

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ANALÝZA MAZANÉHO KONTAKTU PODDAJNÝCH TĚLES

ANALYSIS OF LUBRICATED COMPLIANT CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. KRYŠTOF DOČKAL

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

Ing. DAVID NEČAS

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Kryštof Dočkal

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Konstrukční inženýrství (2301T037)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza mazaného kontaktu poddajných těles

v anglickém jazyce:

Analysis of lubricated compliant contact

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout metodiku hodnocení tloušťky filmu v kontaktu poddajných těles. Kromě pojednání o limitacích souvisejících s analýzou poddajných materiálů musí práce obsahovat návrh algoritmu pro kalibraci a vyhodnocení tloušťky filmu v kontaktu.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

- 1. Úvod
- 2. Přehled současného stavu poznání
- 3. Analýza problému a cíl práce
- 4. Materiál a metody
- 5. Výsledky
- 6. Diskuze
- 7. Závěr
- 8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace; Projekt: Specifický vysokoškolský výzkum

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK sablona praci.zip Seznam odborné literatury:

1) MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. Tribology International. 2010, vol. 43, issue 11, s. 1960-1969.

2) SPIKES, H A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 1999-1-1, vol. 213, issue 5, s. 335-352.

3) HAUGLAND, Richard P, Michelle T SPENCE a Iain D JOHNSON. Handbook of fluorescent probes and research chemicals. 6th ed. Eugene, OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402): Molecular Probes, c1996, xii, 680 p. ISBN 09-652-2400-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Nečas

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015. V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. Ředitel ústavu doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metodiky hodnocení tloušťky filmu maziva v poddajných kontaktech. S ohledem na charakteristiky těchto kontaktních dvojic, jako je například variabilita tlouštěk filmu, vysoká drsnost povrchů, či špatná vodivost a odrazivost, je využití konvenčních metod značně komplikované. V práci je použita optická měřicí metoda na principu fluorescenční mikroskopie. V rámci práce byl vytvořen algoritmus, zahrnující normalizaci k pozadí a kalibraci intenzity fluorescence na tloušťku maziva v kontaktu, který je zpracován ve formě experimentálního softwaru. Algoritmus byl verifikován s využitím elastohydrodynamického kontaktu tvořeného keramickou kuličkou a skleněným diskem. Naměřené výsledky byly porovnány s teoretickou predikcí, přičemž byla zaznamenána velmi dobrá shoda získaných dat. Následně byla realizována série měření s poddajnými vzorky, přičemž byla hodnocena závislost centrální tloušťky filmu v závislosti na střední rychlosti, použitém mazivu, velikosti zatížení a skluzově-valivém poměru. Závěrečná část práce se zabývá analýzou výsledků a jejich diskusí s ohledem na dosud publikovanou literaturu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Poddajný kontakt, fluorescenční mikroskopie, elastohydrodynamické mazání, isoviskózní, tloušťka filmu, ball-on-disk

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the proposal of methodology for film thickness evaluation within compliant contacts. With respect to characteristics of such contact pairs, like variable film thickness, high surface roughness, or poor conductivity and reflectivity, the usage of conventional experimental methods is particularly complicated. In present study, an optical method based on the principle of fluorescent microscopy was employed in present thesis. An evaluation algorithm involving background normalization and calibration of fluorescent intensity to film thickness was created in a form of experimental software. The proposed algorithm was validated by using elastohydrodynamic contact formed between ceramic ball and glass disc. The measured film thickness was compared with theoretical prediction, while very good agreement of obtained data was observed. Further, a series of experiments with compliant samples was conducted, while the central film thickness was evaluated as a function of mean speed, applied lubricant, applied load and slide-to-roll ratio. The last part of the thesis is focused on results analysis and discussion considering the previously published literature.

KEY WORDS:

Compliant contact, fluorescence microscopy, elastohydrodynamic lubrication, isoviscose, film thickness, ball-on-disc

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOČKAL, K. Analýza mazaného kontaktu poddajných těles. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Nečas.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele Ing. Davida Nečase.

......Kryštof Dočkal

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Davidu Nečasovi za cenné rady a připomínky v průběhu řešení této diplomové práce. Také bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNí 1.1 Využití fluorescenční mikroskopie v tribologii 1.2 Využití fluorescenční mikroskopie při studium kontaktu poddaj-	13 15
1.2 vý anet natříšších map. 1.3 Úprava intenzitních map. 1.4 Analýza výsledků	19 26 28
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	29
 3 MATERIÁL A METODY 3.1 Experimentální zařízení 3.2 Fluorescence 3.3 Algoritmus vyhodnocení intenzitních map 	30 30 32 33
 4 VÝSLEDKY 4.1 Verifikace metody 4.1.1 Popis experimentu 4.1.2 Keramický vzorek 4.1.3 Ocelový vzorek 4.2 Experimentální studium tloušťky mazacího filmu v kontaktu po- 	 38 38 39 42
lypropylenu	42 42 44 48
nolové pryskyřice	50 50 51 54
5 DISKUZE 5.1 Vliv materiálu 5.2 Vliv maziva 5.3 Vliv střední rychlosti 5.4 Vliv zatížení	56 56 57 57 58
6 ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM SYMBOLŮ	66
SEZNAM PŘíLOH	68

ÚVOD

V oblasti tribologie došlo v posledních desítkách let k výraznému pokroku jak v teoretické, tak experimentální oblasti. Důsledkem tohoto pokroku je větší efektivita a tedy nižší náklady na údržbu a provoz strojních součástí. Zejména pokud jde o chování tuhých kontaktích dvojic, bylo publikováno významné množství odborných prací popisující poznatky z oblasti kontaktů tuhých těles. V oblasti poddajných kontaktů, tedy v případě, kdy má alespoň jedno z těles modul pružnosti maximálně v jednotkách GPa však k tak výraznému pokroku nedošlo. Cílem je využít nově dostupné znalosti a technologie pro popis chování maziva v kontaktech materiálů s nízkým modulem pružnosti a vytvořit postupy pro formování maziva v kontaktu. Poddajné kontakty se vyznačují zejména větší kontaktní oblastí a značnou proměnlivostí tloušťky filmu maziva závisející na více parametrech. Důležitou roli zde hraje také jakost povrchu. Popis maziva v kontaktech poddajných těles bude mít do budoucna značný vliv na další vývoj a optimalizaci. Dobrým příkladem je umělá chrupavka v kyčelních kloubních náhradách. Poddajné materiály se obvykle vyznačují nízkou elektrickou vodivostí, tudíž nelze používat metody založené na změně odporu nebo kapacity a malou odrazivostí, v důsledku čehož není možné použít optickou interferometrii, která patří mezi zavedené metody v oblasti experimentálního výzkumu kontaktních dvojic. V některých případech se nízká odrazivost může řešit nanesením odrazivé vrstvy na povrch tělesa. U poddajných materiálů je ovšem tento postup značně náročný a nákladný. Povlak je navíc citlivý na opotřebení a ovlivňuje vlastnosti základního materiálu.

Cílem diplomové práce je navrhnout metodu vyhodnocení tloušťky filmu maziva v kontaktu poddajných těles založené na principu fluorescenční mikroskopie. Ta umožňuje měřit materiály s nízkou odrazivostí, vysokou variabilitou tloušťky mazacího filmu přičemž nedochází k výraznému ovlivnění měření v důsledku vyšší drsnosti povrchů. Součástí je také pojednání o limitacích analýzy poddajných materiálů.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Poddajný kontakt se vyznačuje nízkým modulem pružnosti jednoho nebo obou těles v důsledku čehož dochází v povrchových vrstvách materiálu k výrazným elastickým deformacím, zároveň však kontaktní tlak není dostatečně velký, aby způsobil změnu viskozity maziva. Výsledná tloušťka filmu je potom ovlivňována především elastickou deformací povrchů. Režim mazání v nekonformních, poddajných kontaktech bývá označován jako isoviskozní elastohydrodynamický.(I–EHL). [1]



Obr. 1.1: Schema aparatury použité pro studium třecích vlastností poddajného kontaktu [2].

Studie zabývající se chováním kontaktů poddajných těles byly doposud zaměřeny na studium třecích vlastností. Přitom bylo využíváno komerčně dostupného zařízení Mini Traction Machine (MTM). Mapováním Stribeckových křivek, vlivu zatížení nebo kvality povrchů na součinitel tření v kontaktu, se zabývalo několik studií. Detailněji se této oblasti věnují de Vicente a kol. [1] a Bongaerts a kol. [2], kteří zkoumají vliv jakosti, zatížení a smáčivosti těles na režim mazání. Studie analyzují nekonformní kontakt v konfiguraci ball-on-disc (obr. 1.1) jak pro dvojici poddajné-tuhé těleso tak i poddajné-poddajné. Poddahné vzorky jsou vyrobeny z polymeru polydimethysiloxane (PDMS) a to především z důvodu chemické stálosti a tedy minimálního ovlivnění tribologických vlastností při zkoumání vlivu smáčivosti na chování kontaktu. Stejný materiál se často objevuje i v dalších pracích. Experimenty se zaměřují na dvojice tvořené poddajným a tuhým tělesem, které simulují řadu praktických aplikací (těsnění, stěrač, ložiska s plastovými valivými elementy, chrupavku). Studium čistě poddajných kontaktů má význam pro biotribologii, textilní průmysl, medicínu atd. Vlivem mechanických a optických vlastností materiálů rostou nároky na měřící aparaturu nebo je třeba využít výrazně složitější metody.

První studie zaměřené na tloušťku mazacího filmu v poddajném kontaktu se začaly objevovat po roce 1960, kdy Roberts a Tabor [3] využili monochromatickou optickou interferometrii pro analýzu filmu mezi poddajným materiálem a sklem. Aplikaci metody umožnilo potažení vzorků poddajnou, opticky hladkou vrstvou, povlakovanou hliníkem zvyšujícím odrazivost povrchu nutnou pro

1



Obr. 1.2: Schema aparatury využívající LIF pro studium tloušťky filmu v poddajných kontaktech [7].

vyhodnocení tloušťky filmu. Dobré výsledky byly dosaženy i při pozlacení přímo povrchu vzorku. Vzhledem k nízké odolnosti a vysokým nákladům na povlakování byly vyrobeny vzorky s opticky hladkým povrchem, nevyžadující další povrchové úpravy. Při experimentech byla interference dostatečně výrazná i při velkých deformacích. Optická interferometrie je však limitována měřícím rozsahem tloušťky mazací vrstvy, která je i s použitím laseru při hodnotách větších než 2 µm prakticky neměřitelná díky ztrátě koherence světelného svazku při průchodu mazivem. S vysokými rychlostmi, viskozitou a nízkým modulem pružnosti kontaktních těles dosahuje film desítek µm. Důsledkem omezené použitelnosti optické interferometrie vznikla snaha využít jiné, vhodnější metody. V průběhu následujících let byly aplikovány přístupy měření magnetického toku, Ramanova spektroskopie nebo ultrazvuk [4, 5, 6]. Většina metod používaných pro studium tloušťky mazacího filmu v tuhých kontaktech není kvůli odlišným materiálovým vlastnostem vhodná. V roce 2010 úspěšně aplikoval Myant a kol. [7] laserem indukovanou fluorescenční mikroskopii (LIF) při studium filmu maziva v poddajném kontaktu pin–on–disc (obr. 1.2). Teoretická rozlišitelnost odpovídá 2 nm. Reálně se díky limitacím měřicí aparatury a algoritmu vyhodnocení podařilo dosáhnout minimální měřitelné tloušťky 300 nm. Po optimalizaci, snížení počtu optických členů a zvýšení jejich kvality, je možné měřit tloušťky od 50-100 nm [8]. Maximální dosažitelné hodnoty silně závisí na nastavení kamery (expozice, citlivost, dynamický rozsah) a osvětlení vzorku, je možné měřit až desítky µm.

Fluorescenční mikroskopie přináší oproti standardně používané optické interferometrii a jiným metodám v oblasti poddajných kontaktů několik výhod. Především je méně náchylná na jakost a odrazivost povrchu součástí poddajného kontaktu. Zatímco optická interferometrie měří tloušťku filmu na základě superpozice světelných svazků odražených od rozhraní mezi mazivem a povrchy v kontaktu, fluorescenční mikroskopie získává informaci z intenzity emise vyzářené barvivem (fluoroforem), obr. 1.3. Jedná se o látku, která je excitována (absorbuje) dopadajícími fotony a následně emituje (vyzáří) fotony o vyšší vlnové délce (nižší energii). Vyzářený svazek je pomocí soustavy optických filtrů oddělen a snímán. Intenzita je při rovnoměrném nasvícení vzorku, rozptýlení a kvalitě barviva funkcí tloušťky filmu. Fluorescenční mikroskopie tedy udává množství maziva místo velikosti mezery, kterou měří optická interferometrie.



Obr. 1.3: Srovnání optické interferometrie s fluorescenční mikroskopií.

1.1 Využití fluorescenční mikroskopie v tribologii

První aplikaci fluorescenční mikroskopie v tribologii publikovali Smart a Ford v roce 1974 [9]. Autoři popisují mazací vrstvu vyskytující se ve válečkových ložiscích na površích válečku a kroužku ložiska. Při experimentech byla použita k osvětlování rtuťová výbojka, poskytující dostatečný světelný výkon i v oblasti vlnových délek pod hranicí 400 nm, což umožnilo využít přirozenou fluorescenci maziva. Přirozeně fluoreskující oleje jsou nejefektivněji excitovány vlnovými délkami v oblasti UVA (320-400 nm). Díky Stokesovu posunu (rozdílu energií excitace a emise) se emise stává viditelnou. V pozdější práci [10] je jako zdroj světla použit laser. Úzké světelné spektrum umožňuje absenci excitačnho filtru, což zmenšuje počet optických členů. Vzhledem k vysoké koherenci ovšem dochází k vzájemné interferenci jednotlivých vln ve světelném svazku, která se na výsledném snímku projeví charakteristickým vzorem jež je třeba před vyhodnocením tlouštěk mazacího filmu odstranit. Pozdější studie se zaměřují na aplikace diagnostiky mazacích filmů ve spalovacích motorech [11, 12] nebo v průběhu obráběcího procesu mezi nástrojem a obrobkem [13]. Pro analýzu mazacího filmu v konfiguraci ball-on-disk využil LIF Reddyhoff a kol. [14]. V práci se zaměřuje především na proudění maziva v elastohydrodynamickém (EHD) kontaktu. Ze schematu aparatury (obr. 1.4) plyne využití excitačního filtru, který ovšem při použití laseru (Laser2000 Ltd., Northants, UK) není pro správnou funkčnost nutný. Funkce filtru spočívá v separaci excitačního svazku v případě zdroje světla se širokým spektrem. Pomocí expanderu je zvětšen průměr paprsku, ve kterém je následně pomocí difuzéru redukováno kolísání intenzity. Pomocí polopropustného zrcátka je takto upravený excitační svazek nasměrován do objektivu respektive kontaktu. Jako mazivo je použit glycerol se 0,04 hm% barviva Eosin, které má maximální hodnoty excitace blízko vlnové délky laseru – 532 nm a je v glycerolu snadno rozpustitelné. V práci je zmiňována i možnost využití přirozené fluorescence, ovšem díky možnosti kontroly a vysoké intenzitě emise jsou všechny experimenty provedeny s barvivem, které emituje svazek do objektivu mikroskopu a dále na polopropustné zrcátko. Zde je separován od zbytku světla a směrován do emisního filtru a snímače vysokorychlostní kamery.



Obr. 1.4: Schema aparatury využívající LIF pro studium mazacího filmu [14], Filter 1–excitační filtr, Filter 2–emisní filtr, Stop 1-2–clony, Dichromatic plate beam splitter–polopropustné zr-cátko.

Prvotní výstup z kamery je pouze intenzitní mapa, snímek ve stupních šedi. Pro vyhodnocení filmu je třeba provést kalibraci, která přiřadí známé tloušťky k jednotlivým intenzitám. Příklad snímku získaného z fluorescenční mikroskopie je vidět na obr. 1.5a. Charakteristický tvar podkovy EHD kontktů je dobře patrný. Na základě tohoto snímku je zobrazen profil intenzit ve směru střední rychlosti (obr. 1.5b), vyznačený čerchovanou čarou, který je srovnáván s tloušťkami filmu získanými pomocí optické interferometrie. Ačkoliv nejsou hodnoty intenzity zkalibrovány na tloušťku filmu je patrná velmi dobrá shoda přes celý profil kontaktu.

Ze své podstaty je fluorescenční mikroskopie snadno aplikovatelná na analýzu proudění maziva v kontaktu. Často v podobě dávkování čistého a následně obarveného maziva [14]. Na získaných snímcích tak vzniká kontrastní hranice mezi obarvenou a neobarvenou oblastí jejíž pohyb dává informaci o proudění v kontaktu. Druhou velmi častou alternativou je fotovybělování pomocí excitačního fokusovaného svazku s vysokým výkonem (FRAP), který v místě dopadu degraduje fluorescenční barvivo (obr. 1.6), snižuje intenzitu emise v ozářeném místě a vytváří kontrastní hranici. Proces způsobuje trvalou destrukci barviva. Vzniklá oblast je sledována při průchodu kontaktem. U obou přístupů se projevují difuzní pochody [15], které postupně snižují kontrast, homogenizují intenzitu.

FRAP aplikuje pro analýzu chování maziva v EHD kontaktu Ponjavic a kol. [16].



Obr. 1.5: Snímky EHD kontaktu, rychlost 75 mm s⁻¹, mazivo glycerol, barvivo 0.05 hm% eosin, zatížení 20 N, teplota 23 °C, [14], a) intenzitní mapa, b) srovnání s optickou interferometrií.

Při experimentech využívá kombinaci dvou laserů (obr. 1.6). 473 nm fokusovaný, využívaný pro fotovybělení a 488 nm se zvětšeným průměrem paprsku pro excitaci. V aparatuře se nenachází excitační filtr díky úzkým spektrům laseru. Jednotlivé světelné svazky jsou pomocí polopropustných zrcátek spojeny a nasměrovány do kontaktu ocelové kuličky a skleněné desky. Jako mazivo je použit polybuten (PB H-300, Ineos Oligomers) s barvivem nile red (Sigma-Aldrich) o koncentraci 1 mM. Nile red je považováno za stabilní barvivo. V průběhu fotovybělování ovšem podléhalo rychlé degradaci. Po 10 ms při výkonu laseru 40 mW kleslo spektrální maximum intenzity emise o 40%. Na vysoké rychlosti se mohlo projevit zahřívaní vybělované oblasti. Polybuten za vyšších teplot reaguje s kyslíkem, který způsobuje zhášení fluorescence.



Obr. 1.6: Aplikace FRAP pro sledování toku maziva[16], a) schema aparatury, BE–expandér, M–zrcátko, DM–polopropustné zrcátko, LP–emisní filtr, S–clona, EM-CCD–snímač, b) schema vybělené oblasti v mazivu.

Při studiu tuhých kontaktů bývá fluorescenční mikroskopie doplňována optickou interferometrií, kdy jsou metody aplikovány na různé části kontaktu. Jedná se zejména o případy, kdy je třeba sledovat dění v centrální oblasti a širším okolí. Tuto kombinaci využívá Qian a kol. [17, 18]. Práce je zaměřena na chování mazacího filmu PAO oleje (Dowpol Chemical International Corp, Shanghai, China) při prokluzech nad hranicí 1,9. Centrální tloušťku vyhodnocuje z optické interferometrie, která je přesnější a okolí pomocí fluorescenční mikroskopie. Experimenty jsou provedeny na ball-on-disk aparatuře, na ocelové kuličce o průměru 12,7 mm se zatížením 5,2 N. Jako barvivo byl použit 5-Di (5-tert-butylbenzoxazol-2-yl) thiophene (Beijing FLY Science and Technology Co. Ltd, Beijing, China) o relativně vyšší koncentraci 0,17 hm%, jehož maximum absorpce je shodné s vlnovou délkou laseru použitého pro excitaci. Barvivo je dobře rozpustné v PAO olejích a neovlivňuje rheologii. Vysoká koncentrace barviva je pravděpodobně z důvodu chromové vrstvy na skleněném disku potřebné pro optickou interferometrii. Chrom patří do skupiny prvků způsobujících výrazné zhášení fluorescence. Přestože je použit koherentní zdroj světla, fluorescenční snímky nevykazují výraznou interferenci, což vede ke snadnějšímu kvalitativnímu posouzení. To je způsobeno vyšším obsahem barviva a emisí v oblasti modrého světla (400-450 nm)



Obr. 1.7: Kombinace optické interferometrie a fluorescenční mikroskopie[17], rychlost kuličky 10 mm s^{-1} , a-prokluz 1,946, b-prokluz 1,974, c-prokluz 1,985, a) centrální oblast (optická interferometrie), b) okolí kontaktu (fluorescenční mikroskopie).

Na obrázku obr. 1.7 jsou vidět nasnímané interferogramy a intenzitní mapy pro elastohydrodynamicky mazaný (EHL) kontakt. V čase 1 s jsou získány snímky s charakteristickým tvarem podkovy. S rostoucím časem se ale vzhledem k vysokému prokluzu začíná objevovat poškrábaní disku a sedření chromové vrstvy. V intenzitních mapách (obr. 1.7b) je pozorovatelné především na straně vstupu do kontaktu, kde je dostatek maziva, které vyplní rýhy na disku vzniklé poškrábáním. Vyšší intenzitu emise způsobují dva faktory. Prvním z těchto faktorů je poškrábání v místě kde dochází k nárůstu výšky maziva. Druhým potom opotřebení chromové vrstvy, která způsobuje výrazné zhášení. Světlý bod v centrální oblasti označený červenou tečkou je způsobený odrazem okolního světla. Z intenzitních map je dobře sledovatelné chování maziva v okolí kontaktu, pro rostoucí prokluz je viditelné měnící se rozložení. Vzhledem k velikosti snímané oblasti (přibližně 4×4 mm) a průměru kuličky 12.7 mm jsou zachyceny i oblasti s výškou maziva větší než 10 µm bez přeexponování.

Podobně použil kombinaci optické interferometrie a fluorescenční mikroskopie i Xiao a kol. [19], který ve své práci sleduje pohyb malého objemu vody EHL kontaktem ball-on-disk (obr. 1.8a), mazaným hexadecanem. Jako barvivo je v této práci použit coumarin–311, které je snadno rozpustné v oleji. Maximální hodnota vlnové délky absorpce odpovídá přibližně 360 nm. Maximální hodnota emise pak 453 nm. Voda neobsahující barvivo vytvoří kontrastní hranici, která je následně sledována při průchodu kontaktem, obr. 1.8b. Díky vysokému povrchovému napětí mezi mazivem a vodou jsou omezeny difuzní pochody na rozhraní. Nedochází k postupné homogenizaci intenzit.



Obr. 1.8: Kombinace optické interferometrie a fluorescenční mikroskopie[19], a) měřicí aparatura, 1–disk, 2–kulička, 3–mazivo, 4–voda, 5–fluorescenční mikroskop, 6–světelný mikroskop, 7–počítač, b) průchod vody kontaktem.

$1.2\,{\rm Využit}{\rm i}$ fluorescenční mikroskopie při studium kontaktu poddajných těles

Studiem poddajných kontaktů s využitím fluorescenční mikroskopie se v současnosti zabývá jen omezené množství výzkumných pracovišť. Metodu úspěšně aplikoval Myant a kol. [7] na I-EHL kontakt mezi PDMS pinem a skleněným diskem (BK7). Pro experimenty využívá upravenou aparaturu optického tribometru (obr. 1.2). Jako mazivo slouží roztok glycerolu a vody, který umožňuje rozpustit velké množství komerčně dostupných fluorescenčních barviv a zároveň je možné poměrem jednotlivých složek kontrolovat viskozitu maziva. K obarvení je využit Eosin o koncentraci 0,4 hm%, jehož absorpční maximum leží blízko vlnové délky laseru, obr. 1.9. Vzorky jsou vyrobeny z PDMS (Sylgard 184, Dow Corning, UK) plněného sazemi pro získání černého povrchu, který minimalizuje odraženou složku emise vnášející nepřesnost. Drsnost dosahuje 10,24 nm. Modul pružnosti výsledného elastomeru je 3,8 MPa. Zatížení je vyvozeno systémem navrženým pro tuhé kontakty, který ovšem pro malé síly pod 1 N není vhodný. Projevuje se zde citlivost zatížení na mechanické vibrace. Proto je výsledná hodnota v experimentech určována aproximací JKR teorie na statickém kontaktu.



Obr. 1.9: Spectra barviva Eosin a příslušných filtrů [20], 1–laser 532 nm, 2–dichromatické zrcátko, 3–excitační filtr, 4–excitační spektrum, 5–emisní spektrum, 6–emisní filtr.

Vzhledem k použité aparatuře a zdroji světla je na surovém snímku kontaktu, na obr. 1.10, patrné kolísání intenzity v typické struktuře vzniklé při excitaci laserem. Zároveň se zde projevuje méně viditelná nerovnoměrnost nasvícení způsobená Gaussovým rozložením intenzit v excitačním svazku. Z těchto důvodů je u všech snímků provedena normalizace pomocí pozadí, obr. 1.11a, které představuje snímek maziva bez vzorku, s rovnoměrnou koncentrací barviva a objemem maziva po celé ploše. V ideálních podmínkách a homogenním nasvícením by zde vystupovala pouze jedna hodnota intenzity. Reálně je však na obr. 1.11a zachycena nerovnoměrnost nasvícení a šum.



Obr. 1.10: Surový snímek statického kontaktu PDMS a skleněného disku nasvíceného pomocí laseru.[7].

Samotná normalizace představuje aritmetickou operaci dělení pixelů na odpovídajících si pozicích, které jsou reprezentovány stejným typem proměnné, nabývají stejné maximální hodnoty (závisí na barevné hloubce snímače). Každý snímek představuje funkci rozložení intenzity popsanou souřadnicemi x a y. Intenzita světla odraženého respektive emitovaného barvivem do objektivu B(x, y)je proporcionální podle (1) na odrazivosti respektive množství barviva R(x, y) a intenzitě dopadajícího světla respektive excitace barviva I(x, y) [21].

$$B(x,y) \propto I(x,y) \times R(x,y) \tag{1}$$

$$\frac{B_{kontakt}(x,y)}{B_{pozadi}(x,y)} \propto \frac{I_{kontakt}(x,y) \times R_{kontakt}(x,y)}{I_{pozadi}(x,y) \times R_{pozadi}(x,y)}$$
(2)

$$\frac{B_{kontakt}(x,y)}{B_{pozadi}(x,y)} \propto R_{kontakt}(x,y) \tag{3}$$

Při normalizaci kdy je snímek kontaktu (obr. 1.10) dělen pozdím (obr. 1.11a) dostáváme vztah (2). Po úpravě, za předpokladu pořízení všech snímků s totožně nastaveným osvětlením, kdy je $I_{kontakt}(x, y) = I_{pozadi}(x, y)$ a homogenní koncentrací fluorescenčního barviva v celém objemu maziva, čemuž odpovídá $R_{pozadi}(x, y) = konstanta$, je intenzita proporcionální k množství fluorescenčního barviva podle (3). Na obr. 1.11b je vidět výsledná intenzitní mapa, kde se hodnoty každého pixelu pohybují od 0 do 1 v důsledku normalizace. Pro další snížení hladiny šumu je aplikováno průměrování sousedních hodnot podle (4). Na takto upravených intenzitních mapách je provedena kalibrace na tloušťku mazacího filmu pomocí Hertzovi teorie a statického kontaktu.

$$P_{(i,j)} = \frac{8P_{(i,j)} + P_{(i+1,j)} + P_{(i-1,j)} + P_{(i,j+1)} + P_{(i,j-1)} + P_{(i-1,j-1)}}{16} + P_{(i+1,j-1)} + P_{(i-1,j+1)} + P_{(i+1,j+1)}$$
(4)



Obr. 1.11: Normalizace intenztních map [7], a) pozadí, b) normalizovaný snímek.

Kalibrace tloušťky mazacího filmu probíhá přímo na měřeném vzorku. Z normalizovaného snímku statického kontaktu jsou vzaty v okolí centrální oblasti hodnoty intenzit spolu se vzdáleností od centra kontaktu. Snímek byl pořízen přibližně 10 min po zatížení, aby případné zachycené mazivo mohlo vytéci a následná kalibrace byla přesnější. Pomocí vztahu (5) odvozeného z Hertzovy teorie pro výšku mezery mezi tělesy v okolí centrální oblasti je určena teoretická tloušťka mazacího filmu na základě vzdáleností od středu kontaktu $r \cdot E'$ představuje redukovaný modul pružnosti (7), a je poloměr centrální oblasti kontaktu, p_{max} je maximální kontaktní tlak (6), w_s je zatížení. v_x je Poissonoův poměr a e_1, e_2 jsou moduly pružnosti těles v kontaktu.

$$h = \frac{a \cdot p_{max}}{E'} \left[-\left(2 - \frac{r^2}{a^2}\right) \cos^{-1}\frac{a}{r} + \left(\frac{r^2}{a^2} - 1\right)^{\frac{1}{2}} \right]$$
(5)

$$p_{max} = \frac{3 \cdot w_s}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \tag{6}$$

$$E' = \frac{2}{\frac{1 - v_1^2}{e_1} + \frac{1 - v_2^2}{e_2}}$$
(7)

Dopočítané tloušťky spolu s intenzitami tvoří soubor dvojic, které jsou prokládány funkcí (obr. 1.12a). Při nízkých koncentracích barviva nebo malých tloušťkách filmu je závislost lineární. U tohoto postupu je zmiňováno problematické určení přesného zatížení ovlivněného adhezivními silami, které navíc mohou měnit i výšku mezery v Hertzově kontaktu. Přesnější hodnotu zatížení je získána z aproximace JKR teorie.



Obr. 1.12: Kalibrace intenztních map [7], a) klibrační křivka, b) centrální tloušťka filmu.

Centrální tloušťka filmu získaná z kalibrovaných intenzitnch map je znázorněna na obr. 1.12b. Jedná se o plně zaplavený kontakt mezi PDMS pinem a skleněným diskem (BK7). Experimenty zahrnují tři maziva s rozdílnou viskozitou. Čistý glycerol (GLY), 50% roztok glycerolu (GLY50) a vodu. Centrální tloušťky jsou porovnány s teorií Hamrock&Dowson pro poddajné kontakty (8), kde U je bezrozměrný parametr rychlosti (9), W je bezrozměrný parametr zatížení (10), R' je redukovaný poloměr ve směru střední rychlosti (11) a k je parametr elipticity. E' představuje redukovaný modul pružnosti (7), u je střední rychlost, η je dynamická viskozita maziva, w je aplikované zatížení a R_{x1}, R_{x2} jsou poloměry povrchů v kontaktu.

$$h_c = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot U^{0,64} \cdot W^{-0,22} \cdot R'$$
(8)

$$U = \frac{u \cdot \eta}{E' \cdot R'} \tag{9}$$

$$W = \frac{w}{E' \cdot R'^2} \tag{10}$$

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{p2}}}$$
(11)

Vzhledem k nízkému modulu pružnosti není příliš patrný charakteristický tvar podkovy ohraničující oblast (obr. 1.13) s centrální tloušťkou. Uvažované hodnoty odpovídají středu intenzitní mapy zachycující kontakt. Při vyšších rychlostech se experimenty shodují s teorií s výjimkou čistého glycerolu, kde leží všechny hodnoty pod predikcí. Významnější odchylky u vody a 50% roztoku glycerolu nastávají pod hranicí minimální měřitelné tloušťky filmu 300 nm. Z výsledků čistého glycerolu je patrný trend odpovídající predikci pro dynamickou viskozitu maziva 0,15 Pa s, naměřená hodnota ovšem odpovídá 1,16 Pa s. Možným důvodem nižší viskozity respektive tlouštěk filmu může být kombinace vlivu zahřívání maziva laserem při průchodu excitovanou oblastí a absorpce vzdušné vlhkosti glycerolem.



Obr. 1.13: I-EHL kontakt PDMS pinu a skleněného disku, čistý prokluz, zatížení 23,5 mN, střední rychlost 113,1 mm s⁻¹ [8].

Další sada experimentů je zaměřena na efekt hladovění kontaktu, kdy je glycerol rozetřen v tenké vrstvě po spodní straně disku. Zkalibrované intenzitní mapy na obr. 1.14 zachycují interval rychlostí 0-1100 mm·s⁻¹, ve kterém tloušťky filmu dosahují až 30 µm. Při nejvyšších uvažovaných rychlostech potom dochází k částečnému splynutí kontaktní oblasti s okolím kontaktu (860 a 1100 mm·s⁻¹).



Obr. 1.14: Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, čistý prokluz, střední rychlost 0-1100 mm s⁻¹, vstup maziva do kontaktu na pravé straně. [7].

Výsledné centrální tloušťky z obr. 1.14 jsou na obr. 1.15a porovnány s predikcí (8) při hodnotě viskozity 0,15 Pas, která nejlépe korelovala s výsledky v případě plně zaplaveného kontaktu (obr. 1.12b). Centrální tloušťky jsou nižší než predikované, přičemž nárůst tloušťky není lineární. Významné odchylky se vyskytují především krajních oblastech intervalu aplikovaných rychlostí, kde u vysokých hodnot odklon vysvětluje hladovění kontaktu. Vybrané profily tlouštěk filmu ležící ve směru střední rychlosti na ose x v obr. 1.14 jsou zobrazeny na obr. 1.15b. Při porovnání jednotlivých průběhů je patrný značný nárůst šumu se zvyšující se tloušťkou mazacího filmu, kde u statického kontaktu téměř nevystupuje naproti tomu u rychlosti 579 mm s⁻¹ je jasně viditelný. Tento šum by přitom neměl být způsoben ani drsností povrchu, která dosahuje pouze 10,24 nm ani v důsledku částic opotřebení. Šum je způsoben kolísáním intenzity excitace, kterou se nepodařilo plně eliminovat při procesu normalizace. Vyšším obsahem fluorescenčního barviva respektive objemem maziva v kontaktu je tento šum zesílen. Značný nárůst šumu je jedním z důvodů snahy o co nejmenší možné koncentrace barviva.



Obr. 1.15: Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, zatížení 25 mN, mazivo glycerol [7], a) centrální tloušťky filmu, b) profily ve směru střední rychlosti.

V navazující práci kterou přinesl Fowell a kol. [8], se autorům podařilo dosáhnout minimální měřitelné tloušťky filmu v rozsahu 50-100 nm snížením hladiny šumu oproti předchozím pracím, kde je minimální hranice přibližně 300-350 nm. Důvodem tohoto zlepšení je zejména použití menšího počtu-kvalitnějších optických členů a zavedením epi-osvětlení. Oproti předchozím pracím je použito barvivo Rhodamine 6G v nižší koncentraci 0,01 hm%, rozpuštěné v 75 hm% glycerolu a 25 hm% vody. Autoři se zaměřují na tři konfigurace. Nekonformní PDMS pin zatížený 11 mN a 23,5 mN a fluorokarbonový (FKM) O-kroužek (E = 7,3 MPa) zatížený 5,4 N proti skleněnému disku. U konformní konfigurace je disk nahrazen konkávní čočkou do které dosedá O-kroužek zatížený 3,63 N a 4,8 N.



Obr. 1.16: Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, zatížení 23 mN, mazivo 75% roztok glycerolu a vody [8], a) centrální tloušťky filmu, b) profily ve směru střední rychlosti.

Výsledky kontaktu PDMS pinu a skleněného disku se shodují s předchozími pracemi. Centrální tloušťky leží pod predikcí dle Hammrock&Dowson. Sledují lineární trend. V důsledku obtížného určení centrální oblasti jsou hodnoty průměrem 20 × 20 pixelů v místě nominálního středu statického kontaktu. Na intenzitních mapách není patrný charakteristický tvar podkovy. Centrální oblast je zformována do podoby hydrodynamického klínu.



Obr. 1.17: Kontakt FKM o-kroužku a skleněného diku, zatížení 5,4 N, mazivo 75% roztok glycerolu a vody [8], a) intenzitní mapa při střední rychlosti 144 mm s⁻¹, b) centrální tloušťky, c) profily kontaktu ve směru střední rychlosti.

V případě kontaktu O-kroužku a disku jsou experimenty provedeny za podmínek čistého valení. Vzhledem k vyšší drsnosti povrchu, 800 ± 50 nm, jsou na intenzitních mapách viditelné pruhy (obr. 1.17a). Centrální tloušťky leží nad predikcí Hammrock&Dowson, obr. 1.17b, kde pod hranicí 700 nm dochází k výraznému rozptylu hodnot, které jsou stejně jako v případě PDMS pinu průměrem hodnot v okolí nominálního středu kontaktu. Začíná se zde projevovat drsnost povrchu. V centrální oblasti nedochází k formování hydrodynamického klínu (obr. 1.17c). Vzhledem k úpravám měřicí aparatury není na profilech patrný postupný nárůst šumu se zvětšující se tloušťkou filmu.

Ke sledování toku maziva je možné využít mimo FRAP i schopnost fluorescenčního barviva navázat se na určitou složku maziva nebo částice. Tato vlastnost je široce využívána především v biotribologii. V technických aplikacích pak ke sledování toku pomocí částic označených barvivem, unášených proudem maziva. Tan a kol. [22] pozoruje parafinové částice procházející kontaktem polyuretanového (PU) pinu a skleněné desky, mazaného silikonovým olejem (10 sCt, Chemical Industries, Ltd.) umožňujícím rozpustit mnoho fluorescenčních barviv. V navazující práci [23] je použit místo pinu váleček. Pro naznačení částic je použit 5di (5-tert-butylbenzoxazol-2-yl)thiophene v koncentraci 0,17 %, který neovlivňuje rheologii základního maziva. Samotný proces spočívá v rozpuštění parafínu v mazivu při teplotě 68 °C. Následně je přidáno barvivo. Výsledná směs je míchána za stálé teploty po dobu 20 min. Poté následuje ochlazení na 20 °C, kdy postupným tuhnutím vznikají částice obsahující barvivo. Jako zdroj světla je použita metal-halidová lampa, jejíž světelné spektrum je podobné rtuťové výbojce.

1.3 Úprava intenzitních map

Se současnou technikou není možné zaručit rovnoměrnou excitaci v celé pozorované oblasti především díky nerovnoměrnému nasvícení a proměnlivé odrazivosti povrchu vzorků. Pro přesné vyhodnocení experimentů je třeba tyto jevy vyskytující se na pozadí intenzitní mapy eliminovat a vyhnout se přitom zesílení šumu. Samotné pozadí je často obtížně pozorovatelné (obr. 1.11a a 1.18a). Pomocí prahování (tresholding, obr. 1.18b) nebo probarvením (obr. 1.18c) je ovšem možné dosáhnout značného zvýraznění [24]. Existují tři hlavní metody separace pozadí v intenzitních mapách. Dopočítání z originálního snímku kontaktu, využití modelového případu a zachycení na samostatném snímku.



Obr. 1.18: Zvýraznění nerovnoměrnosti osvětlení [24], a) originální snímek, b) zvýraznění pomocí prahování, c) zvýraznění probarvením snímku.

Dopočítání pozadí ze snímku se odlišuje podle rozložení intenzit, na čemž závisí použitý matematický aparát, potřebný objem dat a výsledný efekt korekce. V případě bodových kontaktů by ovšem bylo obtížné rozlišit změnu tloušťky filmu a nerovnoměrnost osvětlení. Zde je možné s výhodou využít předpokládané rozložení intenzit na základě znalosti měřicí aparatury. Především u laserového svazku, který se vyznačuje Gaussovým rozložením intenzity je aplikace modelu výhodná. Na obr. 1.19 je vidět korekce centrálního osvitu. Pomocí originálního snímku obr. 1.19a je předpokládané rozložení intenzity přizpůsobeno konkrétnímu případu obr. 1.19b., následně je teoretické pozadí odečteno. Výsledný snímek je znázorněn na obr. 1.19c.



Obr. 1.19: Korekce pomocí modelového pozadí [24], a) originální snímek, b) modelové pozadí, c) Výsledný snímek.

Oba výše popsané přístupy separování pozadí ze snímku pracují s teoretickými hodnotami. Přesnější eliminaci je možné docílit využitím pozadí odpovídající aktuálnímu nastavení měřicí aparatury. Jedná se o snímek bez vzorku. Stejný přístup, který kromě nerovnoměrné intenzity dokáže odstranit i případné artefakty a vadné pixely využívá Myant a kol. [7].

Nezávisle na algoritmu separace pozadí, dopočítáním ze snímku, využitím teoretického modelu nebo zachycením samostatného snímku, je možné využít více metod pro samotnou eliminaci. Především aritmetické operace dělení a odčítání. Dělení, které využívá Myant a kol. [7] je vidět na obr. 1.20a. Pixely původního snímku jsou děleny pixely pozadí na odpovídajících si pozicích. Další možností je odečtení obr. 1.20c, kdy je od odpovídajících pixelů snímku odečteno pozadí. Při srovnání s dělením je dosaženo mírně zhoršeného výsledku. Jednoznačně nejlepší eliminace je ovšem dosaženo v případě odečtení pozadí s lineární gama korekcí, obr. 1.20d. V tomto případě však může dojít k ovlivnění výsledků.



Obr. 1.20: Eliminace pomocí samostatně zachyceného pozadí [24], původní snímek obr. 1.18a, a) pozadí se zesíleným kontrastem, b) eliminace vydělením snímku pozadím, c) odečtení pozadí od snímku, d) odečtení pozadí s lineární gama korekcí.

1.4 Analýza výsledků

Chování maziva v poddajných kontaktech prozatím nebylo dostatečně popsáno. Běžně používané metody jako je optická interferometrie nebo metody elektrické jsou u poddajných kontaktů v důsledku vysokých tlouštěk mazacího filmu a materiálových vlastností kontaktních těles prakticky nepoužitelné. Je proto třeba hledat nové možnosti pozorování a popis těchto kontaktů. Pro měření tloušťky filmu byly aplikovány přístupy měření magnetického toku, Ramanova spektroskopie nebo ultrazvuk [4, 5, 6].

Jako optimální metoda pro studium poddajných kontaktů se jeví fluorescenční mikroskopie, která není závislá na materiálech kontaktních těles a je schopná měřit velké rozsahy tlouštěk mazacích filmů, až desítky µm [8]. Pro pozorování mazacího filmu v poddajných kontaktech tuto metodu použil a optimalizoval Myant a kol. [7]. Samotná metoda je v tribologii používána již delší dobu a kromě zmíněné tloušťky filmu umožňuje například: sledovat chování okolí kontaktu [17, 18], tok maziva [14] a mapovat průchod nečistot kontaktem [22, 23].

Na intenzitní mapy má velký vliv kombinace fluorescenčního barviva a zkoumaného maziva. Při nesprávné kombinací dochází k rychlé degradaci a malé intenzitě emise. Důležité je také optimální dávkování barviva, aby byla zaručena lineární závislost mezi množstvím excitovaného barviva a intenzitou emise. Ta při vyšších koncentracích není zaručena. Intenzitní mapy je třeba dále upravit, eliminovat pozadí a odstranit šum.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Cílem práce je navrhnout metodiku hodnocení tloušťky filmu v kontaktu poddajných těles. Kromě pojednání o limitacích souvisejících s analýzou poddajných materiálů musí práce obsahovat návrh algoritmu pro kalibraci a vyhodnocení tloušťky filmu maziva v kontaktu.

Hlavním cílem je navrhnout konkrétní postup měření tloušťky filmu maziva v poddajném kontaktu, včetně úpravy intenzitních map, kalibrace metody a ověření algoritmu.

Realizace předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

- Odladit metodu založenou na principu fluorescenční mikroskopie pro měření tloušťky mazacího filmu.
- Navrhnout postup kalibrace a zpracování intenzitních map.
- Zajistit vhodné vzorky pro možnost ověření navrženého algoritmu vyhodnocení tloušťky maziva.
- Verifikovat navržený algoritmus.
- Provést sérii experimentů s poddajnými vzorky.

2

3 MATERIÁL A METODY

3.1 Experimentální zařízení

Pro analýzu tloušťky maziva v poddajných kontaktech slouží upravený optický tribometr (obr. 3.1). Mezi skleněným diskem a plastovou kuličkou je formován tenký mazací film. Oba elementy jsou poháněny servomotory, které je možné pomocí frekvenčních měničů nezávisle na sobě řídit ze softwarového rozhraní – možnost změny velikosti prokluzu a unášivé rychlosti. Osy rotace disku a vzorku jsou mimoběžné, vzájemně kolmé. Plastová kulička je umístěna ve vaně s mazivem, které je otáčením unášeno do kontaktu. Na pozici je držena kuželovými čelistmi přípravku poháněného servomotorem, které díky svému tvaru vystředí kuličku vůči hnacímu hřídeli. Skleněný disk bez povrchových úprav je uložen na hřídeli, přičemž současně slouží jako rameno dvojzvratné páky přes kterou je pomocí závaží vyvozeno statické zatížení až 90 N.



Obr. 3.1: Experimentální aparatura pro měření tloušťky mazacího filmu.

Kontakt je pozorován s využitím optického systému, který se skládá z fluorescenčního mikroskopu, světelného zdroje a snímače. V experimentech je k excitaci fluorescenčního barviva použita rtuťová výbojka. Světlo prochází přes aperturní clonu, která reguluje intenzitu a polní clonu vymezující v zorném poli excitovanou oblast do modulu obsahujícího excitační a emisní filtr a polopropustné zrcátko. Zde je vymezen svazek směřující přes objektiv do kontaktu, kde je absorbován fluorescenčním barvivem. Následně vyzářená emise prochází objektivem zpět přes modul s filtry do snímače kamery.

Světelné spektrum rtuťové výbojky použité jako zdroj světla je znázorněné na obr. 3.2. Výbojka poskytuje dostatečný výkon v oblasti UVA pro využití přirozené fluorescence i v pásmu viditelného světla pro barviva Rhodamin 6G a Eosin, která byla v této práci rovněž využita. Po zažehnutí oblouku dochází ke změnám intenzity a spektra vlivem zahřívání. Vzhledem k předpokladu stálých světelných

podmínek po celou dobu experimentu je třeba vyčkat přibližně 15 min, kdy dochází k postupnému ustálení intenzity světla. Při porovnání s laserem lze svazek na výstupu z rtuťové lampy považovat za nekoherentní, což se projevuje rovnoměrnější excitací a nižšími nároky na zpracování intenzitních map.



Obr. 3.2: Světelné spektrum rtuťové výbojky [25].

Díky šířce spektra rtuťové výbojky je třeba jak emisní, tak excitační filtr. Při průchodu světla modulem obsahujícím oba filtry a polopropustné zrcátko dochází ke značným ztrátám výkonu. Na obr.3.3 je znázorněn modul ET DAPI 49000, použitý ve většině experimentů. Ze spektra světelného zdroje propouští pouze vlnové délky do 400 nm o nejvýše poloviční intenzitě – část energie se ztratí při průchodu světla filtrem. V případě přirozené fluorescence a některých barviv přesto dochází v případě vyšších tlouštěk mazacího filmu k přeexponování centrální oblasti kontaktu, což je eliminováno snížením intenzity pomocí šedých (ND) filtrů $4\times$, $8\times$ a $16\times$, umístěných bezprostředně za zdrojem světla. Pro přesnější nastavení excitačního svazku je dále umístěna aperturní a polní clona, umožňující plynule regulovat intenzitu a excitovanou oblast.



Obr. 3.3: Set filtrů ET DAPI 49000, a) set filtrů, b) spektrum filtrů [20].

Po průchodu světla excitačním filtrem je svazek odražen od polopropustného (dichromatického) zrcátka přes objektiv do kontaktu kde je absorbován fluorescenčním barvivem obsaženým v mazivu. Následná emise vyzářená barvivem zpět

do objektivu prochází díky vyšší vlnové délce polopropustným zrcátkem a emisním filtrem dále na snímač kamery. Jedná se o kameru Neo 5.5 (Andor Technology Ltd) vybavenou chlazeným, 16 bit sCMOS snímačem umožňujícím snímat chování kontaktu v rozlišení 2560×2160 pixelů při 36 fps. Nastavení expozice a předzpracování dat se provádí v softwarovém rozhraní, dodávaném spolu s kamerou, obsahující také spoušť a editor pro vytváření skriptů.

3.2 Fluorescence

Fluorescence označuje fyzikální vlastnost látky absorbující záření na jedné vlnové délce a jeho následné emisi na vyšší vlnové délce – s nižší energií. Molekuly vyznačující se tímto chováním jsou nazývány fluorofory. Při absorpci světelného svazku dochází k přenosu energie srážkami dopadajících fotonů s molekulami fluoroforu, obr. 3.4, jejichž elektrony jsou excitovány, přeskakují na vyšší energetické hladiny. Velikost předané energie závisí na barvě respektive vlnové délce fotonu. V excitovaném stavu nedokážou elektrony setrvat a po určité době dochází k náhlému poklesu energie, kdy je emitován foton o vyšší vlnové délce a elektron se vrací na původní energetickou hladinu.



Obr. 3.4: Jabloskeho diagram.

Proces excitace a emise neprobíhá pouze pro jednu vlnovou délku, ale pro celé spektrum (obr. 3.3b). U každého fluoroforu se vyskytují dvě, excitační a emisní spetrum. Rozdíl mezi maximem excitace a emise je dán Stokesovým posuvem, na jehož velikosti značně závisí úroveň šumu snímků. Proces fluorescence je cyklický. Molekula fluoroforu je opakovaně excitovaná. Po určité době, silně závislé na intenzitě excitačního svazku dochází ovšem k nevratné destrukci označované jako fotovybělování (photobleaching). Intenzita emise (12) [26] je závislá především na molární koncentraci fluoroforu C, kvantovém výtěžku ϕ , který je možné interpretovat jako poměr mezi absorbovanými a vyzářenými fotony za sekundu a intenzitě excitačního svazku I_e . Dále závisí na absorpčním koeficientu $\varepsilon(\lambda_{laser})$ ovlivněném vlnovou délkou excitačního svazku a velikosti kontrolního objemu dV.

$$F = I_e \cdot \varepsilon(\lambda_{laser}) \cdot C \cdot \phi \cdot dV \tag{12}$$

Ve větších objemech se může projevit efekt absorbování excitačního světla roztokem, kdy jsou vzdálenější vrstvy od povrchu excitovány nižší intenzitou. Při měření tlouštěk mazacího filmu tak mohou vznikat nelinearity mezi intenzitou a změnou tloušťky což vede ke snížení přesnosti měření. Podobně se může projevit vysoká koncentrace fluorescenčního barviva samnozhášením, kdy od prahové koncentrace dochází k poklesu počtu emitovaných fotonů. Mechanizmů způsobujících pokles kvantového výtěžku majících vliv v průběhu experimentu může být více. Významným se stává především styk fluoroforu s molekulami zhášedel v podobě cizích látek. Nejčastěji se jedná o molekulární kyslík, chrom, jód a některé ionty (Fe, Cu, Mn, Ni, Co, Hg, ...). Dalším mechanizmem je vnitřní konverze, kdy energie nezářivě přechází z excitovaných molekul na molekuly v základním stavu při srážkách, jejichž počet je ovlivněn teplotou a viskozitou prostředí.

3.3 Algoritmus vyhodnocení intenzitních map

Pro vyhodnocení a normalizaci intenzitních map byl vyvinut nový experimentální software v prostředí Wolfram Mathematica 10 s cílem sjednotit normalizaci i algoritmus a zkrátit tak časové nároky na vyhodnocení experimentů. Uživatelské prostředí je optimalizováno pro zpracování sad měření provedených za stacionárních podmínek, jejichž hlavním výstupem je závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti kontaktu. Software je sestaven ze tří hlavních částí umožňujících import a normalizaci dat k pozadí, kalibraci dat na tloušťku mazacího filmu a vkreslení závislostí.

Uživatelské rozhraní se skládá ze tří panelů. První, sloužící pro import snímků, parametrů potřebných k vyhodnocení a podmínek experimentu je znázorněn na obr. 3.5. Při startu programu jsou automaticky načteny soubory formátu .dat a zobrazeny v prostředním sloupci. U každého je možné nastavit zda se jedná o snímek pozadí nebo kontaktu, což je následně nutné potvrdit. V levém sloupci jsou zobrazeny parametry, které je třeba vyplnit před další prací s programem.

	Save data		L	oad	data		
Image horizontal size	1500	[Pixel]	Contact	;	Soubor:	100	Calibration images: 2 Background images: 1
Image vertical size	1500	[Pixel]	Contact	•	Soubor:	10	Contact images: 12
Pixel binning	1	[-]	Contact	•	Soubor:	150	Asian data type
Pixel size	6.5	(µm]	Contact	:	Soubor:	200	Normalization image:
Objective magnification	10	[-]	Contact	•	Soubor:	20	Background
Contact begining		[Pixel]	Contact	:	Soubor:	300	Start
Contact ending		[Pixel]	Contact	;	Soubor:	400	Interupt
Static load	26	[N]	Contact	;	Soubor:	40	Abort
Poisson's ratio of ball	0.3	[+]	Contact	;	Soubor:	500	Abolt
Modulus of elasticity of disc	80 000	[Mpa]	Contact	;	Soubor:	5	
Modulus of elasticity of ball	310 000	[Mpa]	Contact	+	Soubor:	60	
Contrast upper level	65 536	[-]	Contact	;	Soubor:	80	
Contrast lover level	0	[-]	Background	+	Soubor:	Background	
Ball Radius	12.7	[mm]	Static	;	Soubor:	Static1	
ynamic viscosity of lubricant	0.7	[pa s]	Static	:	Soubor:	Static2	
Pressure-viscosity coeficient	26	[-]		_			

Obr. 3.5: Panel sloužící pro import a normalizaci dat.

V pravé části panelu je uveden celkový počet snímků. Dále se zde nachází nastavení normalizačního pozadí, spuštění a zastavení procesu normalizace, který pro eliminaci pozadí aplikuje aritmetickou operaci dělení. Pro správnou funkci softwaru je třeba dodržet stejný formát pro všechny snímky i typ použitých proměnných unsigned short int (0-65536). Snímky kontaktu i pozadí jsou reprezentovány maticemi, kde výsledný snímek je získán dělením hodnot na odpovídajících si pozicích (13), reprezentovaný normalizovanými intenzitami $I_{N_{i,j}}$, které jsou rovny podílu intenzit obrazu kontaktu $I_{c_{i,j}}$ zmenšených o minimální hodnotu I_{min_c} a intenzit pozadí $I_{b_{i,j}}$ zmenšených o minimální hodnotu I_{min_b} . Hodnoty označené vývojovým prostředím jako nevyhodnotitelné nebo nekonečné jsou automaticky převedeny na maximální možnou hodnotu reprezentující bílou barvu.

$$I_{N_{i,j}} = \frac{I_{c_{i,j}} - I_{min_c}}{I_{b_{i,j}} - I_{min_b}}$$
(13)

$$w = \frac{2 \cdot E' \cdot a^3}{3 \cdot R'} \tag{14}$$

K zachycení snímku pozadí slouží přípravek sestávající ze dvou mikroskopových podložných skel, oddělených nerezovými deskami o výšce 0.3 mm ,obr. 3.6. Spodní strana je zalita pryskyřicí UR 3490 (ACR CZECH s.r.o.) plněnou lampovou černí, zabraňující odrazu světla od podkladu. Vzniklá mezera je vyplněna filmem maziva, který ovšem v důsledku geometrických nepřesností součástí není rovnoměrný. Zachycené pozadí je však dostatečné pro normalizaci. Výška mezery v přípravku nemá vliv na kalibraci intenzity na tloušťku filmu, která probíhá vždy až v normalizovaných intenzitních mapách. Ovlivněna je pouze maximální měřitelná tloušťka filmu.



Obr. 3.6: Přípravek sloužící pro zachycení pozadí, a) uložení skel, b) schema přípravku.

Normalizovaná matice obsahující hodnoty intenzit 0-1 je převedena na obraz reprezentovaný původním rozsahem 0-65536, tak aby korespondoval se surovými daty. Kalibrace a vyhodnocení tlouštěk filmu probíhá ve druhém panelu, obr. 3.7. Na horní straně jsou záložky zobrazující jednotlivé normalizované intenzitní mapy. V levé části jsou umístěny prvky pro vyhodnocení centrální oblasti a změny intenzit v bezprostředním okolí. Dále jsou zde umístěny tlačítka umožňující export probarvených intenzitních map a centrálních tlouštěk filmu. Na pravé straně se zobrazují jednotlivé obrazy kontaktů.



Obr. 3.7: Panel sloužící kalibraci a vyhodnocení dat.

Pro kalibraci je třeba ze statického kontaktu odečíst průměr centrální oblasti, ze kterého je pomocí Hertzovy teorie přesně určeno aplikované zatížení (14), kde E' je redukovaný modul pružnosti, a je odečtený poloměr centrální oblasti a R' je redukovaný poloměr křivosti. Pro snadnější hledání hranice mezi centrální oblastí a okolím kontaktu je pod normalizovaným obrazem vykreslen graf znázorňující horizontální profil intenzit procházející středem kontaktu. Dále je implementována uživatelsky definovatelná konvoluční matice 3×3 , pomocí které je možné zvýraznit hranici mezi centrální oblasti a okolím kontaktu. Poloměr a je počítán jako vzdálenost definovaného středu (osový kříž), který je nejprve potřeba potvrdit a bodu ležícím na kružnici určující odečtenou hranici centrální oblasti. Odečtenou hodnotu (červená kružnice) je možné porovnat s teoretickou hodnotou z Hertzovy teorie reprezentovanou zelenou kružnicí (15). Pro přesnější nastavení je možné velikost centrální oblasti a pozici středu nastavit pomocí trimovacích šipek s krokem 1 pixel nacházejících se v levé části panelu.

$$a_h = \left(\frac{3 \cdot w \cdot R'}{E'}\right) \tag{15}$$

Po definici středu a poloměru centrální oblasti, respektive zatížení je třeba vymezit body, ze kterých bude provedena samotná kalibrace na tloušťku filmu. Určuje je vnitřní a vnější hranice (azurová a oranžová kružnice), mezi kterými je pro každý pixel vypočítána vzdálenost od středu kontaktu, následně přepočtená pomocí (5) na tloušťku mazacího filmu. Intenzity pixelů a dopočítané tloušťky tvoří mrak bodů, které jsou aproximovány lineární funkcí pomocí metody nejmenších čtverců (obr. 3.8) – předpoklad lineárního nárůstu tloušťky filmu spolu s intenzitou. Získaná kalibrační funkce umožňuje převést intenzitu na tloušťku mazacího filmu.



Obr. 3.8: Aproximace kalibrační funkcí.

Třetí panel (obr. 3.9) slouží pro vykreslení závislosti centrální tloušťky filmu maziva na rychlosti v logaritmických a lineárních osách, profilů tlouštěk a aproximace dat kalibračními funkcemi. Přepínání mezi jednotlivými grafy je možné pomocí pásu karet v horní části panelu. Pod nimi se nachází rozbalovací menu s podrobným nastavením zobrazovaných dat. Základní nastavení vykreslovaného grafu je v sloupci v levé části panelu.



Obr. 3.9: Panel sloužící pro vykreslení závislostí.

U všech grafů je možné nastavit velikost vykreslované oblasti, zobrazit popisky os, legendu a vykreslení teorie Hamrock&Dowson pro EHL (16) a I-EHL (8) režim mazání ve sloupci v levé části, kde k je parametr elipticity. V případě centrálních tlouštěk filmu je navíc možné pomocí rozbalovacího menu zvolit re-

MATERIÁL A METODY

prezentaci hodnot jedním pixelem nebo průměrovanou oblastí, kterou je možné nastavit ve druhém panelu, obr. 3.7 (modře vybarvená kružnice). Další dvě menu slouží pro zvolení zobrazených profilů tlouštěk filmu, sílu pohyblivého průměru (počet průměrovaných hodnot v jednom kroku) a velikost teček reprezentujících jednotlivé body. V posledním menu je nastavení vykreslení kalibračních funkcí a korespondujících dat.

$$h_c = 2,69 \cdot U^{0,67} \cdot G^{0,53} \cdot W^{-0,067} \cdot (1-0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}) \cdot R'$$
(16)

4 VÝSLEDKY

Diplomová práce je zaměřena na pozorování filmu maziva v kontaktech poddajných těles pomocí fluorescenční mikroskopie s využitím výše popsané aparatury a algoritmu vyhodnocení intenzitních map.

V provedených experimentech je zkoumán jak EHD tak i-EHD kontakt skleněného disku se čtyřmi různými vzorky. Kuličky o průměru 25,4 mm vyrobené z ložiskové oceli a keramiky Si_3N_4 (Redhill precision speciality balls) jsou použity pro simulaci bodového EHD kontaktu. Poddajné vzorky jsou vyrobeny z fenolické pryskyřice (průměr 25,4 mm) a polypropylenu (průměr 30 mm, The Precision Plastic Ball Co Ltd). Různá kvalita povrchů, geometrie, materiálových vlastností a složení vzorků umožňují zkoumat vliv mnoha parametrů na algoritmus vyhodnocení. Jedná se především o drsnost povrchu vzorku a s ní související odrazivost a přítomnost zhášedel fluorescence v materiálu.

Následující experimenty tvoří dvě skupiny. Verifikační, pro ověření korektnosti navrženého postupu měření a algoritmu vyhodnocení. Předmětem pozorování je film maziva v EHL kontaktech umožňující porovnat výsledky fluorescenční mikroskopie s predikcí dle Hmarocka&Dowsona pro tuhé kontakty, která je dlouhodobě považována za dostatečně přesnou. Druhou skupinu představuje měření tloušťky filmu v poddajných kontaktech s cílem identifikovat komplikace související s materiálovými vlastnostmi a kvalitou povrchu vzorků a jejich vlivem na navržený algoritmus měření.

4.1 Verifikace metody

Experimenty jsou zaměřeny na pozorování tloušťky filmu maziva v EHL bodovémš kontaktu ocelového a keramického vzorku, následně porovnané s teorií Hamrock&Dowson. Vzhledem k odlišnému zbarvení povrchů ocelové a keramické kuličky je možné sledovat vliv odráženého světla na přesnost měření. Za účelem zjednodušení je využita přirozená fluorescence maziva.

4.1.1 Popis experimentu

V kontaktu ocelového a keramického vzorku se skleněným diskem je pozorována tloušťka maziva, která je následně porovnána s teoretickými hodnotami. Jako maziva jsou použity minerální oleje R834/80 a R553/73. Experimenty jsou provedeny za podmínek čistého valení v rozsahu rychlostí 500 mm·s⁻¹ s aplikovaným zatížením 26 N a 16 N. Modul pružnosti keramické kuličky je 310 GPa, u ocelové kuličky 210 GPa a u disku vyrobeného z optického skla BK7 80 GPa. Poissonův poměr odpovídá u keramiky 0,27, u oceli 0,3 a u skla 0,206. Povrch ocelové kuličky je leštěn. Přibližná, dosažená drsnost $S_a = 4, 1$ nm je srovnatelná s keramickou kuličkou, kde průměrná, naměřená drsnost odpovídá $S_a = 6, 1$ nm. K měření drsnosti je použit 3D optický profilometr Contour GT-X Bruker, metoda PSI (phase shifting interferometry). Vzorky se vzájemně odlišují barvou, kde keramika Si₃N₄ má černě zbarvený povrch snižující odraženou složku světla. V experimentech je použit set fluorescenčních filtrů DAPI (obr.3.3) umožňující využití přirozené fluorescence maziva, objektiv 10×. Excitovaná oblast je ohraničena polní clonou na kontakt a jeho bezprostřední okolí.



Obr. 4.1: Použité vzorky, a) keramická kulička, b) ocelová kulička.

4.1.2 Keramický vzorek

Film maziva v kontaktu keramické kuličky je za účelem snížení doby potřebné ke zpracování intenzitních map zaznamenán v rozlišení 1500×1000 pixelů. Slučování pixelů je vypnuto, aby nedocházelo ke ztrátě informací ve snímcích. Použitá přirozená fluorescence maziva je velmi efektivní. U pozadí snímaného pomocí přípravku, kde výška vrstvy maziva odpovídá přibližně 0,3 mm, dochází k přeexponování i při nejkratším možné době expozice. Snížení intenzity emise je dosaženo položením skel na sebe – snížení výšky mezery, kdy jsou podložná skla přípravku odděleny pouze tenkým filmem maziva. Výsledný snímek pozadí je uveden na obr. 4.2a. Tmavé skvrny různé velikosti patrné po celé ploše jsou způsobeny vzduchovými bublinkami uvězněnými v mazivu. Originální snímek statického kontaktu zobrazený na obr. 4.2b je normalizovaný pozadím. Ve výsledné intenzitní mapě (obr. 4.2c) je viditelné vykreslení bublin ze snímku pozadí a zvýšení kontrastu, na který má značný vliv odečtení minimální hodnoty. Z histogramu pozadí zobrazeném na obr. 4.3a je patrné posunutí, které na snímku zanechá pouze informace o změně intenzity emise respektive excitace a nerovnoměrnosti tloušťky snímaného filmu způsobené geometrickými nepřesností ustavení a geometrie přípravku, která je zanedbána.



Obr. 4.2: Normalizace vůči pozadí, a) snímek pozadí, b) snímek statického kontaktu, c) snímek normalizovaný vůči pozadí.

4.1.2



Obr. 4.3: Rozložení intenzit, — původní hodnoty, — odečtené minimum, a) snímek pozadí, b) snímek statického kontaktu.

Vliv odečtení minimální hodnoty vyskytující se na snímku před normalizací je patrný na obr. 4.4, kdy u histogramu s odečtenou minimální hodnotou intenzity hladiny jasu korespondují s rozložením tlouštěk filmu maziva ve statickém kontaktu. V histogramu jsou pozorovatelná dvě maxima. První se strmým nárůstem četnosti se vyskytuje v oblasti vysokých jasů reprezentující přeexponovanou oblast na okrajích normalizovaného snímku. Druhé, ležící přibližně na hladině 0,2, odpovídá pozvolnému zvyšování jasu v důsledku růstu tloušťky filmu v okolí centrální oblasti kontaktu. V případě histogramu reprezentujícího stejný snímek, ale bez odečtení minimální hodnoty v procesu normalizace je nárůst četnosti strmý, zastoupený pouze malým počtem jasových hladin – v obrázku se nenachází postupný nárůst intenzity korespondující s tloušťkou filmu.

Okolí kontaktu v normalizovaném snímku, jevící se jako přeexponované je způsobeno kompresí obrázku a barevným podáním monitorů, které ve většině případů nejsou schopny zobrazit dynamický rozsah 16 bit, ale pouze 8 bit. Pro správné zobrazení je třeba využít více barevných kanálů – probarvit snímek, kdy je možné při hloubce 8 bit barevného kanálu rozlišit více než 16 mil hladin.



Obr. 4.4: Vliv odečtení minimální intenzity snímku na výsledek normalizace, a) snímek s odečteným minimem, b) snímek bez odečtení minima.

Pomocí normalizované intenzitní mapy statického kontaktu je provedena kalibrace intenzity na tloušťku filmu maziva. Na obr. 4.5 jsou porovnány kalibrační funkce získané z celého okolí, a z horizontálního profilu, procházejícího středem kontaktu. Průběhy funkcí jsou téměř shodné. Z nárůstu tloušťky maziva v závislosti na intenzitě emise je patrný lineární trend. Díky vysoké kvalitě povrchu vzorku je rozptyl hodnot konstantní i ve vyšších tloušťkách filmu. Minoritní mrak bodů odchylující se horizontálně na intervalu intenzit 16000-36000 counts vzniká při normalizaci. Na vyhodnocení však nemá zásadní vliv. Pixely náležící profilu jsou v oblasti malých tlouštěk rozděleny do dvou větví. Stejné chování, ve větším rozsahu patrné na obr. 3.8 je způsobeno nedokonalým snímkem pozadí, kdy snímaná vrstva maziva není rovnoměrná. Maximální vyhodnotitelná tloušťka filmu odpovídá přibližně 2,5 μ m.



Obr. 4.5: Kalibrační funkce získaná ze statického kontaktu kuličky.

Z vyhodnocených tlouštěk, uvedených na obr.4.6b je patrná velmi dobrá shoda s predikcí dle Hamrock&Dowson ve všech zkoumaných rychlostech. Experiment je jedenkrát zopakován (experiment 2) se slučováním pixelů 2×2 . Výsledkem je poloviční rozlišení snímků. Centrální tloušťky jsou odečteny jako průměr kruhové oblasti o poloměru 10 pixelů. U rychlosti valení 150 mm·s⁻¹ a vyšších, obr. 4.6c, dosahuje tloušťka filmu vyšších hodnot ve středu, než-li na vstupu maziva do kontaktu. Na výstupu dochází k prudkému snížení tloušťky filmu, které nezávisle na rychlosti odpovídá přibližně 250 nm.





Obr. 4.6: Tloušťka filmu maziva R553/73, a) $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, b) průběh centrální tloušťky srovnaný s predikcí Hamrock&Dowson, c) průběh ve směru střední rychlosti.

4.1.3 Ocelový vzorek

U ocelové kuličky jsou patrné dva trendy, které body použité při kalibraci kopírují (obr. 4.7). Zlom se nachází v okolí 18000 counts. V oblasti nízkých tlouštěk je nárůst strmější až do 0,4 µm, kde začíná výrazně narůstat rozptyl. Kalibrační funkce se zde významně odchyluje od aproximovaných bodů. Rozdělení pixelů profilu do dvou hlavních větví naznačuje nerovnoměrnou vrstvu maziva na snímaném pozadí. Stejně jako u kalibrace keramické kuličky se od hlavního shluku horizontálně odchyluje mrak bodů na intervalu intenzit 0-12000 Counts.



Obr. 4.7: Průběh kalibrační funkce získané ze statického kontaktu ocelové kuličky.

Centrální tloušťky filmu maziva v kontaktu, obr. 4.8b, se výrazně odchylují od predikce do rychlosti $80 \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty jsou oproti predikci posunuty do vyšších tlouštěk, přesto je však nárůst lineární, sklon křivky je však nižší, než predikovaný. Tloušťky korespondují s oblastí, kde se kalibrační funkce významně odchyluje od aproximovaných intenzit. Centrální tloušťky filmu jsou reprezentovány průměrnou hodnotu kruhové oblasti o poloměru 15 pixelů. Další výrazné odchylky centrální tloušťky jsou patrné pro rychlosti 150 mm·s⁻¹ a 400 mm·s⁻¹. Odpovídající profil pro rychlost valení 150 mm·s⁻¹ je shodný s 200 mm·s⁻¹ (obr. 4.8c). Stejně jako u keramického vzorku dosahuje u vyšších rychlostí centrální tloušťka vyšších hodnot než-li na vstupu do kontaktu.

4.2 Experimentální studium tloušťky mazacího filmu v kontaktu polypropylenu

Studium poddajného kontaktu polypropylenového vzorku a skleněného disku zahrnuje experimenty provedené se dvěma minerálními oleji, za stacionárních podmínek zahrnujících tři různá zatížení, kladný a záporný prokluz a čisté valení. Výsledky jsou srovnány s predikcí dle Hamrock&Dowson pro poddajné kontakty.

4.2.1 Popis experimentu

Tloušťka filmu v poddajném kontaktu je sledována u minerálních maziv R553/73 a R834/80 s odlišnou dynamickou viskozitou. Experimenty jsou provedeny v režimu čistého valení pro zatížení 18,5 N, 26 N a 40 N, dále je sledována tloušťka filmu při prokluzech 1,5 a -1,5, se zatížením 26 N. Jako kontaktní tělesa jsou



Obr. 4.8: Tloušťka filmu maziva R834/80, a) $40 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$, $100 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$, $150 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$, $200 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$, $400 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$, b) průběh centrální tloušťky srovnaný s predikcí Hamrock&Dowson, c) průběh ve směru střední rychlosti.

použity černě obarvené, polypropylenové kuličky o průměru 30 mm, vyrobené z Pro-fax 6523 a skleněný disk, popsaný v kapitole 4.1.1. Na povrchu vzorků se vyskytují plošky vzniklé broušením a bílé částice plniva viditelné na obr. 4.9, které jsou excitované modrým světlem. Drsnost povrchu změřená 3D optickým profilometrem, odpovídá $S_a = 0,54 \,\mu\text{m}$. Modul pružnosti polypropylenu je 850 MPa. Poissonův poměr 0,42. Podrobné materiálové vlastnosti jsou uvedeny v materiálovém listu, viz příloha strana 68. V experimentech je použit fluorescenční modul DAPI. Excitovaná oblast je vymezena polní clonou na bezprostřední okolí kontaktu. Aperturní clona je maximálně otevřena. Použitý objektiv disponuje zvětšením 5×. Jednotlivé snímky jsou pořízeny v rozlišení 1500×1500 pixelů se slučováním 2×2 – výsledné soubory mají rozlišení 750×750 pixelů.



Obr. 4.9: Polypropylenový vzorek.

4.2.2 Minerální olej R553/73

Pro pozorování vlivu velikosti zatížení na chování tloušťky filmu v kontaktu mazaném minerálním mazivem R553/73 s dynamickou viskozitou 0,7 Pa·s byla provedena série experimentů se zatížením 18,5 N, 26 N a 40 N, za podmínek čistého valení. Na obr. 4.10 je znázorněna centrální tloušťka maziva v závislosti na valivé rychlosti. Při zatížení 18,5 N jsou tloušťky filmu posunuty pod teoretickými hodnotami, přičemž nárůst je lineární, avšak sklon křivky je menší, než predikce. Kolem rychlosti přibližně 150 mm·s⁻¹ dochází k zlomu. U zatížení 26 N je zlom posunut na rychlost 60 mm·s⁻¹. V případě vyšších rychlostí vykazují hodnoty menší rozptyl. V případě kontaktu zatíženého 40 N nedochází k odchýlení lineárního trendu naměřených tlouštěk od predikce. Vyšší rozptyl je patrný pouze při nižších rychlostech. Při porovnání všech zatížení je patrný nárůst tloušťky maziva se vzrůstajícím zatížením, přičemž dle teoretických předpokladů by mělo dojít k poklesu.



Obr. 4.10: Centrální tloušťky filmu maziva R553/73 za podmínek čistého valení srovnávány s predikcí dle Hamrocka&Dowsona pro poddajné kontakty, a) zatížení 18,5 N, b) zatížení 26 N, c) zatížení 40 N.

Vysoký rozptyl naměřených hodnot je způsoben nedokonalou geometrií kuličky, která především u zatížení 18,5 N,kdy zejména v případě zatížení o velikosti 18,5 N je kontakt kuličky a disku velmi nestabilní. V důsledku rotace kuličky dochází k vibracím, které způsobují dynamické změny velikosti působícího zatížení. Na snímcích znázorněných na obr. 4.11 je patrná deformace kruhového tvaru kontaktu vlivem nedokonalé geometrie. Dále jsou zde patrné emitující částice plniva vyskytující se na povrchu vzorků, které způsobují šum projevující se především při nízkých rychlostech kolísáním intenzity. U vyšších rychlostí je vliv částic nižší.



Obr. 4.11: Vliv geometrie a excitovaných částic v kontaktu zatíženém 18,5 N při střední rychlostech: a) $5 \,\mathrm{mm \cdot s^{-1}}$, b) $10 \,\mathrm{mm \cdot s^{-1}}$, c) $20 \,\mathrm{mm \cdot s^{-1}}$.



(a)



Obr. 4.12: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při zatížení 18,5 N v režimu čistého valení, a) profily tlouštěk, b) korespondující snímky kontaktní oblasti při $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Z průběhů tlouštěk při aplikovaném zatížení 18,5 N , zobrazených na obr.4.12
a je viditelný postupný nárůst tloušťky maziva, který ovšem v důsledku nedokonalé geometrie povrchu vzorku není rovnoměrný. Při rychlosti 40 mm·s⁻¹ se minimální hodnota nachází ve středu kontaktu. U vyšších rychlostí se minimální tloušťka nachází na výstupu maziva z kontaktu a profil je zformován do hydrodynamického klínu. Vliv geometrie je patrný také na obr.4.12b, kde se na jednotlivých snímcích mění tvar kontaktní oblasti a rozložení tloušťky maziva. Viditelné pruhy jsou způsobeny procházením emitujících částic plniva.

Při zatížení 26 N je nárůst tloušťky maziva rovnoměrnější. Z průběhu odpovídajícímu rychlosti 40 mm·s⁻¹ je patrné hromadění maziva před výstupem z kontaktu, kdy je na vstupu nižší tloušťka maziva než-li ve středu kontaktu (obr. 4.13a). Podobné chování, ovšem výraznější, se vyskytuje u keramického a ocelového vzorku, obr. 4.6 a 4.8. U vyšších rychlostí se již zmíněné chování neprojevuje, průběhy se postupně formují do podoby hydrodynamického klínu. při zatížení 40 N jsou průběhy zformovány do hydrodynamického klínu i za nízkých rychlostí. Při porovnání snímků kontaktu pro všechna zmíněná zatížení (obr. 4.12b, 4.13c a 4.13d), je patrné snižování vlivu nedokonalé geometrie vzorku se vzrůstajícím aplikovaným zatížením. U snímků kontaktu zatíženého 40 N nejsou viditelné výraznější zdeformování kontaktní oblasti. Zůstává zde pouze nesymetrické rozložení tlouštěk maziva, které může být způsobeno normalizací. Obdobně jako u průběhů v tuhých kontaktech odpovídá minimální tloušťka maziva na výstupu z kontaktu přibližně jedné hodnotě, nezávisle na střední rychlosti.

Na obr. 4.14
a jsou znázorněné centrální tloušťky maziva kontaktu zatíženého 26 N, za podmínek částe
čného negativního prokluzu -1,5. Do rychlosti $10\,\rm mm\cdot s^{-1}$





Obr. 4.13: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti, a) profily tlouštěk při zatížení 26 N, b) profily tlouštěk při zatížení 40 N, c) snímky kontaktu zatíženého 26 N při 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹, d) snímky kontaktu zatíženého 40 N při 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

je tloušťka filmu prakticky neměnná. Následuje zlom, kdy je tloušťka maziva posunutá pod teoretickými hodnotami, přičemž koresponduje sklon predikční křivky až do rychlosti 100 mm·s⁻¹. Zde dochází k ustálení, k žádné výrazné změně v naměřených hodnotách již nedochází. Profily tloušťky (obr. 4.14b) jsou zformované do hydrodynamického klínu. Pouze u nízkých rychlostí je viditelná kumulace maziva před výstupem z kontaktu. Na snímcích není zřetelně viditelný charakteristický tvar podkovy jako je tomu u čistého valení, obr.4.14c, přesto je ohraničení centrální oblasti kontaktu částečně viditelné.

U experimentů s částečným pozitivním prokluzem 1,5 je patrná dobrá shoda získaných centrálních tlouštěk filmu s predikcí obr. 4.15a. Výraznější odchylka nastává upři vyšších rychlostech, kde při 300 a $400 \,\mathrm{mm\cdot s^{-1}}$ dochází k poklesu centrální tloušťky. Průběhy znázorněné na obr. 4.15b jsou oproti zápornému prokluzu značně nestabilní, což je způsobeno nižší rychlostí rotace kuličky, kdy se více projeví excitované částice plniva na povrchu vzorku. Vzhledem ke shodě predikce a centrálních tlouštěk lze předpokládat efektivní potlačení vlivu částic průměrováním vymezené kruhové oblasti.





Obr. 4.14: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním prokluzu -1,5 a aplikovaném zatížení 26 N, a) centrální tloušťky, b) profily tlouštěk, c) korespondující snímky kontaktní oblasti při $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.





Obr. 4.15: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném pozitivním prokluzu 1,5 a aplikovaném zatížení 26 N, a) centrální tloušťky, b) profily tlouštěk, c) korespondující snímky kontaktní oblasti při 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

4.2.3 Minerální olej R834/80

Stejná sada experimentů byla jak pro mazivo R553/73 byla provedena i pro olej R834/80, jehož dynamická viskozita je 0,21 Pa·s. Vzhledem k časové i výpočetní náročnosti jsou snímky kontaktu pořízeny v nižším rozlišení – 375×375 pixelů. Zatížení, jehož velikost je určena na základě odečteného poloměru centrální oblasti statického kontaktu a Hertzovy teorie je nižší než v případě maziva R553/73 – 7,5 N, 18,5 N a 31 N,. V důsledku nižšího zatížení a nižší viskozity oleje vykazují výsledné snímky vyšší úroveň šumu, který je způsobený nedokonalou geometrií vzorků (obr. 4.17g).

Při nízkých rychlostech jsou nezávisle na aplikovaném zatížení zřejmé výrazné odchylky měřených hodnot od predikce, obr. 4.17a–4.17c. Při zatížení 7,5 a 18,5 N se výrazné odchylky vyskytují i v případě vysokých rychlostí. Bez ohledu na velikost zatížení je v průběhu nárůstu centrální tloušťky patrná oblast, která se vyznačuje stejným sklonem jako predikce. Nejmenší odchylky od predikce jsou patrné při zatížení 31 N, kde se vzrůstající rychlostí valení naměřené tloušťky konvergují k teoretickým hodnotám.

Průběhy tloušťky maziva v kontaktu, zatíženým 7,5 N jsou znázorněny na obr. 4.17d. Při všech rychlostech je patrná nestabilita profilů. Profily jsou zformovány do hydrodynamického klínu. Výrazná deformace profilu tlouštěk odpovídající rychlosti 40 mm·s je způsobena částicemi plniva procházejícími oblastí kontaktu. U zatížení 18,5 N, obr. 4.17e je odchylka profilu vzhledem k velikosti deformace způsobena poškrábáním disku. Na výstupu maziva z kontaktu je patrný náhlý pokles tloušťky, který se u nižšího zatížení vyskytoval pouze při rychlosti 200 mm·s. U zatížení 40 N je viditelný u všech průběhů s výjimkou profilu tlouštěk pro rychlost 40 mm·s. Při porovnání průběhů tloušťky pro částečný kladný a záporný prokluz, obr. 4.16, je patrný výrazný rozdíl tlouštěk maziva. Při kladném prokluzu je na jednotlivých profilech projevuje výrazná nestabilita, především v nízkých rychlostech.



Obr. 4.16: Průběh tlouštěk u kontaktu zatíženého 18,5 N při: a) částečném záporném prokluzu -1.5 a b) částečném záporném prokluzu 1.5.



Obr. 4.17: Vliv změny velikosti zatížení, centrální tloušťky maziva při zatížení: a) 7,5 N b) 18,5 N, c) 31 N, profily tlouštěk: d) 7,5 N e) 18,5 N, f) 31 N, d) a korespondující snímky kontaktu zatíženého g) 7,5 N h) 18,5 N, i) 31 N, při rychlostech 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

Na snímcích kontaktní oblasti, zobrazených na obr. 4.17g–4.17i jsou viditelné výrazné pruhy způsobené procházejícími částicemi plniva, nečistotami v mazivu a poškrábáním disku. Tmavá skvrna, vyskytující se v horní polovině centrálních oblasti je způsobena prachovou částicí ulpělou na objektivu. Tvar kontaktu se vyznačuje malou deformací. Charakteristická podkova ohraničující centrální oblast kontaktu je jen obtížně pozorovatelná i ve vysokých rychlostech valení.

4.3 Experimentální studium tloušťky mazacího filmu v kontaktu fenolové pryskyřice

Studium kontaktu vzorku vyrobeného z fenolické pryskyřice doplňuje předchozí experimenty o možnost porovnání navrženého algoritmu vyhodnocení na rozdílných typech povrchů. Se vzorkem z fenolické pryskyřice je provedena byla provedena stejná sada testů, tedy analýza tloušťky maziva pro dva různé minerální oleje (R553/73, R834/80) za podmínek čistého valení, částečného negativního (-1,5) a pozitivního (1,5) prokluzu v rozsahu rychlostí 5-500 mm·s⁻¹

4.3.1 Popis experimentů

Za podmínek čistého valení byly provedeny experimenty pro
tři různá zatížení 12,5 N, 26 N a 40 N. Expeirmenty za podmínek částečných prokluzů byly
provedeny při zatížení 26 N. Jako kontaktní těleso je použita kulička, vyrobená
z fenolické pryskyřice o průměru 25,4 mm. Modul pružnosti fenolové kuličky o
průměru 25,4 mm byl 4100 MPa, její Poissonův poměr 0,4. Podrobné materiá-
lové vlastnosti jsou dohledatelné v příloze strana 68. Drsnost povrchu kuličky
byla $S_a = 13,4$ nm. Jak může být vidět na obr. 4.18, fenolová kulička je oproti
předchozímu vzorku lesklá, bez vad, či artefaktů. Pořízené snímky měly rozlišení
1500x1500 pixelů, přičemž bylo využito slučování koloních pixelů v míře 2×2 a
4×4. Stejně jako v předchozích experimentech byl využit fluorescnenční filtr s
označneím DAPI. Excitovaná oblast je omezena polní clonou na bezprostřední
okolí kontaktu, aperturní clona byla plně otevřena. Kontak byl pozorován objek-
tivem s 5ti násobným zvětšením.

Obr. 4.18: Fenolický vzorek upnutý v čelistech přípravku.

4.3.2 Minerální olej R553/73

Vzhledem vyšší kvalitě povrchu oproti polypropylenovému vzorku vykazovaly naměřené hodnoty tloušťky maziva výrazně menší rozptyl. Při všech zmíněných zatíženích je patrný zřejmý, lineární nárůst centrální tloušťky v závislosti na střední rychlosti, obr. 4.19. opět o něco nižší, než predikované. V případě zatížení 12,5 N respektive 40 N je sklon křivky nárůst tloušťky nižší, než predikovaný. V obou případech se tloušťky maziva v oblasti nízkých rychlostí lépe shodují s předpokládanými hodnotami. Při zatížení 26 N je nárůst rovnoběžný s predikcí.

Obr. 4.19: Vliv zatížení na kontakt fenolické kuličky a skla, zatížení: a) 12,5 N, b) 26 N, c) 40 N.

Na obr. 4.20
a jsou zobrazeny průběhy tlouštěk pro zatížení 12,5 N. U všech rychlostí je patrná konstantní centrální oblast, ohraničená konstrikcí na výstupu maziva z kontaktu. Na obr. 4.20
b jsou znázorněny vybrané snímky kontaktní oblasti, přičemž je patrný charakteristický tvar podkovy. Minimální tloušťka v profilech na výstupu maziva z kontaktu odpovídá přibližně 0,3 µm s výjimkou rychlosti 40 mm·s⁻¹, u které minimální hodnota dosahuje 0,1 µm. U žádného z průběhů není patrné formování do podoby hydrodynamického klínu, což je pravděpodobně způsobeno mechanickými vlastnostmi materiálu vzorku.

Obr. 4.20: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při zatížení 12,5 N, a) průběhy tlouštěk, b) 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

U průběhů náležících zatížení 26 N a 40 N je patrná větší tloušťka maziva oproti předchozímu nižšímu zatížení. Minimální hodnoty tlouštěk na výstupu kontaktu jsou se liší v závisloti na rychlosti, což je patrné především na obr. 4.21b. Vybrané snímky pro zmíněná zatížený jsou porovnány na obr. 4.20b, 4.21c a 4.21d.

Obr. 4.21: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti, a) průběhy tlouštěk při zatížení 26 N, b) průběhy tlouštěk při zatížení 40 N, c) zatížení 26 N, 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹, d) zatížení 40 N, 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

U kontaktu zatíženého 26 N s prokluzem -1,5 naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají teoretické predikci.. Malá odchylka nastává pouze u tlouštěk odpovídajících rychlostem vyšším než 150 mm·s⁻¹. V porovnání s obr. 4.21b a 4.22b, jsou zobrazeny snímky pro případ čistého valení, jsou minimální hodnoty jednotlivých průběhů přibližně rovny 0,2 µm (obr. 4.22b). Mírná vlnitost profilů je způsobena nečistotami usazenými na optice a průchodem škrábanců přes kontakt.

V případě kladného prokluzu 1.5, obr. 4.23
a, se tloušťky přibližují predikci až do rychlosti 80 mm·s⁻¹, kde nastává zlom, naopak dochází k mírnému odchýlení. Jednotlivé průběhy vykazují tvar hydrodynamického klínu, minimální tloušťky na výstupu se mění s narůstající rychlostí. Z porovnání snímků, zobrazených na obr. 4.22
c a 4.23
c je patrný tvar podkovy vymezující centrální oblast kontaktu.

Obr. 4.22: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním prokluzu -1,5 a aplikovaném zatížení 26 N, a) centrální tloušťky, b) profily tlouštěk, c) korespondující snímky kontaktní oblasti při 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

Obr. 4.23: Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním prokluzu 1,5 a aplikovaném zatížení 26 N, a) centrální tloušťky, b) profily tlouštěk, c) korespondující snímky kontaktní oblasti při 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

4.3.3 Minerální olej R834/80

Vzhledem k časové i výpočetní náročnosti jsou snímky kontaktu pořízeny v nižším rozlišení – 375×375 pixelů. Zatížení, jehož velikost je určena na základě odečteného poloměru centrální oblasti statického kontaktu a Hertzovy teorie je nižší než v případě maziva R553/73 - 11 N, 26 N a 35 N,. Vzhledem vyšší kvalitě povrchu vykazují naměřené hodnoty tloušťky maziva výrazně menší rozptyl, který se vyskytuje především při nízkých ryclostech. Při všech zmíněných zatíženích je patrný zřejmý, lineární nárůst centrální tloušťky v závislosti na střední rychlosti (obr. 4.25a–4.25c). Naměřené hodnoty velmi dobře odpovídají teoretické predikci. Při zatížení 35 N je centrální tloušťka mírně vyšší. Při porovnání s ostatními hodnotami ale není patrný její nárůst v závislosti na velikosti zatížení.

Na obr. 4.25d–4.25f jsou zobrazeny průběhy tlouštěk pro zatížení 11 N. Pro všechny rychlostí je patrná konstantní centrální oblast , ohraničená konstrikcí na výstupu maziva z kontaktu. Na obr. 4.25g–4.25i jsou znázorněny vybrané snímky kontaktní oblasti, přičemž je patrný charakteristický tvar podkovy.

Obr. 4.24: Průběh tlouštěk u kontaktu zatíženého 26 N při: a) částečném záporném prokluzu -1.5 a b) částečném záporném prokluzu 1.5.

Obr. 4.25: Vliv změny velikosti zatížení, centrální tloušťky maziva při zatížení: a) 11 N b) 26 N, c) 35 N, profily tlouštěk: d) 11 N e) 26 N, f) 35 N, d) a korespondující snímky kontaktu zatíženého g) 11 N h) 26 N, i) 35 N, při rychlostech 40 mm·s⁻¹, 100 mm·s⁻¹, 150 mm·s⁻¹, 200 mm·s⁻¹, 400 mm·s⁻¹.

5 DISKUZE

Na základě poznatků získaných z rešeršní studie a zkušebních měření byl sestaven byl stanoven algoritmus vyhodnocení tloušťky mazacího filmu v poddajných kontaktech sestávající se ze dvou hlavních částí. V prvním kroku je provedena normalizace vůči pozadí, které je z intenzitní mapy odfiltrováno pomocí referenčního snímku. Následuje proces kalibrace, kdy je za pomoci Hertzovy teorie a snímku statického kontaktu stanovena funkce pro přepočet intenzity na tloušťku mazacího filmu. Všechny vzorky, stejně tak i části měřicí aparatury, které s nacházejí v kontaktu s olejem, byly před experimenty řádně očištěny pomocí acetonu. Celá laboratorní aparatura je zakryta černou clonou, aby se zamezilo nežádoucímu ovlivnění měření v důsledku působení okolního světla. Zatížení, vyvozené pomocí pákového mechanizmu se u jednotlivých experimentů mění v důsledku odlišného vyložení závaží na páce. Velikost aplikovaného zatížení je vždy stanovena na základě odečteného poloměru centrální oblasti statického kontaktu, materiálových vlastností vzorku a Hertzovy teorie (14).

5.1 Vliv materiálu

Na výsledky měření má velmi výrazný vliv barva a odrazivost povrchu vzorku. Kalibrační data (obr. 4.5) tloušťky maziva, verifikačního experimentu s černě zabarvenou keramickou kuličkou (Si₃N₄, obr. 4.1a) se vyznačují jasnou lineární závislostí intenzity na tloušťce filmu s konstantním rozptylem hodnot. U ocelového vzorku, jehož kvalita povrchu je srovnatelná, je však patrný nárůst rozptylu tlouštěk s narůstající intenzitou, obr. 4.7. Jako vysvětlení se nabízí nesprávně provedené vyhodnocení, kdy v důsledku nerovnoměrné vrstvy maziva při snímání pozadí a posunutí polohy středu statického kontaktu stejná hodnota intenzity náleží více tloušťkám mazacího filmu. V kalibračních datech ocelové kuličky se také nachází zlom (hodnoty nerespektují pouze jeden lineární trend), který způsobuje přítomnost zhášedla, v tomto případě chromu, v materiálu vzorku a vysoká odrazivost jeho povrchu. Blízko centrální oblasti, kde jsou tloušťky maziva malé a povrch kuličky je kolmý k objektivu je naměřená tloušťka vyšší z důvodu odrazu emitovaného záření od povrchu vzorku do objektivu. Nedochází zde k jeho absorpci při průchodu olejovým filmem. Chrom obsažený v oceli naopak snižuje intenzitu emise. Zháší fluorescenci vrstev maziva nacházejících se blízko u povrchu vzorku. Výsledná emise skládající se z přímo vyzářené a odražené složky přesto dostačuje pro vyhodnocení. Využití přirozené fluorescence se v tomto případě jeví jako velmi robustní. Ve větších vzdálenostech od středu kontaktu se mění míra jednotlivých vlivů. S narůstající tloušťkou mazací vrstvy mezi kuličkou a diskem a úhlem normály povrchu vzorku vůči objektivu se snižuje odražená složka emise, která je absorbována při průchodu mazivem. Ve větších tloušťkách mazacího filmu se začíná projevovat filtrační efekt, kdy mazivo dále od ozařovaného povrchu je v důsledku absorpce při průchodu světla mazivem excitováno nižší intenzitou, což způsobuje nelinearity.

U polypropylenového vzorku se vyskytovaly bílé částice plniva obr. 4.9, které byly excitovány vlnovými délkami v modrém a UVA spektru světla. Jejich přítomnost na snímcích se projevovala výrazným kolísáním intenzity obr. 4.11, což bylo při odečítáním centrální tloušťky maziva částečně eliminováno zavedením průměrování hodnot nacházejících se v oblasti okolo středu kontaktu. Při porovnání naměřených hodnot centrálních tlouštěk maziva v kontaktu polypropylenové kuličky (obr. 4.10) a kuličky vyrobené z fenolické pryskyřice (obr. 4.19) je patrná závislost velikosti rozptylu hodnot na přítomnosti částic plniva. Vyšší rozptyl je způsoben také nedokonalou geometrií vzorku, v důsledku čehož vznikaly při rotaci kuličky vibrace, které způsobovaly velikosti kontaktní oblasti.

Z průběhů tlouštěk maziva pro kontakt keramické i ocelové kuličky, které jsou zatíženy 26 N v režimu čistého valení, obr. 4.6c a 4.8c, je patrná velmi výrazná konstrikce objevující se na výstupu maziva z kontaktu. Minimální tloušťka filmu dosahuje nezávisle na rychlosti valení v místě konstrikce přibližně stejných hodnot. V průbězích tloušťky maziva v poddajných kontaktech se takto výrazná konstrikce obvykle nevyskytuje [7].

V kontaktu polypropylenové kuličky je v profilech tloušťky maziva patrné formování hydrodynamického klínu jak v případě čistého valení (obr. 4.12a), tak i při částečných prokluzech (obr. 4.14b a 4.15b), přičemž je tento jev výraznější v případě méně viskózního maziva obr. 4.16 a 4.17. Podobné chování pozorovali i autoři Fowel a kol. [8] a Myant a kol. [7] u kontaktu PDMS pinu respektive pryžového o-kroužku a skleněného disku. Formování klínu zjevně závisí především na modulu pružnosti materiálu vzorku. V průbězích tlouštěk filmu s fenolovou kuličkou, která má přibližně čtyřikrát větší modul pružnosti, k formování hydrodynamického klínu nedocházelo.

5.2 Vliv maziva

Nárůst centrálních tlouštěk je u viskóznějšího maziva (R553/73) podobný, jako pozoroval Myant a kol. [7] v kontaktu PDMS a skla, kdy naměřené centrální tloušťky leží pod teoretickou predikcí dle Hamrock&Dowson. Při porovnání průběhů tlouštěk filmu kontaktu polypropylenové kuličky v režimu čistého valení, zatíženého 18,5 N, pro obě použitá maziva (R553/73 – obr.4.10a, R834/80 – obr.4.17b), což je patrná nižší odchylka naměřených a teoretických dat v případě méně viskózního oleje. V kontaktu mazaném minerálním olejem R834/80 dosahuje centrální tloušťka filmu vyšších hodnot. Také se na výstupu kontaktu vyskytuje výraznější konstrikce, která je ovšem na snímcích obtížně pozorovatelná.

V průbězích tlouštěk maziva v kontaktu tvořeném fenolickou kuličkou není s ohledem na použité mazivo pozorováno natolik rozdílné chování. Centrální tloušťky velmi dobře odpovídají teoretické predikci obr. 4.19 a 4.25a–4.25c, je do značné míry způsobeno přesnější geometrií a lepší kvalitou povrchu. V profilech tlouštěk maziva je patrná výrazná konstrikce obr. 4.19b a 4.25b, znázorněná na snímcích (obr. 4.21c a 4.25h) bez ohledu na použitý olej.

5.3 Vliv střední rychlosti

Střední rychlost se projevuje zejména u kontaktu polypropylenové kuličky. Vzhledem k fixně nastavenému času expozice pro celou sérii daného měření, je při vyšších rychlostech rotace kuličky znatelné rozmazání částic plniva, které pak vytváří na snímcích rušivé pruhy. Výsledkem je částečná homogenizace centrální oblasti, což snižuje vliv částic na hodnotu odečtené centrální tloušťky maziva. Zároveň se

také snižuje kolísání velikosti zatížení, způsobené vibracemi v důsledku nedokonalé geometrie kuličky.

5.4 Vliv zatížení

Pro oba typy vzorků byly v režimu čistého valení provedeny experimenty pro různé velikosti zatížení. Nezávisle na mazivu a materiálu vzorku je patrný nárůst centrální tloušťky v závislosti na zvětšujícím se aplikovaném zatížení, kdy zároveň dochází k výraznějším konstrikcím. V případě kontaktu zatíženého 40 N, mazaného minerálním olejem R834/80 vystoupaly naměřené tloušťky oproti nižším zatížením až nad teoretickou predikci, což může být způsobeno větší kontaktní oblastí, která zabraňuje obtékání kontaktu mazivem.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem metodiky hodnocení tloušťky maziva v poddajných kontaktech. V práci je použita optická měřicí metoda na principu fluorescenční mikroskopie. Vytvořený algoritmus, zahrnující normalizaci k pozadí a kalibraci intenzity na tloušťku maziva v kontaktu je zpracován ve formě experimentálního softwaru.

Snímek kontaktu zachycený snímačem fluorescenčního mikroskopu je normalizován k pozadí, pomocí referenčního snímku. Pro účel zachycení pozadí byl použit jednoduchý přípravek sestávající ze dvou mikroskopových podložných skel sloužících pro vytvoření rovnoměrné vrstvy maziva. Na normalizovaných snímcích je provedena kalibrace intenzity na tloušťku mazacího filmu, k čemuž je využita Hertzova teorie a snímek statického kontaktu. Následně jsou hodnoty aproximovány lineární funkcí, která slouží pro přepočet intenzity na tloušťku mazacího filmu. Implementací výše zmíněného postupu do softwarové podoby byl celý proces vyhodnocení značně urychlen. Dále byly implementovány funkce pro vykreslení závislostí centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti, kalibrační funkce a průběhů tloušťky mazacího filmu.

Algoritmus byl verifikován pomocí klasického elastohydrodynamického kontaktu, kdy byla jako kontaktní tělesa puužita keramická kulička Si_3N_4 a disk z optického skla BK7. Získané tloušťky filmu byly následně porovnány s teoretickou predikcí dle Hamrock&Dowson, která je v oblasti tribologie dlouhodobě etablovaná. Naměřená data vykazovala velmi dobrou shodu s predikcí.

Dále byla provedena série experimentů s poddajnými kontakty zahrnujícími dva typy vzorků, polypropylenovou kuličku a kuličku vyrobenou z fenolické pryskyřice, pro které byla měřena tloušťka mazacího filmu za použití dvou rozdílných minerálních olejů R553/73 a R834/80. Dále byl analyzován vliv zatížení, střední rychlosti a stupně prokluzu.

Na základě publikovaných výsledků lze konstatovat, že byla jednoznačně prokázána funkčnost navržené metodiky pro hodnocení tloušťky mazacího filmu v poddajných kontaktech pomocí metody fluorescenční mikroskopie, čímž byl splněn cíl diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- DE VICENTE, J., J.R. STOKES a H.A. SPIKES. Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* 2006-4-1, vol. 220, is. 2, s. 55-63. ISSN 1350-6501. DOI: 10.1243/13506501JET90. Dostupné z: http: //pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/13506501JET90
- BONGAERTS, J.H.H., K. FOURTOUNI a J.R. STOKES. Softtribology: Lubrication in a compliant PDMS–PDMS contact. *Tribology International.* 2007, vol. 40, 10-12, s. 1531-1542. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.01.00710.1016/j.triboint.2. Dostupné z: http: //linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X07000126
- [3] ROBERTS, A.D. a D. TABOR. Fluid film lubrication of rubber-an interferometric study. Wear. 1968, vol. 11, is. 2, s. 163-166. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/0043-1648(68)90594-2. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/ retrieve/pii/0043164868905942
- [4] POLL, G. a A. GABELLI. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II—A New Measuring Principle for Lubricant Film Thickness. *Journal of Tribology*. 1992, vol. 114, is. 2, s. 290-297. ISSN 0742-4787. DOI: 10.1115/1.2920886. Dostupné z: http://Tribology. asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460092
- [5] BONGAERTS, J.H.H., J.P. DAY, C. MARRIOTT, P.D. PUDNEY a A.-M. WILLIAMSON. In situ confocal Raman spectroscopy of lubricants in a soft elastohydrodynamic tribological contact. *Journal of Applied Physics*. 2008, vol. 104, is. 1, s. 014913. ISSN 0021-8979. DOI: 10.1063/1.2952054. Dostupné z: http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/104/1/10.1063/ 1.2952054
- [6] GASNI, D., M.K. WAN IBRAHIM a R.S. DWYER-JOYCE. Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime. *Tribology International.* 2011, vol. 44, 7-8, s. 933-944. ISSN 0301-679X. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.03.010. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/ retrieve/pii/S0301679X1100065X
- [7] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International.* 2010, vol. 43, is. 11, s. 1960-1969. ISSN 0301-679X DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier. com/retrieve/pii/S0301679X10000770
- [8] FOWELL, M.T., C. MYANT, H.A. SPIKES a A. KADIRIC. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. *Tribology International.* 2014, vol. 80, s. 76-89. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.028. Dostupné z: http:// linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14002163

- SMART, A.E. a R.A.J. FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. Wear. 1974, vol. 29, is. 1, s. 41-47. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/0043-1648(74)90132-X. Dostupné z: http://linkinghub. elsevier.com/retrieve/pii/004316487490132X
- [11] SHAW, B., D. HOULT a V. WONG. Development of Engine Lubricant Film Thickness Diagnostics Using Fiber Optics and Laser Fluorescence. *SAE Technical Paper 920651*. 1992-02-01. DOI: 10.4271/920651. Dostupné z: http://papers.sae.org/920651/
- [12] RICHARDSON, D. a G. BORMAN. Using Fiber Optics and Laser Fluorescence for Measuring Thin Oil Films with Application to Engines. SAE Technical Paper 912388. 1991-10-01. DOI: 10.4271/912388. Dostupné z: http://papers.sae.org/912388/
- [13] AZUSHIMA, A. In situ 3D measurement of lubrication behavior at interface between tool and workpiece by direct fluorescence observation technique. Wear. 2006, vol. 260, is. 3, s. 243-248. ISSN 0043-1648. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.053. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier. com/retrieve/pii/S0043164805003686
- [14] REDDYHOFF, T., J.H. CHOO, H.A. SPIKES a R.P. GLOVNEA. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. *Tribology Letters.* 2010, vol. 38, is. 3, s. 207-215. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-010-9592-6. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11249-010-9592-6
- [15] PIT, Remmelt, Hubert HERVET a Liliane LÉGER. Friction and slip of a simple liquid at a solid surface. *Tribology Letters*. 1999, vol. 7, 2-3, s. 147-152. DOI: 10.1023/A:1019161101812. Dostupné z: http://link.springer.com/ 10.1023/A:1019161101812
- [16] PONJAVIC, A., M. CHENNAOUI a J. S. S. WONG. Through-Thickness Velocity Profile Measurements in an Elastohydrodynamic Contact. *Tribology Letters.* 2013, vol. 50, is. 2, s. 261-277. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-013-0118-x. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/ s11249-013-0118-x
- [17] QIAN, S., D. GUO, S. LIU a X. LU. Experimental Investigation of Lubrication Failure of Polyalphaolefin Oil Film at High Slide/Roll Ratios. *Tribology Letters.* 2011, vol. 44, is. 2, s. 107-115. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-011-9820-8. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11249-011-9820-8

- [18] QIAN, S., D. GUO, S. LIU a X. LU. Experimental Investigation of Lubricant Flow Properties Under Micro Oil Supply Condition. *Journal of Tribology*. 2012, vol. 134, is. 4, s. 041501. ISSN 0742-4787. DOI: 10.1115/1.4007107. Dostupné z: http://Tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx? articleid=1485059
- [19] XIAO, H. et al. Direct observation of oil displacement by water flowing toward an oil nanogap. *Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 110, is. 4, s. 044906. ISSN 0021-8979. DOI: 10.1063/1.3624732. Dostupné z: http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/110/4/10.1063/1.3624732
- [20] CHROMA TECHNOLOGY CORPORATION. Chroma Technology Corp [online]. © 2014- [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: https://www.chroma.com
- [21] MARION, André a Translated by Charles POLLEY. Introduction to image processing. English ed. New York, N.Y: London, Angleterre, 1991. ISBN 978-044-2312-022.
- [22] TAN, G. et al. In Situ Observation of Wax-in-Oil Flow in Rough Soft Contact. Tribology Letters. 2013, vol. 52, is. 1, s. 93-103. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-013-0196-9. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11249-013-0196-9
- [23] TAN, G. et al. Probing tribological properties of waxy oil in pipeline pigging with fluorescence technique. *Tribology International*. 2014, vol. 71, is. 1, s. 26-37. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.10.020. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X13003745
- [24] HEILBRONNER, Renee. Image analysis in earth sciences. New York: Springer, 2013, ISBN 978-364-2103-421.
- [25] Fundamentals of Metal Halide Arc Lamps: Introduction. DAVIDSON, M. W. ZEISS: Education in Microscopy and Digital Imaging [online]. 2005 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/ lightsources/metalhalide.html
- [26] HIDROVO, Carlos H a Douglas P HART. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2001-04-01, vol. 12, issue 4, s. 467-477. DOI: 10.1088/0957-0233/12/4/310. Dostupné z: http://stacks.iop.org/0957-0233/ 12/i=4/a=310?key=crossref.d3b5ca9c9a2db2a6fcfde0a313d8705a

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schema aparatury použité pro studium třecích vlastností poddajného	10
1.2	Schema aparatury využívající LIF pro studium tloušťky filmu v pod-	13
	dajných kontaktech [7]	14
1.3	Srovnání optické interferometrie s fluorescenční mikroskopií.	15
1.4	Schema aparatury využívající LIF pro studium mazacího filmu [14], Filter 1–excitační filtr, Filter 2–emisní filtr, Stop 1-2–clony, Dichro-	10
1.5	matic plate beam splitter-polopropustne zrcatko	10
1.6	b) srovnání s optickou interferometrií	17
1.7	S–clona, EM-CCD–snímač, b) schema vybělené oblasti v mazivu Kombinace optické interferometrie a fluorescenční mikroskopie[17], rychlost kuličky $10 \mathrm{mms^{-1}}$, a–prokluz 1,946, b–prokluz 1,974, c–prokluz	17
1.8	1,985, a) centrální oblast (optická interferometrie), b) okolí kontaktu (fluorescenční mikroskopie)	18
1.9	mikroskop, 6–světelný mikroskop, 7–počítač, b) průchod vody kon- taktem	19
	dichromatické zrcátko, 3–excitační filtr, 4–excitační spektrum, 5–emisní spektrum, 6–emisní filtr.	20
1.10	Surový snímek statického kontaktu PDMS a skleněného disku nasví- ceného pomocí laseru.[7]	20
1.11	Normalizace intenztních map [7], a) pozadí, b) normalizovaný snímek.	21
1.12	Kalibrace intenztních map [7], a) klibrační křivka, b) centrální tloušťka filmu.	22
1.13	I-EHL kontakt PDMS pinu a skleněného disku, čistý prokluz, zatížení 23.5 mN , střední rychlost 113.1 mm s^{-1} [8],,,,,	23
1.14	Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, čistý prokluz, střední rychlost $0-1100 \text{ mm s}^{-1}$ vstup maziva do kontaktu na pravé straně [7]	24
1.15	Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, zatížení 25 mN, mazivo gly- cerol [7] a) centrální tloušťky filmu, b) profily ve směru střední rychlosti	24
1.16	Kontakt PDMS pinu a skleněného disku, zatížení 23 mN, mazivo 75% roztok glycerolu a vody [8], a) centrální tloušťky filmu, b) profily ve	24
1.17	směru střední rychlosti	25
1.18	rychlosti	25
	zvýraznění pomocí prahování, c) zvýraznění probarvením snímku.	26

1.19	Korekce pomocí modelového pozadí [24], a) originální snímek, b) mo-	~-
1 00	delove pozadi, c) Vysledny snimek.	27
1.20	Eliminace pomoci samostatné zachyceného pozadí [24], původní sni-	
	mek obr. 1.18a, a) pozadí se zesíleným kontrastem, b) eliminace vy-	
	dělením snímku pozadím, c) odečtení pozadí od snímku, d) odečtení	
	pozadí s lineární gama korekcí.	27
3.1	Experimentální aparatura pro měření tloušťky mazacího filmu	30
3.2	Světelné spektrum rtuťové výbojky [25].	31
3.3	Set filtrů ET DAPI 49000, a) set filtrů, b) spektrum filtrů [20]	31
3.4	Jabloskeho diagram.	32
3.5	Panel sloužící pro import a normalizaci dat.	33
3.6	Přípravek sloužící pro zachycení pozadí, a) uložení skel, b) schema	
	přípravku.	34
3.7	Panel sloužící kalibraci a vyhodnocení dat.	35
3.8	Aproximace kalibrační funkcí.	36
3.9	Panel sloužící pro vykreslení závislostí	36
0.5 1 1	Použité vzorky a) koramické kulička b) ocelové kulička	30
4.1	Normalizaça uvěj pozedí, a) gnímel pozedí, b) gnímel statického kon	09
4.2	taktu a) gnímak normalizavaný užči pozadí	20
4.9	$\operatorname{Dark}(u, c)$ similer normalizovany vuci pozaci	39
4.5	Roziozeni intenzit, — puvodni nodnoty, — odectene minimum, a)	40
	snimek pozadi, b) snimek statickeno kontaktu.	40
4.4	Vliv odečteni minimalni intenzity snimku na výsledek normalizace, a)	10
	snimek s odectenym minimem, b) snimek bez odecteni minima	40
4.5	Kalibrační funkce získaná ze statického kontaktu kuličky.	41
4.6	Tloušťka filmu maziva $R553/73$, a) $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,	
	$200 \mathrm{mm} \cdot \mathrm{s}^{-1}$, $400 \mathrm{mm} \cdot \mathrm{s}^{-1}$, b) průběh centrální tloušťky srovnaný s pre-	
	dikcí Hamrock&Dowson, c) průběh ve směru střední rychlosti	41
4.7	Průběh kalibrační funkce získané ze statického kontaktu ocelové kuličky.	42
4.8	Tloušťka filmu maziva $R834/80$, a) $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,	
	$200 \mathrm{mm \cdot s^{-1}}, 400 \mathrm{mm \cdot s^{-1}}, \mathrm{b})$ průběh centrální tloušťky srovnaný s pre-	
	dikcí Hamrock&Dowson, c) průběh ve směru střední rychlosti	43
4.9	Polypropylenový vzorek	43
4.10	Centrální tloušťky filmu maziva ${\rm R553}/{\rm 73}$ za podmínek čistého valení	
	srovnávány s predikcí dle Hamrocka&Dowsona pro poddajné kontakty,	
	a) zatížení 18,5 N, b) zatížení 26 N, c) zatížení 40 N	44
4.11	Vliv geometrie a excitovaných částic v kontaktu zatíženém 18,5 N při	
	střední rychlostech: a) $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, b) $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, c) $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.	44
4.12	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při zatížení 18,5 N v režimu	
	čistého valení, a) profily tlouštěk, b) korespondující snímky kontaktní	
	oblasti při $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	45
4.13	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti, a) profily tlouštěk při za-	
	tížení 26 N, b) profily tlouštěk při zatížení 40 N, c) snímky kontaktu	
	zatíženého 26 N při 40 mm·s ⁻¹ , 100 mm·s ⁻¹ , 150 mm·s ⁻¹ , 200 mm·s ⁻¹	
	$400 \mathrm{mm} \cdot \mathrm{s}^{-1}$, d) snímky kontaktu zatíženého 40 N při 40 mm $\cdot \mathrm{s}^{-1}$. 100 mm $\cdot \mathrm{s}^{-1}$	-1
	$150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.	, 46
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	-0

4.14	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním prokluzu -1,5 a aplikovaném zatížení 26 N , a) centrální tloušťky, b) pro-	
	fily tlouštěk, c) ko respondující snímky kontaktní oblasti při 40 mm·s $^{-1},$	
	$100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	47
4.15	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném pozitivním	
	prokluzu 1,5 a aplikovaném zatižení 26 N, a) centrální tlouštky, b) pro-	
	fily tloustek, c) korespondujici snimky kontaktni oblasti pri 40 mm·s ⁻¹ , 100 mm·s ⁻¹ , $\frac{1}{100}$ mm·s ⁻¹	17
1 16	$100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	41
4.10	porném prokluzu 15 a b) částočném záporném prokluzu 15	18
4 17	Vliv změny velikosti zatížení centrální tloušťky maziva při zatížení:	40
T , T (a) 7.5 N b) 18.5 N c) 31 N profily thoustek: d) 7.5 N e) 18.5 N f) 31 N	
	d) a korespondující snímky kontaktu zatíženého g) 7.5 N h) 18.5 N. j)	
	31 N , při rychlostech $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,	
	$400 \mathrm{mm \cdot s^{-1}}$.	49
4.18	Fenolický vzorek upnutý v čelistech přípravku	50
4.19	Vliv zatížení na kontakt fenolické kuličky a skla, zatížení: a) $12,5\mathrm{N},$	
	b) $26 \text{ N}, \text{ c}$) $40 \text{ N}.$	51
4.20	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při zatížení 12,5 N, a)	
	průběhy tlouštěk, b) $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,	~ .
4.01	$400 \mathrm{mm} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.	51
4.21	Pruben tloustek ve smeru stredni rychlosti, a) prubeny tloustek pri zatižení 26 N b) průběhy tloužtěk při zatížení 40 N c) zatížení 26 N	
	$40 \text{ mm} \text{s}^{-1}$ 100 mm s^{-1} 150 mm s^{-1} 200 mm s^{-1} 400 mm s^{-1} d) za-	
	tížení 40 N. 40 mm·s ⁻¹ . 100 mm·s ⁻¹ . 150 mm·s ⁻¹ . 200 mm·s ⁻¹ . 400 mm·s ⁻¹	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	52
4.22	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním	
	prokluzu -1,5 a aplikovaném zatížení 26 N, a) centrální tloušťky, b) pro-	
	fily tlouštěk, c) ko respondující snímky kontaktní oblasti při 40 mm s $^{-1},$	
	$100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 400 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	53
4.23	Průběh tlouštěk ve směru střední rychlosti při částečném negativním	
	prokluzu 1,5 a aplikovanem zatizeni 26 N, a) centralni tloustky, b) pro-	
	100 mm s^{-1} 150 mm s $^{-1}$ 200 mm s $^{-1}$ 400 mm s $^{-1}$	52
1 91	Průběh tloužtěk u kontektu zatíženého 26 N při 2) částečném zápor-	55
4.24	ném prokluzu -1.5 a b) částečném záporném prokluzu 1.5	54
4.25	Vliv změny velikosti zatížení. centrální tloušťky maziva při zatížení:	• •
-	a) 11 N b) 26 N, c) 35 N, profily tlouštěk: d) 11 N e) 26 N, f) 35 N,	
	d) a korespondující snímky kontaktu zatíženého g) 11 N h) 26 N, i)	
	35 N , při rychlostech $40 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,	
	$400 \mathrm{mm \cdot s^{-1}}$.	55

SEZNAM SYMBOLŮ

CCD	Typ snímače obrazu
EHD	$\ldots \ldots Elastohydrodynamický$
EHL	Elastohydrodynamický režim mazání
FKM	Fluorokarbonový
Fluorofor	Fluorescenční látka
Frap	Fluorescence recovery after photobleaching
GLY	Glycerol
GLY50	$\dots \dots $
I-EHL	. Isoviskózní elastohydrodynamický režim mazání
LIF	Laser induced fluorescence
MTM	
ND	Neutral density
PDMS	(Poly)dimethylsiloxane
PU	Polyuretan
sCMOS	Scientific
UVA	Ultrafialové záření s vlnovou délkou (320-400 nm)

B(x, y)	() Counts	Intenzita odraženého světla
C	mol	
E'	Pa	Redukovaný modul pružnosti
F	Counts	Intenzita emise
G	1	Bezrozměrný parametr materiálu
$I_{b_{i,i}}$	Counts	Intenzita pozadí
$I_{c_{i,j}}$	Counts	Intenzita obrazu kontaktu
I_e	Counts	Intenzita excitačního svazku
I_{min_b}	Counts	Minimální intenzita pozadí
I_{min_c}	Counts	minimální intenzita kontaktu
I_N	Counts	Normalizovaná intenzita
I(x, y) Counts	Intenzita dopadajícího světla
$P_{x,y}$	1	Hodnota pixelu na pozici $\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}$
R(x, y)	$() \qquad 1 \dots \dots$	Odrazivost
R_{xx}	m	Poloměr povrchu kontaktu
R'	m	$\ldots\ldots$ Redukovaný poloměr ve směru střední rychlosti
U	1	$\ldots \ldots Bezrozměrný \ parametr \ rychlosti$
V	$m^3 \dots \dots$	Objem
W	1	$\ldots\ldots$ Bezrozměrný parametr zatížení
a	m	Poloměr centrální oblasti
a_h	m	
e_r	Ра	
h	m	
h_c	m	Centrální tloušťka dle Hamrock&Dowson
\bar{k}	1	Parametr elipticity
p_{max}	Pa	

m Vzdálenost od středu statického kontaktu

r

u	$m \cdot s^{-1} \dots$	Střední rychlc	ost
w	Ν	Aplikované zatíže	ení
w_s	N	$\ldots \ldots Zatíže$	ení
v_x	$1\ldots\ldots$	Poissonův poměr kontaktního těle	\mathbf{sa}
$\begin{array}{l} \upsilon_x\\ \varepsilon(\lambda_{las}) \end{array}$	$\begin{array}{cc} 1 \dots \dots \\ _{er}) & 1 \ . \end{array}$	Poissonův poměr kontaktního těle Absorpční koeficie	sa nt
$ \begin{array}{l} \upsilon_x \\ \varepsilon(\lambda_{las} \\ \eta \end{array} $	$\begin{array}{c} 1 \dots \dots \\ _{er}) & 1 \ . \\ \mathrm{Pa}{\cdot}\mathrm{s} \dots \end{array}$	Poissonův poměr kontaktního těle Absorpční koeficie Dynamická viskozi	nt ta
$ \begin{array}{c} \upsilon_x \\ \varepsilon(\lambda_{las} \\ \eta \\ \phi \end{array} $	$\begin{array}{c} 1.\dots\dots_{er}) & 1.\\ \operatorname{Pa\cdot s}\dots\dots\\ 1\dots\dots\end{array}$	Poissonův poměr kontaktního těle Absorpční koeficie Dynamická viskozi Kvantový výtěž	nt ta ek

SEZNAM PŘÍLOH

- 1. Materiálový list Pro-fax 6523
- 2. Přehled vlastností fenolických materiálů
- 3. Zdrojový kód softwaru
- 4. Laboratorní protokol