografie povrchu. Ze získaných experimentálních výsledků vyplývá, že vhodně navržená topografie třecího povrchu může napomoci snížit tření a opotřebení během nestacionárních provozních podmínek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Smíšené mazání, tloušťka mazacího filmu, cílená topografie povrchu, reverzace, rozběh třecích povrchů.

Abstract

ABSTRACT

This dissertation is focused on the effects of both artificially produced and real roughness features on mixed lubrication film formation during start-up and reversal of non-conformal contacts operated under rolling/sliding conditions. The start-up operation of mixed lubricated contacts represents one of the transient conditions that bring the risk of the surface damage because of asperities interactions. Chromatic interferograms captured by CMOS high-speed camera during start up of the motion enabled to observe the detailed changes in lubrication film caused by surface features. The observation of the effects of surface dents artificially produced on the ball surface helped to understand better the behaviour of real surface topography. It was found that the presence of shallow surface features can help to separate mixed lubricated rubbing surfaces more efficiently than it could be suggested from the results obtained with smooth surfaces. It can be suggested from the obtain results that properly designed topography of the rubbing surfaces can help to reduce the asperities interactions under transient operational conditions.

KEY WORDS

Mixed lubrication, film thickness, surface topography, reversal motion, start-up of the motion.

ABSTRAKT	7
KLÍČOVÁ SLOVA	7
ABSTRACT	8
KEY WORDS	8
OBSAH	9
1 ÚVOD	11
1.1 Formulace řešeného problému a jeho analýza.....	11
2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
2.1 Elastohydrodynamické mazání za nestacionárních provozních podmínek	12
2.2 Teoretické řešení EHD mazání bodových kontaktů	14
2.2.1 Numerické studie EHD mazání bodových kontaktů	15
2.2.2 Modelování nestacionárních podmínek EHD mazaných kontaktů	16
2.3 Experimentální studium EHD mazání bodových kontaktů	18
2.3.1 Vliv změny rychlosti na utváření mazacího filmu v EHD kontaktech.....	19
2.4 Utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů	25
2.5 Cílená modifikace topografie třecích povrchů	36
2.5.1 Cílená modifikace topografie konformních povrchů.....	36
2.5.2 Cílená modifikace topografie nekonformních povrchů.....	37
2.6 Vliv cílené modifikace třecích povrchů na tenké mazací filmy	38
2.6.1 Teoretické modelování třecích povrchů s cílenou modifikací topografie .	38
2.6.2 Experimentální studium cílené modifikace třecích povrchů	41
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	48
4 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	49
4.1 Implementace světelného zdroje a jeho chlazení	50
4.2 Synchronizace vysokorychlostní CMOS kamery s kuličkou	51
4.3 Vysokorychlostní CMOS kamera IDT X-Vision 3	51
4.4 Modifikace stávajícího zařízení.....	52
4.5 Stanovení indexu lomu oleje Abbeho refraktometrem.....	52
4.6 Stanovení viskozity oleje rotačním viskozimetrem Haake RotoVisco 1	53
4.7 Příprava vzorku pro experiment	53
5 SÉRIE VSTUPNÍCH EXPERIMENTŮ	55
5.1 Vstupní experimenty pro hladký kontakt za podmínek čistého valení.....	55
5.2 Vstupní experimenty s cíleně vytvořenými mikrovrtisky za čistého valení.....	56
5.3 Vstupní experimenty s cíleně vytvořenými mikrovrtisky při prokluzu třecích povrchů	57

6 VLIV TOPOGRAFIE NA UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU PŘI ROZBĚHU TŘECÍCH POVRCHŮ.....	59
6.1 Popis experimentu.....	59
6.1.1 Experimenty při rozběhu nemodifikovaných třecích povrchů	59
6.1.2 Experimenty při rozběhu třecích povrchů s cíleně modifikovanou topografií.....	62
7 VLIV TOPOGRAFIE NA UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU PŘI REVERZACI TŘECÍCH POVRCHŮ.....	68
7.1 Popis experimentu.....	68
7.2 Série experimentů s uměle vytvořenými mikrovrtisky na kuličce.....	68
7.3 Série experimentů na reálném povrchu kuličky	71
8 ZÁVĚR	73
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	74
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	79
PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	84

1 ÚVOD

Tato disertační práce je zaměřena na experimentální studium procesů probíhajících za nestacionárních provozních podmínek u velmi zatěžovaných strojních součástí (valivých ložisek, ozubených soukolí, vaček apod.) s využitím vysokorychlostní CMOS záznamové techniky. Jako zásadní se jeví zejména popsání nestacionárních procesů, které mohou vést k prolomení mazacího filmu, a nalezení postupů, které tomuto procesu mohou zabránit. Hlavním cílem disertační práce je proto experimentální objasnění procesů probíhajících při smíšeném mazání během rozběhu a reverzace třecích povrchů. Základní problém při rozběhu třecích povrchů představuje skutečnost, že 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. Existují různé způsoby, jak efektivně napomoci oddělit třecí povrchy a tím zabránit případnému tření a opotřebení. Jedním ze způsobů je cílená modifikace topografie třecích povrchů. U cílené modifikace topografie třecích povrchů se jedná o vytváření soustav mikrodůlků na třecích površích. Tento přístup napomáhá ke zlepšení mazání, snížení tření a opotřebení třecích povrchů. Vytvořené mikrodůlky napomáhají posunout mazací režim směrem k optimálním provozním podmínkám. To znamená, že např. při rozběhu součásti napomáhají mikrovrtisky s mazivem utváření mazacího filmu. Mazivo je uchováváno uvnitř těchto mikrodůlků a při rozběhu kontaktu je transportováno do kontaktu. Tyto mikrovrtisky tak napomáhají v podmínkách, kdy není dostatek maziva v kontaktu. Dále můžou sloužit jako mikrokapsy, které zachycují volné částice, vzniklé následkem opotřebení třecích součástí. Dosud publikované výsledky naznačují, že vhodně zvolená textura třecího povrchu může vést ke zlepšení tribologických vlastností, jak už ke zlepšení mazacích schopností tenkých mazacích filmů, tak k redukci tření a opotřebení třecích povrchů. Proto je disertační práce vedena snahou o experimentální objasnění a zmapování procesů při rozběhu a reverzaci třecích povrchů na strojních součástech s cíleně modifikovanou topografií třecích povrchů.

1.1 Formulace řešeného problému a jeho analýza

Problémová situace

Při rozběhu nejsou třecí povrchy po určitou dobu odděleny souvislým mazacím filmem, takže dochází ke styku třecích povrchů. Při reverzaci třecích povrchů dochází z výrazné redukci tloušťky mazacího filmu. Rozběh a reverzace třecích povrchů proto představují kritickou fázi provozu strojních součástí s ohledem na nárůst tření, opotřebení a následné vyřazení strojních součástí z provozu.

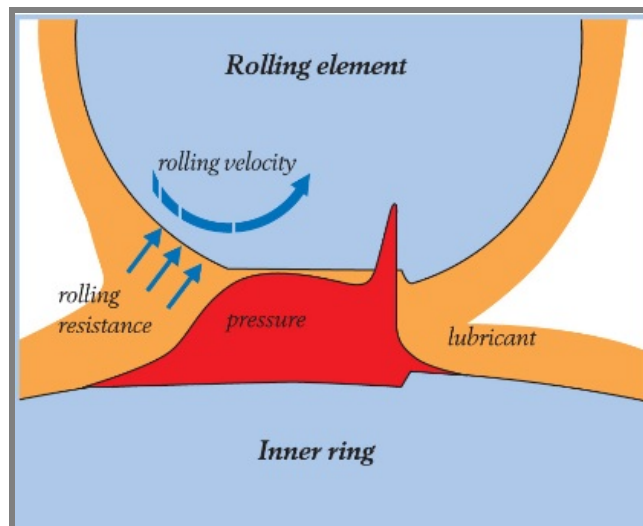
Formulace problému

Základní problém řešený v rámci disertační práce lze na základě problémové situace formulovat následovně: Může vhodně zvolená modifikace topografie třecího povrchu vést ke zlepšení tribologických vlastností (snížení tření a opotřebení) při rozběhu a reverzaci třecích povrchů?

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Elastohydrodynamické mazání za nestacionárních provozních podmínek

Většina strojních prvků (valivých ložisek, ozubených soukolí a vaček) pracuje za podmínek elastohydrodynamického (EHD) mazání, kdy jsou třecí povrchy elasticky deformovány a viskozita maziva v oblasti kontaktu třecích povrchů se výrazně zvyšuje vlivem kontaktního tlaku. Tento jev nastává během deformace nekonformních povrchů při vysokém zatížení, které je přenášeno malou plochou, jako je například mezi kuličkou a vnitřním kroužkem valivého ložiska, ve styku zubů ozubených převodů, ve dvojici vačka a zdvihátko ventilu. To způsobuje dočasné zvýšení viskozity maziva, které je v tomto okamžiku zachyceno mezi deformované třecí povrchy (Obr. 2.1). Při relativním pohybu kontaktních těles dochází na rozhraní třecích povrchů k vytváření homogenního mazacího filmu, který odděluje třecí povrchy a tím snižuje jejich tření a následné opotřebení [1].



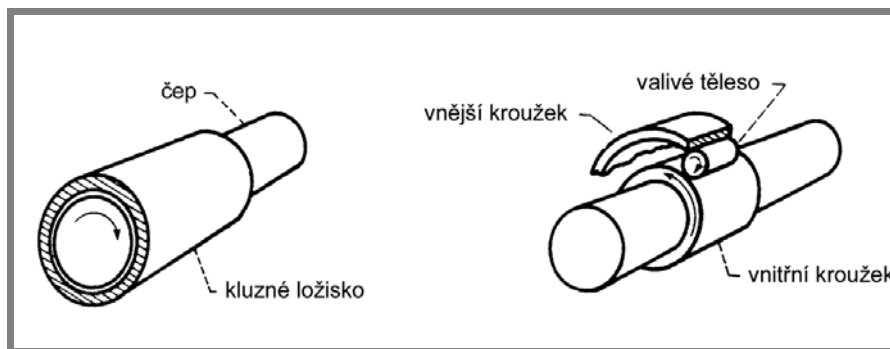
Obr. 2. 1 Tloušťka mazacího filmu a rozložení tlaku v EHD mazaném kontaktu [2].

Začátek teoretického studia mazání nekonformně zakřivených třecích povrchů se datuje od počátku 20. století, kdy L. Gümbel [3] a H. M. Martin [4] publikovali výsledky svého teoretického studia mazání ozubeného soukolí. Při řešení vycházeli ze stávající hydrodynamické teorie a H. M. Martin získal řešením Reynoldsovy rovnice vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu (1) pro styk parabolického válce s deskou mazaného nestlačitelným izoviskózním mazivem:

$$h_{\min} = 4,896 \frac{u \eta_0 R_x}{w} \quad (1)$$

Podle tohoto vztahu se měla tloušťka mazacího filmu při běžných podmínkách pohybovat okolo 0,03 μm , ale dosahovaná drsnost R_a byla mezi 0,4 až 0,8 μm . To však bylo v rozporu s experimentálními výsledky, které ukazovaly, že většina zubů ozubených kol nebyla v místě styku zubů opotřebena, a tedy že ve většině případů jsou v místě záběru třecí povrchy odděleny souvislou vrstvou maziva.

Tento rozpor se podařilo zcela objasnit na počátku 60. let 20. století, kdy bylo prokázáno, že chování velmi zatížených mazaných nekonformních těles (Obr. 2.2) ovlivňují fyzikální vlastnosti maziva i mechanické vlastnosti třecích těles. Na takovýto režim mazání se začalo pohlížet jako na elastohydrodynamické mazání (EHL).



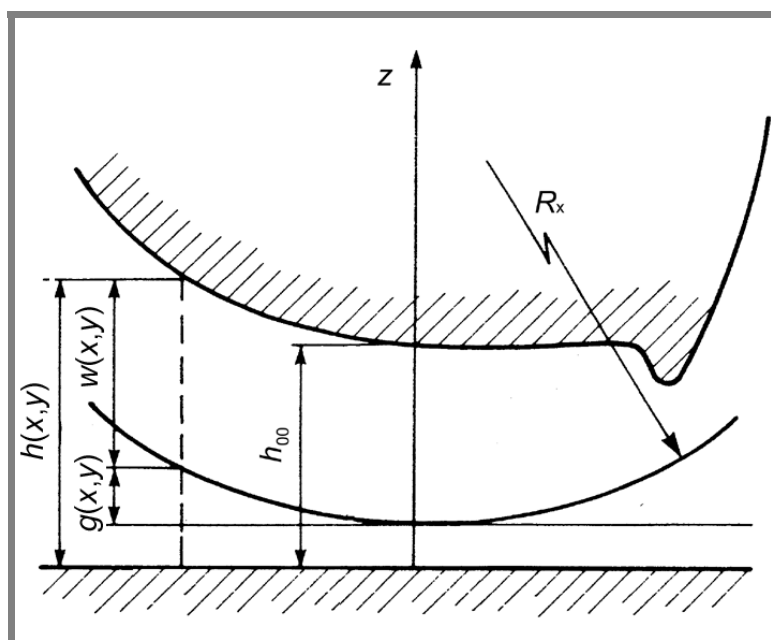
Obr. 2. 2 Příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles [5].

V klasické teorii EHD mazání se pro popis kontaktu používají tři rovnice. První, Reynoldsova rovnice, kterou lze získat z Navierových-Stokesových rovnic a rovnice continuity, popisuje hmotnostní průtoky způsobené gradienty tlaku v mazané oblasti. Druhá rovnice reprezentuje součet nedeformovaného tvaru kontaktní oblasti a elastických deformací třecích povrchů. Poslední rovnice vyjadřuje rovnováhu sil v kontaktu. Řešením soustavy těchto rovnic je při využití vhodného numerického aparátu možné získat rozložení tloušťky a tlaku mazacího filmu. Průlomem v této oblasti byla zejména práce A. A. Lubrechta, T. Napela a R. Bosmy z roku 1987 [6], kteří představili zcela nový numerický nástroj pro řešení matematického problému EHD mazání na kruhovém kontaktu. V porovnání s klasickým, do té doby používaným numerickým přístupem je mnohem rychlejší a umožnil analyzovat i případy velmi zatížených bodových kontaktů. Již na konci minulého století se tak podařilo podrobně popsat a experimentálně ověřit utváření mazacích filmů mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy za ustálených provozních podmínek [7], [8].

U mnoha strojních prvků však nejsou provozní podmínky (zatížení, rychlosti třecích povrchů a jejich geometrie) konstantní, ale nestacionární – proměnné, a dochází k jejich významným změnám v čase. Za této situace již mazací film není často schopen zajistit úplné oddělení třecích povrchů, a tak dochází k jejich styku, opotřebení a následnému zadření. Zatímco se v odborné literatuře můžeme setkat s řadou teoretických studií zohledňujících nestacionární provozní podmínky, dosud bylo publikováno jen několik experimentálních prací zabývajících se touto problematikou, což je způsobeno zejména dostupností vhodných měřicích metod.

2.2 Teoretické řešení EHD mazání bodových kontaktů

Teoretické řešení EHL bodových kontaktů u tuhých třecích těles vychází z podmínky, že mazací film je v kontaktu třecích těles vytvářen společným působením hydrodynamického tlaku v mazacím filmu a elastických deformací třecích povrchů. Na tvaru mazacího filmu se výrazně podílí změna dynamické viskozity a hustoty maziva v kontaktní oblasti. Rozložení tlaku v EHD filmu je popsáno Reynoldsovou rovnicí v obecném tvaru [9]. Reynoldsova rovnice popisuje hmotnostní průtoky způsobené gradienty tlaku v mazané oblasti. Za předpokladu proudění maziva pouze v jednom směru a zanedbání roztažnosti maziva dostaneme redukovaný tvar Reynoldsovy rovnice, který se používá při výpočtu u nekonformně zakřivených třecích těles. Tloušťka mazacího filmu se vyjadřuje jako součet nedeformovaného tvaru kontaktní oblasti a elastických deformací třecích povrchů podle obrázku 2.3.



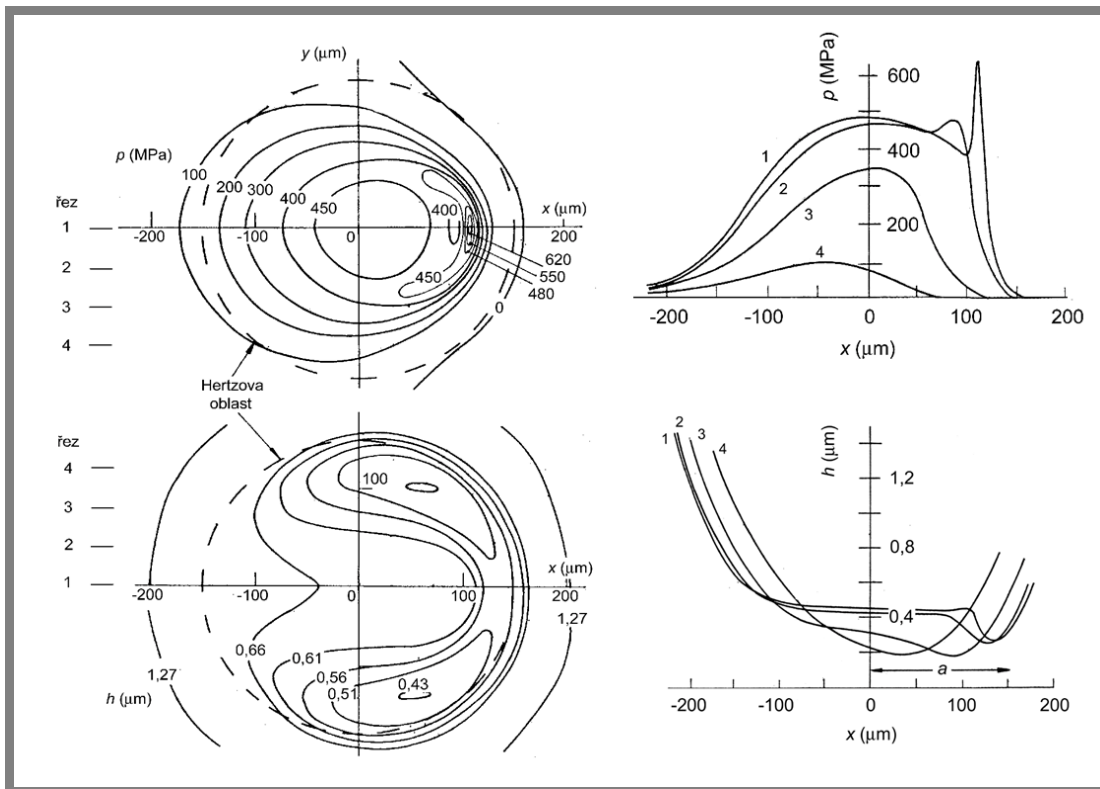
Obr. 2. 3 Tvar třecích těles v mazaném kontaktu [10].

Při řešení EHD problému je rovněž nutné uvažovat změnu dynamické viskozity a hustoty s tlakem. Změnu viskozity s tlakem popsal již v roce 1893 C. Barus [11], nicméně jeho vztah je možné použít pro tlaky do 0,5 GPa, proto se setkáme při řešení i s dalšími vztahy, které lépe popisují změnu viskozity maziva za větších tlaků [12]. Rovněž hustota maziva se s tlakem výrazně mění. Zpočátku se s rostoucím tlakem prudce zvyšuje a při překročení dostatečně vysokého tlaku se chová mazivo jako nestlačitelné [13], [14], [15].

2.2.1 Numerické studie EHD mazání bodových kontaktů

První zcela numerické studie problému EHD mazání bodových kontaktů se objevily až v druhé polovině 70. let 20. století, kdy publikovali A. P. Ranger, C. M. Ettles a A. Cameron [16] rozložení tloušťky a průběh tlaku v mazacím filmu u kruhového kontaktu třecích těles v závislosti na zatížení, rychlosti třecích povrchů a viskozitně-tlakovém koeficientu. Toto numerické řešení potvrdilo charakteristické rysy vyskytující se při experimentálním řešení mazacího filmu v bodovém kontaktu (Obr. 2.4). Stanovili také vztah pro centrální tloušťku mazacího filmu (2).

$$H_c = 1,44U^{0,567}W^{0,035}G^{0,462} \quad (2)$$



Obr. 2.4 Rozložení tloušťky a tlaku EHD mazacího filmu v kruhovém kontaktu pro $F = 22,2 \text{ N}$ a $u = 0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [16].

Srovnatelný přístup použili i B. J. Hamrock a D. Dowson ve studii EHD mazání eliptických kontaktů [17]–[20]. Detailně popsali vlivy bezrozměrných parametrů U , W , G a elipticity k na rozložení tloušťky a tlaku v mazacím filmu. Na základě studia pro omezený rozsah provozních podmínek získali vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu (3) a také vztah pro centrální tloušťku mazacího filmu (4).

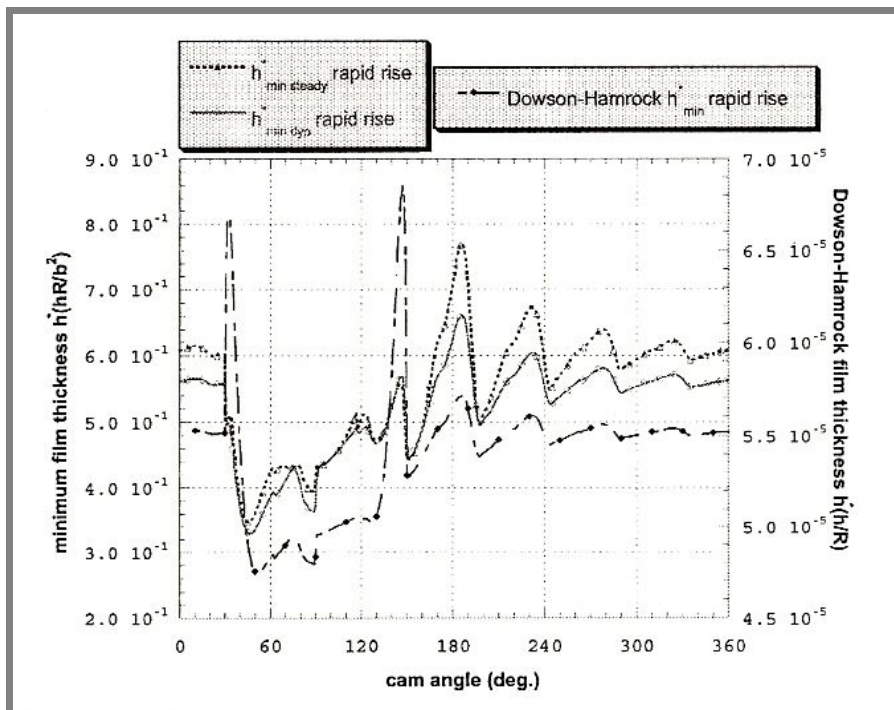
$$H_{\min} = 3,63U^{0,68}W^{-0,073}G^{0,49}(1 - e^{-0,68k}) \quad (3)$$

$$H_c = 2,69U^{0,67}W^{-0,067}G^{0,53}(1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (4)$$

Bez ohledu na omezený rozsah podmínek, pro které byly tyto rovnice odvozeny, jsou dodnes používány při odhadu tloušťky mazacího filmu v EHD mazaných kontaktech tribologických soustav a slouží také jako referenční hodnoty při prezentaci výsledků teoretických i experimentálních studií.

2.2.2 Modelování nestacionárních podmínek EHD mazaných kontaktů

Již v roce 1971 J. P. Vichard ve své studii přechodových jevů [21] porovnal výsledky s Martinovou teorií a sestavil rovnici pro EHD liniový kontakt s proměnným zatížením v čase založenou na Grubinově aproximaci. Avšak teprve na konci osmdesátých let minulého století byly zkoumány dynamické efekty a případy náhlých změn rychlostí podrobně. Mnoho výzkumných skupin po celém světě vyšetřovalo zdroje energetických ztrát uvnitř spalovacího motoru a způsoby, jakými by mohly být sníženy [22]–[26]. Ačkoli bylo zjištěno, že většina ztrát je způsobena termodynamickou účinností, bylo jasné, že přínosem by mohlo být i snížení mechanických ztrát v tribologickém systému motoru. Tak bylo dosaženo významnějšího zlepšení v porozumění tribologického chování mnoha součástí motoru. Avšak menší pozornost byla věnována ventilovému rozvodu kvůli složitosti vzájemných ovlivňování mezi vačkou a zdvihátkem. V této dvojici dochází k velkému dynamickému zatížení, velkým dotykovým tlakům, vysokým kluzným rychlostem a k utváření nedostatečného mazacího filmu. I když ztráty ventilového rozvodu jsou obecně nižší než v případě pístů nebo ložisek klikového hřídele, při nízkých rychlostech motoru je jejich význam mnohem větší.

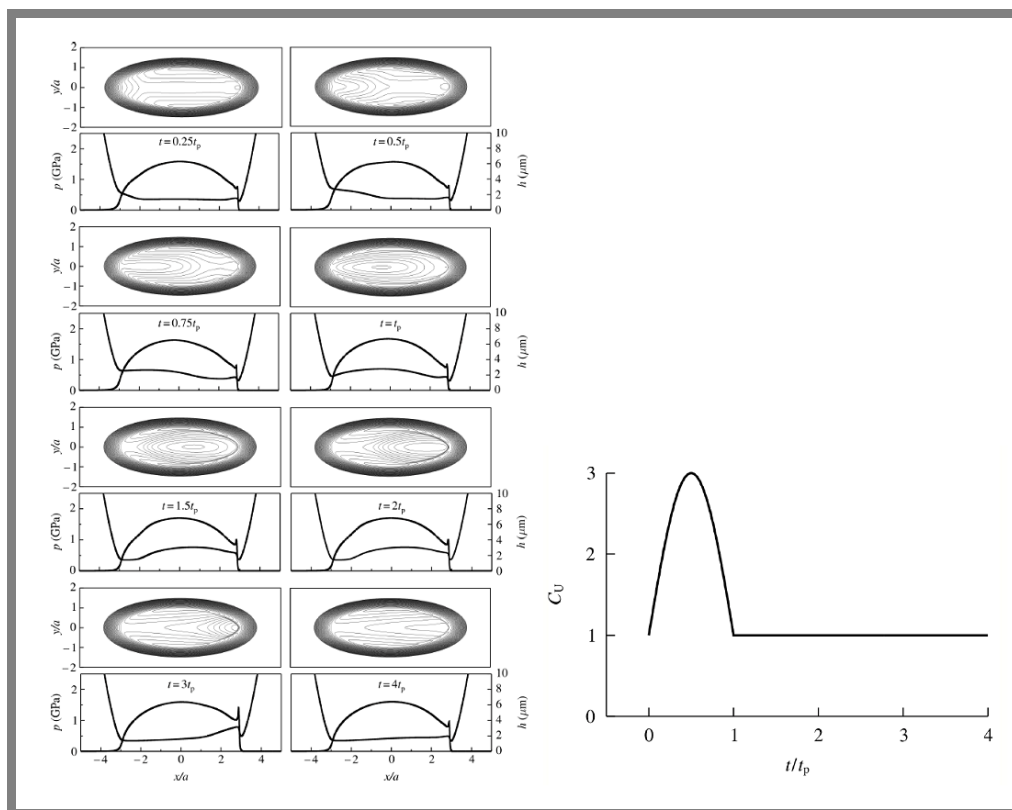


Obr. 2. 5 Tloušťka filmu při dynamických podmínkách [27].

S ohledem na spolehlivost a trvanlivost se ukázal jako nejvíce problematický návrh efektivního, převážně EHD mazání ventilového rozvodu při zohlednění cyklických změn zatížení a náhlých změn rychlostí [25]. S. Jang a K. Park [27] ukázali vliv dynamických změn rychlostí třecích povrchů na průběh tloušťky mazacího filmu. Výsledky porovnali se vztahem B. J. Hamrocka a D. Dowsona (Obr. 2.5), kde není dynamický efekt uvažován.

Na konci minulého století uskutečnili S. Messe a A. A. Lubrecht obdobné srovnání [28]. Aplikovali nový model na problém chování vačky a zdvihátka, který umožnil zahrnutí dynamické změny zatížení, rychlosti a geometrie třecích povrchů. Výsledky srovnali se vztahem B. J. Dowsona a G. R. Higginsona pro liniový kontakt. S. Meese a A. A. Lubrecht prokázali, že mazací film může mít i při krátkodobém zastavení relativního pohybu třecích povrchů nenulovou hodnotu, zatímco klasické řešení vede ke snížení tloušťky mazacího filmu až na nulu.

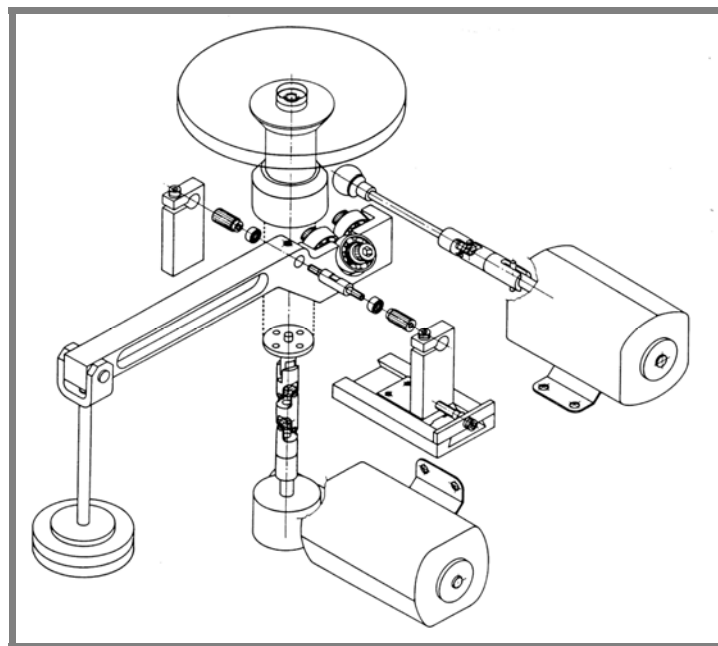
Rozdíl mezi klasickým EHD řešením a modelem zohledňujícím nestacionární provozní podmínky ukázal i L. Chang [29], který popsal novou metodu pro výpočet tloušťky filmu pro EHD kontakty. Metoda umožňuje stanovit průběh tloušťky a tlaku pro celý cyklus stroje během několika sekund nebo může být jednoduše implementována do prostředí programu pro strojní části pracující za EHD podmínek. Obdobné řešení prezentovali v roce 2004 Z. M. Jin a kol. [30] u eliptického kontaktu (Obr. 2.6). Ukázali, že náhlé zvýšení rychlosti má za následek výrazné změny tloušťky filmu, zatímco změna v kontaktním tlaku je stěží pozorovatelná. Přechodový efekt je ještě dlouho pozorovatelný i po ukončení změny rychlosti. Dále popsali, že vytlačený mazací film dokáže zabránit náhlému zhroucení tloušťky mazacího filmu během rychlého zastavení.



Obr. 2. 6 Průběh tloušťky mazacího filmu a tlaku v osmi okamžicích po náhlém zvýšení otáček [30].

2.3 Experimentální studium EHD mazání bodových kontaktů

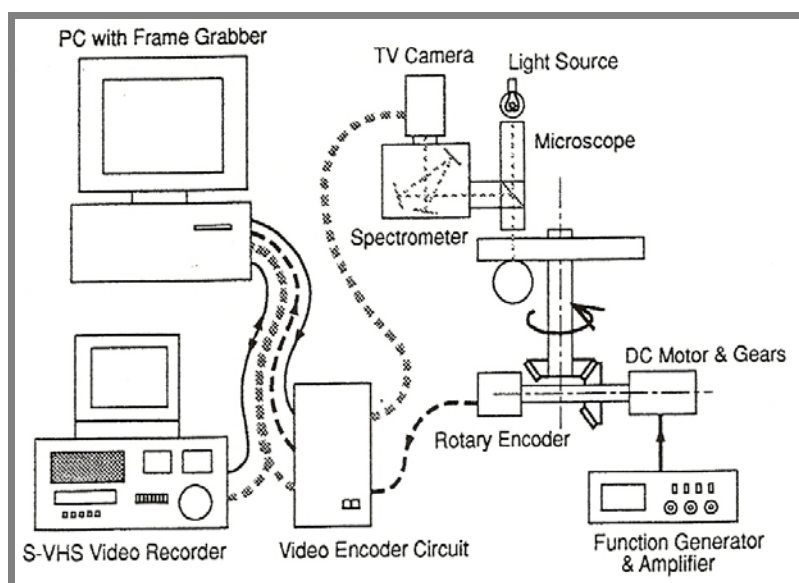
Při studiu mazacích filmů se využívají různé typy experimentálních zařízení. Odlišují se typem konstrukce, která je zpravidla určena měřicí metodou použitou ke stanovení tloušťky mazacího filmu. V roce 1963 R. Gohar a A. Cameron [31] poprvé popsali charakteristický tvar EHD mazaného kruhového kontaktu s podkovovitou konstrikcí ve výstupní oblasti kontaktu. Chování EHD mazacího filmu studovali pomocí optické interferenční metody v kontaktu mezi ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm a deskou vyrobenou z transparentního materiálu. Od té doby se tento typ experimentálního zařízení stal jedním z nejpoužívanějších pro studium rozložení tloušťky mazacího filmu mezi nekonformně zakřivenými tělesy. Experimentálně bylo ověřeno, že rychlost třecích povrchů má značný vliv na tloušťku mazacího filmu, zatímco zatížení či změna geometrie třecích těles má menší vliv na hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu. Konstrukce experimentálních zařízení se nadále vyvíjela s tím, jak se vyvíjely dostupné měřicí metody. Typickým zástupcem současných experimentálních zařízení je zařízení (Obr. 2.7) navržené C. C. Kwehmem, H. P. Evansem a R. W. Snidlem [32]. Tento typ zařízení umožňuje nezávislý pohon obou třecích povrchů, nastavení požadovaného zatížení či teploty maziva. V průběhu 70. a 80. let 20. století se ukázala optická interferenční metoda jako nejvhodnější ke studiu chování EHD mazaných bodových kontaktů a zprostředkovala detailní pohled na tvar mazacího filmu, avšak dalšímu použití zejména v oblasti tenkých mazacích filmů bránila její omezená rozlišitelnost. Toto omezení se podařilo překonat použitím pokročilých metod založených na optické interferenční metodě, které umožnily stanovit tvar mazacího filmu v rozsahu od 3 do 800nm [7]. Tyto metody nejen pomohly objasnit řadu procesů probíhajících v mazaných kontaktech za ustálených provozních podmínek, ale vytvořily i předpoklad úspěšného studia chování mazacích filmů při dynamických změnách rychlostí či zatížení třecích povrchů.



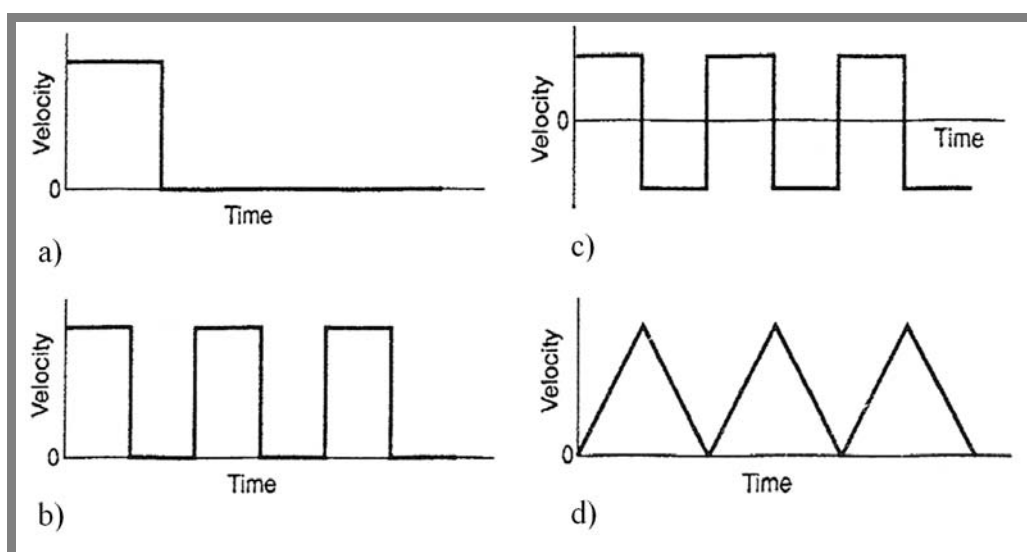
Obr. 2. 7 Zařízení pro měření tloušťky mazacího filmu [32].

2.3.1 Vliv změny rychlosti na utváření mazacího filmu v EHD kontaktech

Za počátek systematického experimentálního výzkumu přechodových jevů v EHD mazacích kontaktech lze označit druhou polovinu 90. let 20. století. J. Sugimura a kol. [34], [35] navrhli experimentální zařízení (Obr. 2.8) pro měření přechodových jevů, kde byl disk poháněn pomocí elektronicky ovládaného servomotoru, spektrum bylo snímáno monochromatickou CCD kamerou, která dovolila zaznamenat až 50 snímků za sekundu. Snímky byly nahrávány na klasickou S-VHS videokazetu pro pozdější vyhodnocení. Na dvou typech minerálních olejů s rozdílnou viskozitou pozorovali utváření mazacího filmu za podmínek náhlého zastavení třecích povrchů (Obr. 2.9a). Ve své studii rovněž simulovali další experimentální podmínky – zapnutí a vypnutí stroje (Obr. 2.9b), vratný pohyb (Obr. 2.9c), akceleraci a deceleraci (Obr. 2.9d).

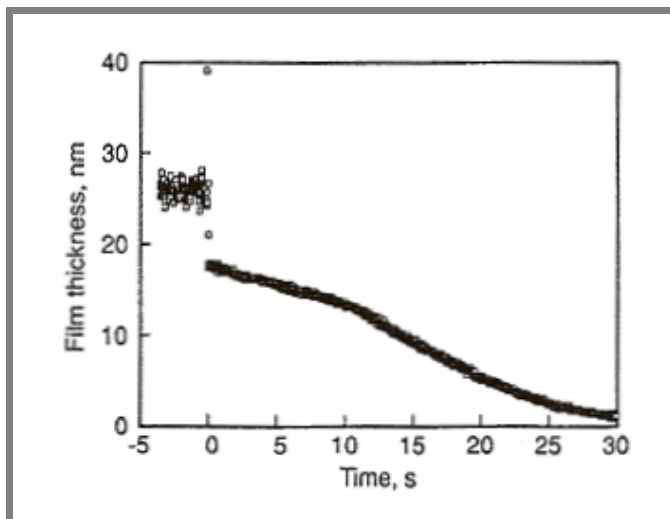


Obr. 2. 8 Experimentální zařízení pro studium mazacích filmů za neustálených provozních podmínek [34].



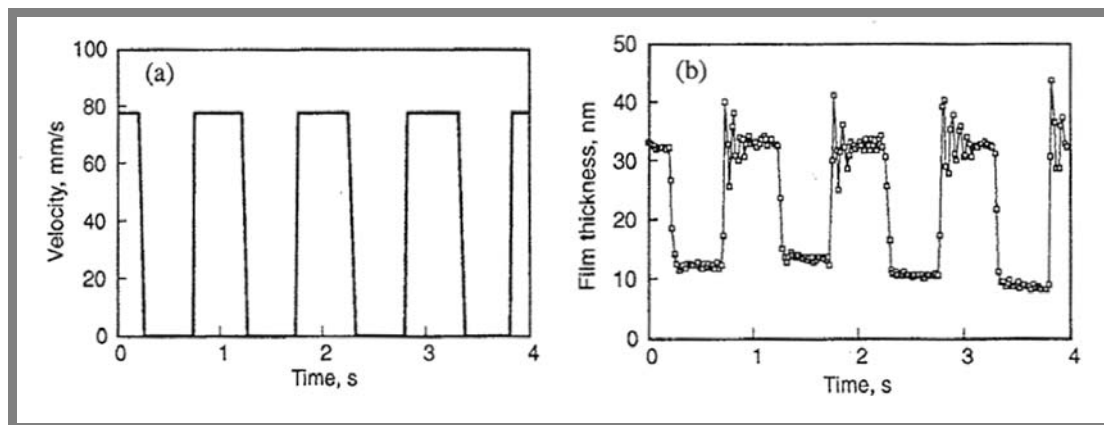
Obr. 2. 9 Experimentální podmínky: (a) rychlé zastavení, (b) zapnutí – vypnutí, (c) vratný pohyb, (d) akcelerace – decelerace [34].

Při rychlém zastavení třecích povrchů (použité mazivo SN150) mazací film okamžitě kolabuje, avšak nedochází k prolomení mazacího filmu, ale k pozvolnému poklesu tloušťky mazacího filmu. To souvisí s přítomností vytlačeného mazacího filmu v kontaktu při náhlém zastavení a jeho pozvolném vytékání z kontaktní oblasti (Obr. 2.10).



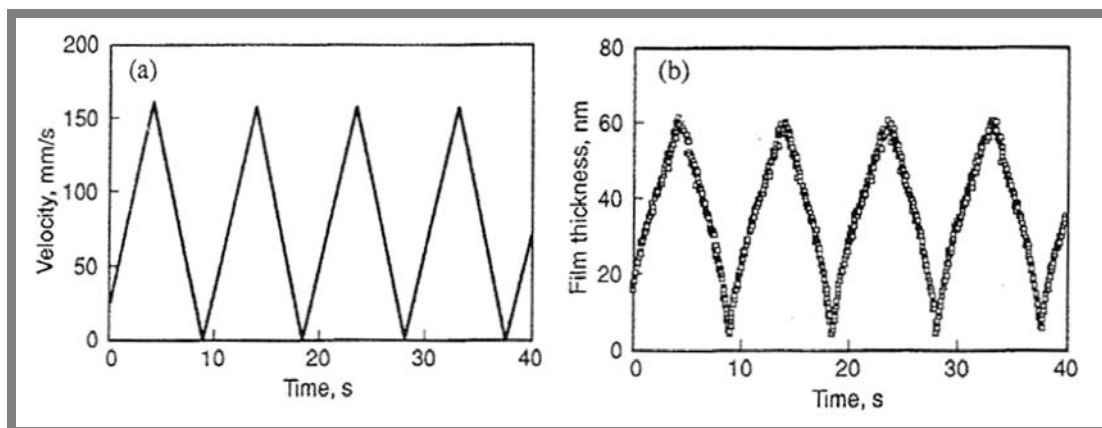
Obr. 2. 10 Změna v EHD centrální tloušťce mazacího filmu při náhlém zastavení otáček z rychlosti $41,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (SN150, $25 \text{ }^\circ\text{C}$) [34].

V dalším experimentu simulovali podmínky zapnutí a vypnutí stroje (Obr. 2.11a), což je pohyb sestávající z cyklů o konstantní rychlosti následovaný pauzou. Ekvivalent tohoto pohybu lze přirovnat k činnosti krokového motoru. Obdobně jako v předchozím případě poklesne tloušťka filmu velmi rychle na určitou hodnotu a při následujícím zapnutí tloušťka filmu náhle vzroste a potom osciluje přibližně pět cyklů, než se ustálí na hodnotě, která koresponduje s hodnotou při stacionárních podmínkách (Obr. 2.11b). Nedojde však k prolomení mazacího filmu.



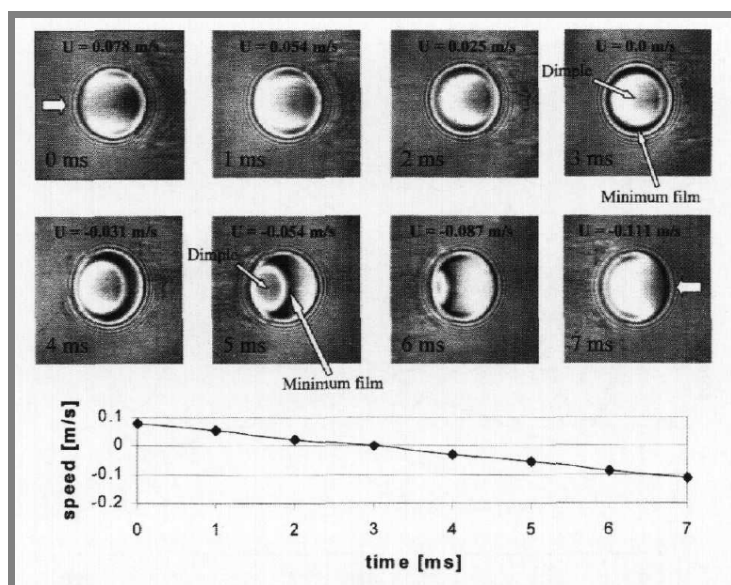
Obr. 2. 11 Změna (a) rychlosti, (b) EHD centrální tloušťky filmu v čase při opakovaném zapnutí a vypnutí stroje (SN 100, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 Hz , $78,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). [34]

Při zrychlování a zpomalování třecích povrchů (Obr. 2.12a) změna tloušťky filmu kopíruje změnu otáček (Obr. 2.12b). Zjistili, že náhlé zrychlení třecích prvků způsobuje zmenšení tloušťky mazacího filmu a zpomalováním tloušťka vrstvy roste.

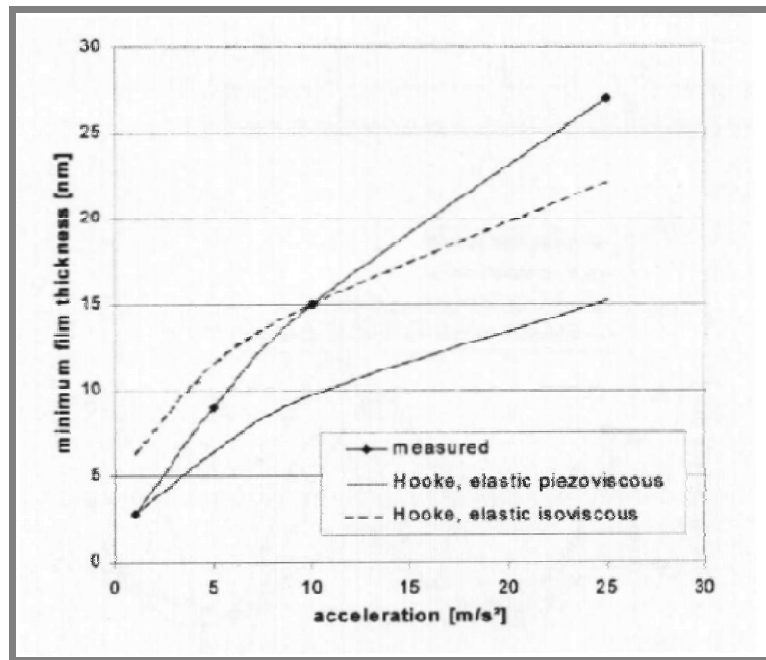


Obr. 2. 12 Změna (a) rychlosti a (b) EHD centrální tloušťky filmu v čase při zrychlování a zpomalování třecích povrchů (SN 150, 25 °C, 0,1 Hz, 0-165 mm.s⁻¹) [34].

K obdobným závěrům dospěli také R. P. Glovnea a kol. [36], [37], kteří studovali utváření mazacího filmu během reverzibilního pohybu při opakovaném zrychlování a zpomalování třecích prvků. Záznam z vysokorychlostní kamery (1000 snímků/s) posléze vyhodnocovali pomocí ultratenké interferometrické metody (Obr. 2.13). Ukázali, že 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. Dále srovnali svá experimentální měření minimální tloušťky filmu s teoretickým předpokladem podle C. J. Hooka (Obr. 2.14). Zjistili, že naměřená minimální tloušťka mazacího filmu je větší než vypočtená hodnota. Pro akceleraci 25 ms⁻² je podhodnocena minimální tloušťka filmu přibližně o 40 % s použitím elasto-piezoviskózní rovnice podle C. J. Hooka a okolo 18 % s použitím elasto-isoviskózní rovnice.

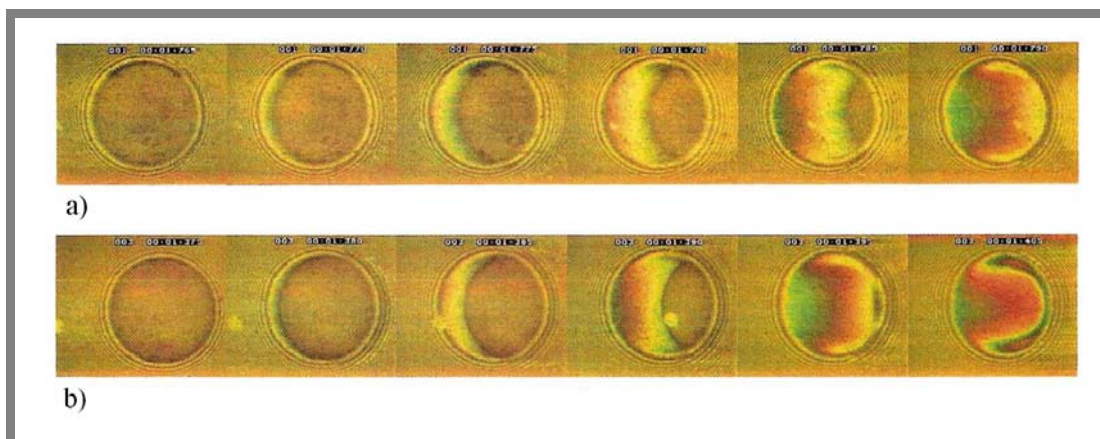


Obr. 2. 13 Změny v tloušťce mazacího filmu při reverzibilním pohybu třecích povrchů [37].



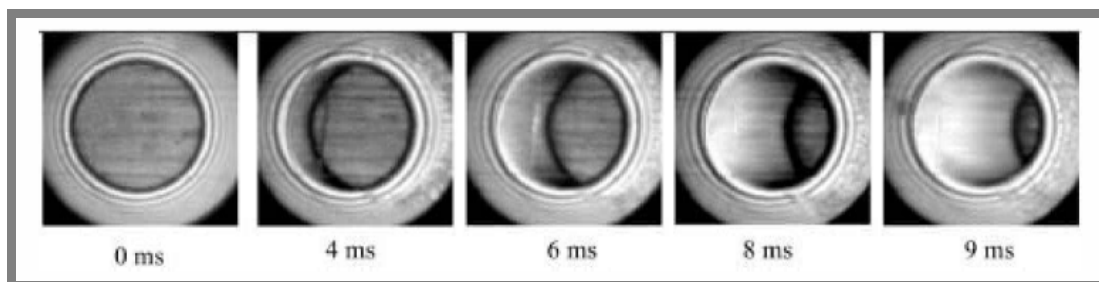
Obr. 2. 14 Srovnání minimální tloušťky filmu s teoretickým řešením [37].

M. Kaneta studoval experimentálně utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů za použití optické interferometrie [38]. Na obr. 2.15 je ukázána série chromatických interferogramů, na kterých lze pozorovat utváření mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů pro olej typu BS. Chromatické interferogramy byly získány při náhlém rozběhu třecích povrchů za podmínek čistého valení a čistého prokluzu.



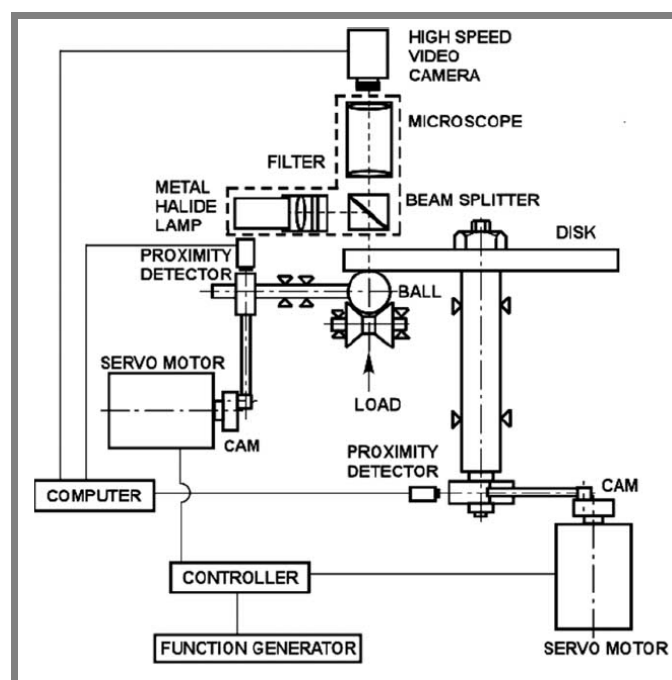
Obr. 2. 15 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů pro olej BS, (a) čisté valení, (b) čistý prokluz. [38].

R. P. Glownea a H. A. Spikes studovali také jevy při rozběhu strojních soustav [39]. Popsali chování tloušťky filmu v kontaktu při simulaci rozjezdu stroje, kde se meniskus propadu mazacího filmu pohybuje napříč kontaktem až do vytvoření kompletního mazacího filmu (Obr. 2.16). Z uvedených chromatických interferogramů je patrné, že při rozběhu třecích povrchů představuje počáteční vzájemný styk těles značné riziko poškození třecích povrchů.



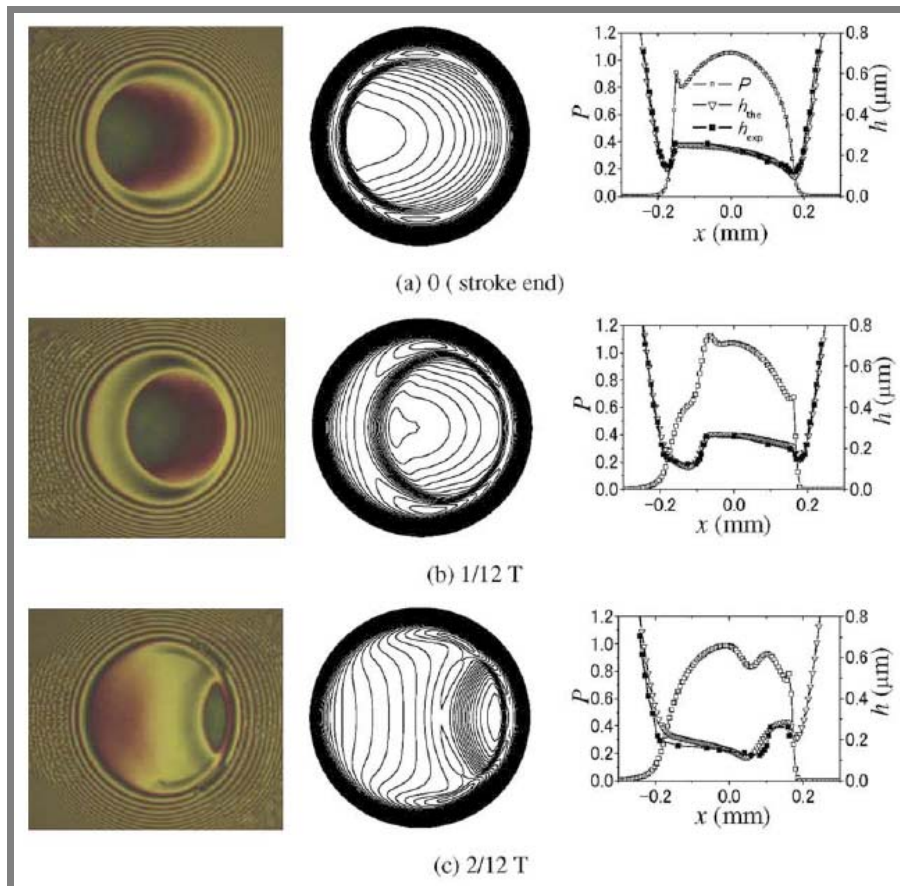
Obr. 2. 16 Interferogramy kontaktu při rozběhu třecích povrchů pro HVI650, 60 °C, 5 m.s⁻² [39].

Na jejich předchozí experimenty navázala J. Wang a kol. [40]. Studovali chování EHD mazaného kontaktu za podmínek čistého valení s krátkým vratným pohybem, který je jedním ze základních typů pohybu v mechanice. Mazací film byl studován mezi leštěnou ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm a skleněným kotoučem o průměru 180 mm a tloušťce 12 mm s nanesenou polopropustnou vrstvou chrómu (Obr. 2.17). Vratný pohyb byl realizován oscilací skleněného kotouče pomocí vačky a amplituda vratného pohybu byla pokaždé 1 mm.



Obr. 2. 17 Experimentální zařízení pro studium vratného pohybu třecích povrchů [40].

Pomocí vysokorychlostní kamery (2000 snímků/s) připojené k mikroskopu zaznamenali interferogramy během celého cyklu vratného pohybu. Naměřené hodnoty průběhu tloušťky mazacího filmu podél kontaktu srovnali s výsledky teoretického řešení. Z obrázku 2.18, který ukazuje příklad takového srovnání, je patrná velmi dobrá shoda mezi naměřenými a vypočítanými průběhy. Zjistili, že v průběhu celého cyklu nedochází k prolomení mazacího filmu a třecí povrchy jsou separovány vrstvou maziva.



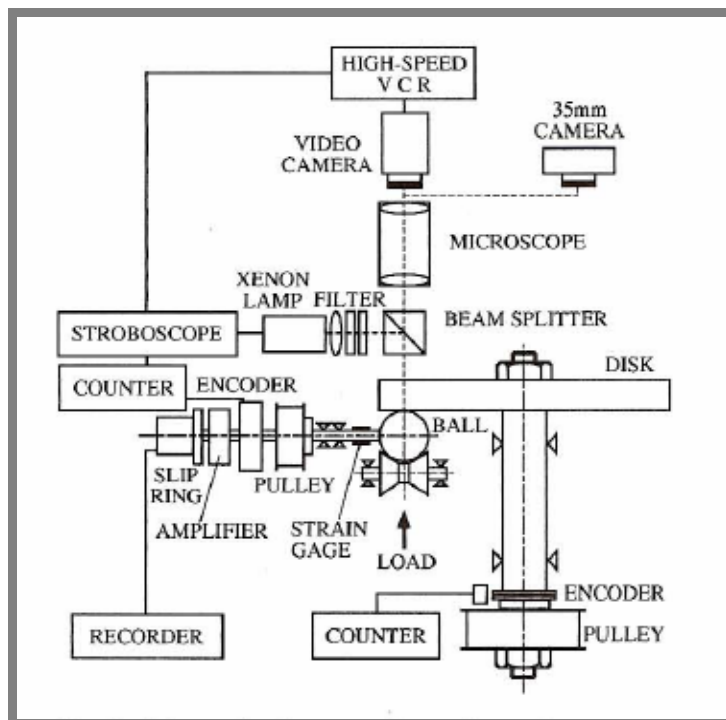
Obr. 2. 18 Srovnání experimentálního a teoretického řešení ($f=7.78$ Hz, $L=1$ mm) [40].

Výše uvedené studie významným způsobem přispěly k pochopení procesů, které probíhají v mazaných kontaktech při nestacionárních provozních podmínkách nekonformních povrchů. Nicméně celá řada procesů probíhajících v takovýchto kontaktech zůstala neobjasněna. Pro další studium se jeví jako zásadní zejména popsání procesů, které mohou vést k prolomení mazacího filmu, a nalezení postupů, které tomuto procesu mohou zabránit. S tím souvisí nejen nalezení vhodných provozních podmínek, ale rovněž zohlednění vlivu mazivostních přísad základových olejů a utváření mezních mazacích filmů. Z hlediska tření a opotřebení se jeví jako kritický stav, který nastává během rozběhu třecích povrchů. V tomto okamžiku nejsou totiž třecí povrchy odděleny souvislou vrstvou maziva. Pozornost by měla být věnována i dalším postupům k zajištění lepšího utváření mazacího filmu i za kritických podmínek, jako je např. hladovění či smíšené nebo mezní mazání. Mezi ně patří i cílená modifikace topografie [41], kdy se třecí povrchy opatří soustavou mikrodutín, které v mazaném kontaktu mají funkci mikrozásobníků maziva. Při vhodném návrhu rozměrů mikrodutín a jejich uspořádání v kontaktu by tento přístup mohl napomoci zamezit náhlému snížení tloušťky mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách.

Proto je disertační práce vedena snahou o experimentální objasnění a zmapování procesů při rozběhu třecích povrchů 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.

2.4 Utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů

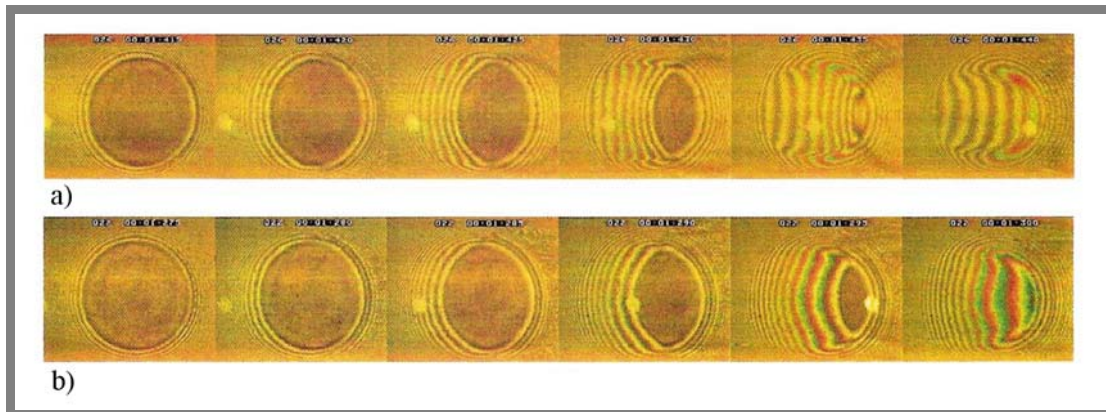
Utváření mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů bylo publikováno v několika málo experimentálních studiích. První podrobné experimentální studie utváření mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů publikoval M. Kaneta [38]. Studoval experimentálně (Obr. 2.19) utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů za použití optické interferometrie.



Obr. 2. 19 Schéma experimentálního zařízení [38].

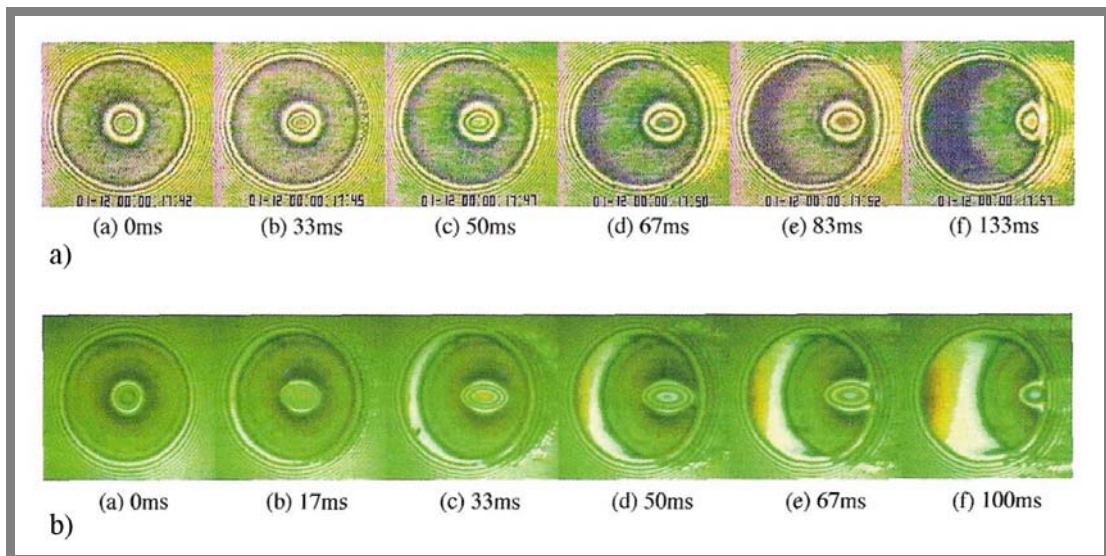
Na obrázcích 2.15 a 2.20 je ukázána série chromatických interferogramů, na kterých lze pozorovat utváření mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů pro olej BS a TN320. Chromatické interferogramy byly získány při náhlém rozběhu třecích povrchů za podmínek čistého valení a čistého prokluzu. Na každém chromatickém interferogramu je zachycen malý bílý bod. Tento bod se nachází na skleněném disku. Podle tohoto bodu je možné sledovat posunutí skleněného disku napříč kontaktem. Utváření mazacího filmu s olejem BS a TN320 je v podstatě stejné, podstatnou roli hraje hlavně reologie použitého maziva. V případě čistého valení je vzdálenost, kterou urazí mazivo, stejná jako vzdálenost otočení disku. Kompletní mazací film je tedy utvořen v okamžiku, kdy se skleněný disk otočí o vzdálenost, která odpovídá průměru Hertzova kontaktu.

V případě čistého prokluzu je vzdálenost, kterou urazí mazivo, poloviční než posun disku. Plný EHD film je tedy utvořen až v okamžiku, kdy se skleněný disk otočí o dvojnásobek průměru Hertzova kontaktu.



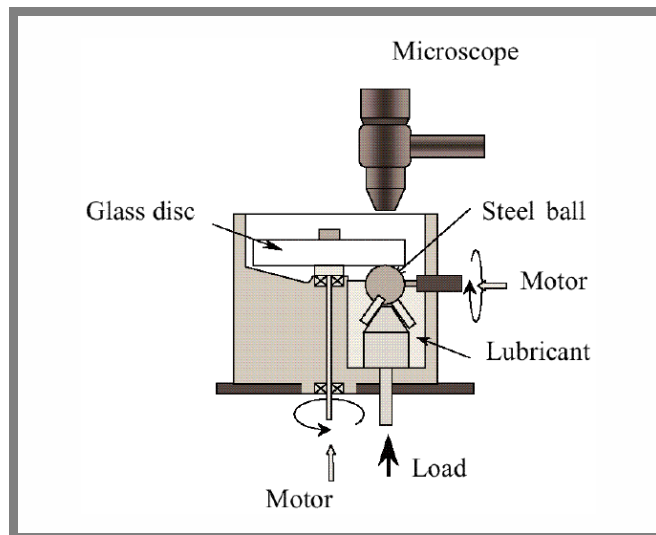
Obr. 2. 20 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů pro olej TN320, (a) čisté valení, (b) čistý prokluz [38].

M. Kaneta studoval také chování tenkého mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů za podmínek čistého prokluzu se zachyceným mazivem uvnitř v kontaktu (Obr. 2.21). Při experimentu byl olej zachycen mezi dva třecí povrchy. Při rozběhu třecích povrchů se zachycený olej pohybuje směrem doprava. Ukazuje se, že je podstatný rozdíl mezi chováním oleje BS a 5P4E, a to zvláště na začátku náhlého rozběhu třecích těles. Mazivo 5P4E vykazuje větší prokluz zachyceného filmu v kontaktu. Tento efekt byl pozorován i při dynamickém zachycení mazacího filmu s větší tloušťkou [42].



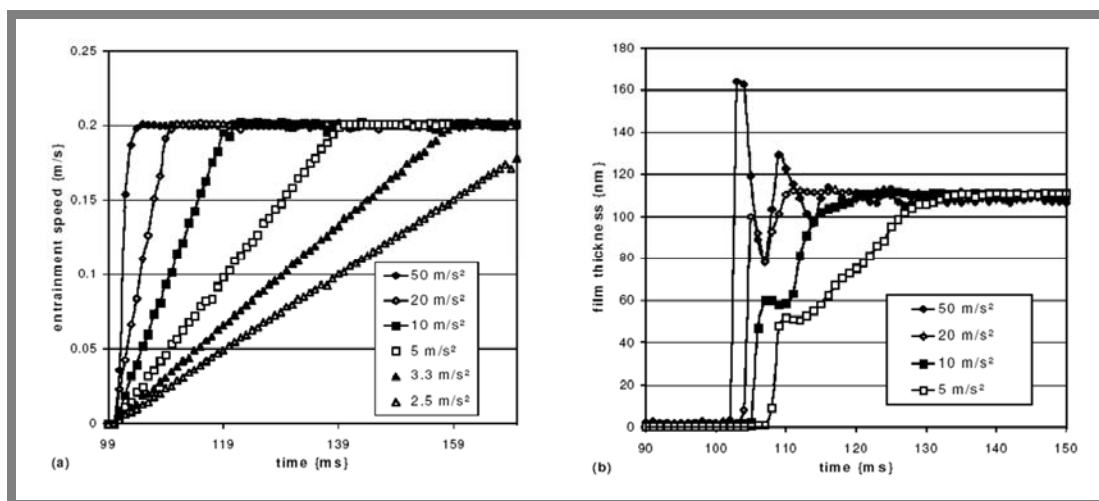
Obr. 2. 21 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů za čistého prokluzu se zachyceným mazivem uvnitř v kontaktu, $\Sigma = 2$, (a) olej BS, (b) olej 5P4E [38].

V roce 2001 publikovali R. P. Glovnea a H. A. Spikes [39] svoji první experimentální studii zabývající se utvářením tenkého mazacího filmu během rozběhu hladkých bodových kontaktů. Podmínky vyskytující se v reálných tribologických soustavách modelovali v kontaktu ocelové kuličky ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$) a skleněného disku ($E = 75 \text{ GPa}$, $\nu = 0,25$).



Obr. 2. 22 Schéma experimentálního zařízení [39].

K měření tloušťky EHD filmu použili optickou interferometrii v kombinaci s vysokorychlostní kamerou (Obr. 2.22). Tato konfigurace umožnila zaznamenat až 1000 snímků za sekundu a následně vyhodnotit tloušťku filmu v EHD mazaném kontaktu. Kontakt byl zatížen silou 20 N (Hertzův tlak 0,5 GPa). Při experimentu použili tři typy olejů, minerální olej (HVI650), polyalphaolefin (PAO) a polyethylenether (5P4E). Tyto oleje experimentálně testovali při teplotách od 30 do 80 °C za podmínek čistého valení a čistého prokluzu. Při podmínkách čistého prokluzu byl skleněný disk pevně zafixován a ocelová kulička byla akcelerována. Obrázek 2.23a představuje různé akcelerace do rychlosti 0,2 m.s⁻¹ pro olej HVI650 a teplotu 80 °C. Na obrázku 2.23b je ukázána změna centrální tloušťky filmu pro akcelerace odpovídající obrázku 2.23a.

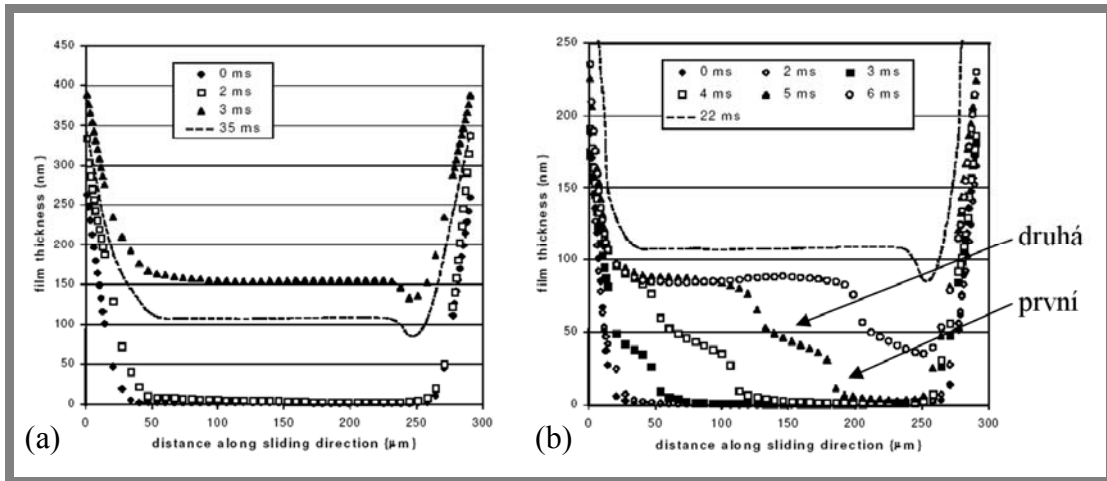


Obr. 2. 23 (a) Zvýšení rychlosti při rozdílných akceleracích pro čistý prokluz. (b) centrální tloušťka filmu při rozdílných akceleracích pro olej HVI650 a 80 °C [39].

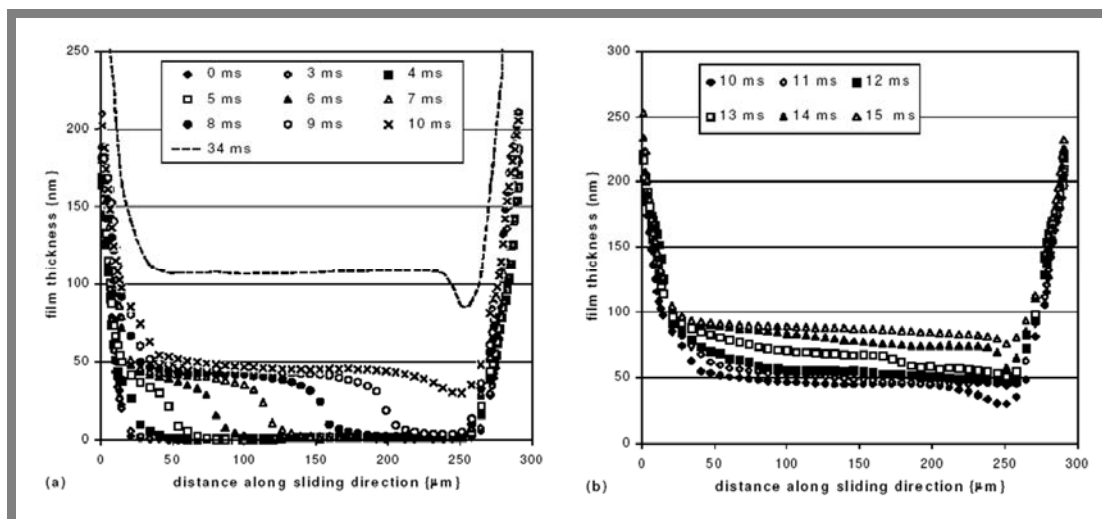
Navzdory skutečnosti, že nárůst rychlosti je lineární, centrální tloušťka filmu se nezvyšuje rovnoměrně v závislosti na čase. Při experimentu s nejvyšší akcelerací (50 m.s^{-2}) je patrné počáteční zvýšení centrální tloušťky filmu na hodnotu vyšší, než která odpovídá tloušťce filmu při ustáleném stavu. Tloušťka filmu následně krátce osciluje a po přibližně 30 ms se ustálí na hodnotě 108 nm. Při nižších zrychleních je počáteční lokální maximum nižší než tloušťka filmu při ustáleném stavu. Následuje snížení a zvýšení tloušťky filmu až na hodnotu, která odpovídá rychlosti $0,2 \text{ m.s}^{-1}$.

Obrázky 2.24 a 2.25 ukazují změřenou tloušťku filmu ve směru prokluzu při třech různých akceleracích ($50, 10, 5 \text{ m.s}^{-2}$) během rozběhu třecích povrchů až do vytvoření plného EHD filmu. Za povšimnutí stojí, že je velmi malý nárůst tloušťky mazacího filmu v prvních 2 až 3 ms pohybu povrchu, výraznější změna mazacího filmu se projeví, až unášecí rychlost dosáhne hodnot mezi $0,01$ a $0,015 \text{ m.s}^{-1}$. Avšak jak je mazivo při rozběhu unášeno kontaktem, nabývá tvaru schodu. Tento tvar si udržuje téměř nezměněný napříč celým kontaktem, dokud se ne vytvoří kompletní film. Tento efekt není možné pozorovat na obrázku 2.24a, protože vysokorychlostní kamera nestihne zaznamenat při této vysoké akceleraci utváření mazacího filmu. Čelní hrana jde nejlépe vidět na obrázku 2.25a, kde se tvar čela jeví jako jasné viditelné schody.

Také je možno pozorovat podobnou nebo větší tloušťku filmu na vstupu do kontaktu ve stejnou dobu v závislosti na zrychlení třecích povrchů. Při akceleraci 5 m.s^{-2} dosáhne druhá hrana konce kontaktu těsně před první hranou (Obr. 2.25b). Při větších zrychleních se začíná druhá hrana tvořit dříve. Při akceleraci 10 m.s^{-2} se vytvoří druhá hrana ještě před tím, než první hrana dosáhne středu kontaktu (Obr. 2.24b). Při nižší akceleraci se naopak druhý schod utváří později.



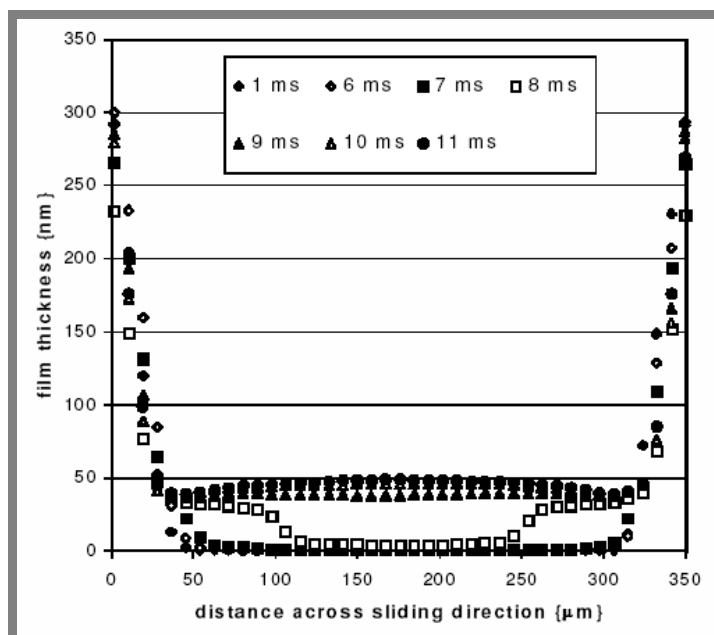
Obr. 2. 24 Tloušťka filmu při rozběhu třecích povrchů pro olej HVI650 ($80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) při akceleraci (a) 50 m.s^{-2} , (b) 10 m.s^{-2} [39].



Obr. 2. 25 (a) Tloušťka filmu v podélném směru pro HVI650 (80 °C) při akceleraci 5 m.s^{-2} , (b) tloušťka filmu – druhá hrana, HVI650 (80 °C) při akceleraci 5 m.s^{-2} – čistý prokluz [39].

Při akceleraci 20 m.s^{-2} a vyšší se vytváří druhá hrana tak rychle, že nejde jasně rozlišit od první hrany. Z obrázků vyplývá, že utváření mazacího filmu od rozběhu až do plného zaplavení kontaktu silně závisí na rychlosti akcelerace. Při nejvyšším použitém zrychlení (Obr. 2.24a) je centrální tloušťka mazacího filmu 3 ms ($0,188 \text{ m.s}^{-1}$) po rozběhu asi o 50% vyšší než tloušťka filmu v ustáleném stavu při konečné rychlosti $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Při nižších akceleracích se tento efekt nedá dobře pozorovat.

Profil tloušťky filmu napříč kontaktem popisuje obrázek 2.26. Ukazuje se, že přední hrana má tvar menisku, který je vyduť v směru k výstupu kontaktu. Podobný tvar popsal ve své práci už v roce 1999 M. Kaneta. [38].

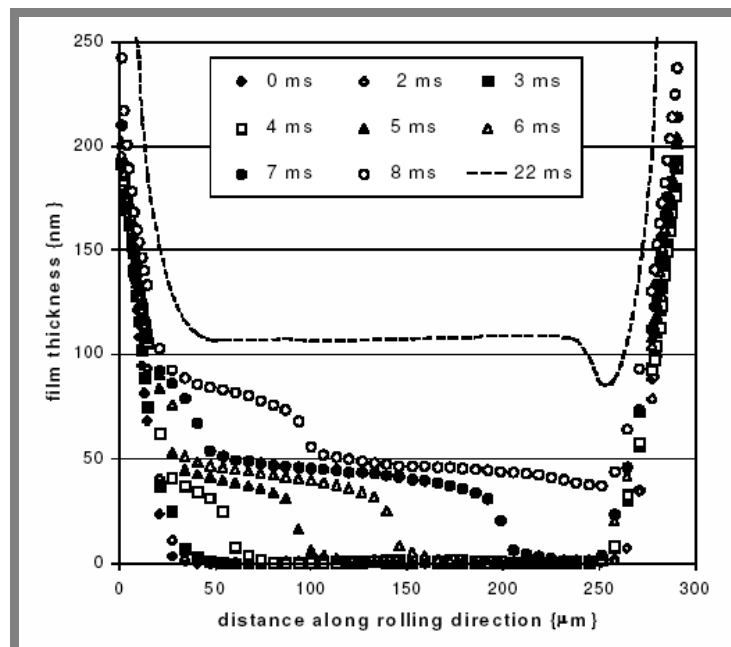


Obr. 2. 26 Profil tloušťky filmu napříč kontaktem pro olej HVI650, 80 °C, 5 m.s^{-2} [39].

Posloupnost interferenčních obrazců reprezentující chování tloušťky filmu v kontaktu při simulaci rozjezdu stroje s akcelerací $5\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ukazuje obrázek 2.16. Meniskus propadu mazacího filmu se pohybuje napříč kontaktem až do vytvoření kompletního mazacího filmu.

Experimenty s dalšími dvěma oleji ukázaly podobné výsledky. Rozdílné hodnoty viskozity a viskózně tlakového koeficientu tvořily jiné tloušťky mazacího filmu, ale hlavní rysy utváření mazacího filmu byly stejné.

Profily tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů získané při podmínkách čistého valení během akcelerace $10\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro olej HVI650 jsou ukázány na obrázku 2.27. Chování mazacího filmu za podmínek čistého valení je velmi podobné již popsanému experimentu za čistého prokluzu. První hrana má podobnou tloušťku při stejné akceleraci, jako tomu bylo při čistém prokluzu. Nicméně při srovnání obrázcích 2.24a a 2.27 můžeme pozorovat, že druhá hrana vznikne později při valení než při prokluzu.

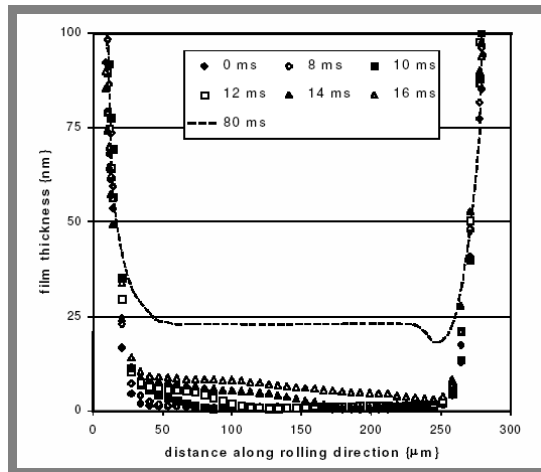


Obr. 2. 27 Tloušťka filmu v podélném směru pro HVI650, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ [39].

Jak už bylo popsáno, první hrana mazacího filmu se vytvoří jen tehdy, když unášecí rychlost dosáhne určité hodnoty. Po vytvoření prochází tato první hrana napříč kontaktem s téměř nezměněnou tloušťkou. Rozběh se tedy liší od stacionárních podmínek, kde teorie předpokládá lineární závislost tloušťky filmu na rychlosti valení. Experimentální výsledky vzniku mazacího filmu jsou také odlišné od předpokladu K. F. Osborna a F. Sadeghiho [43]. Jestliže je zrychlení dostatečně velké, má za následek kmity v tloušťce filmu na vstupu kontaktu.

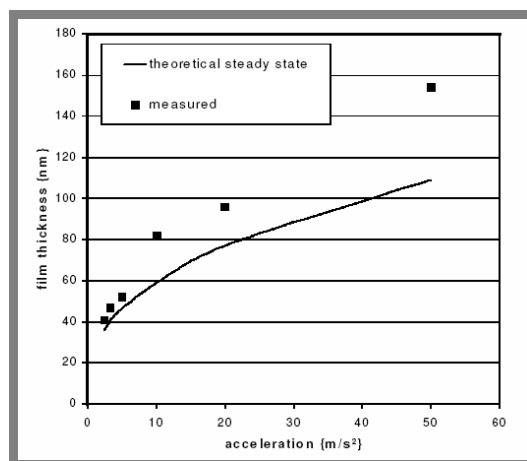
Tyto kmity mohou vznikat odezvou systému při náhlém rozběhu a setrvačnosti jednotlivých elementů nebo také statickým třením, které se uvolní při rozběhu soustavy.

Dvě vlastnosti maziva mají přímý vliv na tloušťku mazacího filmu. Těmito parametry jsou viskozita a viskózně tlakový koeficient. Při vyšších teplotách s použitým mazivem PAO a malé akceleraci při rozběhu za podmínek čistého valení a čistého prokluzu třecích povrchů se nevytvoří schodovitý tvar v mazacím filmu. Přední hrana pak vypadá jako klínová podle teorie za ustáleného stavu (Obr. 2.28).



Obr. 2. 28 Tloušťka filmu v podélném směru pro PAO, 80 °C, 2,5 m.s⁻² [39].

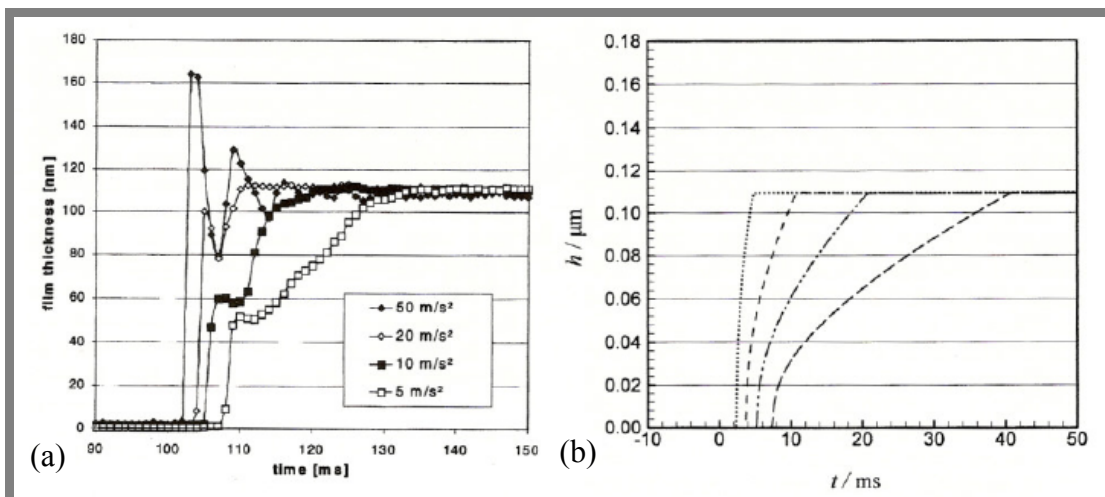
Pokud klesne teplota a zvýší se viskozita maziva, můžeme pozorovat v mazacím filmu stupňovitou přední hranu i při nízkých zrychleních. Je zřejmé, že viskózně tlakový koeficient může mít větší vliv během přechodového děje než viskozita maziva. Schodovitý tvar se tedy může vytvořit při vysokých zrychleních a relativně viskózním mazivu. Tento jev popsal při rozběhu i M. Kaneta [38]. Použil mazivo s nižším viskózně tlakovým koeficientem, které vytvořilo konstantní tloušťku filmu, zatímco mazivo s vyšším viskózně tlakovým koeficientem, ale přibližně stejnou viskozitou, vytvořilo klínový tvar. Tato studie však byla provedena při nízkých akceleracích a s poměrně viskózním mazivem. Centrální tloušťka mazacího filmu při utvoření úplného EHD filmu je velmi závislá na velikosti akcelerace. Pro akcelerace nižší než 5 m.s⁻² jsou naměřené hodnoty blízké hodnotám teoretickým pro stacionární podmínky. Pro zrychlení větší než 5 m.s⁻² jsou hodnoty tloušťky mazacího filmu mnohem větší, než předpokládá teorie pro stacionární podmínky. Obrázek 2.29 srovnává tyto experimentálně naměřené a teoretické (stacionární) tloušťky mazacího filmu podle B. T. Hamrocka a D. Dowsona [44].



Obr. 2. 29 Tloušťka mazacího filmu v závislosti na akceleraci [39].

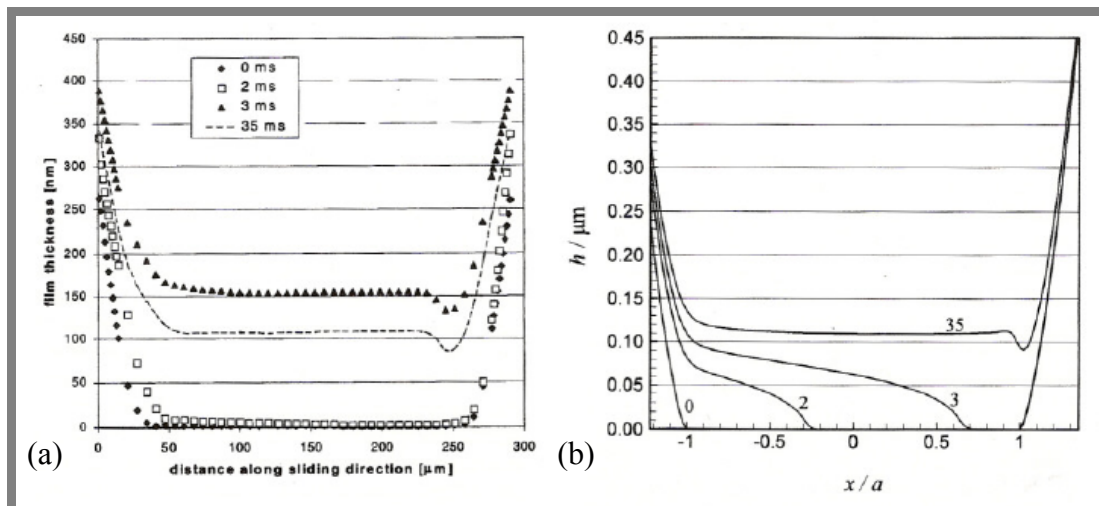
M. J. A. Holmes, H. P. Evans a R. W. Snidle navázali na experimentální studium R. P. Glovnei a H. A. Spikes [39] a provedli srovnávací numerické experimenty s experimentálními [45]. Vyvinuli nový přístup v numerickém řešení bodového kontaktu [46, 47] založený na diferenciální metodě [48].

Numerickou simulaci provedli pro každý ze čtyř rozběhů třecích povrchů popsanych v experimentu R. P. Glovneou a H. A. Spikesem. Obrázek 2.30 srovnává centrální tloušťku filmu získanou během numerické simulace rozběhu třecích povrchů s experimentem. Během numerické simulace je hodnota h_0 držena na konstantní hodnotě, to vede ke zvýšení zatížení o 13 % během rozběhu třecích povrchů. Toto ovšem nezpůsobí významný rozdíl mezi tloušťkou filmu získanou při stálém zatížení. Obrázek 2.30 naznačuje, že numerická simulace vykazuje systematické zvýšení centrální tloušťky mazacího filmu, jakmile se dostane meniskus do kontaktu. Nejstrmější nárůst centrální tloušťky mazacího filmu je při numerické simulaci u nejvyššího zrychlení a konečná centrální tloušťka filmu pro každé zrychlení je po ustálení identická jako při experimentu. Numerická simulace nárůstu centrální tloušťky mazacího filmu v porovnání s experimentem je podobná jen při nejnižším zrychlení. Numerický model nevykazuje oscilace, které popisovali R. P. Glovnea a H. A. Spikes [39].



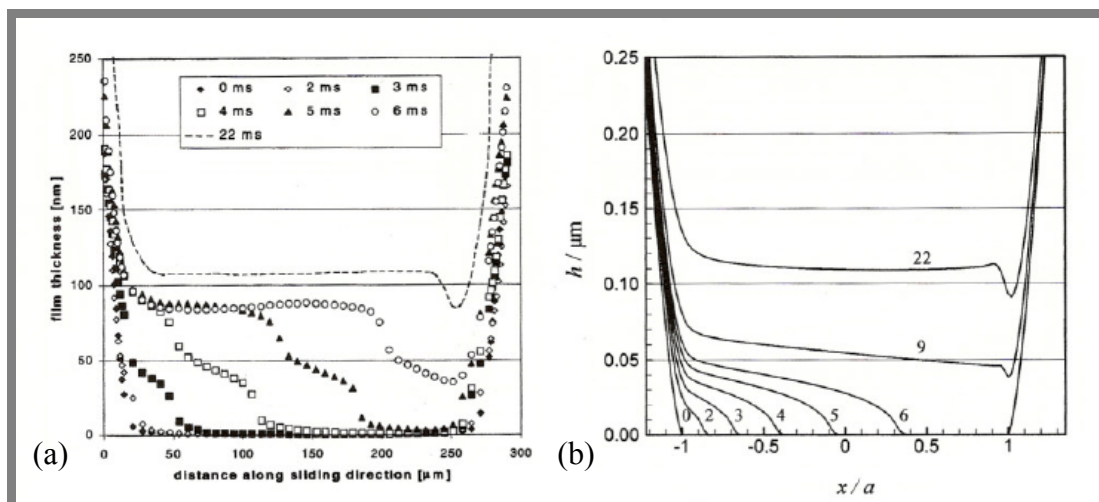
Obr. 2. 30 Porovnání centrální tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů. (a) experimentální řešení. (b) numerické řešení. (..... 50 m.s⁻², --- 20 m.s⁻², -.-.-.- 10 m.s⁻², ---- 5 m.s⁻²) [45].

Srovnání vypočteného profilu podél kontaktu a experiment při nejvyšším zrychlení je na obrázku 2.31. Profily získané (2, 3, 35 ms) po rozběhu třecích povrchů jsou při porovnání rozdílné. Při experimentálním měření vykazovala tloušťka filmu značné oscilace napříč celým Hertzovým kontaktem. Tloušťka filmu 150 nm pozorovaná 3 ms po rozběhu převyšovala ustálenou hodnotu tloušťky filmu o 50 %. Numerická simulace vykazuje zcela odlišné výsledky. Podle numerického modelu narůstá tloušťka se zvyšující se rychlostí a maxima dosáhne v ustáleném stavu. Lze tedy předpokládat, že při experimentu dosahovala rychlost pohybu třecí dvojice při oscilacích mnohem větší rychlost, než byla předpokládána.



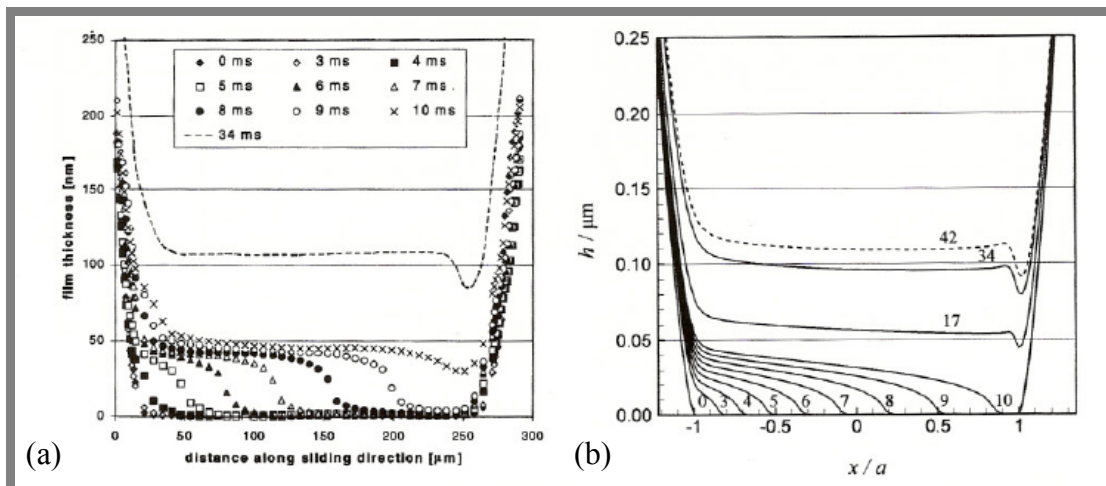
Obr. 2. 31 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].

Obrázek 2.32 popisuje podobné srovnání rozběhu třecích povrchů pro akceleraci $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tloušťka filmu získaná numericky je reprezentována křivkami, které mají progresivní zvýšení sklonu. Jde zřetelně pozorovat postupné zaplavení kontaktu během rozběhu. Trend vývoje bodu odtržení během rozběhu je na numerickém modelu zřetelnější. Pro pozici 2 a 3 ms po rozběhu je shoda mezi vzdáleností otočení kuličky a pozicí bodu odtržení. 6 ms po rozběhu se výrazně liší experimentální výsledky s numerickými. Opět je zřejmé, že rychlost unášení maziva mohla být při experimentu vyšší, než byla předpokládána. Rozdíl však není tak velký jako při nejvyšší akceleraci.



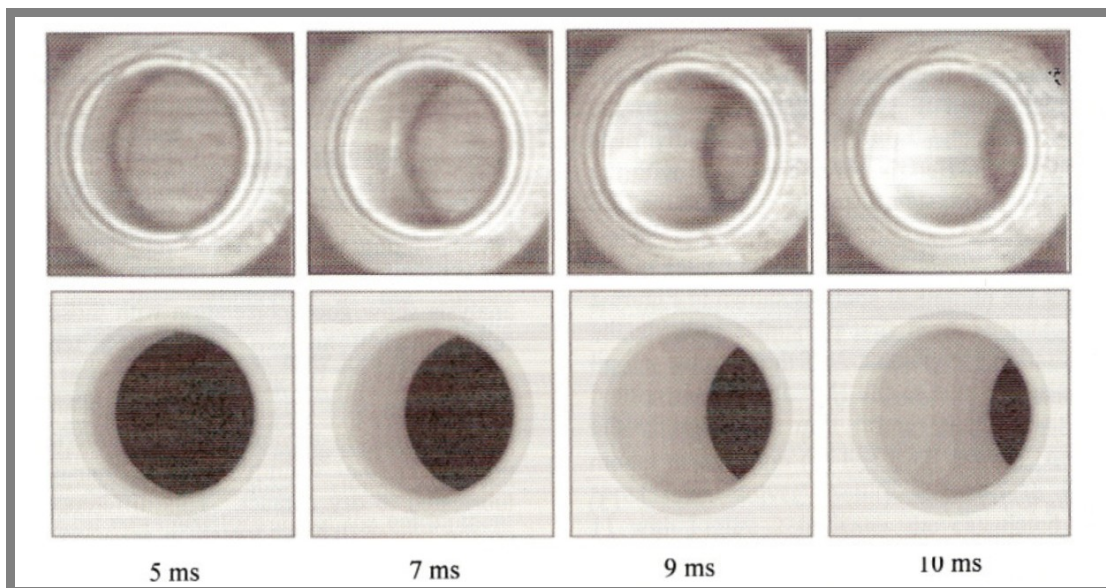
Obr. 2. 32 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].

Při porovnání numerických a experimentálních výsledků se profil filmu značně liší. V numerickém modelu nejdou vidět schodovité tvary, které jsou zřetelné v experimentu. Obrázek 2.33 porovnává profily tloušťky filmu pro rozběh třecích povrchů při akceleraci $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tloušťka filmu je při numerickém řešení opět menší, než je tomu u experimentálního přístupu, ale rozdíly jsou méně patrné než u vyšších akcelerací. Například tloušťka filmu při ustáleném stavu (34 ms) je o 15 % nižší u numerického řešení než u řešení experimentálního.



Obr. 2. 33 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci 5 m.s^{-2} , (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].

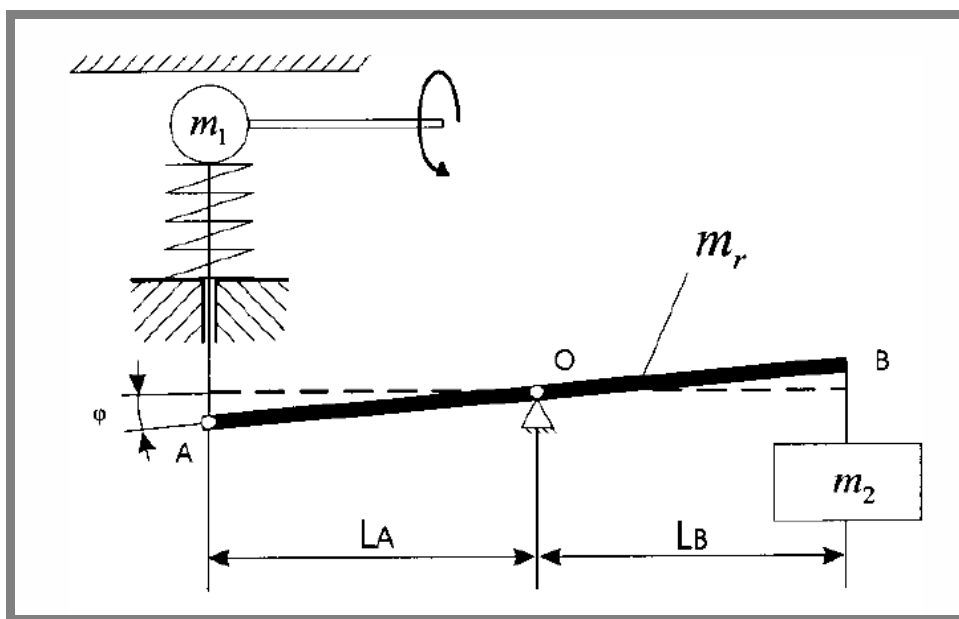
Hranice mezi zaplavenou a nezaplavenou částí kontaktu je vidět zřetelně na interferogramech (Obr. 2.34) pro akceleraci 5 m.s^{-2} . Nezaplavená oblast je ilustrována na numericky získaných interferogramech černou barvou. Hranice, která odděluje tyto oblasti, má tvar menisku, který se pohybuje při rozběhu třecích povrchů napříč Hertzovým kontaktem.



Obr. 2. 34 Interferogramy kontaktu při rozběhu třecích povrchů pro 5 m.s^{-2} [45].

Je zřejmé, že značné rozdíly mezi numerickým a experimentálním přístupem jsou hlavně při vyšších hodnotách zrychlení.

Ve snaze objasnit rozpory mezi numerickým a experimentálním řešením navrhli P. Popovici a kol. [49] dva možné zdroje, které způsobují tyto oscilace. Dynamický účinek zatěžovacího systému a značné unášení maziva do kontaktu během experimentu kvůli počátečnímu přilepení stykových ploch. Numericky simulovali tyto podmínky a našli dobrou shodu chování kontaktu při rozběhu třecích povrchů. Pro vyšší hodnoty zrychlení byly vypočtené amplitudy oscilací mnohem menší než při experimentálním přístupu. P. Popovici a kol. dospěli k názoru, že je nepravděpodobné, aby oscilační chování při experimentu bylo způsobeno pouze dynamikou zatěžovacího systému (Obr. 2.35). Navrhli další zdroje jako tuhost, eventuálně setrvačnost (např. pohon kuličky nebo disku) systému.



Obr. 2. 35 Schéma zatěžovacího systému [49]

Z výše uvedených výsledků je patrné, že základní problém při rozběhu třecích povrchů představuje vzájemný styk těles. Při rozběhu nejsou totiž třecí povrchy po určitou dobu odděleny mazacím filmem. Existují různé způsoby, jak efektivně napomoci oddělit třecí povrchy a tím zabránit případnému tření a opotřebení (nanesení speciálních povlaků na třecí povrchy, přidání mazivostních přísad do mazacího oleje, cílená modifikace topografie třecích povrchů).

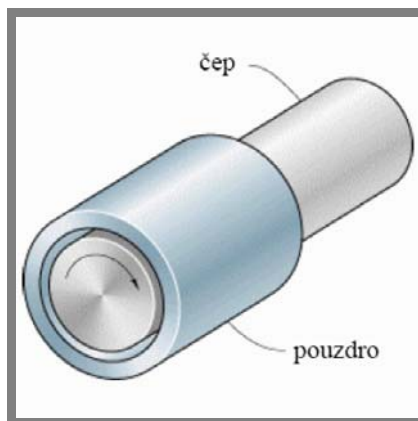
2.5 Cílená modifikace topografie třecích povrchů

Byla publikována celá řada způsobů, jak snížit tření a opotřebením a napomoci celkovému mazání třecích povrchů součástí. Mazivo lze obohatit speciálními přísadami (aditivy) nebo opatřit třecí povrchy speciálními povlaky a přísadami vytvářejícími tenké mazací (mezní) filmy. Jednou z využívaných variant, jak napomoci zlepšení z hlediska mazání, snížení tření a opotřebením je cílená modifikace topografie třecích povrchů. U cílené modifikace topografie třecích povrchů se jedná o vytváření soustav mikrodůlek na třecích površích. Vytvořené mikrodůlky napomáhají posunout mazací režim směrem k optimálním provozním podmínkám. To znamená, že např. při rozběhu součásti mikrovrtisky s mazivem napomáhají při utváření mazacího filmu. Mazivo je uchováváno uvnitř těchto mikrodůlek a při rozběhu kontaktu je transportováno do kontaktu. Tyto mikrovrtisky tak napomáhají v podmínkách, kdy není dostatek maziva v kontaktu nebo při rozběhu či reverzaci pohybu. Modifikace povrchů je známá již mnoho let. Základní výzkum povrchové úpravy pro tribologické aplikace je prováděn výzkumnými skupinami po celém světě. Vhodně zvolená textura třecího povrchu může vést ke zlepšení tribologických vlastností, jak už ke zlepšení mazacích schopností tenkých mazacích filmu, tak ke zmírnění tření a opotřebením třecích povrchů.

Modifikaci topografie třecích povrchů lze obecně rozdělit podle zakřivením třecích povrchů na modifikaci topografie konformních a nekonformních povrchů.

2.5.1 Cílená modifikace topografie konformních povrchů

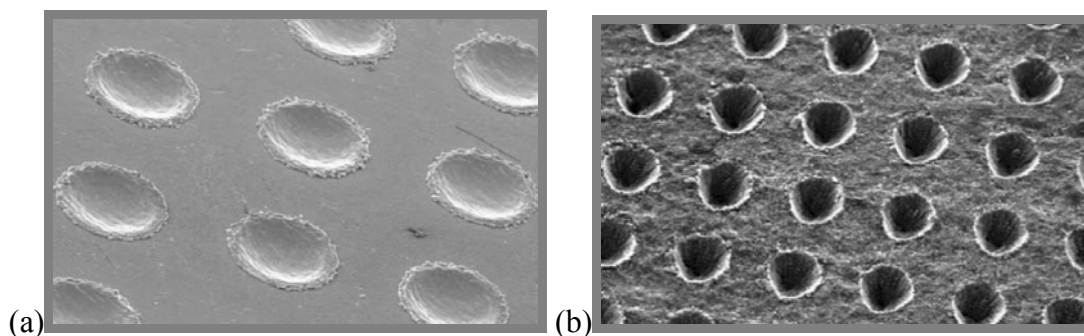
Konformní povrchy (např. kluzná ložiska) do sebe zapadají s relativně velkou geometrickou přesností a jejich zatížení je přenášeno po relativně velké ploše. Přenášené tlaky u konformních povrchů bývají poměrně malé.



Obr. 2. 36 Konformně zakřivený povrch [50].

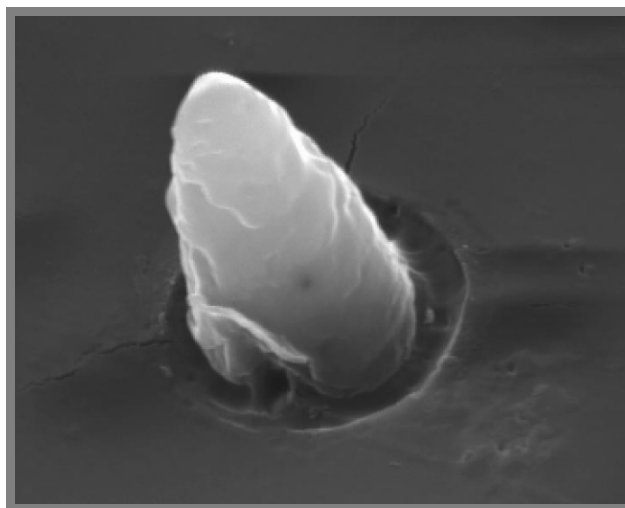
Při styku konformních povrchů (Obr. 2.36) nastává převážně hydrodynamické mazání. Se změnou provozních podmínek (rychlost, zatížení) může dojít u konformních povrchů ke smíšenému nebo meznému mazání. Snaha o zlepšení tribologických vlastností, snížení tření a opotřebením při styku konformních povrchů vedla k výzkumu cílené modifikace topografie konformních třecích povrchů. Bylo prokázáno, že při vytvoření určitého uspořádání soustavy mikrodůlek dojde k rozšíření pásma hydrodynamického režimu mazání. Také je významně redukováno tření a opotřebením při mezném a smíšeném mazání.

Bylo prokázáno, že hlavní vliv na velikost tření a opotřebení má tvar, hloubka a hustota mikrovrtisků [52]. Za účelem snížit tření a opotřebení byla provedena celá řada studií, postupů a metod modifikace topografie třecích povrchů. Použití textury s vhodně zvolenými parametry může vést i k několikanásobnému zvýšení životnosti [53].



Obr. 2. 37 Laser Surface Texturing pro různé materiály: (a) Kobalt-chrom (b) Titan s laserem vytvořenou texturou [51].

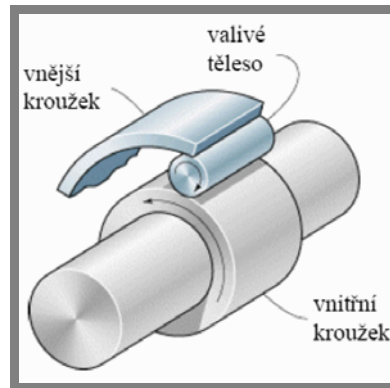
Nejrychlejší a nejpoužívanější technologie je v současnosti metoda „Laser Surface Texturing“ zkráceně LST [53]. Tato technologie využívá laser pro vytvoření mikrodůlků na povrchu součásti. Rozteče vytvářených mikrodůlků (Obr. 2.37a, 2.37b) pomocí LST se pohybují v desítkách až stovkách mikrometrů a hloubka mikrodůlků (Obr. 2.38) se pohybuje v hodnotách do deseti mikrometrů. Vytváření textury laserem je v současné době úspěšně aplikováno na vložky válců a mechanická těsnění.



Obr. 2. 38 Negativ mikrodůlku [54].

2.5.2 Cílená modifikace topografie nekonformních povrchů

Nekonformní povrchy se stýkají ve velmi malé ploše (Obr. 2.39), která je mnohonásobně menší než v případě konformních povrchů. Přenášené tlaky bývají relativně velké a s rostoucím zatížením roste i kontaktní plocha. U nekonformně zakřivených třecích povrchů se většinou setkáváme s EHD nebo smíšeným režimem mazání. Příkladem styku nekonformně zakřivených třecích povrchů jsou valivá ložiska, ozubené převody a vačky.



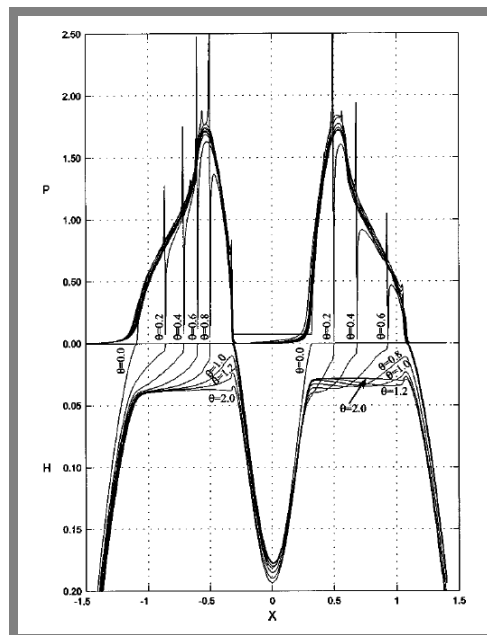
Obr. 2. 39 Nekonformně zakřivený povrch [50].

2.6 Vliv cílené modifikace třecích povrchů na tenké mazací filmy

Studium vlivu textury třecích povrchů je většinou založeno na hypotéze, že tvar textury vytváří mikrokapsy se zachyceným mazivem, které zlepšuje mazání třecích povrchů.

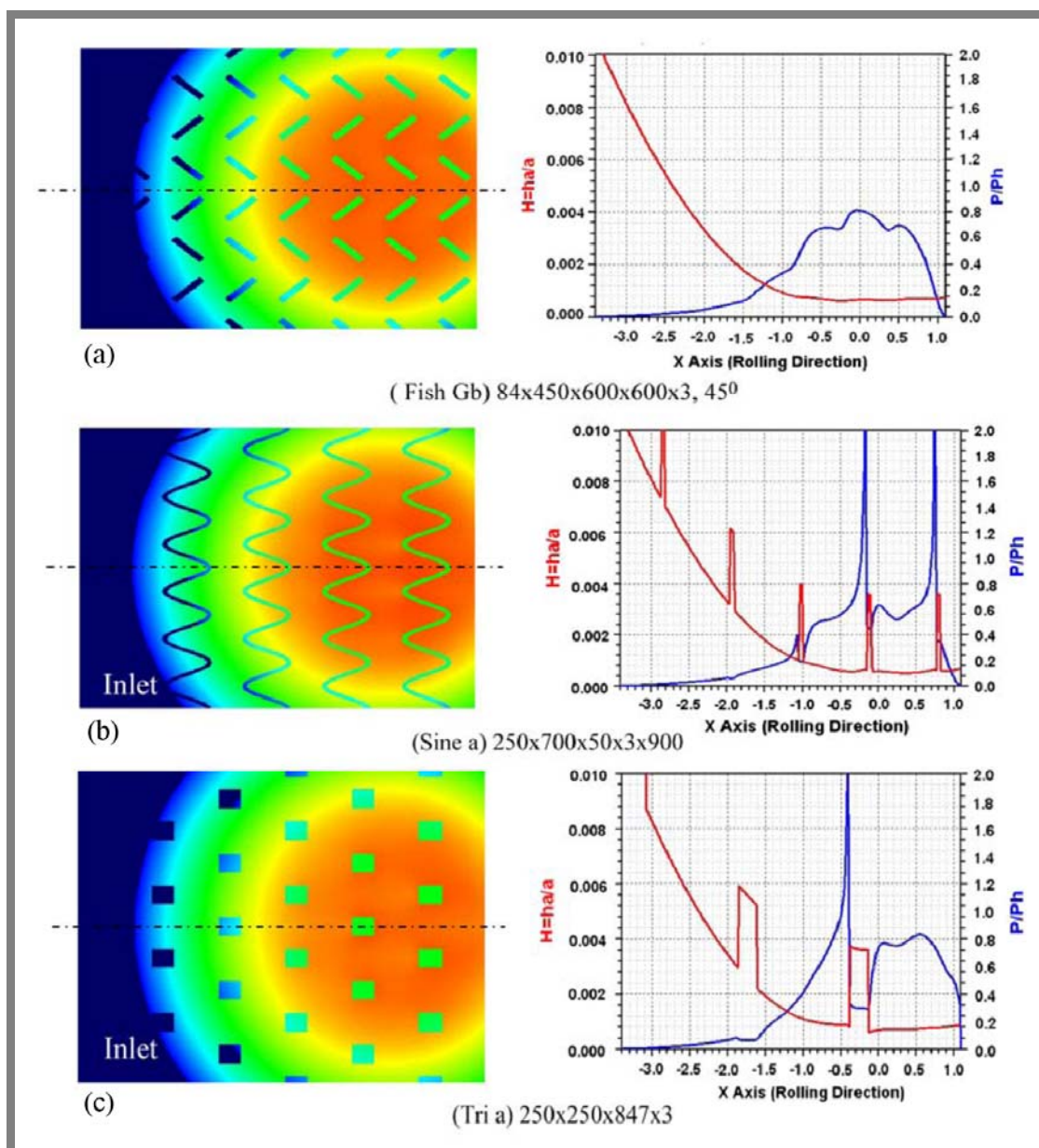
2.6.1 Teoretické modelování třecích povrchů s cílenou modifikací topografie

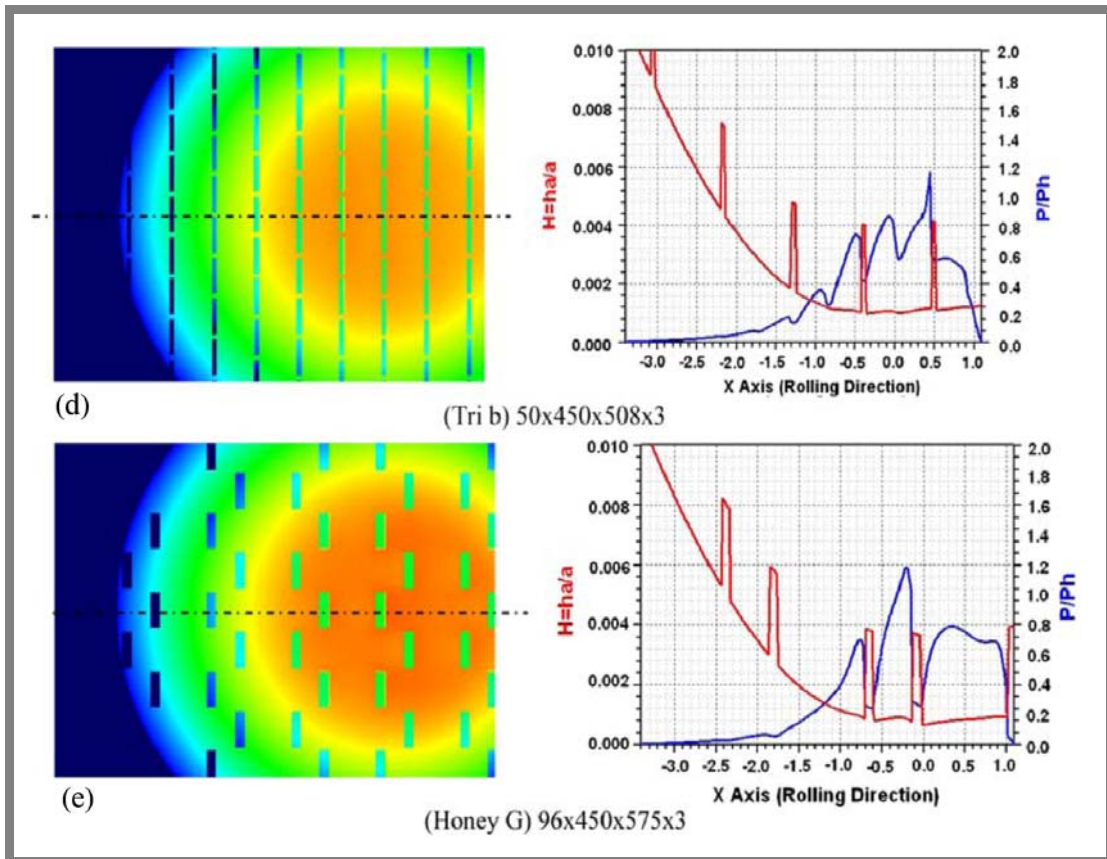
Numerické studium v oblasti cílené modifikace třecích povrchů je ve většině případů věnováno analýze modelových nerovností, protože z důvodu jedinečnosti každé reálné povrchové nerovnosti je z výsledků analýz reálných povrchů velmi obtížné dosáhnout obecných závěrů. Numerická simulace se osvědčila jako efektivní řešení pro hledání nejvýhodnější struktury povrchu. M. Dumont a kol. [55] popsali chování povrchů s cíleně modifikovanou topografií za podmínek nedostatečného mazání a ukázali, že cílená modifikace topografie má pozitivní vliv na životnost třecích povrchů. J. Zhao a F. Sadeghi [56] studovali vliv mikrostruktur na mazaný kontakt při rozběhu třecích povrchů (Obr. 2.40), tj. za podmínek, kdy ještě není v kontaktu vytvořen souvislý mazací film. Zjistili, že mikrostruktury vytvářejí mikrozásobníky maziva, které je poté do kontaktu dodáváno v kritických fázích provozu strojních částí.



Obr. 2. 40 Rozložení tlaku a tloušťky mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů [56].

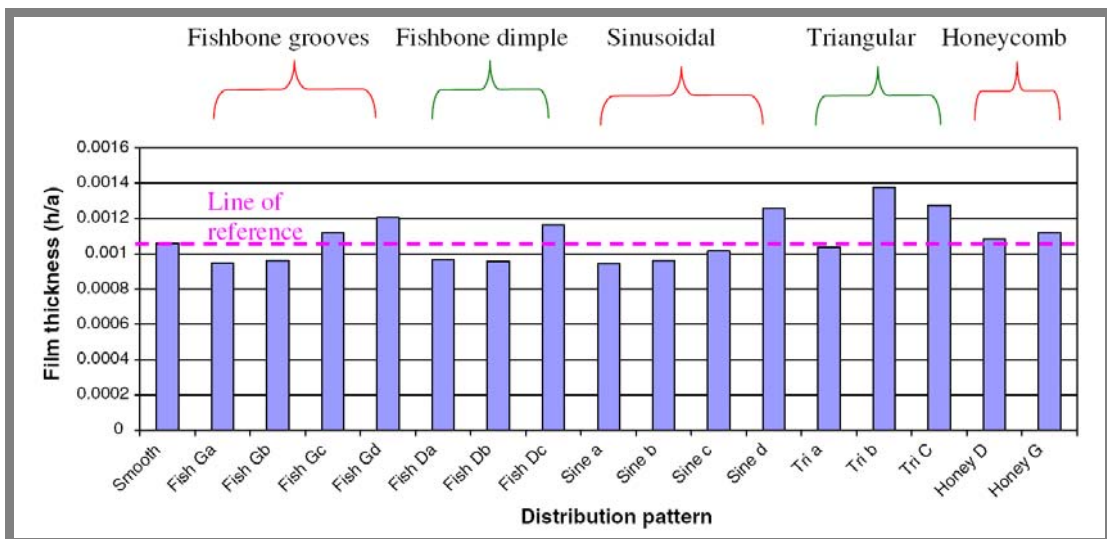
N. Ren a kol. [57] ukázali, že z hlediska průměrné tloušťky mazacího filmu se jako nejvhodnější tvar topografie jeví úzké a krátké mikrorýhy orientované kolmo na směr pohybu třecího povrchu. Při aplikaci takto navržené mikrostruktury je nejvíce redukováno tření. Příklady výsledků takového řešení pro různé tvary mikrokapes s odpovídající tloušťkou mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktu jsou na obrázcích 2.41a až 2.41e. Přednostně se používají typy cílené modifikace topografie třecích povrchů, kam patří např. šipovitý průběh, sinusový průběh, trojúhelníkový průběh nebo průběh jako plást medu.



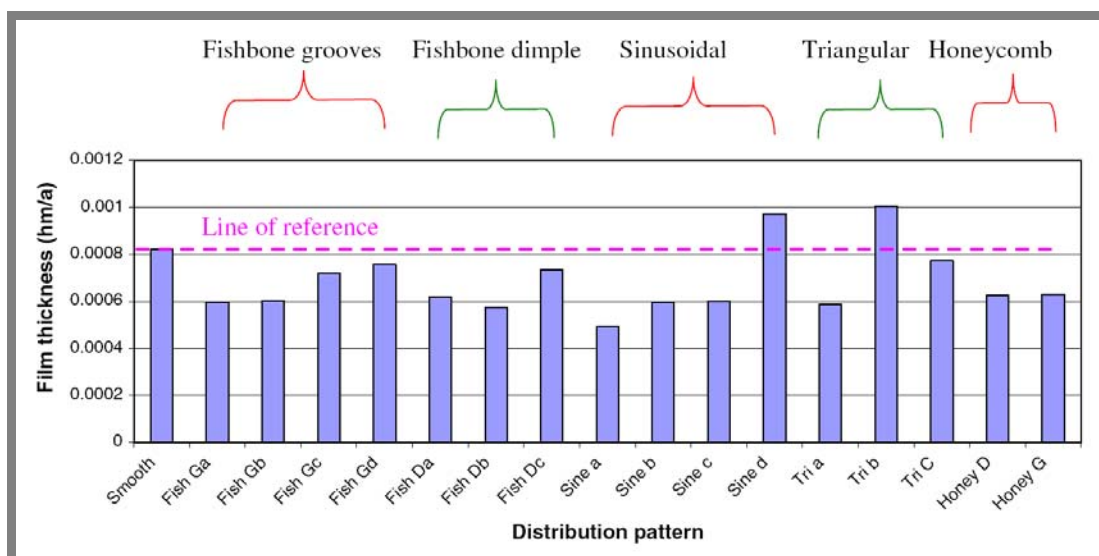


Obr. 2. 41 Rozložení tloušťky a tlaku v kontaktu při různých tvarech topografie třecích povrchů [57].

Po následném porovnání průměrné centrální (Obr. 2.42) a minimální (Obr. 2.43) tloušťky mazacího filmu pro různé tvary topografie třecích povrchů je zřejmé, že jako nejvhodnější struktura topografie třecího povrchu z hlediska tloušťky mazacího filmu je tvar trojúhelníku (Obr. 2.41d).



Obr. 2. 42 Srovnání průměrné centrální tloušťky mazacího filmu pro různé tvary topografie třecích povrchů [57].



Obr. 2. 43 Srovnání minimální tloušťky mazacího filmu pro různé tvary topografie třecích povrchů [57].

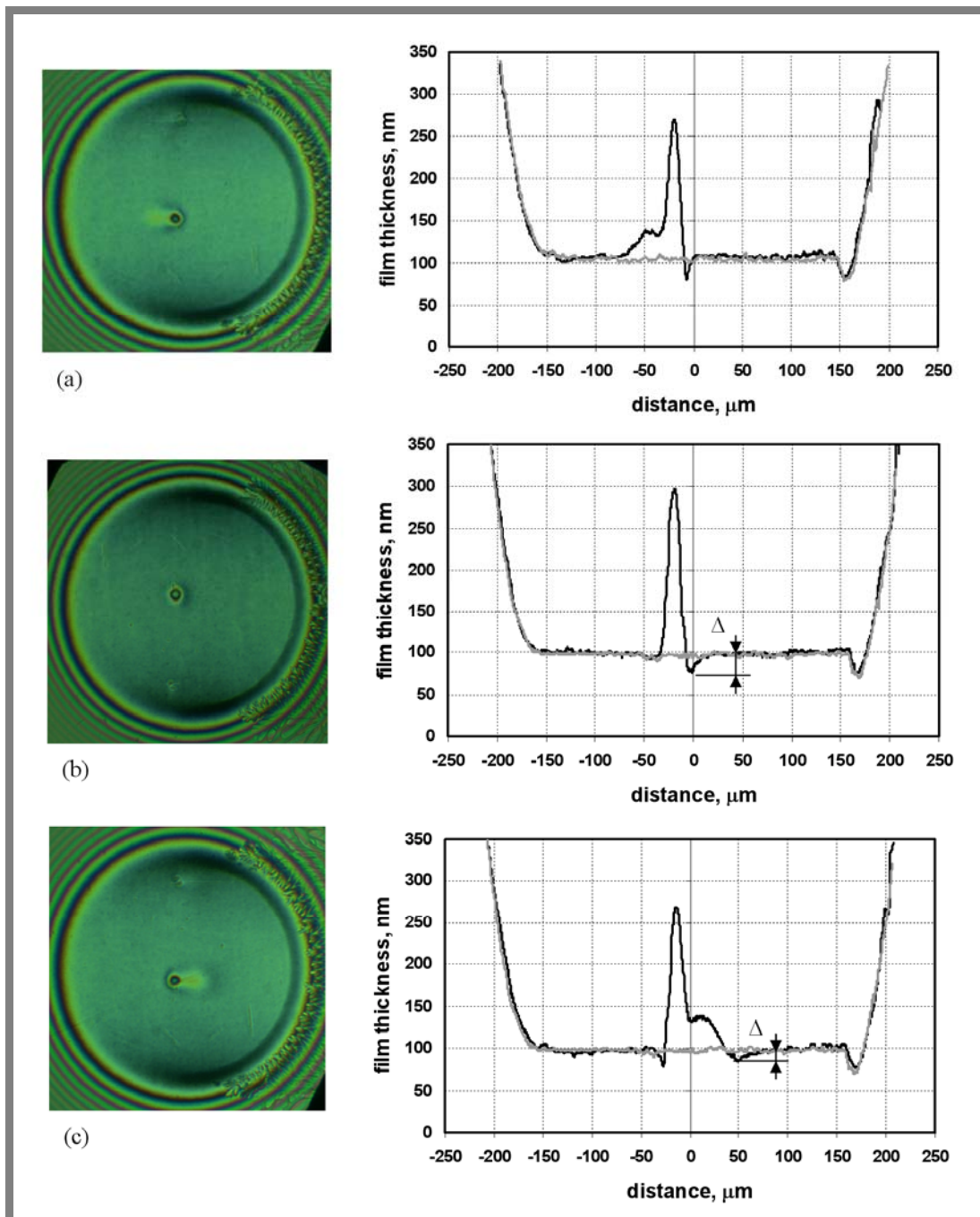
2.6.2 Experimentální studium cílené modifikace třecích povrchů

2.6.2

Experimentální studie využívají kruhové mikrodůlky o různém průměru a hloubce. Výsledky experimentálních studií ukázaly, že mělké kruhové mikrodůlky o menších průměrech mohou pozitivně ovlivnit tření a opotřebení [58]. Viskozita oleje zachyceného v mikrodůlku prudce roste při průchodu kontaktem a mazivo je tak uzavřeno v mikrodůlku, který funguje jako zásobník maziva. Tento vysoce viskózní mazací film je vytlačován ven z mikrodůlku v důsledku rozdílných rychlostí třecích povrchů, elasticky deformuje kontaktní povrchy a tím ovlivňuje tloušťku mazacího filmu [59].

Zlepšení tribologických vlastností bylo pozorováno zejména za provozních podmínek, kdy se povrch s mikrotexturou pohybuje rychleji než povrch bez textury (Obr. 2.44a) a v kontaktu vzniká prokluz třecích povrchů. [60]. Tento prokluz definujeme jako Σ (5). Při stejných rychlostech třecích povrchů (Obr. 2.44b) nebo v případech, kdy se povrch bez mikrotextury pohybuje rychleji než povrch s texturou (Obr. 2.44c), dochází k místnímu poklesu „ Δ “ tloušťky mazacího filmu.

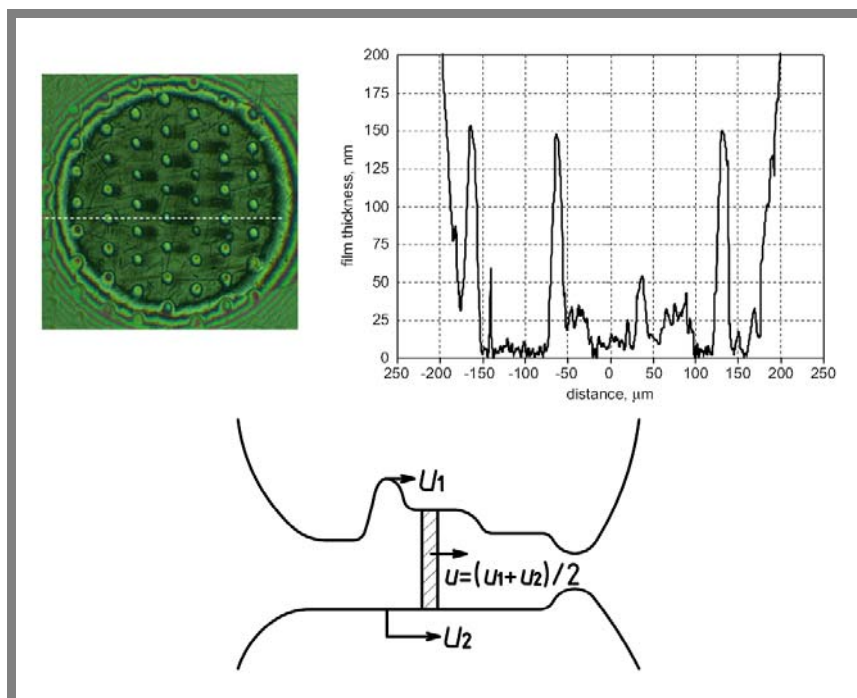
$$\Sigma = 2 \frac{u_B - u_D}{u_D + u_B} \quad (5)$$



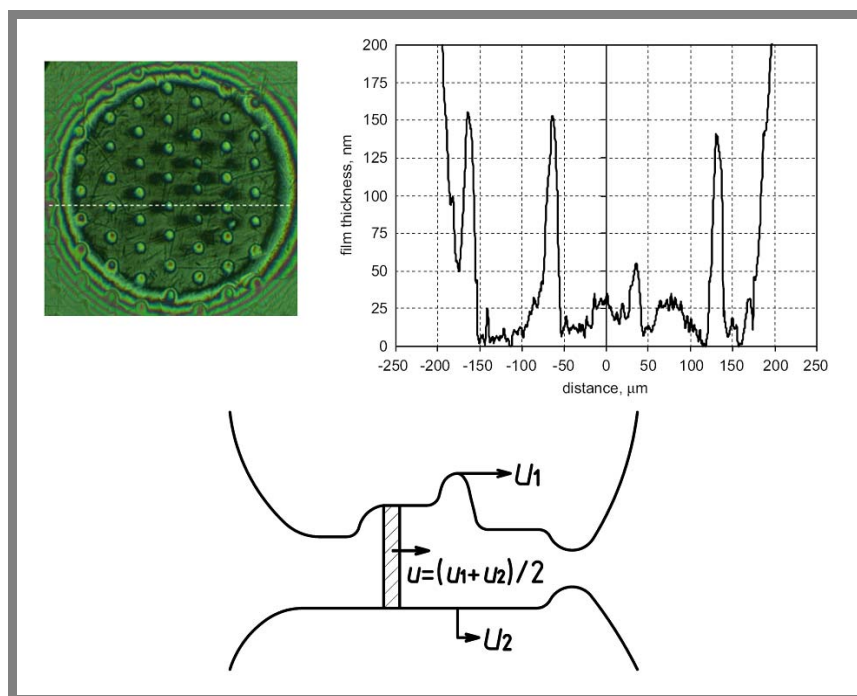
Obr. 2. 44 Chromatický interferogram a tloušťka mazacího filmu pro $u = 0.027 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Sigma = -0.5$ (a), 0 (b), $+0.5$ (c) [61].

M. Kaneta [62] studoval také vliv prokluzu na rozdělení tloušťky mazacího filmu v nejbližším okolí mikrodůlků. Bylo pozorováno, že mikrodůlky umístěné uvnitř mazaného kontaktu emitují olej po proudu maziva, když jsou mikrodůlky na pomaleji se pohybujícím povrchu, a proti proudu, když jsou mikrodůlky na rychleji se pohybujícím povrchu.

Stejně závěry publikoval i I. Křupka a kol. se soustavou mikrovrtisků na třecím povrchu [60]. Na obrázcích 2.45 a 2.46 je ukázán nárůst tloušťky mazacího filmu v okolí mikrovrtisku při průchodu mazaným kontaktem. Pro lepší představu je rozložení tvaru mazacího filmu za vtiskem zobrazeno ve 2D pohledu, kde můžeme pozorovat nárůst tloušťky mazacího filmu za vtiskem v případě, kdy se třecí povrch s vtiskem pohybuje pomaleji než hladký povrch a naopak (Obr. 2.46).

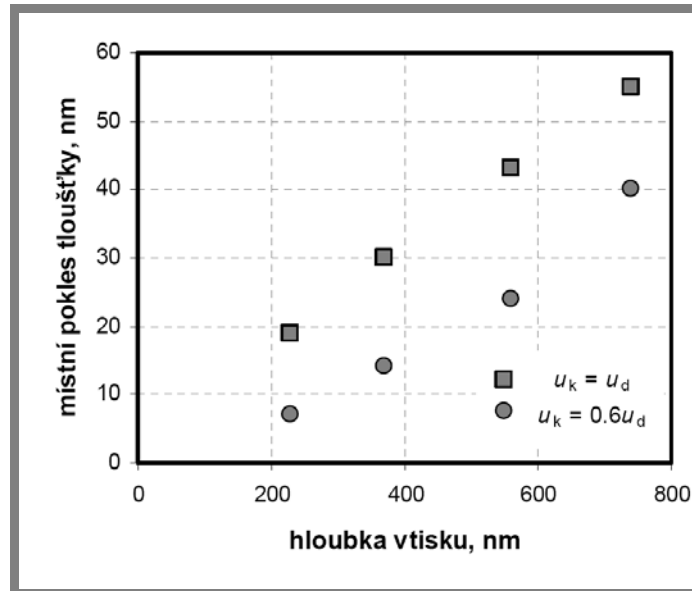


Obr. 2. 45 Chromatický interferogram, profil tloušťky filmu zobrazující efekt mělkého mikrovrtisku při smíšeném a 2D profil kontaktu ($u = 0,0013 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Sigma = +0,5$) [60].



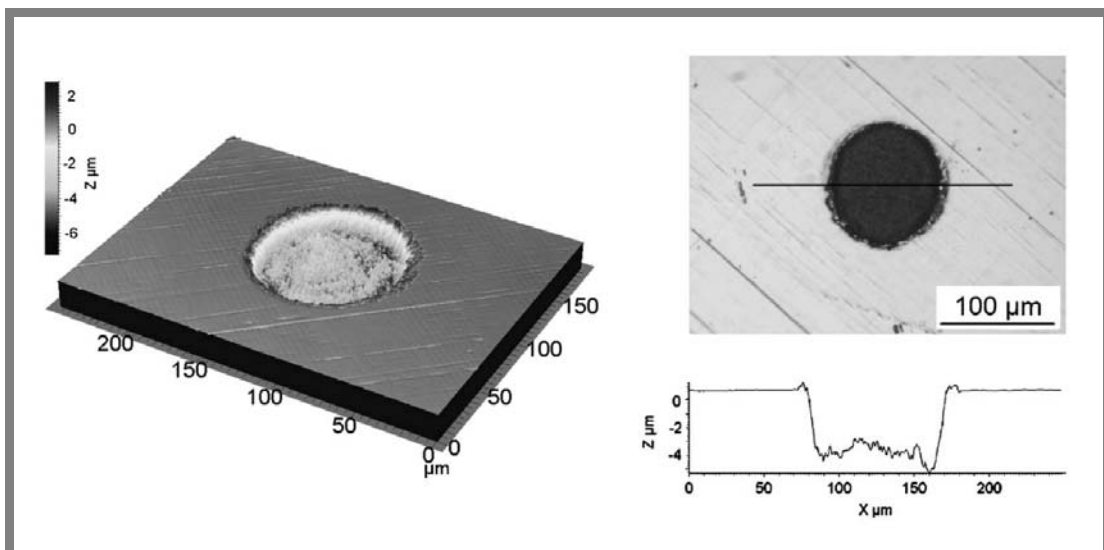
Obr. 2. 46 Chromatický interferogram, profil tloušťky filmu zobrazující efekt mělkého mikrovrtisku při smíšeném a 2D profil kontaktu ($u = 0,0013 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Sigma = -0,5$) [60].

Nedávno publikovali L. Mourier a kol. [59] chování jednotlivých mikrodutin vytvořených na třecích površích femtosekundovým pulzním laserem (Obr. 2.48). Došli k závěru, že vliv mikrodutin na mazací film závisí v prvé řadě na jejich hloubce. Významný nárůst tloušťky filmu byl pozorován u mělkých mikrodutin, zatímco hluboké způsobují lokální snížení tloušťky filmu. Vliv poklesu tloušťky mazacího filmu v závislosti na hloubce povrchové nerovnosti dále publikoval také I. Křupka a kol. [58] (Obr. 2.47).



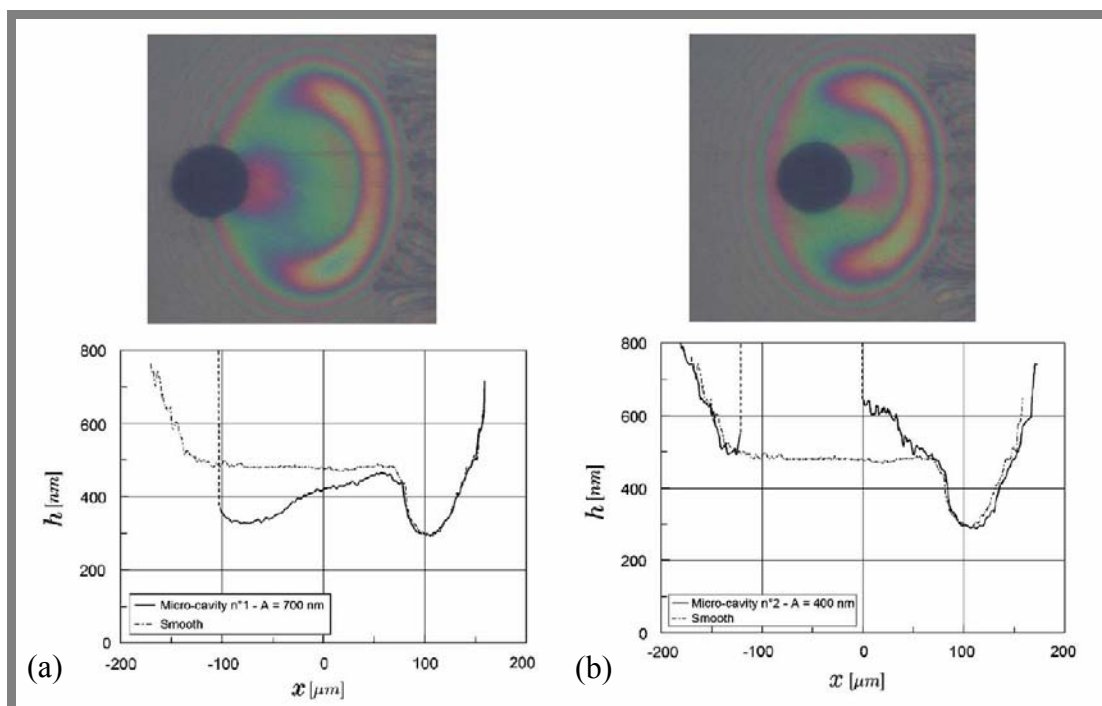
Obr. 2. 47 Pokles tloušťky mazacího filmu Δ , u_k – rychlost kuličky s texturou, u_d – rychlost skleněného kotouče [58].

Získané výsledky prezentovali za podmínek velmi tenkých mazacích filmů s jedním mikrodučkem umístěným ve středu kontaktu. Bylo prokázáno, že tento mikroduček může působit jako mikronádrž maziva. Výsledky jsou shodné s výsledky M. Kanety a kol. [62], kteří také pozorovali lokální redukci tloušťky filmu v závislosti na velikosti mikrodučků.



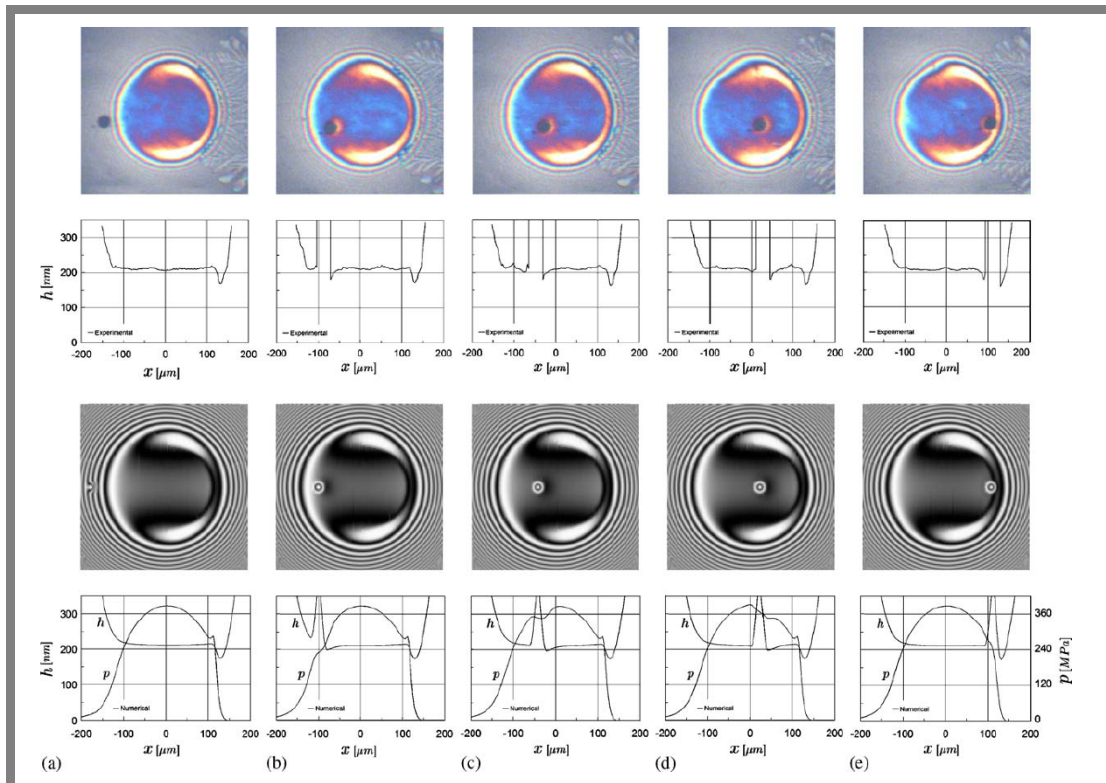
Obr. 2. 48 Mikroduček získaný za pomoci femtosekundového pulzního laseru (200 pulzů, $0,71 \text{ J.cm}^{-2}$) [59].

Velikost této redukce tloušťky mazacího filmu (Obr. 2.49) roste s rostoucí hloubkou mikrodůlků, hluboké mikrodůlky tak mohou zapříčinit i kolaps mazacího filmu [59].



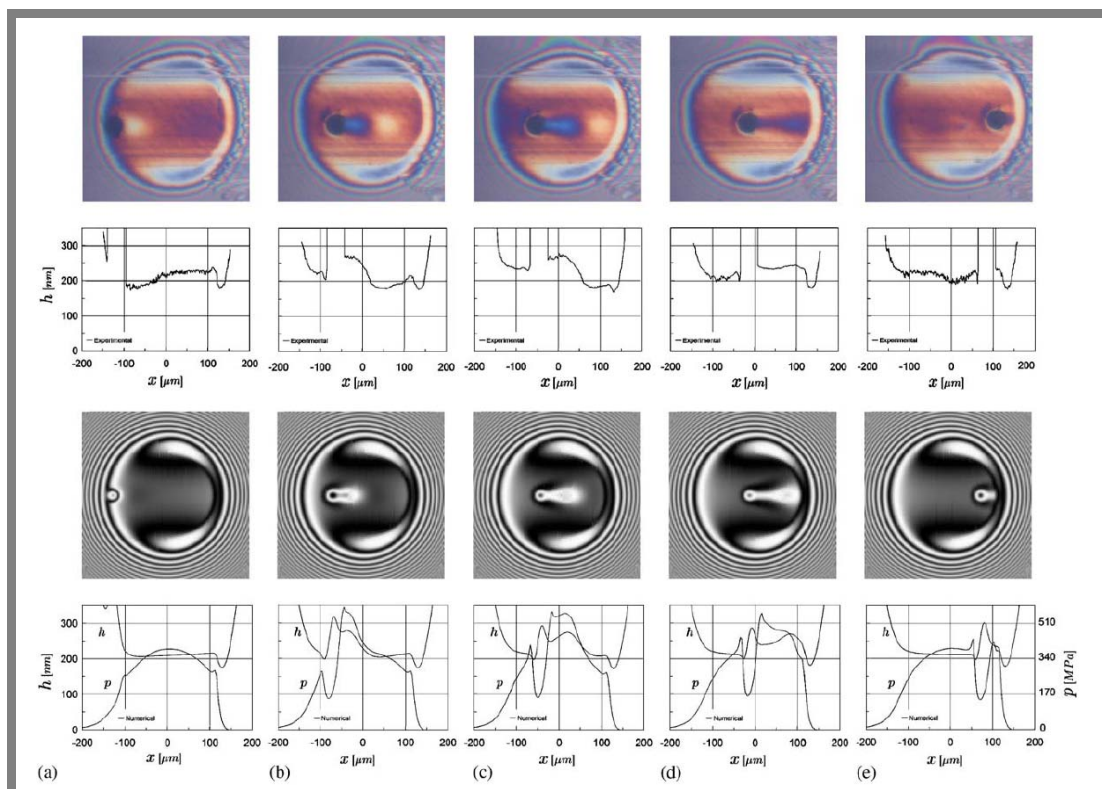
Obr. 2. 49 Vliv hlubokého a mělkého mikrodůlku na tloušťku mazacího filmu; (a) hluboký mikrodůlek, (b) mělký mikrodůlek [59].

Chování mikrodůlku za podmínek čistého valení popisuje obrázek 2.50. Mikrodůlek o průměru $31 \mu\text{m}$ a hloubce $7 \mu\text{m}$ prochází napříč kruhovým EHL kontaktem. Získané numerické výsledky umožňují kvalitativní srovnání s experimentálními. Přítomnost textury uvnitř kontaktu může způsobit významný nárůst kontaktního tlaku a podvrchových napětí. Navíc je tento efekt doprovázen redukcí tloušťky filmu, která může mít za následek selhání mazacího filmu.



Obr. 2. 50 Povrchový mikrodůlek procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek čistého valení. Parametry řešení $M=63.8$ a $L=5.8$, polohy vtisku: $X=-1.29$, $X=-0.73$, $X=-0.30$, $X=-0.16$, $X=0.82$. Srovnání experimentálních a numerických výsledků [59].

Povrchový mikrodůlek procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek částečného prokluzu popisuje obrázek 2.51. Při vstupu mikrodůlku do kontaktní oblasti je pozorováno nepatrné lokální snížení tloušťky mazacího filmu. Rozložení tlaku je v tomto okamžiku relativně malé a viskozita maziva zůstává také nízká. Jak se mikrodůlek pohybuje směrem ke středu kontaktu, narůstá tlaková špička a viskozita maziva se velmi rychle mění. Následkem vysokého tlaku se viskozita maziva zachyceného v mikrodutině stane tak vysoká, že mazivo ztuhne a posléze se emituje z mikrodutiny pomocí tangentiálního smykového napětí. Za několik málo milisekund se tlak v okolí mikrodutiny snižuje. Při porovnání experimentálních a numerických výsledků je patrné, že velmi dobře korelují.



Obr. 2. 51 Povrchový mikrodůlek procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek částečného prokluzu. Parametry řešení $M=63.8$ a $L=5.8$, $S=50\%$, polohy vtisku: $X=-0.93$, $X=-0.52$, $X=-0.30$, $X=-0.07$, $X=0.57$. Srovnání experimentálních a numerických výsledků [59].

Z experimentálních i numerických studií cílené modifikace topografie nekonformních třecích povrchů vyplývá, že po její aplikaci může být dosaženo pozitivního vlivu na tření a opotřebení třecích povrchů. Tohoto pozitivního vlivu na tření a opotřebení je dosahováno nárůstem tloušťky mazacího filmu. Ve studiích však nebyl pozorován pouze nárůst tloušťky mazacího filmu, ale také jeho lokální redukce. Rozhodující vliv na nárůst i redukci mazacího filmu má hloubka a tvar mikrotextury.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

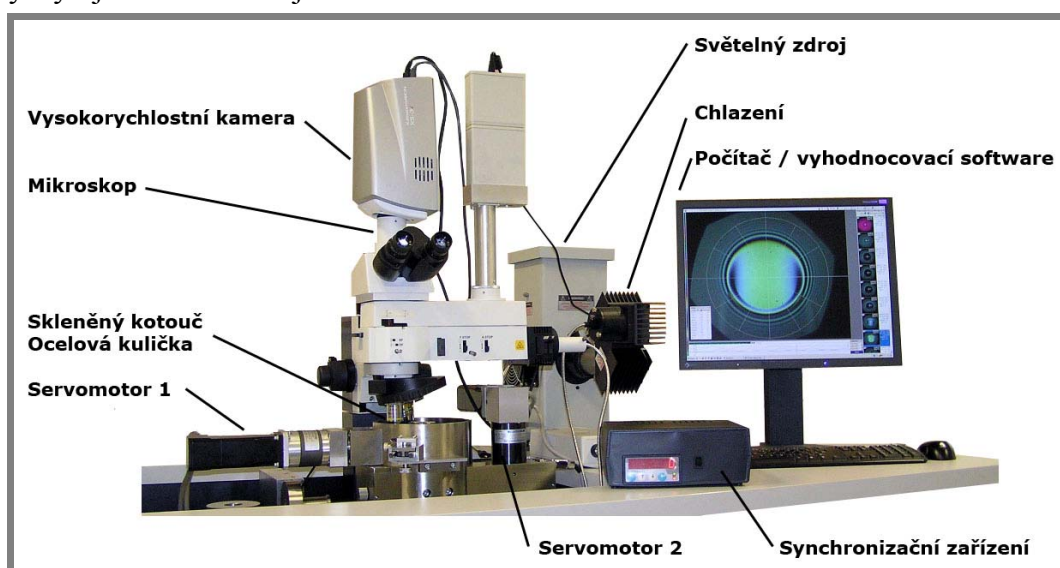
Cílem disertační práce je experimentální objasnění procesů, které probíhají při smíšeném mazání během rozběhu a reverzace třecích povrchů u strojních prvků s cíleně modifikovanou topografií. Při rozběhu nejsou totiž třecí povrchy po určité době odděleny mazacím filmem. Cílená modifikace topografie povrchu kontaktu by mohla napomoci snížit styk povrchových nerovností.

Naplnění tohoto cíle předpokládá realizaci následujících zvolených dílčích cílů:

- Modifikace stávajícího zařízení pro experimentální studium měření tloušťky mazacích filmů při rozběhu a reverzaci třecích povrchů.
- Realizace vstupních experimentů za podmínek čistého valení a prokluzu třecích povrchů. Posouzení vlivu prokluzu cíleně modifikovaných třecích povrchů na rozložení tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu.
- Posouzení vlivu reálné a cíleně modifikované topografie na utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů.
- Posouzení vlivu reálné a cíleně modifikované topografie na utváření mazacího filmu při reverzaci třecích povrchů.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

K modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách je používán tribometr (Obr. 4.1) určený k experimentálnímu výzkumu mazacích filmů. V tribometru je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž 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 vyskytujících se ve strojních uzlech.

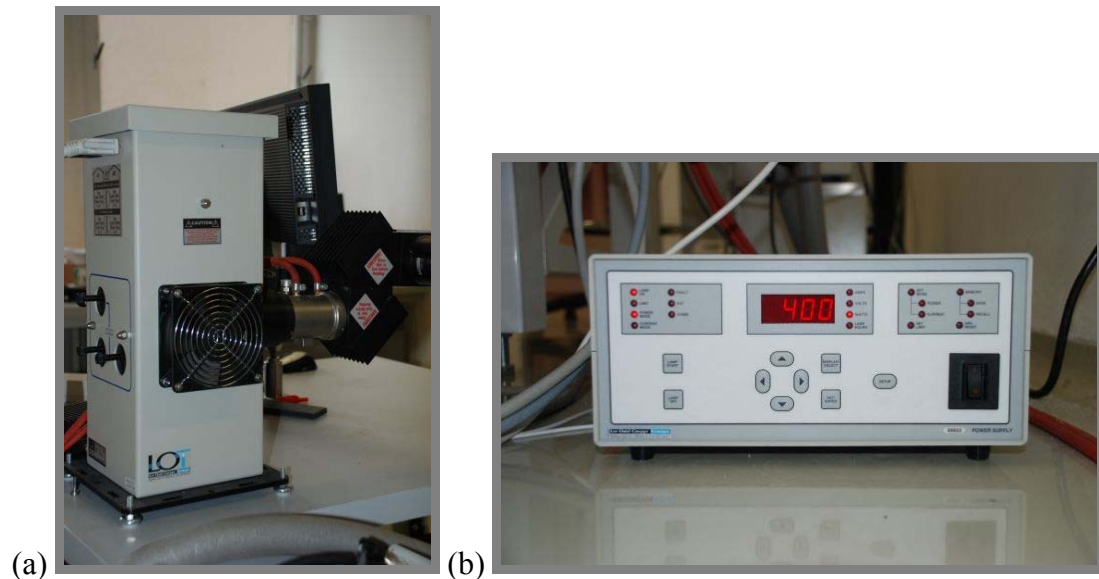


Obr. 4. 1 Experimentální zařízení pro studium tenkých mazacích filmů [63].

Při experimentech je ocelová kulička umístěna do simulátoru, nasadí se skleněný kotouč a simulátor se zaplní mazivem. Zaznamenávání chromatických interferogramů probíhá při průchodu zvoleného místa na povrchu vzorku mazaným kontaktem. Mazané kontakty jsou pozorovány pomocí mikroskopového zobrazovacího systému založeného na průmyslovém mikroskopu Nikon Optiphot 150. V závislosti na studovaných problémech je volena optimální kombinace světelného zdroje a barevné kamery ke snímání chromatických interferenčních obrazců. Pro výzkum smíšeného mazání a procesů probíhajících za neustálených provozních podmínek je využíván xenonový zdroj bílého světla v kombinaci s barevnou vysokorychlostní kamerou IDT X-Vision 3. Xenonový zdroj bílého světla v kombinaci s barevnou vysokorychlostní kamerou umožňuje zaznamenat až 630 snímků za sekundu v rozlišení 1280 x 1024 pixelů. Změny tvaru mazacího filmu jsou studovány kolorimetrickou interferometrií, měřicí metodou určenou ke stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu. Užití kolorimetrické interferometrické metody v kombinaci s vysokorychlostní barevnou CMOS kamerou umožňuje rekonstruovat vytváření mazacího filmu za realistických provozních podmínek. Vliv neustálených provozních podmínek na utváření mazacího filmu je sledován při proměnných rychlostech tak, aby bylo možné simulovat podmínky při rozběhu, doběhu a náhlých změnách rychlosti třecích povrchů.

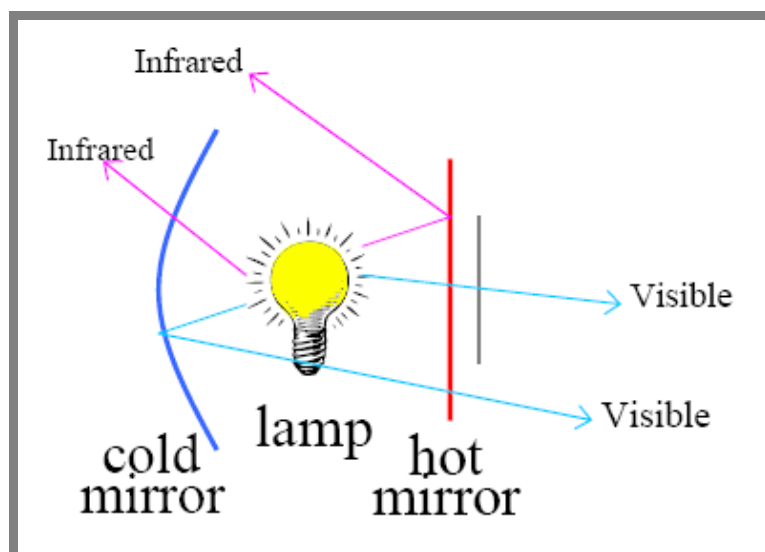
4.1 Implementace světelného zdroje a jeho chlazení

Pro experimentální studium je nutno zajistit dostatečnou intenzitu osvětlení snímaného kontaktu. Použitá vysokorychlostní CMOS kamera dokáže pořídit až 630 snímků za sekundu v rozlišení 1280x1024 pixelů. Při těchto rychlostech záznamu je nutno snímaný kontakt osvětlit lampou o dostatečné intenzitě. Pro dostatečné osvětlení chromatických interferogramů v kontaktní oblasti byl tribometr vybaven 1000 W xenonovým světelným zdrojem (Obr. 4.2a) a řídicí jednotkou pro nastavení výkonu (Obr. 4.2b).



Obr. 4. 2 (a) Světelný zdroj, (b) řídicí jednotka.

Pro navázání světla do mikroskopu je použito optické vlákno. Použité optické vlákno však snese maximální tepelné zatížení 40 °C, proto byla do měřicí aparatury implementována také sestava tří dichroických zrcadel pro dostatečné zchlazení soustavy. Dichroická zrcadla (Obr. 4.3) odrážejí světlo ve viditelné oblasti (jako kovy) a v UV, IR (nežádoucí) záření propouštějí.



Obr. 4. 3 Princip dichroického zrcadla [64].

4.2 Synchronizace vysokorychlostní CMOS kamery s kuličkou

Přesná synchronizace snímání sekvence snímků s polohou rotující kuličky si vyžádala zkonstruování synchronizačního zařízení (Obr. 4.4).

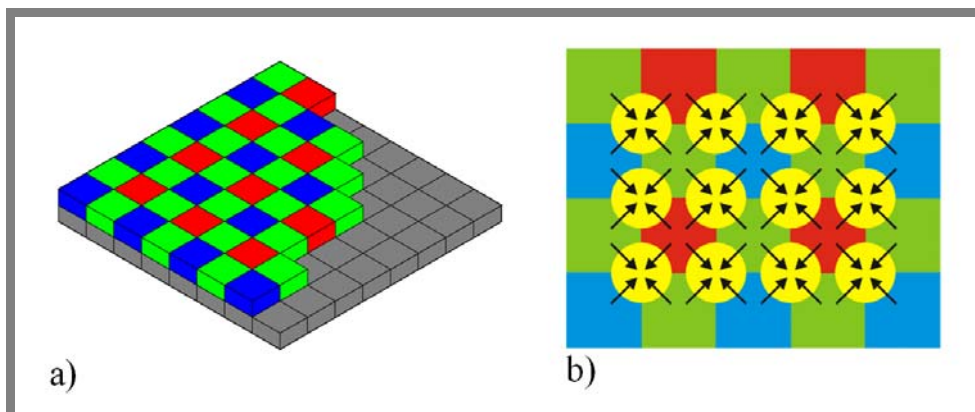


Obr. 4. 4 Synchronizační zařízení.

Synchronizace kamery s kuličkou v EHD kontaktu je realizována pomocí inkrementálního kodéru umístěného na hřídeli planetové převodovky pohánějící kuličku a čítače pulsů ZX340. Vlastní spuštění kamery je realizováno pomocí (vstupního – spouštěcího) TTL pulsu, který na vstřední hraně spustí obrazovou sekvenci na požadovaném místě kuličky. Díky synchronizaci lze pořídit přesně zahájenou a ukončenou sekvenci snímků bez nadbytečných dat.

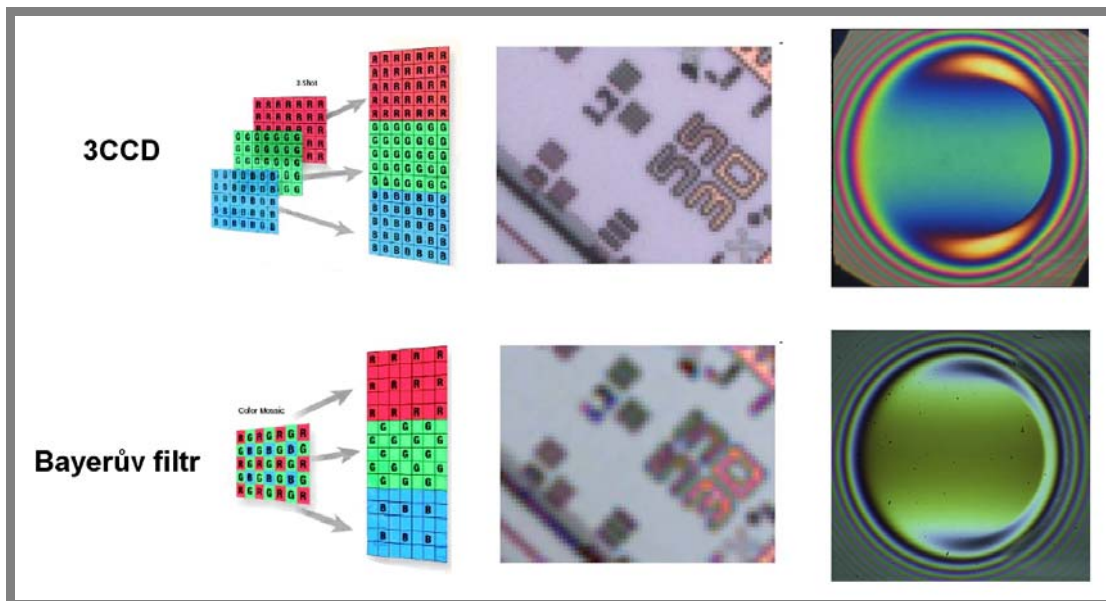
4.3 Vysokorychlostní CMOS kamera IDT X-Vision 3

Použitá vysokorychlostní CMOS kamera je založena na snímání barevného obrazu jediným čipem, na jehož jednotlivých pixelech jsou naneseny barevné filtry v bayerovském uspořádání. Využívá se toho, že lidské oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu, a proto je informace o této barvě pro něj nejdůležitější. Proto má také Bayerův filtr (Obr. 4.5a) dvojnásobný počet zelených buněk vzhledem k buňkám červeným a modrým.



Obr. 4. 5 Uspořádání Bayerova filtru - 50 % zelená, 25 % červená a 25 % modrá (a), Interpolace barev z Bayerova filtru (b) [65].

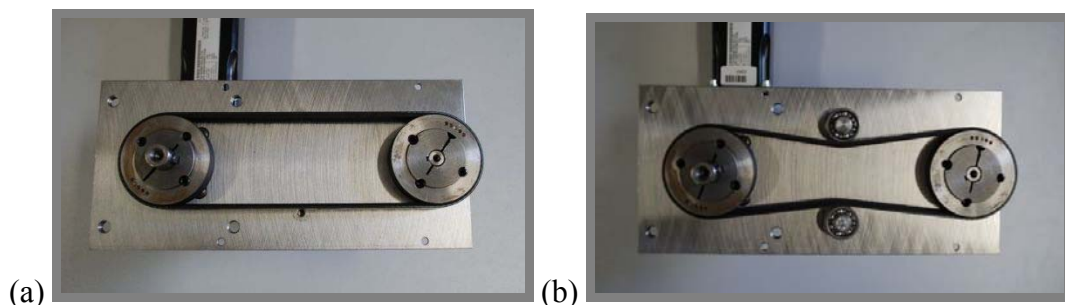
Obraz se z čipu načte běžným způsobem, posléze se plnobarevné barvy jednotlivých pixelů interpolují (Obr. 4.5b) z nejbližších pixelů jednotlivých barev RGB. Na obrázku žlutá kolečka představují plnobarevné pixely výsledného obrázku a šipky naznačují, ze kterých buněk Bayerova filtru byly interpolovány. Srovnáním s další používanou 3CCD technologií (Obr. 4.6) pro zachytávání snímků je vidět, že při snímání jedním senzorem s rozlišením 2048 x 2048 bude rozlišení ve skutečnosti pouze 1024 x 1024 oproti 3CCD technologii, která by měla rozlišení 2048 x 2048.



Obr. 4. 6 Srovnání jednočipové (Bayer filtr) technologie a technologie 3CCD [66].

4.4 Modifikace stávajícího zařízení

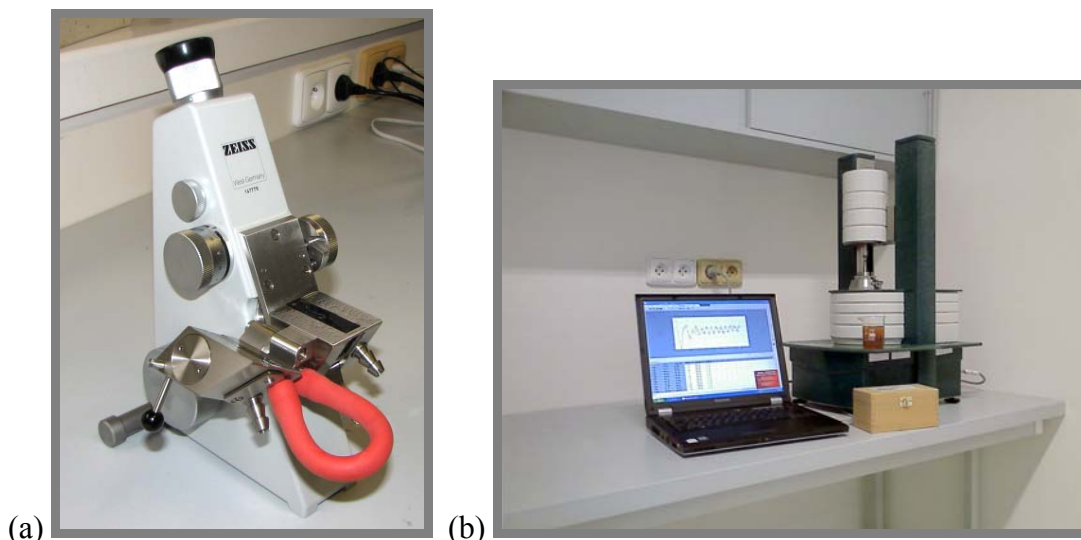
Krouticí moment přenáší ze servomotoru na disk víceřadý klínový řemen. Přítomnost tohoto pryžového řemene (Obr. 4.7a) má při reverzaci pohybu za následek zpoždění disku vzhledem k pohybu kuličky, což bylo pozorováno při úvodních experimentech. Kontakt se při iniciaci pohybu s konstantním prokluzem choval podobně jako při čistém valení. Tento nežádoucí efekt se podařilo z větší části eliminovat napínacími kladkami (Obr. 4.7b).



Obr. 4. 7 Pohon disku, původní řešení (a), řešení s napínacími kladkami (b)

4.5 Stanovení indexu lomu oleje Abbeho refraktometrem

Pro určení indexu lomu oleje byl použit Abbeho refraktometr (Obr. 4.8a). Podstatou měření je zjišťování mezního úhlu lomu, který je dán polohou rozhraní mezi osvětlenou a temnou částí zorného pole, odečítanou na stupnici přístroje. Několik kapek oleje se nakape na optický hranol. Index lomu může být odečten přímo na zabudované škále pozorované refraktometrem.



Obr. 4. 8 Abbeho refraktometr (a), schéma rotačního viskozimetru (b).

4.6 Stanovení viskozity oleje rotačním viskozimetrem Haake RotoVisco 1

4.6

Pro určení viskozity oleje byl použit rotační viskozimetr (Obr. 4.8b), který určuje viskozitu ze silových účinků, kterými na sebe působí dvě válcové plochy (jedna v klidu, druhá rotující), mezi kterými je zkoumaný olej. Měřený olej je umístěn v temperované nádobce. Měří se síla, která je potřebná pro překonání odporu proti otáčení. Rotor je připevněn na hřídeli motoru, která se otáčí určitou rychlostí. Na základě znalosti rychlosti otáčení a geometrie rotoru se pomocí viskozimetru určuje krouticí moment motoru a z něj viskozita kapaliny.

4.7 Příprava vzorku pro experiment

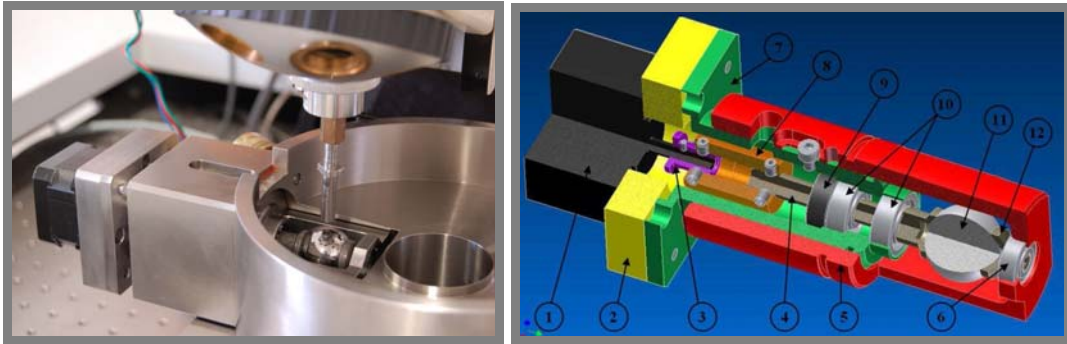
4.7

Jako vzorek pro měření byla použita komerčně dodávaná kulička z ložiskové oceli (ČSN 14 109, ekvivalent 100Cr6, AISI 52100, DIN W.13505) o průměru 25,4 mm. Náhodně umístěné nerovnosti povrchu vzniklé při obrábění tvoří převládající povrchovou texturu kuličky $R_a = 0,018 \mu\text{m}$. Kuličky z ložiskové oceli mají vynikající povrchové vlastnosti, vysokou tvrdost a pevnost, jsou celkově tepelně kalené v celém svém průměru tak, aby bylo dosaženo maximální pevnosti. Tvrdost kuliček se pohybuje okolo 60-66 HRC.

Mechanické Vlastnosti:

Napětí v tahu	228	Kg / mm^2
Mez kluzu	207	Kg / mm^2
Tažnost	20.748	Kg / mm^2
Hustota	7.83	g / cm^3

K vytváření mikrostruktur na povrchu vzorků byl použit přípravek (Obr. 4.9) k mechanickému vyrážení pomocí vnikacího tělíska (Rockwell) s diamantovým hrotem o poloměru zaoblení 0,2 mm. Pro vytváření cílené modifikace třecích povrchů byla provedena úprava konvenčního mikroskopu. První experimenty s vytvářením cílené modifikace povrchu byly založeny na manuálním posuvu diamantového hrotu.



Obr. 4. 9 Přípravek pro vytváření mikrostruktur. Jednotlivé části přípravku (1...krokový elektromotor, 2...příruba, 3...redukce, 4...hnaný hřídel (nátrubek), 5...pouzdro, 6...dvouřadé kuličkové ložisko, 7...těleso, 8...spojka, 9...gufero, 10...jednořadá kuličková ložiska, 11...měřené tělísko – kulička, 12...malý nátrubek) [67].

Ovládání posuvu mikroskopu a suportu bylo později vybaveno dvěma krokovými motory k vertikálnímu posuvu mikroskopu a k otáčení se vzorkem. Vytváření jednotlivých měřících stop je plně automatizováno a řízeno počítačem. Modifikace topografie povrchu kuličky je realizována vertikálním posuvem mikroskopu. Horizontální posuv je realizován manuálním posuvem, pomocí mikrometrického šroubu. Tímto způsobem jsme schopni zajistit požadovanou topografii třetího povrchu.

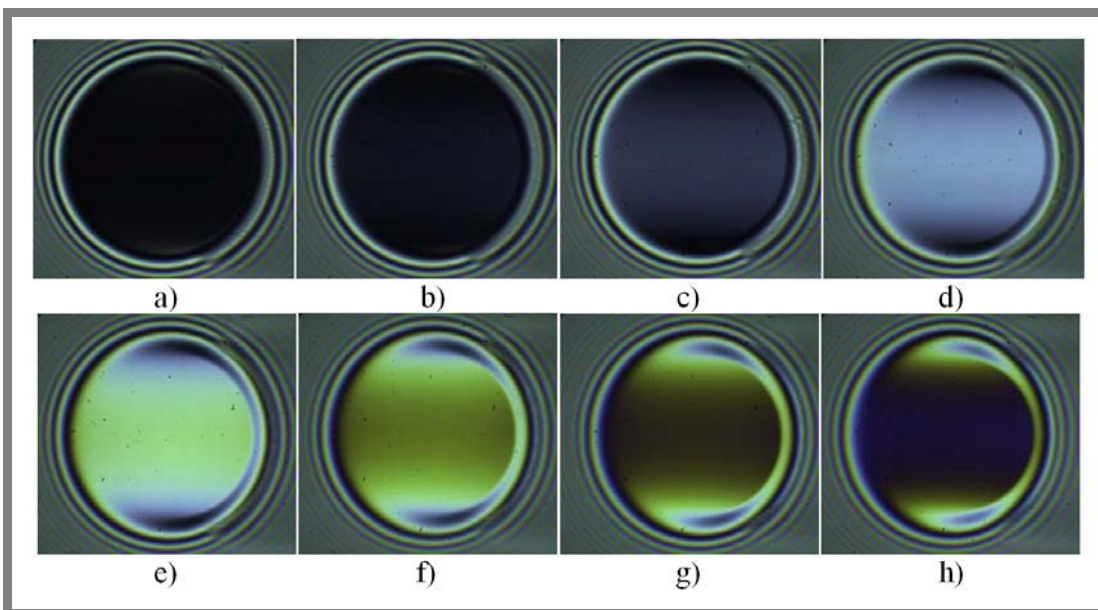
5 SÉRIE VSTUPNÍCH EXPERIMENTŮ

5

5.1 Vstupní experimenty pro hladký kontakt za podmínek čistého valení

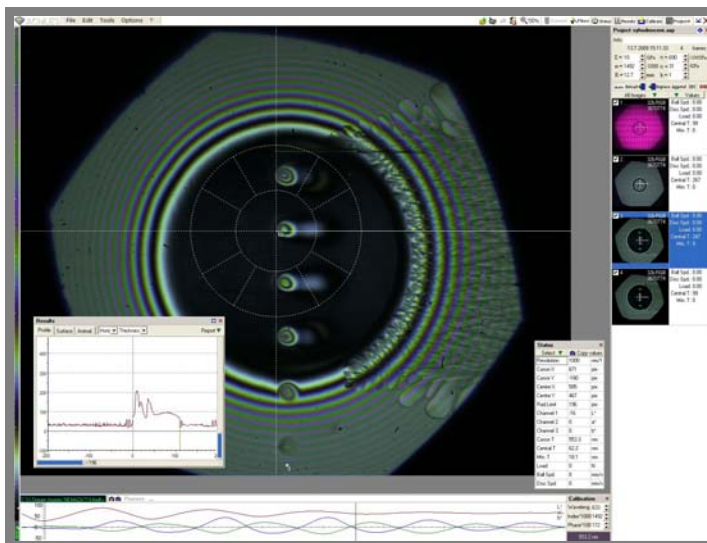
5.1

Prvním dílčím cílem disertační práce bylo ověření metody s použitou vysokorychlostní CMOS kamerou X-Stream™ VISION XS-3 na hladkém kontaktu za podmínek čistého valení. Pro experiment byl použit tribometr a tvar mazacího filmu byl stanoven kolorimetrickou interferometrií. K osvětlení kontaktní oblasti byl použit 1kW xenonový světelný zdroj.



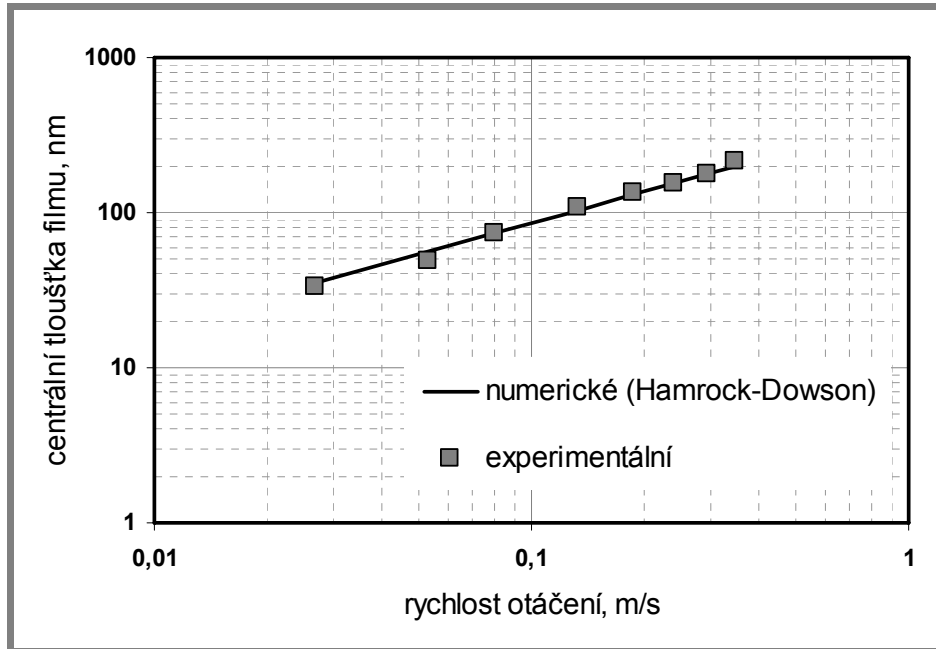
Obr. 5. 1 Chromatické interferogramy hladkého kontaktu za podmínek čistého valení ($F = 26,58 \text{ N}$), $u = 0,013$ (a), $0,053$ (b), $0,079$ (c), $0,132$ (d), $0,186$ (e), $0,239$ (f), $0,292$ (g), $0,345$ (h) ms^{-1} , $\eta = 0,065 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Kontakt byl snímán při různých rychlostech valení (Obr. 5.1). Následně byla vyhodnocena tloušťka filmu ze získaných chromatických interferogramů pomocí programového prostředí Achilles (Obr. 5.2).



Obr. 5. 2 Programové prostředí Achilles.

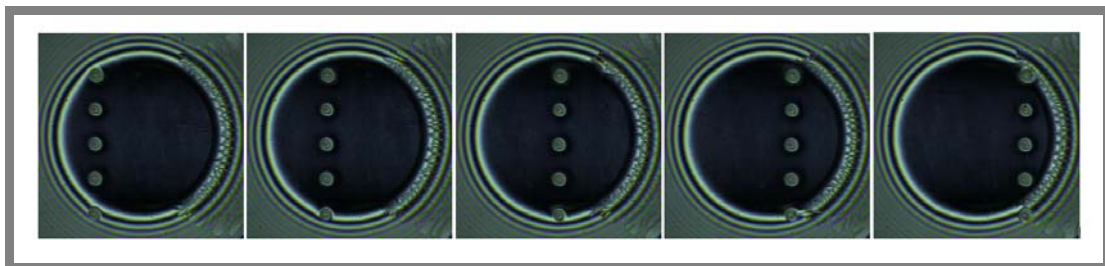
Pro dostatečně přesný odhad centrální tloušťky EHD mazacího filmu v kruhovém kontaktu lze použít vztah dle B. J. Hamrocka a D. Dowsona (4). Naměřené hodnoty centrální tloušťky mazacího filmu tak byly porovnány s hodnotami spočítanými dle tohoto vztahu. Z obrázku 5.3 je zřejmá velmi dobrá shoda naměřených a vypočítaných hodnot, což prokázalo vhodnost použití CMOS kamery pro plánované experimenty.



Obr. 5.3 Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot centrální tloušťky mazacího filmu.

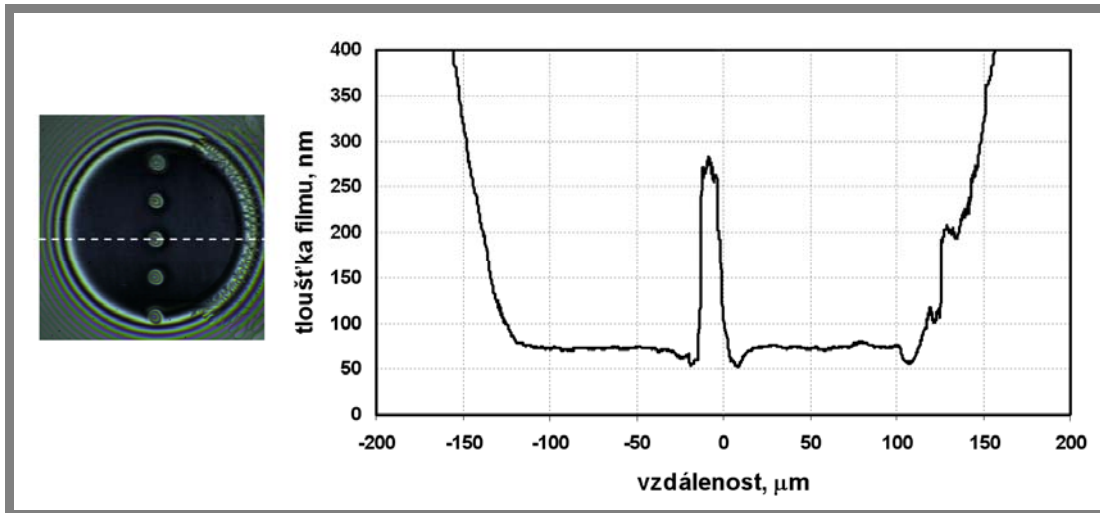
5.2 Vstupní experimenty s cíleně vytvořenými mikrovttisky za čistého valení

S cílem ověřit funkci synchronizace byla provedena řada experimentů s uměle vytvořenými defekty na kuličce za ustálených provozních podmínek. Vtisky na kuličce byly vytvořeny mechanicky pomocí diamantového hrotu. Při vytváření vtisku působil diamantový hrot na povrch kuličky silou 5 N a vtisky byly vytvářeny s roztečí 75 μm . Úvodní série experimentů byla realizována za podmínek čistého valení a bylo zaznamenáno 100 snímků při průchodu mikrovttisků kontaktem. Posunutí ve směru rotace kuličky mezi následujícími snímky bylo 4,02 μm . Na obrázku 5.4 jsou zobrazeny vybrané chromatické interferogramy kontaktu s mikrovttisky zaznamenané za podmínek čistého valení při rychlosti otáčení kuličky 0,00177 ms^{-1} , frekvenci snímání kamery 440 Hz a expozičním čase kamery 2272 μs .



Obr. 5.4 Chromatické interferogramy kontaktu s mikrovttisky za podmínek čistého valení $F = 22\text{N}$, $u = 0,00177 \text{ ms}^{-1}$, $f = 440 \text{ Hz}$, $\text{exp.} = 2272 \mu\text{s}$, rozlišení 1260x1024.

Následně byla vyhodnocena tloušťka filmu ve vybraném řezu (Obr. 5.5). Z průběhu tloušťky je zřejmé, že zvoleným postupem lze zaznamenat a vyhodnotit chromatické interferogramy i za podmínek, které umožní studium mazacích filmů za neustálených provozních podmínek.

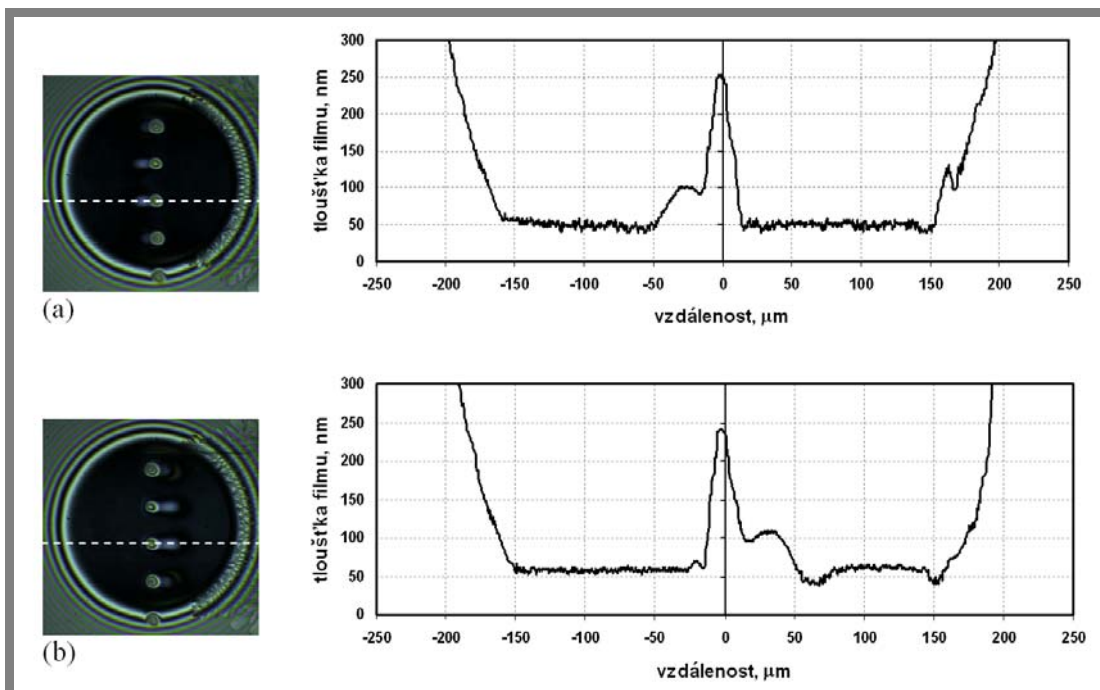


Obr. 5.5 Chromatický interferogram a profil tloušťky filmu ($F = 22\text{N}$, $u = 0,00177\text{ ms}^{-1}$, $f = 440\text{ Hz}$, $\text{exp.} = 2272\text{ }\mu\text{s}$, rozlišení 1260×1024), SUNOCO sample L.S. B/S.

5.3 Vstupní experimenty s cíleně vytvořenými mikrovtkisky při prokluzu třecích povrchů

5.3

Stejná série experimentů byla provedena za podmínek prokluzu třecích ploch. Z experimentu je zřejmé, že pro $\Sigma > 0$ se pohybuje skleněný kotouč rychleji než kulička. Pokud je $\Sigma < 0$, pohybuje se kulička rychleji než skleněný kotouč.



Obr. 5.6 Chromatický interferogram a profil tloušťky filmu při prokluzu třecích povrchů. (a) $\Sigma = -0,5$; $u_B = 0,00222\text{ ms}^{-1}$, $u_D = 0,00133\text{ ms}^{-1}$, (b) $\Sigma = +0,5$; $u_B = 0,00133\text{ ms}^{-1}$, $u_D = 0,00222\text{ ms}^{-1}$, ($F = 30\text{N}$, $f = 450\text{ Hz}$, $\text{exp.} = 2222\text{ }\mu\text{s}$, rozlišení 1260×1024), základový minerální olej SUNOCO sample L.S. B/S.

Při prokluzu třecích povrchů dochází k ovlivnění toku maziva. Mazivo zachycené v mikrovrtisku je vytlačováno do kontaktu ve směru nebo proti směru pohybu třecí dvojice.

V případě, kdy se ocelová kulička pohybuje rychleji než skleněný kotouč, můžeme pozorovat místní nárůst tloušťky mazacího filmu za mikrovrtiskem (Obr. 5.6a). Pokud se skleněný kotouč pohybuje rychleji než ocelová kulička, můžeme pozorovat, že mazivo ovlivňuje oblast před mikrovrtiskem (Obr. 5.6b). Lokální nárůst tloušťky mazacího filmu dosahoval v blízkém okolí mikrovrtisku hodnot okolo 100 nm. Nicméně místní nárůst mazacího filmu není jediným jevem, který můžeme pozorovat při průchodu mikrovrtisku kontaktem. Na obrázku 5.6b je vidět také lokální pokles mazacího filmu na hodnotu pod 50 nm. Rozdílné chování bylo pozorováno v případě, když se ocelová kulička pohybovala rychleji než skleněný kotouč. Mazivo zachycené v mikrovrtiscích produkovalo místní nárůst tloušťky mazacího filmu. Tento jev však nedoprovází redukce tloušťky mazacího filmu (Obr. 5.6a).

Tyto série vstupních experimentů potvrdily, že je vhodné ke studiu přechodových jevů v mazacích filmech použít vysokorychlostní CMOS barevnou kameru. Tímto byl splněn nutný předpoklad k dosažení cíle disertační práce.

6 VLIV TOPOGRAFIE NA UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU PŘI ROZBĚHU TŘECÍCH POVRCHŮ

6

6.1 Popis experimentu

6.1

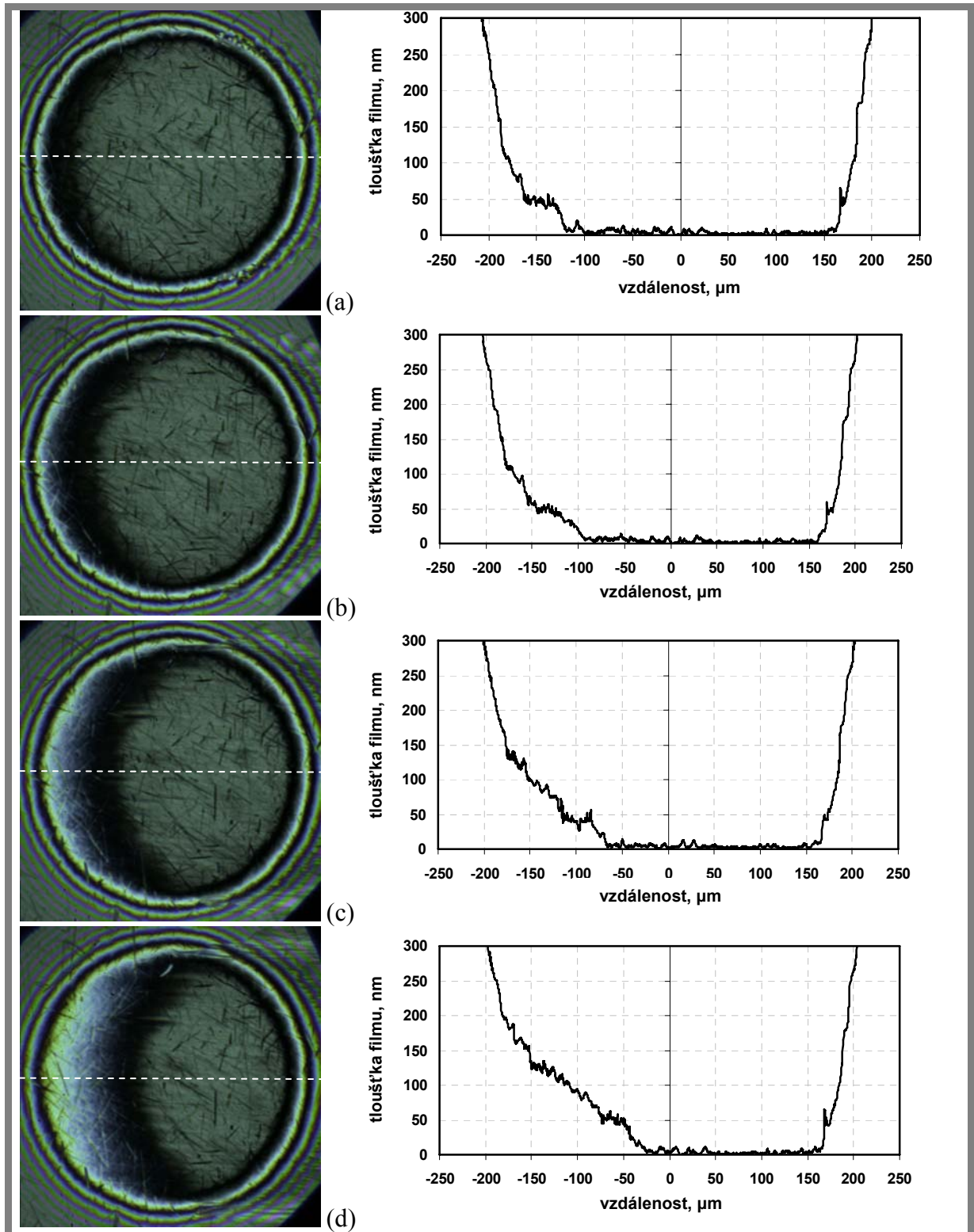
Pro první sérii experimentů byla použita komerčně dodávaná ocelová kulička s drsností povrchu $R_a = 0,018 \mu\text{m}$. Následující experiment byl posléze realizován na komerčně dodávané kuličce s indentovanou maticí mikrovrtisků. Mikrovrtisky byly vytvořeny za použití vnikacího tělíska Rockwell. Hloubka vytvořených mikrovrtisků byla okolo 200 nm a rozteč mezi mikrovrtisky byla $50 \mu\text{m}$. Skleněný disk o průměru 150 mm měl opticky hladký povrch. Všechny experimenty byly provedeny se základovým minerálním olejem LSBS za pokojové teploty $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě má olej dynamickou viskozitu $0,69 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Zatížení kontaktu bylo 22 N , tomu odpovídá maximální Hertzův tlak $0,466 \text{ GPa}$ a průměr Hertzova kontaktu přibližně $300 \mu\text{m}$. Modul pružnosti ocelové kuličky byl 212 GPa a skleněného disku 81 GPa . Rychlost disku u_D a kuličky u_B byla volena s ohledem na dosažení konstantní hodnoty Σ (5). Rozběh kontaktu s prokluzem třecích povrchů vyžaduje při experimentu přesnou kontrolu akcelerace skleněného disku i ocelové kuličky. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, ocelová kulička je poháněna přes servomotor a planetovou převodovku, zatímco kroučící moment na skleněný disk je přenášen ze servomotoru přes planetovou převodovku víceřadým klínovým řemenem. Přítomnost tohoto pryžového řemene má při rozběhu třecích ploch za následek zpoždění disku vzhledem k pohybu kuličky, což bylo pozorováno při úvodních experimentech. Kontakt se při rozběhu s konstantním prokluzem choval určitou dobu podobně jako při čistém valení. Tento nežádoucí efekt se podařilo z větší části eliminovat napínacími kladkami. Přesto byl v následujícím experimentu kontakt po dobu 33 ms při podmínkách čistého valení, zatímco se ocelová kulička otočila přibližně o $50 \mu\text{m}$. Ukázalo se, že takto modifikovaná konfigurace s napínacími kladkami umožňuje vytvořit podmínky pro experiment při nízkých hodnotách zrychlení. Použitá barevná vysokorychlostní CMOS kamera byla nastavena na zachycení 450 chromatických interferogramů za sekundu. Konečné rychlosti ocelové kuličky a skleněného disku dosáhly během $0,2 \text{ s}$ hodnot $0,00177 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,0205 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnota prokluzu $\Sigma = 1,68$ byla neměnná během celého rozběhu třecích povrchů. Je zřejmé, že hodnoty rychlostí a zrychlení jsou poměrně nízké. Přesto tyto podmínky dovolily detailně sledovat postupné utváření mazacího filmu a změny v jeho tloušťce.

6.1.1 Experimenty při rozběhu nemodifikovaných třecích povrchů

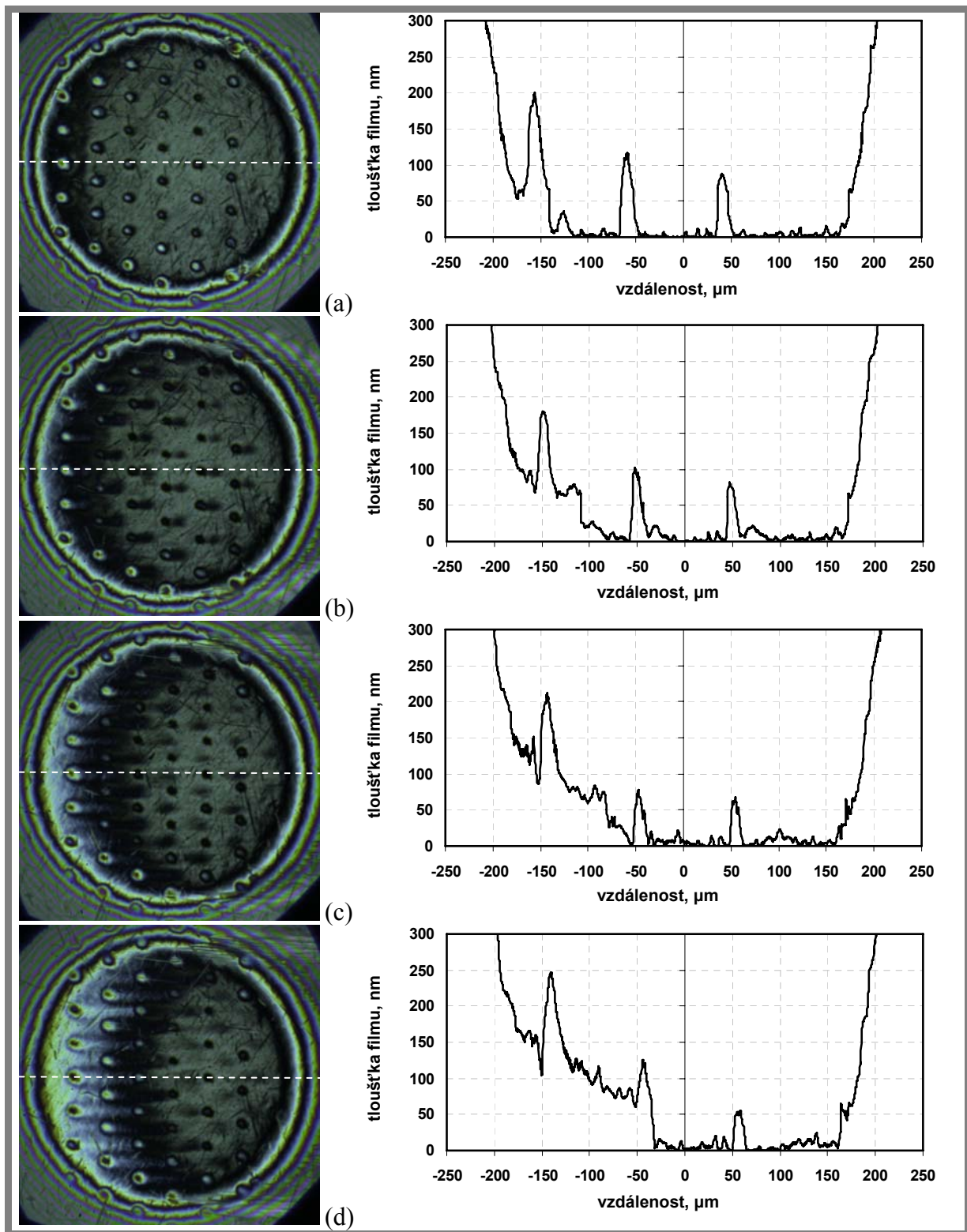
6.1.1

Na obrázku 6.1 je série chromatických interferogramů a odpovídající profil tloušťky mazacího filmu ve směru pohybu kuličky. Chromatické interferogramy byly zaznamenány v čase $38,8 \text{ ms}$ (Obr. 6.1a), $42,2 \text{ ms}$ (Obr. 6.1b), $46,7 \text{ ms}$ (Obr. 6.1c), $51,1 \text{ ms}$ (Obr. 6.1d) po rozběhu třecích povrchů. Během nárůstu rychlosti třecích povrchů se v kontaktu postupně vytváří klínová vrstva mazacího filmu. V mazacím filmu můžeme pozorovat přítomnost schodu v tloušťce filmu. Tento schod se vytvoří právě v okamžiku rozběhu třecích povrchů. Podobné chování mazacího filmu a vytvoření schodovitěho tvaru při rozběhu třecích povrchů popsali R. P. Glovnea s H. A. Spikes [39]. Schodovitý tvar lze pozorovat přibližně 60 ms po rozběhu třecích povrchů, tomu odpovídá vzdálenost poloviny průměru Hertzova kontaktu. Posléze tento schod zanikne, což může být způsobeno podmínkami prokluzu třecích ploch. Vytvoření druhého schodu nebylo při nízkých hodnotách zrychlení

pozorováno. Z experimentu je zřejmé, že při rozběhu třecích ploch s prokluzem není část kontaktu oddělena souvislou vrstvou mazacího filmu, a dochází tak k vzájemnému styku třecích ploch. Přestože se tato oblast styku třecích ploch zmenšuje během rozběhu třecích povrchů, představuje možné riziko poškození.



Obr. 6. 1 Chromatické interferogramy a profil tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů [68].

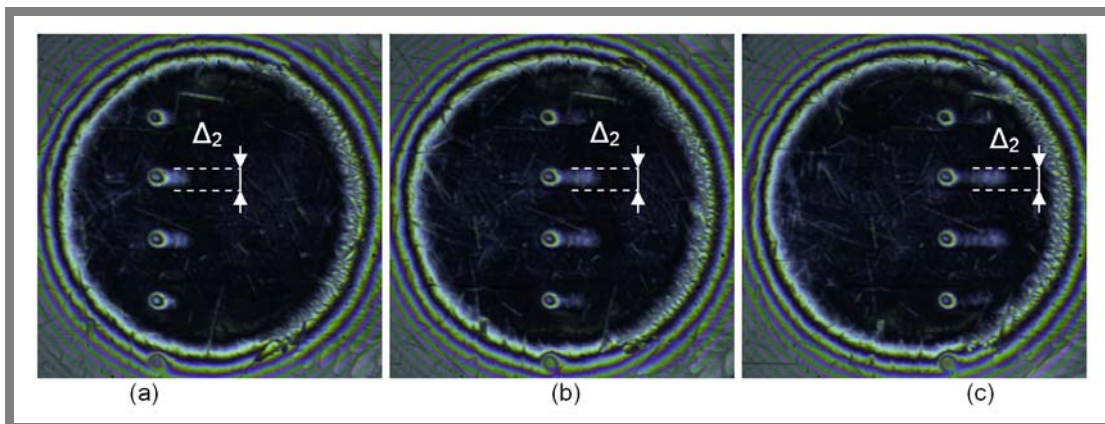


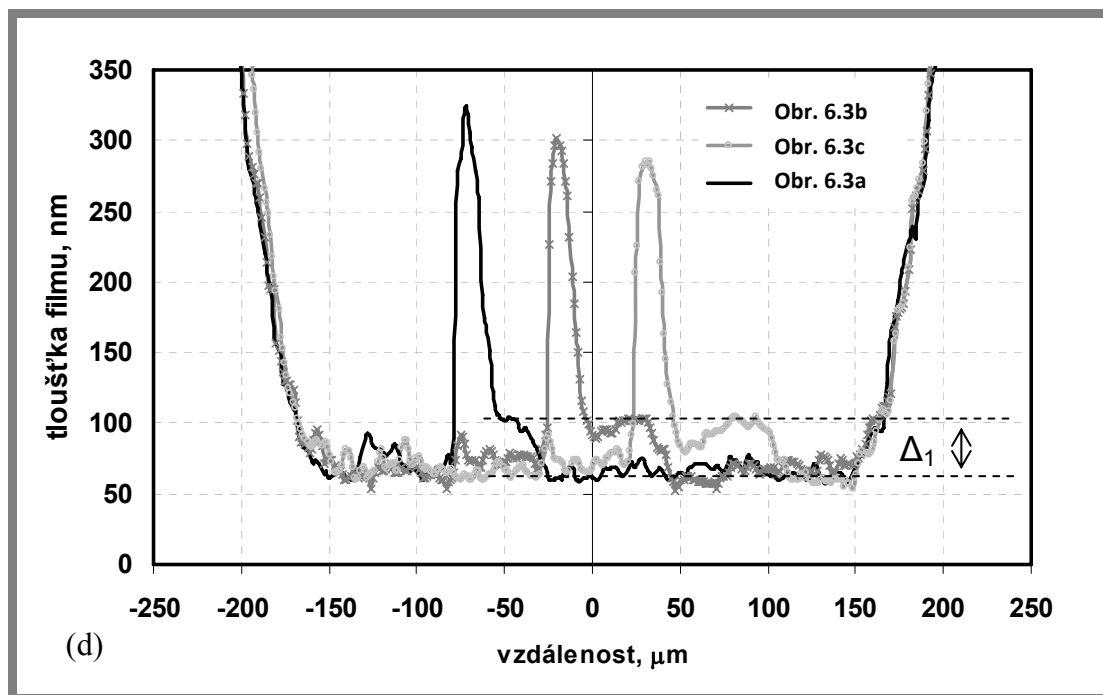
Obr. 6. 2 Chromatické interferogramy a profil tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů s cílenou topografií povrchu [68].

6.1.2 Experimenty při rozběhu třecích povrchů s cíleně modifikovanou topografií

Stejná série chromatických interferogramů během rozběhu byla pořízena pro povrch s maticí mikrovrtisků (Obr. 6.2). Je zřejmé, že mazivo je během rozběhu třecích povrchů vytlačováno z mikrovrtisků ve směru pohybu ocelové kuličky a skleněného disku. Vytlačené mazivo následně zvyšuje tloušťku mazacího filmu a redukuje vzájemné ovlivňování třecích povrchů. Tento jev můžeme pozorovat kvalitativně z pořízených chromatických interferogramů a kvantitativně z vyhodnocených profilů tloušťky filmu. Zvětšení tloušťky mazacího filmu ve směru pohybu dosahuje přibližně 20 nm, což pomáhá efektivněji oddělit třecí povrchy. Chování mazacího filmu vytlačeného z mikrovrtisku při průchodu kontaktem je však poněkud odlišné ve srovnání s předchozím studiem hladkých povrchů [61] a povrchů s texturou [60], kde výška a šířka oblasti se zvětšenou tloušťkou mazacího filmu zůstává téměř nezměněná při průchodu kontaktem.

Obrázek 6.3 podrobně popisuje tento vliv mělkého mikrovrtisku na tloušťku mazacího filmu při průchodu kontaktem. Z obrázku je zřejmé, že třecí povrchy jsou odděleny souvislou vrstvou maziva. Hloubka mikrovrtisku se snižuje (Obr. 6.3d) při průchodu kontaktem a zároveň s vytlačováním maziva z mikrovrtisku. Přesto se výška Δ_1 a šířka Δ_2 oblasti se zvětšenou tloušťkou mazacího filmu poblíž mikrovrtisku významně nemění při průchodu napříč kontaktem. Tento efekt by mohl být přisuzován tlaku uvnitř Hertzova kontaktu. Tento tlak je dostatečně vysoký, aby zvýšil viskozitu maziva do té míry, že se mazivo chová jako pevná látka.

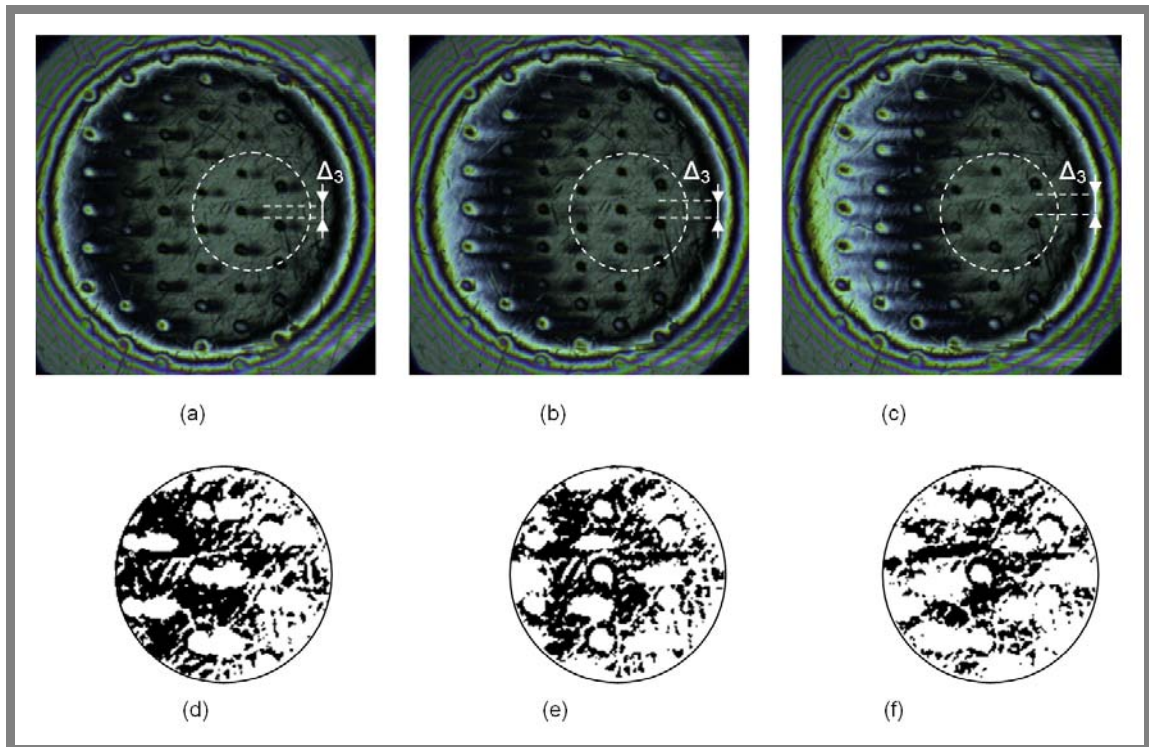




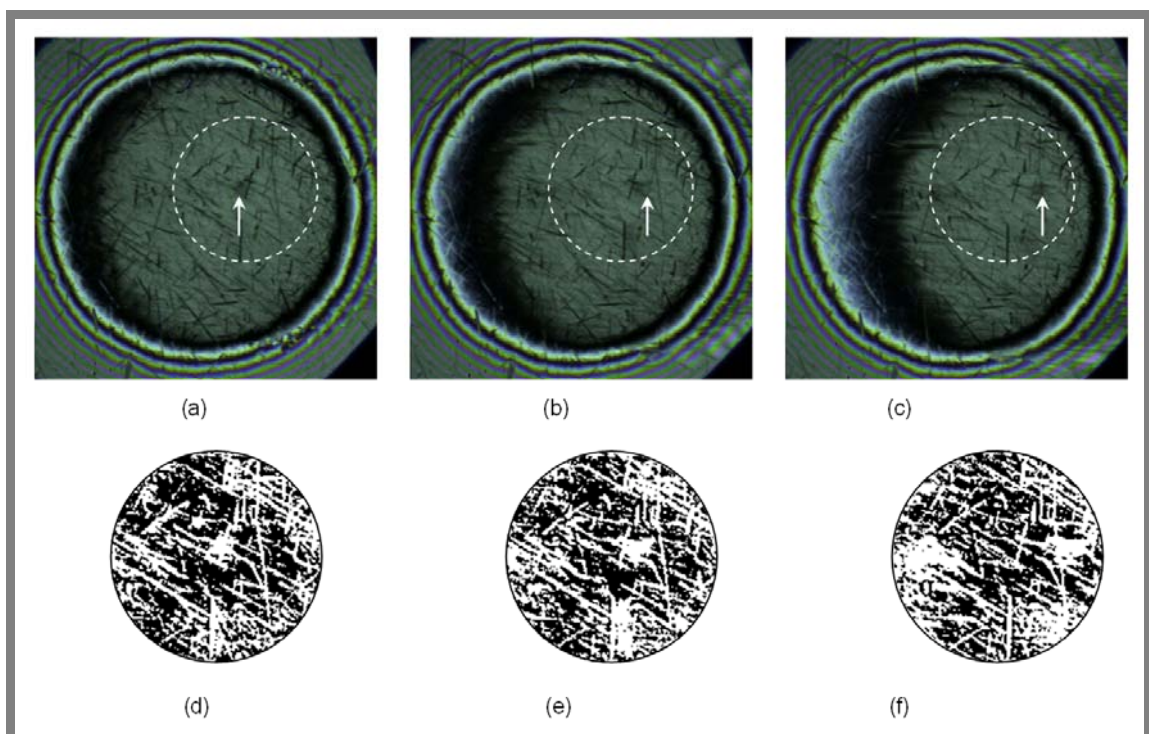
Obr. 6. 3 Vliv mikrovrtisku na tloušťku mazacího filmu pro EHD kontakt [68].

Tento efekt ale nenastane, pokud není utvořena souvislá vrstva mazacího filmu v kontaktu a třecí povrchy se dotýkají svými nerovnostmi povrchu. V tomto případě je zatížení přenášeno drsnostmi povrchu a částečně i mazivem. Bylo zjištěno, že přítomnost mělkých povrchových nerovností může napomoci lépe oddělit třecí povrchy při smíšeném mazání, než je tomu u hladkých povrchů. V tomto případě kolísá rozložení tlaku v kontaktu v závislosti na struktuře třecího povrchu [69]. Výtok maziva z povrchových nerovností je tedy snadnější při smíšeném mazání kvůli místnímu snížení tlaku v nejbližším okolí těchto nerovností povrchu. Tento jev popisuje obrázek 6.4. Počáteční šířka lokálně zvětšené tloušťky mazacího filmu Δ_3 je přibližně stejná jako v případě dokonale oddělených třecích povrchů. Avšak při průchodu napříč kontaktem se oblast vytlačeného maziva z mikrovrtisku zvětšuje. Obrázky 6.4d až 6.4f zobrazují kvalitativně tento efekt uvnitř vybrané kruhové oblasti. Bílé body odpovídají hodnotám tloušťky mazacího filmu nad 2 nm, můžeme tedy konstatovat, že jsou třecí povrchy kompletně odděleny vrstvou maziva. To znamená, že se oblast s oddělenými třecími povrchy zvyšuje (Obr. 6.4d – 56 %, Obr. 6.4e – 61 % a Obr. 6.4f – 68 %) s rostoucím počtem bílých bodů. Toto studium utváření mazacího filmu je důležité nejen pro cíleně modifikované povrchy, ale hlavně také pro lepší porozumění chování reálné topografie povrchu při smíšeném mazání. Množství maziva vytlačeného z mělkých povrchových nerovností je v obou případech stejné. Oblast se zvětšenou tloušťkou mazacího filmu uvnitř hladkého kontaktu je menší a lokální tloušťka mazacího filmu je vyšší. Během rozběhu třecích povrchů při podmínkách smíšeného mazání je ovlivněná oblast větší a tloušťka filmu naopak nižší.

Experimenty s cíleně modifikovanou topografií třecích povrchů představují nový způsob zmenšení vzájemného styku třecích povrchů při smíšeném mazání. Tyto experimenty také ukazují na chování reálné topografie třecích povrchů.

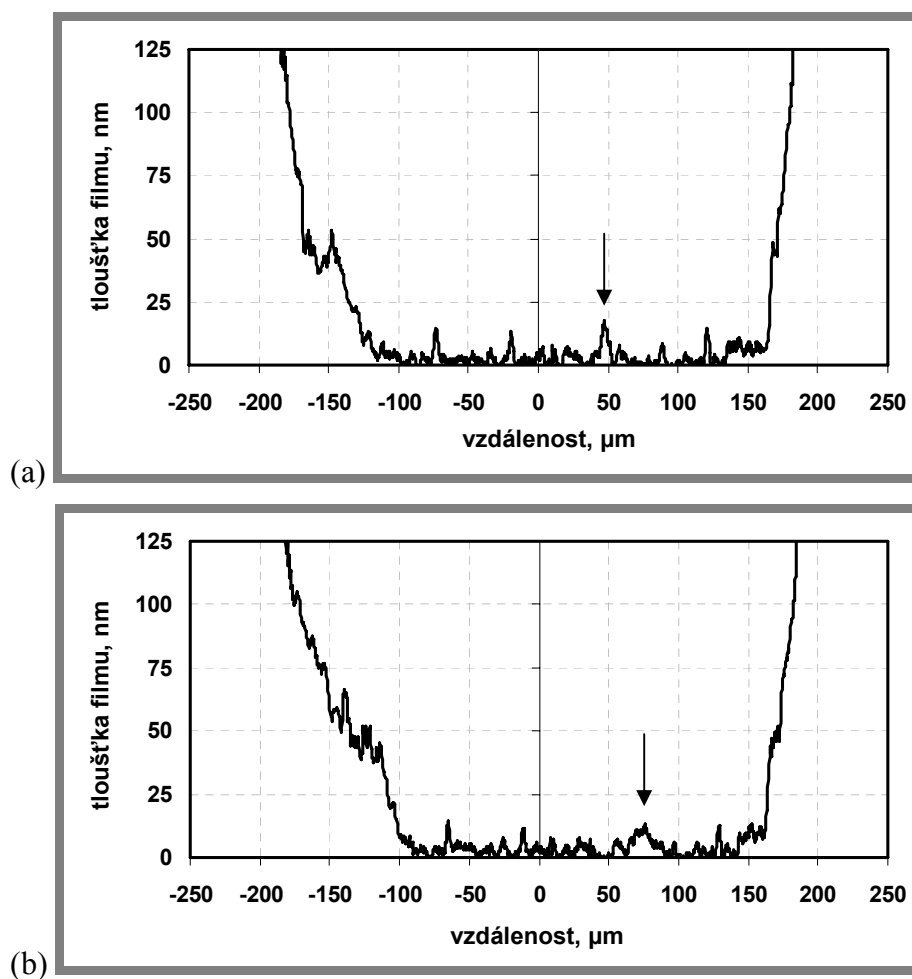


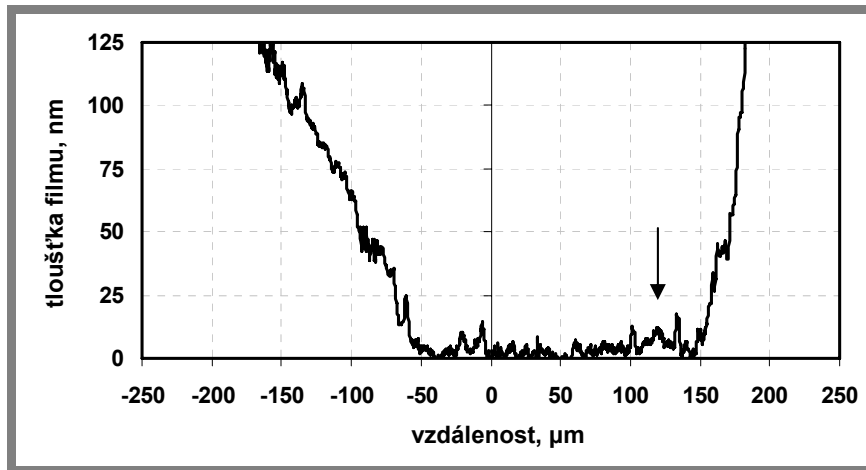
Obr. 6. 4 Chromatické interferogramy a mapy tloušťky mazacího filmu pro reálný kontakt s mikrovrtisky [68].



Obr. 6. 5 Chromatické interferogramy a mapy tloušťky mazacího filmu pro reálný kontakt [68].

Obrázek 6.5 popisuje tento efekt na reálném třecím povrchu ocelové kuličky během rozběhu třecích povrchů. Interpretace výsledků bude stejná jako na obrázku 6.4. V tomto případě jsou nerovnosti na povrchu ocelové kuličky vytvořeny během dokončovacích operací při obrábění. Již v předchozích studiích [70] bylo prokázáno, že tyto drobné povrchové nerovnosti mohou zvýšit tloušťku mazacího filmu. Během rozběhu třecích povrchů je možné sledovat v chromatických interferogramech přítomnost tmavších míst, které se posunují skrz kontakt, kde jsou třecí plochy ještě ve vzájemném styku. Tyto tmavší body odpovídají oblastem se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu a jsou vytlačovány z mělkých povrchových nerovností. Toto chování je samozřejmě spojeno s prokluzem třecích povrchů. Na obrázcích 6.5a až 6.5c je přítomnost těchto oblastí naznačena pomocí šipek. Protože mazivo prochází kontaktem rychleji než povrch ocelové kuličky, můžeme pozorovat tento nárůst tloušťky mazacího filmu ve směru pohybu od povrchové nerovnosti, která toto mazivo vytlačuje. Tloušťku mazacího filmu můžeme sledovat na obrázcích 6.5d až 6.5f. Toto chování můžeme sledovat na bílých oblastech obrázku 6.5. Bílé body opět představují tloušťku filmu nad 2 nm. Na těchto mapách můžeme snadno rozeznat dvě další oblasti s větší tloušťkou mazacího filmu. Tyto oblasti se vyskytují na levé straně a ve spodní oblasti kruhové mapy. Tuto závislost mělké nerovnosti povrchu ocelové kuličky na množství vytlačeného maziva je lepší sledovat podrobněji na obrázku 6.6.



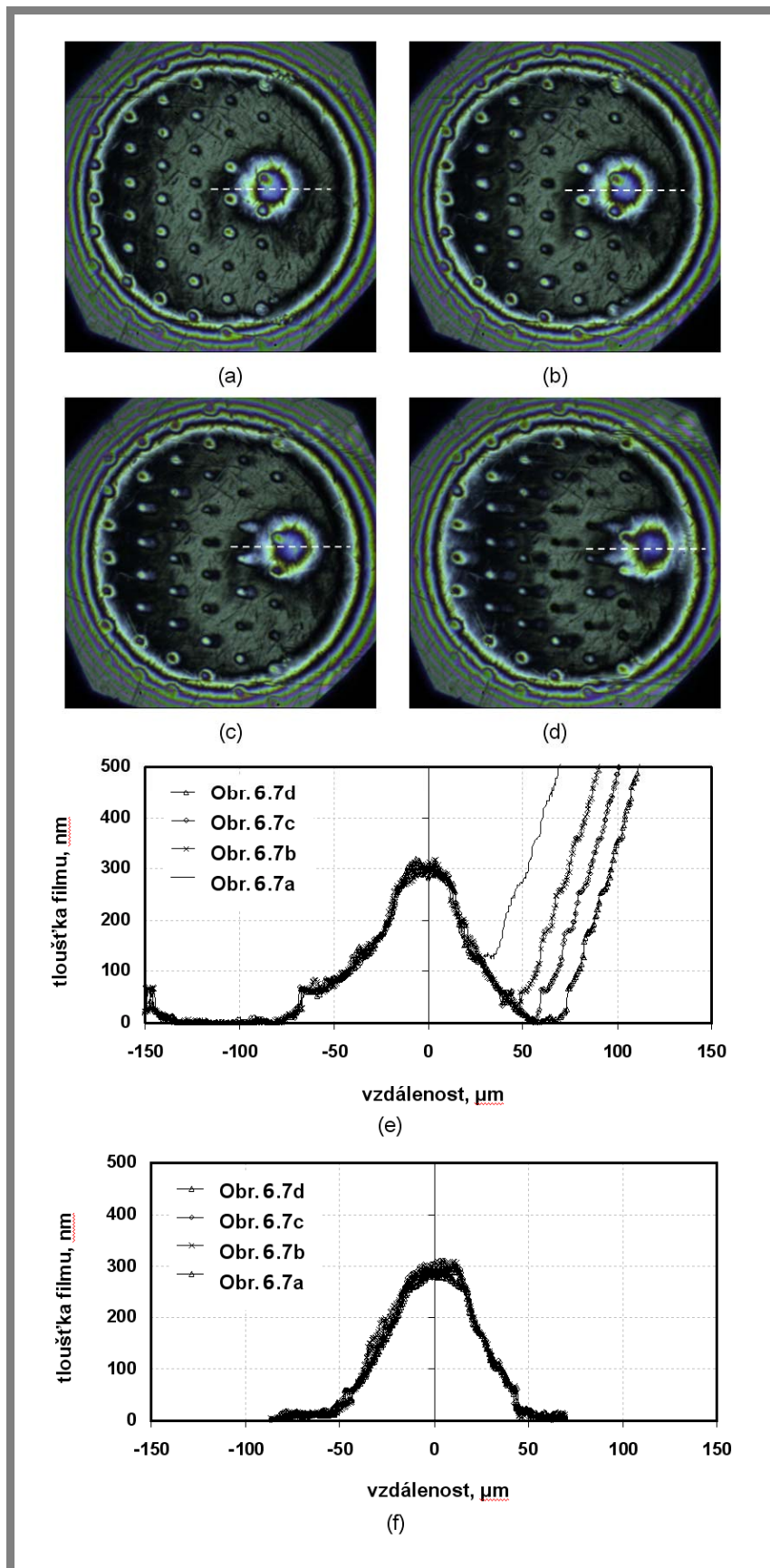


(c)

Obr. 6. 6 Profil tloušťky mazacího filmu znázorňující vliv mělké povrchové nerovnosti na reálném povrchu [68].

Šipka na obrázku 6.6a označuje pozici mělké povrchové nerovnosti v okamžiku, kdy se třecí povrchy rozbíhají s konstantním prokluzem 1,68. Obrázky 6.6b a 6.6c naznačují, jak je mazivo vytlačováno z povrchové nerovnosti. Tento nárůst tloušťky mazacího filmu pomáhá oddělit třecí povrchy.

Další série experimentů byla zaměřena na efekt kontaktního tlaku a chování nerovností povrchu. Jak již bylo naznačeno, při podmínkách smíšeného mazání je významné kolísání tlaku uvnitř kontaktu způsobeno povrchovými nerovnostmi. Tento nárůst a pokles tlaku v nejbližším okolí mělkých nerovností povrchu ovlivňuje chování maziva. Obrázek 6.7 ukazuje takovéto chování zachyceného maziva o tloušťce asi 300 nm a průměru přibližně 100 μm během rozběhu třecích povrchů. Tato oblast byla vytvořena náhlým stlačením skleněného disku na ocelovou kuličku. Přítomnost zachyceného maziva uvnitř kruhového kontaktu má za následek lokální zvýšení kontaktního tlaku a ztuhnutí maziva v kontaktu. Takto zachycené mazivo prochází kontaktem. Na chromatických interferogramech lze pozorovat, že toto zachycené mazivo projde kontaktem téměř bez výrazných změn. Tloušťka a průměr zachyceného maziva se tedy nemění, zatímco mazivo zachycené v mikrotiscích je vytlačováno do kontaktu. Tento experiment napomohl k objasnění výše uvedených rozdílů v chování maziva vytlačovaného z povrchu při EHL a smíšeném mazání.



Obr. 6. 7 Chování zachyceného maziva během rozběhu třecích povrchů [68].

7 VLIV TOPOGRAFIE NA UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU PŘI REVERZACI TŘECÍCH POVRCHŮ

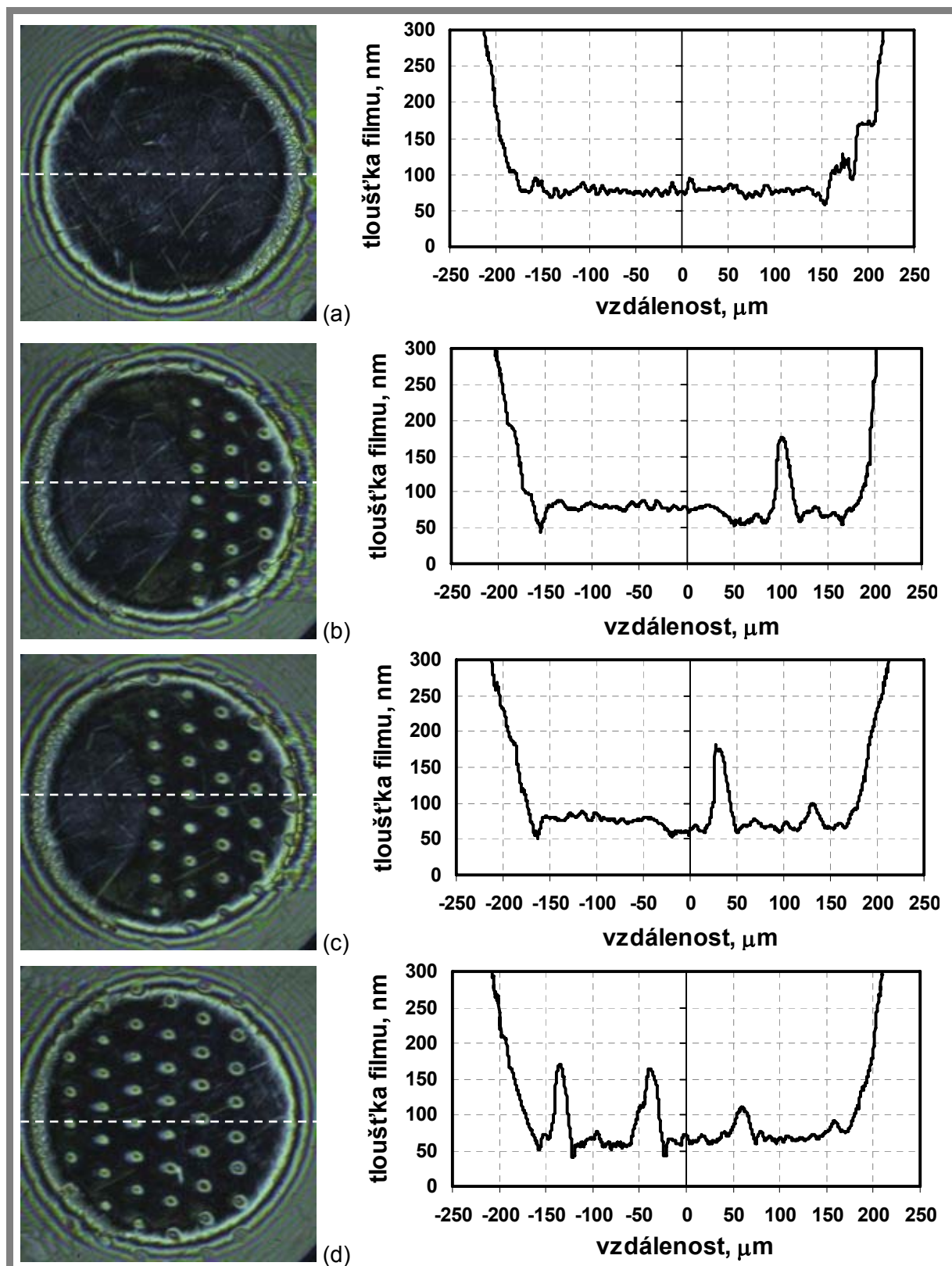
Reverzace třecích povrchů představuje jeden z přechodových jevů se zvýšeným rizikem poškození třecích povrchů, který se běžně vyskytuje u strojních soustav. Experimenty byly zaměřeny na porovnání chování uměle vytvořených a skutečných nerovností nekonformních povrchů.

7.1 Popis experimentu

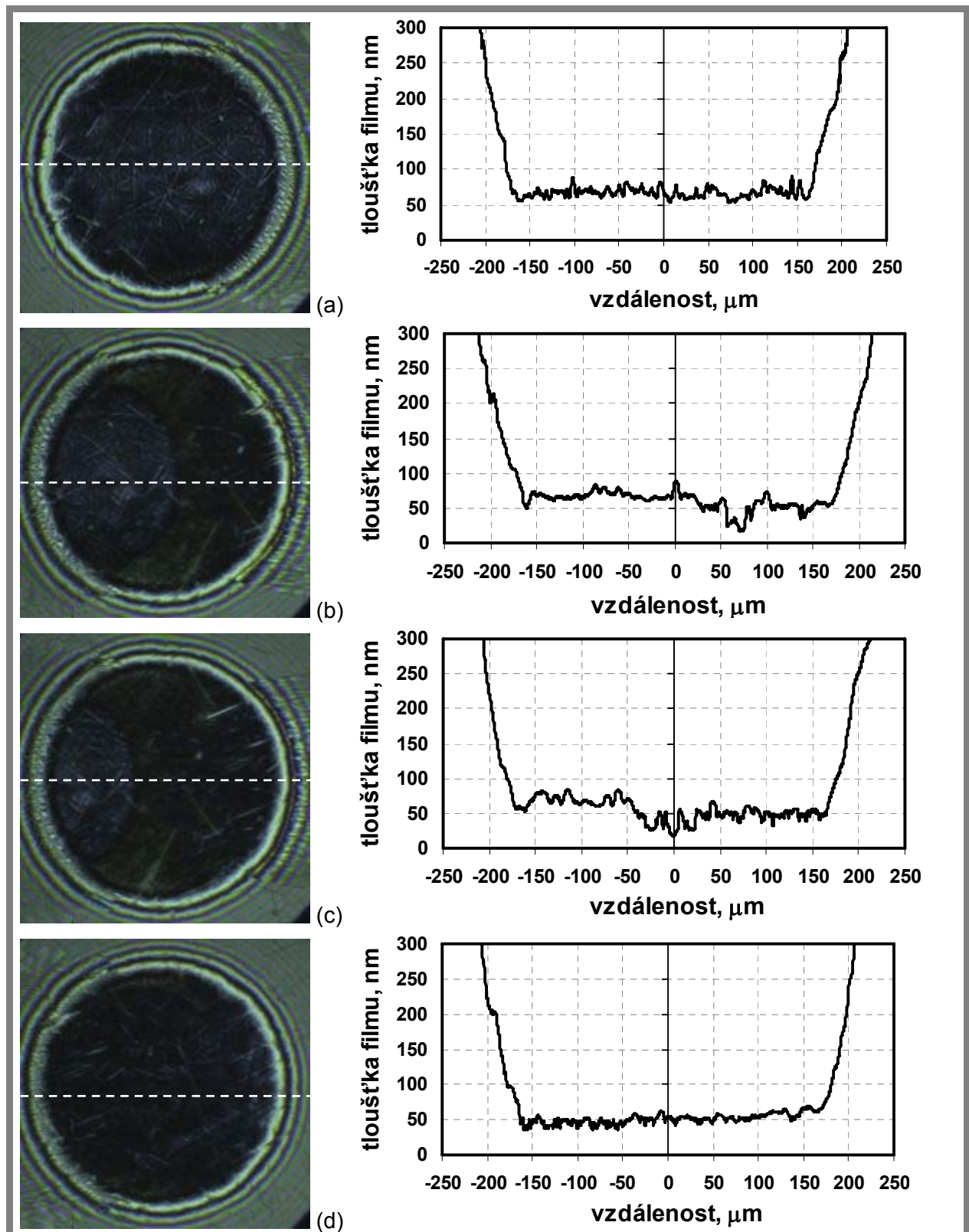
Byla provedena řada experimentů s cíleně vytvořenými mikrovrtisky na kuličce za nestacionárních provozních podmínek. Mikrovrtisky na kuličce byly vytvořeny pomocí diamantového hrotu. Experimenty byly provedeny se základovým minerálním olejem LSBS za pokojové teploty 25 °C. Při této teplotě má olej dynamickou 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 prokluzu Σ (5).

7.2 Série experimentů s uměle vytvořenými mikrovrtisky na kuličce

Na obrázku 7.1 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 obrázku 7.1a 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. 7.1b) 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. 7.1c) se 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. 7.1d) 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.



Obr. 7. 1 Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu s cíleně modifikovanou topografií kuličky, (mikrovtisky: hloubka 250 nm, rozteč 50 μm , základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms, $F = 22$ N, $u_B = 0,00265$ ms $^{-1}$, $u_D = 0,00443$ ms $^{-1}$) [72].

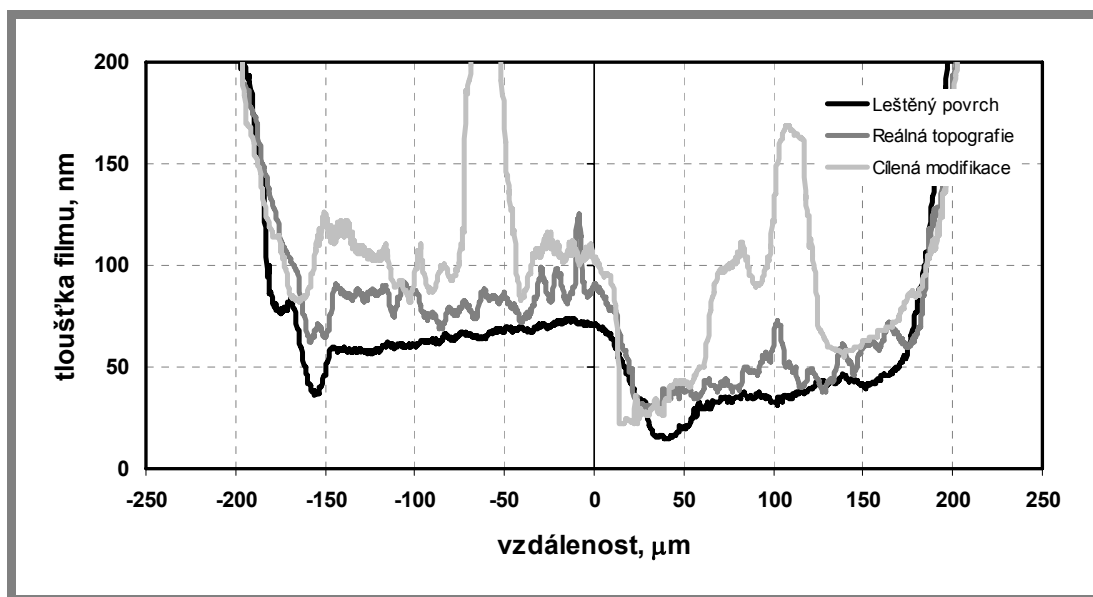


Obr. 7. 2 Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu na reálné kuličce, (základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms, $F = 22$ N, $u_B = 0,00265$ ms⁻¹, $u_D = 0,00443$ ms⁻¹) [72].

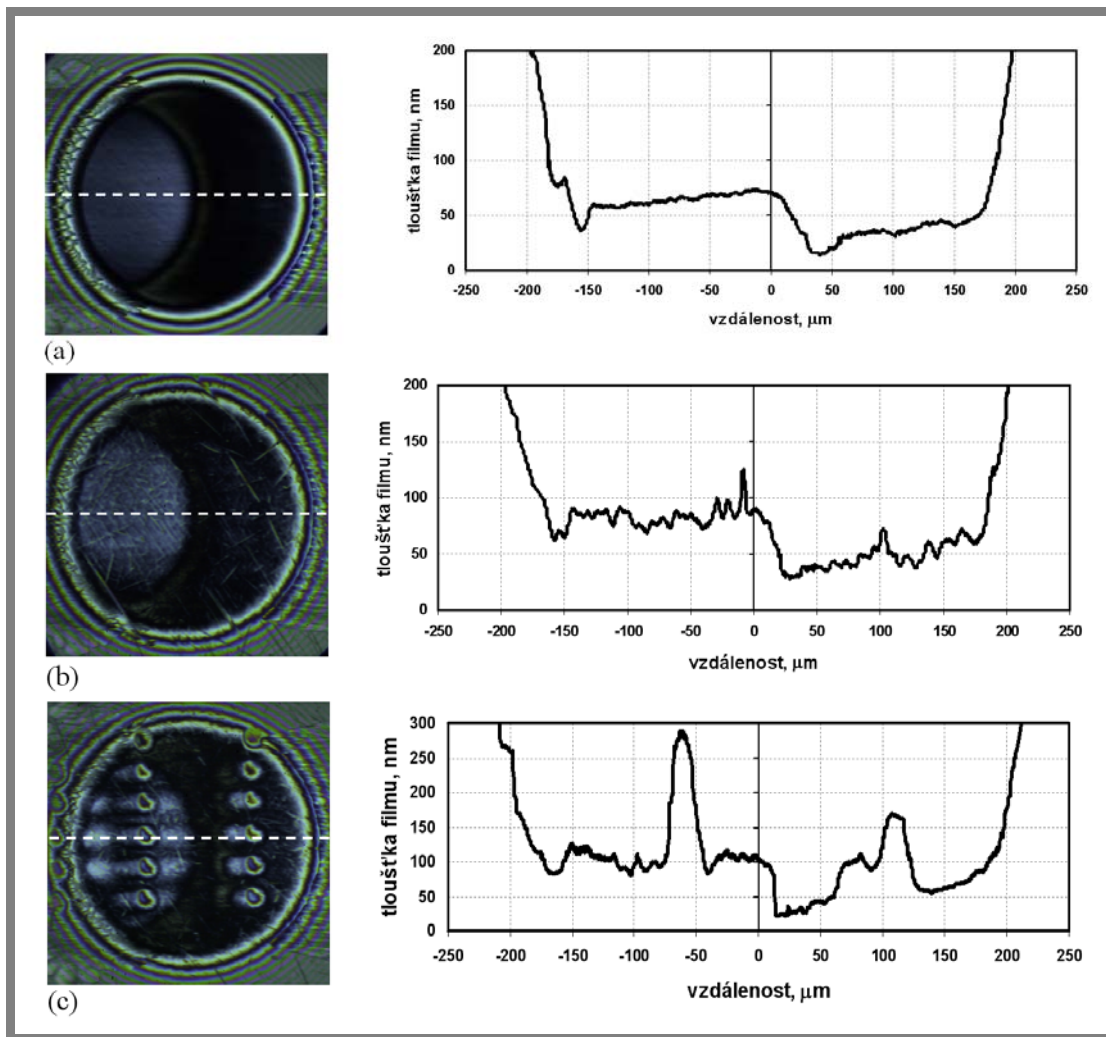
7.3 Série experimentů na reálném povrchu kuličky

Sérii chromatických interferogramů na reálném povrchu kuličky bez cílené topografie povrchu popisuje obrázek 7.2. Byla použita komerčně dodávaná kulička s náhodně umístěnými nerovnostmi povrchu vzniklými při obrábění, jejichž hloubka, šířka a uspořádání tvoří převládající povrchovou texturu s $R_a = 0,018 \mu\text{m}$. 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. 7.2a); 75 ms (Obr. 7.2b); 97,7 ms (Obr. 7.2c); 188,6 ms (Obr. 7.2d) po reverzaci pohybu. V čase začátku reverzace, kdy jsou rychlosti třecích povrchů nulové (Obr. 7.2a), 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. Výrazné snížení tloušťky filmu po reverzaci pohybu popisuje obrázek 7.2b – 7.2c, 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. 7.2d) až na hodnoty, které byly pozorovány před reverzací třecích ploch.

Pro lepší popis vlivu topografie třecího povrchu na tloušťku mazacího filmu během reverzace třecích povrchů byly realizovány následující experimenty. Na obrázku 7.3 a 7.4 jsou zachyceny tři různé topografie třecího povrchu (leštěný, reálný, reálný s cílenou topografií) během reverzace třecích povrchů. Vstupní podmínky (rychlosti třecích povrchů, zatížení, prokluz) jsou pro všechny tři případy stejné. Ve stejném okamžiku po reverzaci třecích povrchů je vyhodnocena tloušťka mazacího filmu.



Obr. 7.3 Profil tloušťky filmu: leštěný povrch kuličky, reálná topografie kuličky, reálná topografie kuličky s mikrovrtisky.



Obr. 7. 4 Chromatické interferogramy profilu filmu (a) leštěný povrch kuličky, (b) reálná topografie kuličky, (c) reálná topografie kuličky s mikrovrtisky.

Při vhodném návrhu rozměrů mikrovrtisků a jejich uspořádání v kontaktu by tento přístup mohl napomoci zamezit náhlému snížení tloušťky mazacího filmu při reverzaci třecích povrchů. Při experimentech bylo zjištěno, že v průběhu celého cyklu nedochází k prolomení mazacího filmu a třecí povrchy jsou separovány souvislou vrstvou maziva.

Disertační práce shrnuje výsledky experimentálního studia zaměřeného na rozběh a reverzaci třecích povrchů s cíleně modifikovanou a reálnou topografií povrchu za podmínek prokluzu třecích povrchů. Vysokorychlostní CMOS barevná kamera umožnila zaznamenat postupné utváření tenkého mazacího filmu a tak sledovat přechodové jevy v mazaném kontaktu. Při rozběhu třecích povrchů bylo pozorováno typické utváření mazacího filmu s klínovým nárůstem, zatímco ve zbývající části kontaktu byly třecí povrchy ve vzájemné interakci. Cílem práce bylo zejména ukázat vliv topografie třecích povrchů na utváření mazacího filmu. Získané výsledky prokázaly, že mělké mikro-důlky na třecích površích mohou efektivně snížit riziko kontaktu třecích povrchů a tím i přispět ke snížení tření a následného opotřebení. Bylo zjištěno, že přítomnost mělkých povrchových mikrovrtisků a mikronerovností může napomoci oddělit třecí povrchy efektivněji, než je tomu u hladkých povrchů. Mazivo vytlačované z mikrovrtisků a mikronerovností se může ve smíšeně mazaném kontaktu šířit snadněji díky místnímu snížení tlaku v nejbližším okolí těchto mělkých mikrovrtisků nebo mikronerovností. Je tedy zřejmé, že topografie povrchu hraje velmi důležitou roli během rozběhu třecích povrchů při podmínkách prokluzu. Vhodně navržená topografie třecích povrchů může napomoci redukovat styk třecích těles během těchto přechodových stavů.

V rámci studia přechodových jevů byla experimentálně studována i reverzace třecích povrchů [71, 72]. Při experimentech na reálném i cíleně modifikovaném povrchu kuličky bylo zjištěno, že v průběhu celého cyklu nedochází k prolomení mazacího filmu a třecí povrchy jsou separovány souvislou vrstvou maziva. 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. Bylo prokázáno, že reverzace třecích povrchů nepředstavuje vážnější riziko pro mazané třecí povrchy, a proto jsou výsledky tohoto studia popsány v disertační práci jen okrajově.

Při řešení disertační práce byly splněny všechny dílčí cíle, což umožnilo splnit i celkový cíl disertační práce a experimentálně objasnit procesy, které probíhají při smíšeném mazání během rozběhu a reverzace třecích povrchů na vzorcích s cíleně modifikovanou a reálnou topografií.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	1	bezrozměrný parametr šířky mikrovrtisku, dR_x/a^2
E_1, E_2	Pa	Youngův modul pružnosti třecího povrchu 1, resp. 2
E'	Pa	redukovaný modul pružnosti, $2/[(1-\nu_1^2)/E_1+(1-\nu_2^2)/E_2]$
F	N	síla
G	1	bezrozměrný parametr materiálů, $\alpha E'$
H	1	bezrozměrná tloušťka mazacího filmu, h/R
H_c	1	bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu, h_c/R_x
H_{min}	1	bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu, h_{min}/R_x
M	1	bezrozměrný parametr zatížení (Moes), $W(U)^{-0,75}$
L	1	bezrozměrný parametr materiálů (Moes), $G(U)^{0,25}$
R_x	m	redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy x , $r_{1x}r_{2x}/(r_{1x}+r_{2x})$
U	1	bezrozměrný parametr rychlosti, $\eta_0 u/E'R_x$
W	1	bezrozměrný parametr zatížení, $F/E'R_x^2$
Σ	1	poměr valení/prokluz, $2(u_D-u_B)/(u_D+u_B)$
λ	1	parametr mazání
$\Delta_{1,2}$	nm	místní pokles/nárůst tloušťky mazacího filmu
X, Y	1	bezrozměrné souřadnice Kartézského souřadného systému, x/a
a	m	délka hlavní poloosy bodového kontaktu
b	m	délka vedlejší poloosy bodového kontaktu
f	Hz	frekvence
h	m	tloušťka mazacího filmu
h_c	m	centrální tloušťka mazacího filmu
h_{min}	m	minimální tloušťka mazacího filmu
k	1	parametr elipticity, a/b ev. $1,03(R_y/R_x)^{0,64}$
p	Pa	tlak ve vrstvě maziva
r_{1x}, r_{2x}	m	poloměr třecího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy x
u	$m \cdot s^{-1}$	průměrná rychlost ve směru osy x
u_B	$m \cdot s^{-1}$	rychlost třecího povrchu ocelové kuličky
u_D	$m \cdot s^{-1}$	rychlost třecího povrchu skleněného disku
w	$N \cdot m^{-1}$	normálová liniová síla
x, y, z	m	souřadnice Kartézského souřadného systému bodu v kontaktní oblasti
α	Pa^{-1}	viskozitně-tlakový koeficient
η	Pa.s	dynamická viskozita
η_0	Pa.s	dynamická viskozita při nulovém tlaku
ν_1, ν_2	1	Poissonova konstanta třecího povrchu 1, resp. 2

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2. 1 Tloušťka mazacího filmu a rozložení tlaku v EHD mazaném kontaktu [2].	12
Obr. 2. 2 Příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles [5].	13
Obr. 2. 3 Tvar třecích těles v mazaném kontaktu [10].	14
Obr. 2. 4 Rozložení tloušťky a tlaku EHD mazacího filmu v kruhovém kontaktu pro $F = 22,2 \text{ N}$ a $u = 0,33 \text{ m.s}^{-1}$ [16].	15
Obr. 2. 5 Tloušťka filmu při dynamických podmínkách [27].	16
Obr. 2. 6 Průběh tloušťky mazacího filmu a tlaku v osmi okamžicích po náhlém zvýšení otáček [30].	17
Obr. 2. 7 Zařízení pro měření tloušťky mazacího filmu [32].	18
Obr. 2. 8 Experimentální zařízení pro studium mazacích filmů za neustálých provozních podmínek [34].	19
Obr. 2. 9 Experimentální podmínky: (a) rychlé zastavení, (b) zapnutí – vypnutí, (c) vratný pohyb, (d) akcelerace – decelerace [34].	19
Obr. 2. 10 Změna v EHD centrální tloušťce mazacího filmu při náhlém zastavení otáček z rychlosti $41,2 \text{ mm.s}^{-1}$, (SN150, $25 \text{ }^\circ\text{C}$) [34].	20
Obr. 2. 11 Změna (a) rychlosti, (b) EHD centrální tloušťky filmu v čase při opakovaném zapnutí a vypnutí stroje (SN 100, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 Hz , $78,8 \text{ mm.s}^{-1}$). [34].	20
Obr. 2. 12 Změna (a) rychlosti a (b) EHD centrální tloušťky filmu v čase při zrychlování a zpomalování třecích povrchů (SN 150, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $0,1 \text{ Hz}$, $0-165 \text{ mm.s}^{-1}$) [34].	21
Obr. 2. 13 Změny v tloušťce mazacího filmu při reverzibilním pohybu třecích povrchů [37].	21
Obr. 2. 14 Srovnání minimální tloušťky filmu s teoretickým řešením [37].	22
Obr. 2. 15 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů pro olej BS, (a) čisté valení, (b) čistý prokluz. [38].	22
Obr. 2. 16 Interferogramy kontaktu při rozběhu třecích povrchů pro HVI650, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, 5 m.s^{-2} [39].	23
Obr. 2. 17 Experimentální zařízení pro studium vratného pohybu třecích povrchů [40].	23
Obr. 2. 18 Srovnání experimentálního a teoretického řešení ($f = 7.78 \text{ Hz}$, $L = 1 \text{ mm}$) [40].	24
Obr. 2. 19 Schéma experimentálního zařízení [38].	25
Obr. 2. 20 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů pro olej TN320, (a) čisté valení, (b) čistý prokluz [38].	26
Obr. 2. 21 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů za čistého prokluzu se zachyceným mazivem uvnitř v kontaktu, $\Sigma = 2$, (a) olej BS, (b) olej 5P4E [38].	26
Obr. 2. 22 Schéma experimentálního zařízení [39].	27
Obr. 2. 23 (a) Zvýšení rychlosti při rozdílných akceleracích pro čistý prokluz. (b) centrální tloušťka filmu při rozdílných akceleracích pro olej HVI650 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ [39].	27
Obr. 2. 24 Tloušťka filmu při rozběhu třecích povrchů pro olej HVI650 ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) při akceleraci (a) 50 m.s^{-2} , (b) 10 m.s^{-2} [39].	28
Obr. 2. 25 (a) Tloušťka filmu v podélném směru pro HVI650 ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) při akceleraci 5 m.s^{-2} , (b) tloušťka filmu – druhá hrana, HVI650 ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) při akceleraci 5 m.s^{-2} – čistý prokluz [39].	29

Obr. 2. 26 Profil tloušťky filmu napříč kontaktem pro olej HVI650, 80 °C, 5 m.s ⁻² [39].	29
Obr. 2. 27 Tloušťka filmu v podélném směru pro HVI650, 80 °C, 10 m.s ⁻² [39].	30
Obr. 2. 28 Tloušťka filmu v podélném směru pro PAO, 80 °C, 2,5 m.s ⁻² [39].	31
Obr. 2. 29 Tloušťka mazacího filmu v závislosti na akceleraci [39].	31
Obr. 2. 30 Porovnání centrální tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů. (a) experimentální řešení. (b) numerické řešení. (..... 50 m.s ⁻² , - - - 20 m.s ⁻² , -.-.-.-. 10 m.s ⁻² , ---- 5 m.s ⁻²) [45].	32
Obr. 2. 31 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci 50 m.s ⁻² , (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].	33
Obr. 2. 32 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci 10 m.s ⁻² . (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].	33
Obr. 2. 33 Porovnání tloušťky filmu při rozběhu třecích povrchů pro akceleraci 5 m.s ⁻² , (a) experimentální řešení, (b) numerické řešení [45].	34
Obr. 2. 34 Interferogramy kontaktu při rozběhu třecích povrchů pro 5 m.s ⁻² [45].	34
Obr. 2. 35 Schéma zatěžovacího systému [49].	35
Obr. 2. 36 Konformně zakřivený povrch [50].	36
Obr. 2. 37 Laser Surface Texturing pro různé materiály: (a) Kobalt-chrom (b) Titan s laserem vytvořenou texturou [51].	37
Obr. 2. 38 Negativ mikrodůlku [54].	37
Obr. 2. 39 Nekonformně zakřivený povrch [50].	38
Obr. 2. 40 Rozložení tlaku a tloušťky mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů [56].	38
Obr. 2. 41 Rozložení tloušťky a tlaku v kontaktu při různých tvarech topografie třecích povrchů [57].	40
Obr. 2. 42 Srovnání průměrné centrální tloušťky mazacího filmu pro různé tvary topografie třecích povrchů [57].	40
Obr. 2. 43 Srovnání minimální tloušťky mazacího filmu pro různé tvary topografie třecích povrchů [57].	41
Obr. 2. 44 Chromatický interferogram a tloušťka mazacího filmu pro $u = 0.027 \text{ m.s}^{-1}$, $\Sigma = -0.5$ (a), 0 (b), +0.5 (c) [61].	42
Obr. 2. 45 Chromatický interferogram, profil tloušťky filmu zobrazující efekt mělkého mikrovrtisky při smíšeném a 2D profil kontaktu ($u = 0,0013 \text{ m.s}^{-1}$, $\Sigma = +0,5$) [60].	43
Obr. 2. 46 Chromatický interferogram, profil tloušťky filmu zobrazující efekt mělkého mikrovrtisky při smíšeném a 2D profil kontaktu ($u = 0,0013 \text{ m.s}^{-1}$, $\Sigma = -0,5$) [60].	43
Obr. 2. 47 Pokles tloušťky mazacího filmu Δ , u_k – rychlost kuličky s texturou, u_d – rychlost skleněného kotouče [58].	44
Obr. 2. 48 Mikrodůlek získaný za pomoci femtosekundového pulzního laseru (200 pulzů, $0,71 \text{ J.cm}^{-2}$) [59].	44
Obr. 2. 49 Vliv hlubokého a mělkého mikrodůlku na tloušťku mazacího filmu; (a) hluboký mikrodůlek, (b) mělký mikrodůlek [59].	45
Obr. 2. 50 Povrchový mikrodůlek procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek čistého valení. Parametry řešení $M=63.8$ a $L=5.8$, polohy vtisku: $X=-1.29$, $X=-0.73$, $X=-0.30$, $X=-0.16$, $X=0.82$. Srovnání experimentálních a numerických výsledků [59].	46

Obr. 2. 51 Povrchový mikrodůlek procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek částečného prokluzu. Parametry řešení $M=63.8$ a $L=5.8$, $S=50\%$, polohy vtisku: $X=-0.93$, $X=-0.52$, $X=-0.30$, $X=-0.07$, $X=0.57$. Srovnání experimentálních a numerických výsledků [59].	47
Obr. 4. 1 Experimentální zařízení pro studium tenkých mazacích filmů [63].	49
Obr. 4. 2 (a) Světelný zdroj, (b) řídicí jednotka.	50
Obr. 4. 3 Princip dichroického zrcadla [64].	50
Obr. 4. 4 Synchronizační zařízení.	51
Obr. 4. 5 Uspořádání Bayerova filtru - 50 % zelená, 25 % červená a 25 % modrá (a), Interpolace barev z Bayerova filtru (b) [65].	51
Obr. 4. 6 Srovnání jednočipové (Bayer filtr) technologie a technologie 3CCD [66].	52
Obr. 4. 7 Pohon disku, původní řešení (a), řešení s napínacími kladkami (b).	52
Obr. 4. 8 Abbeho refraktometr (a), schéma rotačního viskozimetru (b).	53
Obr. 4. 9 Přípravek pro vytváření mikrostruktur. Jednotlivé části přípravku (1...krokový elektromotor, 2...příruba, 3...redukce, 4...hnaný hřídel (nátrubek), 5...pouzdro, 6...dvouřadé kuličkové ložisko, 7...těleso, 8...spojka, 9...gufero, 10...jednořadá kuličková ložiska, 11...měřené tělísko – kulička, 12...malý nátrubek) [67].	54
Obr. 5. 1 Chromatické interferogramy hladkého kontaktu za podmínek čistého valení ($F = 26,58$ N), $u = 0,013$ (a), $0,053$ (b), $0,079$ (c), $0,132$ (d), $0,186$ (e), $0,239$ (f), $0,292$ (g), $0,345$ (h) ms^{-1} , $\eta = 0,065$ Pa.s.	55
Obr. 5. 2 Programové prostředí Achilles.	55
Obr. 5. 3 Srovnání naměřených a vypočtených hodnot centrální tloušťky mazacího filmu.	56
Obr. 5. 4 Chromatické interferogramy kontaktu s mikrovttisky za podmínek čistého valení $F = 22$ N, $u = 0,00177$ ms^{-1} , $f = 440$ Hz, exp. = 2272 μs , rozlišení 1260x1024.	56
Obr. 5. 5 Chromatický interferogram a profil tloušťky filmu ($F = 22$ N, $u = 0,00177$ ms^{-1} , $f = 440$ Hz, exp. = 2272 μs , rozlišení 1260x1024), SUNOCO sample L.S. B/S.	57
Obr. 5. 6 Chromatický interferogram a profil tloušťky filmu při prokluzu třecích povrchů. (a) $\Sigma = -0,5$; $u_B = 0,00222$ ms^{-1} , $u_D = 0,00133$ ms^{-1} , (b) $\Sigma = +0,5$; $u_B = 0,00133$ ms^{-1} , $u_D = 0,00222$ ms^{-1} , ($F = 30$ N, $f = 450$ Hz, exp. = 2222 μs , rozlišení 1260x1024), základový minerální olej SUNOCO sample L.S. B/S.	57
Obr. 6. 1 Chromatické interferogramy a profil tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů [68].	60
Obr. 6. 2 Chromatické interferogramy a profil tloušťky filmu během rozběhu třecích povrchů s cílenou topografií povrchu [68].	61
Obr. 6. 3 Vliv mikrovttisku na tloušťku mazacího filmu pro EHD kontakt [68].	63
Obr. 6. 4 Chromatické interferogramy a mapy tloušťky mazacího filmu pro reálný kontakt s mikrovttisky [68].	64
Obr. 6. 5 Chromatické interferogramy a mapy tloušťky mazacího filmu pro reálný kontakt [68].	64
Obr. 6. 6 Profil tloušťky mazacího filmu znázorňující vliv mělké povrchové nerovnosti na reálném povrchu [68].	66
Obr. 6. 7 Chování zachyceného maziva během rozběhu třecích povrchů [68].	67

- Obr. 7. 1** Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu s cíleně modifikovanou topografií kuličky, (mikrovtisky: hloubka 250 nm, rozteč 50 μm , základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms, $F = 22$ N, $u_B = 0,00265$ ms⁻¹, $u_D = 0,00443$ ms⁻¹) [72]. 69
- Obr. 7. 2** Interferogramy a profil filmu – reverzace pohybu na reálné kuličce, (základový olej, $f = 440$ Hz, exp: 2,272 ms, $F = 22$ N, $u_B = 0,00265$ ms⁻¹, $u_D = 0,00443$ ms⁻¹) [72]. 70
- Obr. 7. 3** Profil tloušťky filmu (a) leštěný povrch kuličky, (b) reálná topografie kuličky, (c) reálná topografie kuličky s mikrovtisky..... 71
- Obr. 7. 4** Chromatické interferogramy profil filmu (a) leštěný povrch kuličky, (b) reálná topografie kuličky, (c) reálná topografie kuličky s mikrovtisky..... 72

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HAMROCK, B. T. and DOWSON, D. (1981): *Ball Bearing Lubrication: the Elastohydrodynamic of Elliptical Contacts*, John Wiley and Sons.
- [2] Skf.com – technology magazine [online], [cit. 2009-05-25]. Dostupné online na World Wide Web: <http://evolution.skf.com/img/zimg/engb/10_friction1_EN.jpg>
- [3] GÜMBEL, L. (1916): *Über geschmierte Arbeitsräder*. Z. ges. Turbinenweseu., s. 205-272.
- [4] MARTIN, H. M. (1916): *Lubrication of Gear Teeth*. *Engineering.*, s. 119-121.
- [5] HAMROCK, B. J. (1994): *Fundamentals of Fluid Film Lubrication.*, New York, McGraw-Hill, Inc., s. 2.
- [6] LUBRECHT, A.A., TEN NAPEL, W.E. and BOSMA, R. (1987): *Multigrid, An Alternative Method for Solution of Two-Dimensional Elastohydrodynamically Lubricated Point Contact Calculations.*, ASME J. Tribol., 109, pp. 437-443.
- [7] SPIKES, H. A. (1999): *Thin Films in Elastohydrodynamic Lubrication: The Contribution of Experiment*. Proc. Instn Mech. Engrs Part J, J. Engineering Tribology, 213, s. 335-352.
- [8] DOWSON, D., EHRET, P. (1999): *Present and Future Studies in Elastohydrodynamics*. Proc. Instn Mech. Engrs Part J, J. Engineering Tribology, 213, s. 317-333.
- [9] HAMROCK, B. J. (1994): *Fundamentals of Fluid Film Lubrication.*, New York, McGraw-Hill, Inc., s. 147-151.
- [10] GOHAR, R. (1988): *Elastohydrodynamics.*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, s. 123.
- [11] BARUS, C. (1893): *Isotherms, Isopiestic, and Isometrics relative to Viscosity.*, American Journal of Science, 45, s.87-96.
- [12] ROELANDS, C. J. A. (1966): *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*, Druk, V.R.B. Groingen, Netherlands.
- [13] DOWSON, D., HIGGINSON, G. R., WHITAKER, A. V. (1962): *Elastohydrodynamic Lubrication: A Survey of Isothermal Solutions.*, Journal Mechanical Engineering Science, 4, s. 121-162.
- [14] JACOBSON B. O., VINET, P. A (1987): *Model for the Influence of Pressure on the Bulk Modulus and the Influence of Temperature on the Solidification Pressure of Liquid Lubricants.*, Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 109, s. 709-713.
- [15] RAMESH, K. T. (1991): *The Short-time Compressibility of Elastohydrodynamic Lubricants.*, Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 113, s. 361-371.
- [16] RANGER A. P., ETTLES C. M. M., CAMERON A. (1975): *The Solution of the Point Contact Elastohydrodynamic Problem.*, Proceedings of the Royal Society of London, A346, s. 227-244.

- [17] HAMROCK B. J., DOWSON D. (1976): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part I -Theoretical Formulation.*, Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, s. 223-229.
- [18] HAMROCK B. J., DOWSON D. (1976): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II -Ellipticity Parameter Results.*, Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, s.375-383.
- [19] HAMROCK B. J., DOWSON D. (1977): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part III -Fully Flooded Results.* Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 99, s. 264-276.
- [20] HAMROCK B. J., DOWSON D. (1977): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV - Starvation Results.*, Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 99, s. 15-23.
- [21] VICHARD, J. P. (1971): *Transient Effects in the Lubrication of Hertzian Contacts.*, Jour Mech. Eng. Sci., 13, s. 173-179.
- [22] PARKER, D. A., and ADAMS, D. R. (1982): *Friction Losses in the Reciprocating Internal Combustion Engine, Tribology-Key to the Efficient Engine.*, Instn. Mech. Engrs., Conf. Pub. 1982-1, London, Paper C5/82, pp. 31–39.
- [23] HOSHI, M. (1984): *Reducing Friction losses in Automobile Engines.*, Tribol. Int., 17, pp. 185–189.
- [24] REZRKA, S. F., and HENEIN, N. A. (1984): *A New Approach to Evaluate Instantaneous Friction and Its Components in Internal Combustion Engines.*, SAE Paper 840179.
- [25] DOWSON, D., HARRISON, P., and TAYLOR, C. M. (1986): *The Lubrication of Automotive Cams and Followers, Mechanisms and Surface Distress.*, Proc. 12th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Butterworths, London, pp. 305–322.
- [26] TAYLOR, C. M. (1991): *Valve Train Lubrication Analysis, Vehicle Tribology.*, Proc. 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, Amsterdam, pp. 119–131.
- [27] JANG, S. and PARK, K. (2000): *Dynamic EHL Film Thickness in Cam and Follower Contacts of Various Valve Lifts.*, in Advances in Powertrain Tribology, SAE 2000, Warrendale, PA, s. 101-107.
- [28] MESSE, S. and LUBRECHT, A.A. (2000): *Transient Elastohydrodynamic Analysis of an Overhead Cam / Tappet Contact.*, in Proc. 1.Mech.E.,J214, s. 415-426.
- [29] CHANG, L. (2000): *A Simple and Accurate Method to Calculate Transient EHL Film Thickness in Machine Components Undergoing Operation Cycles.*, Trib. Trans, 43, s. 116-122.
- [30] Jin, Z. M., Yang, P., Cui, J., Dowson, D. (2004): *Transient elastohydrodynamic analysis of elliptical contacts. Part 1: isothermal and Newtonian lubricant solution.* Proc. of the I. MECH. E. Part J, Journal of Engineering Tribology, 218, s. 211-224.

- [31] GOHAR, R., CAMERON, A., (1963): *Optical Measurement of Oil Film Thickness under Elasto-hydrodynamic Lubrication*. Nature, 200, s. 458-459.
- [32] KWEH, C. C., EVANS, H. P., SNIDLE, R. W. (1989): *Elastohydrodynamic Lubrication of Heavily Loaded Circular Contacts*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Engineering Science, 203, s. 133-148.
- [33] KANETA, M., OZAKI, S., NISHIKAWA, H., GUO, F., *Effects of impact loads on point contact elastohydrodynamic lubrication films*, Journal of Engineering Tribology, vol. 221, no. 3, 2007, pp. 271-278.
- [34] SUGIMURA, J. and SPIKES, H. A. (1997): *Technique for Measuring EHD Film Thickness in Non-steady State Contact Conditions.*, in Proc. Leeds/Lyon Symp., Elasto-hydrodynamics '96, Dowson, D., et al., Eds., Elsevier.
- [35] SUGIMURA, J., JONES, W. R. Jr. and SPIKES, H. A. (1998): *EHD Film Thickness in Non Steady State Contacts.*, ASME Trans. Jour of Trib., 120, s. 442-452.
- [36] GLOVNEA, R. P., DIACONESCU, E. N., FLAMAND, L. (1995): *EHD Film Thickness Under Transient Speed Conditions.*, Acta Tribologica, 3, s. 31-36.
- [37] GLOVNEA, R. P. and SPIKES, H.A. (2002): *Behavior of EHD films during reversal of entrainment in cyclically accelerated/decelerated motion.*, Trib. Trans., 45, 2, s. 177-184.
- [38] KANETA, M. *For the establishment of a new EHL theory*. In Lubrication at the Frontier, 1999 (Elsevier, Amsterdam).
- [39] GLOVNEA, R. P. and Spikes, H.A. (2001): *Elastohydrodynamic film formation at the start-up of the motion.*, Proc. I. Mech.E., J215, s. 125-138.
- [40] WANG, J., HASIMOTO, T., NISHIKAWA, H., KANETA, M. (2005): *Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion.*, Tribology International 38, s. 1013-1021.
- [41] MOURIER, L., MAZUYER, D., LUBRECHT, A.A. and DONNET, C. (2006): *Transient Increase of Film Thickness in Micro-Textured EHL Contacts.*, Tribology International, 39, 1745-1756.
- [42] KANETA, M., KANZAKI, Y., KAMEISHI, K., NISHIKAWA, H. (1990): *Non-Newtonian Response of Elasto-hydrodynamic Oil Films*, Proc. Japan Int. Tribology Conf. Nagoya, 1695-1700.
- [43] OSBORN, K. F. AND SADEGHI, F. (1992): *Time dependent line EHD lubrication using the multigrid/multilevel technique*. Trans. ASME, J. Tribology, 114, 68-74.
- [44] HAMROCK, B. T., DOWSON, D. (1981): *Ball Bearing Lubrication: the Elasto-hydrodynamics of Elliptical Contacts*, (John Wiley, New York).
- [45] HOLMES, M. J., EVANS, H. P., SNIDLE, R. W. (2003): *Comparison of transient EHL calculations with start-up experiments*, Proc. 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology , 79-89 Elsevier, Amsterdam ISBN 0-444-51243-8.
- [46] HOLMES, M. J. A. (2002): *Transient analysis of the point contact elastohydrodynamic lubrication problem using coupled solution methods*. PhD Thesis, University of Wales.

- [47] HOLMES, M. J. A., HUGHES, T. G., EVANS, H. P. AND SNIDLE, R. W. *Transient elastohydrodynamic point contact analysis using a new coupled differential deflection method: Part 1 Theory and validation*. Submitted to Proc. Instn. Mech. Eng., Part J, Journal of Engineering Tribology.
- [48] EVANS, H. P. AND HUGHES, T. G. (2000): *Evaluation of deflection in semi-infinite bodies by a differential method*, Proc. Instn. Mech. Eng., Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol 214, pp 563584.
- [49] POPOVICI G, VENNER CH, LUGT PM. (2004): *Effects of load system dynamics on the film thickness in EHL contacts during start up*. Trans ASME, Jour Tribol 2004; 126:258-266.
- [50] POKORNÁ, J. (2007): *Cílená modifikace třecích povrchů snižující tření a opotřebení*. Brno, VUT-FSI.
- [51] Mound Laser & Photonics Center, Inc. [online], [cit. 2009-05-25]. Dostupné online na World Wide Web: <<http://www.mlpc.com>>.
- [52] KOVALCHENKO, A., AJAYI, O., ERDEMIR, A., FENSKE, G.: ETSION, I. (2005): *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*, Tribology International, 38, s. 219-225
- [53] ETSION, I. (2005): *State of the Art in Laser Surface Texturing*, Trans ASME Journal of tribology, 127, s. 248-253
- [54] DUMITRU, G., ROMANO, V., WEBER, H.P., HAEFKE, H., GERBIG, Y., PFLÜGER, E. (2000): *Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications*, Applied Physics A: Materials Science & Processing, 70, s.485-487
- [55] DUMONT, M. - LUGT, P. M. - TRIPP, J. H. (2002), *Surface feature effects in starved circular EHL contacts*,. Journal of Tribology, Trans. of the ASME, 124, pp 358-366.
- [56] ZHAO, J. X. - SADEGHI, F. (2004): *The effects of a stationary surface pocket on EHL line contact start-up*, Journal of Tribology, Trans. of the ASME, 126, pp 672-680.
- [57] REN, N., NANBU, T., YASUDA, Y., ZHU, D., WANG, Q. (2007): *Micro textures in Concentrated-Conformal-Contact Lubrication: Effect of Distribution Patterns*, Tribol Lett, 28, s. 275-285.
- [58] KŘUPKA, I. - HARTL, M. (2006): *The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films*, Tribology International, doi:10.1016/j.triboint.2006.10.2007.
- [59] MOURIER, L., MAZUYER, D., AUBRECHT, A.A., DONNET, C. (2006): *Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts*, Tribology International, 39, 2006, s.1745–1756.
- [60] KŘUPKA I, et al. (2008): *Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts*. Tribol Int, doi: 10.1016/j.triboint.2007.11.016.
- [61] KŘUPKA, I., HARTL, M. (2009): *Effect of Surface Texturing on Very Thin Film EHD Lubricated Contacts*, Tribology Transactions, Vol. 52, 2009 , p. 21 – 28
- [62] KANETA, M., KANADA, T., NISHIKAWA, H. (1997): *Optical Interferometric Observations of the Effects of a Moving Dent on Point Contact EHL*. In: Elastohydrodynamics – '96 Fundamentals and Applications in Lubrication and Traction. Tribology Series 32. Elsevier, 1997, s. 69-79.

- [63] ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. (2009): 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. p. 1513 - 1523. ISBN 978-80-86246-35-2.
- [64] SZE, W.; LAM, T. *Optical Interference Coatings*, College of Optical Science, The University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, [online], [cit. 2009-04-20]. Dostupné online na World Wide Web: <<http://www.u.arizona.edu/~waisze/report.html>>
- [65] Wikipedia.org – otevřená encyklopedie [online], [cit. 2007-12-20]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>>
- [66] I-cubeinc.com – diagnostic instruments [online]. [cit. 2007-12-20]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.i-cubeinc.com/pdf/cameras/3shotcm.shtml>>
- [67] CHLACHULA, P. (2009): *Cílená modifikace topografie třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 48 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Krupka, Ph.D.
- [68] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; SVOBODA, P. (2008): Effects of Roughness Features on Lubrication Film Formation within Mixed Lubricated Contacts. In *2nd International Conference on advanced Tribology 2008*. 1. Singapore, Research Publishing Services. 2008. p. 482 - 483. ISBN 978-981-08-2067-1.
- [69] ZHU D, AI XL. (1997): *Point Contact EHL Based on Optically Measured Three-dimensional Rough Surfaces*. ASME J Tribology 1997; 119: 375-384.
- [70] KŘUPKA I, KOUTNÝ D, HARTL M. (2008): *Behavior of real roughness features within mixed lubricated non-conformal contacts*. Tribology Int 2008; 41:1153-1160.
- [71] ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. (2009): Experimentální studium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. In *FSI Junior konference 2008 - Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů - sborník*. Brno, VUT FSI v Brně. 2009. p. 134 - 141. ISBN 978-80-214-3834-7.
- [72] ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. (2009): 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. p. 1513 - 1523. ISBN 978-80-86246-35-2.

PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE**Články v časopise**

KŘUPKA I, SVOBODA P, HARTL M. Effect of surface topography on mixed lubrication film formation during start up under rolling/sliding conditions. In *Tribol Int* 2009; 42: přijato k otištění.

KŘUPKA I, HARTL M, SVOBODA P. Effects of surface topography on lubrication film formation within EHD and mixed lubricated non-conformal contacts. In *Proc IMechE, J Eng Tribol* 2009; 223: přijato k otištění.

Články ve sbornících

SVOBODA, P. Experimentální studium chování mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. In *FSI Junior konference 2006*. Brno, FSI Brno. (4 p.). ISBN 978-80-214-3364-9.

SVOBODA, P. Experimentální studium chování mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. In *sborník prací 47. konference KCMS*. Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze. 2006. p. 168 - 171. ISBN 80-213-1523-7.

SVOBODA, P. Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní CMOS barevnou kamerou. In *Sborník příspěvků - Proceedings of papers*. Bratislava, STU - Publishing House. 2007. p. 509 - 514. ISBN 978-80-227-2708-2.

SVOBODA, P. Experimentální studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní CMOS barevnou kamerou. In *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Plzeň, Západočeská Univerzita v Plzni. 2008. p. 253 - 256. ISBN 978-80-7043-718-6.

ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P. Experimentální studium mazacích filmů při nestacionárních provozních podmínkách. In *FSI Junior konference 2008 - Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů - sborník*. Brno, VUT FSI v Brně. 2009. p. 134 - 141. ISBN 978-80-214-3834-7.

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 Rep., v.v.i. 2009. p. 1513 - 1523. ISBN 978-80-86246-35-2.

KŘUPKA, I.; HARTL, M.; SVOBODA, P. Effects of Roughness Features on Lubrication Film Formation within Mixed Lubricated Contacts. In *2nd International Conference on advanced Tribology 2008*. 1. Singapore, Research Publishing Services. 2008. p. 482 - 483. ISBN 978-981-08-2067-1.

KŘUPKA, I.; HARTL, M.; VRBKA, M.; VAVERKA, M.; SVOBODA, P.; ŠAMÁNEK, O. The Effect of Surface Texturing on Lubricant Film Thickness and Contact Pressure within Non-Conformal Surfaces. In *Ecotrib 2009 - 2nd European Conference on Tribology*. 1. Pisa, Italy, Engineering Faculty, University of Pisa. 2009. p. 115 - 120. ISBN 978-884672426-7.

Funkční vzorky

SVOBODA, P. *Zařízení pro přípravu vzorků*. Funkční vzorek, umístění A2/423. 2007-12-05.

SVOBODA, P., ČUDEK, V. *Synchronizační zařízení pro vysokorychlostní kameru*. Funkční vzorek, umístění A2/423. 2008-11-03.

