

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor tribologie

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

Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem

Disertační práce
Dissertation Thesis

Autor práce: **Ing. David Košťál**
Author

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

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli prof. Ivanu Křupkovi a kolegům Petru Šperkovi a Petru Svobodovi za podporu, mnoho cenných rad a připomínek, kterými přispěli k vypracování této práce. Současně bych rád poděkoval svým rodičům a přítelkyni Peťce za podporu, kterou mi poskytovali během studia a pomáhali řešit různá úskalí, která studium provázela.

PROHLÁŠENÍ O SAMOSTATNOSTI

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

V Brně dne 31. 8. 2015

.....

Ing. David Košťál

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠTÁL, D. Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 137 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D..

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá experimentálním studiem elastohydrodynamického kontaktu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Další vědecké studie v této oblasti jsou zaměřeny z větší části teoreticky a je zde tudíž nedostatek prací za účelem ověření modelů. V prezentovaných modelech lze dohledat dva základní způsoby kvantifikace úrovně hladovění: pomocí polohy vstupního menisku a podle tloušťky vrstvy maziva na vstupu. Druhá metoda je mnohem univerzálnější vzhledem k rozsahu provozních podmínek, nicméně poměrně obtížně experimentálně dosažitelná. Tato práce prezentuje původní experimenty za účelem popisu chování a kvantifikace úrovně hladovění při přesně definované tloušťce maziva na vstupu kontaktu. Hlubší poznání procesů probíhajících v hladovějícím elastohydrodynamickém kontaktu umožní vývoj přesnějších modelů, zpřesnění schopnosti predikovat tento stav a vyhnout se mu již ve fázi návrhu klíčových tribologických uzlů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tribologie, mazání, EHD, hladovění, nedostatečné zásobování mazivem, tloušťka mazacího filmu na vstupu,

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with an experimental study of an elastohydrodynamic contact under insufficient lubricant supply. Theoretical studies published in this research area focus mainly on the development of theoretical models and there is an insufficient number of experimental studies which validate these models. There are two basic methods of starvation severity control in published theoretical models: by positioning of an inlet meniscus and by setting the thickness of an oil layer in the vicinity of contact inlet. The second method is more suitable when considering a wide range of operating conditions, however it is difficult to ensure experimentally. This thesis presents original experimental results and aims to describe the starvation severity level as a function of the inlet film thickness. Deeper understanding of fundamental processes in starved elastohydrodynamic contacts enables the development of more precise models, better ability of prediction of the starvation and improves the ability to avoid starvation in the early design process of key tribological components.

KEYWORDS

Tribology, lubrication, EHD, starvation, parched lubrication, inlet film thickness,

OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Přehled současného stavu poznání	10
2.1. Pokroky v oblasti tribologie	10
2.2. Hladovění	12
2.3. Pohyb maziva (uvnitř a vně kontaktu) – efekt doplňování.....	27
3. Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše.....	41
4. Vymezení cíle disertační práce	43
4.1. Vědecká otázka:.....	44
4.2. Pracovní hypotéza.....	44
5. Materiály a metody.....	46
5.1 Experimentální část.....	46
5.2. Teoretická část.....	63
6. Výsledky a diskuze.....	65
6.1. Kvantifikace hladovění.....	65
6.2. Slabá místa navržené metody.....	67
6.3. Doplňování maziva – vliv vzájemné vzdálenosti elementů.....	68
6.4. Poměr dělení maziva po průchodu kontaktem.....	79
6.5. Vliv tloušťky maziva na vstupu kontaktu na úroveň hladovění..	90
6.6. Vliv parametru γ na závislost h_{oil} na h_c	103
6.7. Tvar vstupního menisku.....	106
6.8. Vliv chyb a jejich analýza	108
7. Shrnutí a Závěr.....	114
7.1. Doplňování maziva	114
7.2. Poměr dělení maziva	114
7.3. Vliv tloušťky maziva na vstupu na úroveň hladovění.....	115
7.4. Trendy budoucího vývoje	119
8. Seznam publikací a dalších výstupů autora vytvořených během studia.....	120
8.1. Články v odborných periodících	120
8.2. Příspěvky na konferencích – konferenční sborníky	120
8.3. Užité vzory.....	121
8.4. Funkční vzorky	122
9. Literatura.....	123
10. Seznam obrázků.....	131
11. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	136

1. ÚVOD

Tato disertační práce se zabývá studiem procesů ve vědním oboru tribologie, což je vědní nauka o procesech tření, mazání a opotřebení. Konkrétnějším vymezením tématu v rámci tribologie je oblast elastohydrodynamického mazání. Tento režim mazání byl objeven a poprvé popsán zhruba 20. století. Objasnění procesu elastohydrodynamického mazání patří mezi jedny z nejvýznamnějších poznatků vědního oboru tribologie. Jedná se o mazací režim, při kterém je mazivo schopno úplně separovat kontaktní povrchy a radikálně snížit opotřebení, které by při kontaktu vzniklo. Současně se snížením opotřebení dochází i ke snížení tření, které je ve většině případů aplikací EHD mazání vyžadováno co nejnižší.

Inženýrské aplikace využívající vlastnosti elastohydrodynamického mazání jsou všechny, které zahrnují malé kontaktní oblasti za vysokých kontaktních tlaků. To jsou například vačkové mechanismy, valivá ložiska, ozubení apod. Současné trendy ve všech těchto oblastech vyžadují minimalizaci energetických ztrát za současného prodlužování životnosti kontaktních povrchů a zvyšování přenášených výkonů. Pokroků v těchto oblastech je dosahováno v neposlední řadě také díky novým objevům v oblasti tribologie.

Hodnoty potencionálního opotřebení a tření mají úzkou návaznost na hodnotu tloušťky mazacího filmu elastohydrodynamického kontaktu, který odděluje mazané povrchy. Jeho tloušťka je za běžných okolností definována na základě hodnot rychlosti třecích povrchů, jejich geometrií, vlastností maziva, okolní teplotou, zatížením a několika dalšími parametry. Pokud je k dispozici dostatečné množství maziva, tak se kontakt označuje za plně zaplavený.

Za specifických podmínek, zejména je to nedostatečný objem maziva či jeho nevhodné parametry, může ovšem dojít ke snížení tloušťky mazacího filmu na nižší hodnoty. Takto mazaný kontakt se označuje za hladovějící či za nedostatečně zásobovaný mazivem. Ve většině případů se jedná o defektní situaci, která může sice za některých okolností poskytovat nižší tření, než je tomu u plně zaplaveného elastohydrodynamicky mazaného kontaktu, nicméně se výrazně zvyšuje riziko interakce kontaktních povrchů a tím i opotřebení.

Tloušťka mazacího filmu se může snížit až na hodnotu drsnosti kontaktních povrchů a poté může v kontaktu vrcholů nerovností docházet k dřívější iniciaci únavového poškození typů pitting či spalling. Z tohoto důvodu existuje obecná snaha o co nejvyšší porozumění mechanismů

doprovázejících hladovění za účelem jeho predikce a včasné eliminace, ideálně ještě ve fázi návrhu tribologických uzlů.

Během posledních let vznikly teoretické modely, které komplexněji popisují tento problém a dokáží předpovědět úroveň hladovění. Experimentální ověření těchto modelů je nicméně doposud nedostačující.

Tato disertační práce se zabývá studiem hladovějícího kontaktu z pohledu možné verifikace některých teoretických modelů dostupných v literatuře. Některé z těchto modelů totiž využívají jako vstupní hodnoty pro výpočet některé parametry, které jsou experimentálně měřitelné velmi obtížně, v průmyslové praxi téměř nereálně.

Lepší pochopení jevů provázejících počátek a samotný proces hladovění by umožnilo lepší návrh a kontrolu strojních součástí. To by ve výsledku znamenalo úsporu nákladů na výměnu těchto součástí a eliminaci časových prodlev způsobených havarijními odstávkami z důvodů výměn či celkové snížení energetické náročnosti provozu.

Disertační práce obsahuje nejen některé doposud nepublikované výsledky, ale také popis některých publikací autora souvisejících s tématem práce a výsledky v nich obsažené.

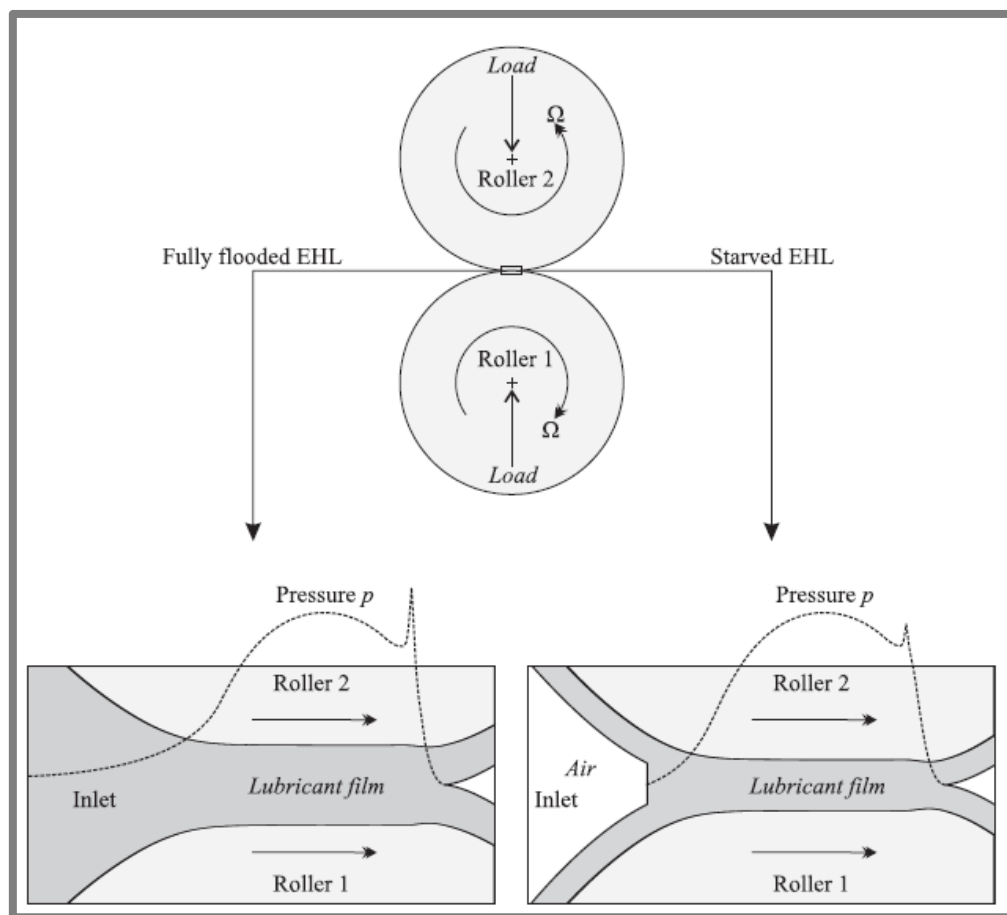
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1. Pokroky v oblasti tribologie

Během posledního století došlo k výraznému pokroku v kvalitě součástí strojů. Běžný tlak, rychlost, přesnost a životnost vzrůstají, zatímco velikost, hmotnost a cena klesá. Toho bylo docíleno za pomoci zlepšování geometrie, materiálů, způsobu výroby a v neposlední řadě také pokrokem v oblasti tribologie. Další důvod je ovšem také přiblížení bezpečnostních mezí blíže mezním stavům. Důsledkem toho je zvýšená potřeba umět přesně předvídat všechny provozní parametry, včetně těch, které se týkají mazání, aby se předešlo selhání komponent ještě během jejich plánované životnosti [1].

Mechanické komponenty jako například valivé elementy ložisek přenášejí vysoká zatížení, během čehož je po nich požadována minimální ztráta energie třením. Mezi kontaktními plochami (například mezi valivým elementem a ložiskovým kroužkem) je nezbytné mít mazací film, který odděluje povrchy. Ten sníží tření a opotřebení, vstřebá případné negativní důsledky způsobené rozdíly mezi rychlostmi, sníží zahřívání těles a navíc pomocí aditiv v mazivu dokáže zvýšit únavovou životnost [2].

Před třiceti lety byla vada materiálu hlavní důvod poruch ložisek [3], [4]. Vměstky a vady obsažené v oceli zrychlily iniciaci trhlin a tvorbu úlomků. Dnešní výrobní postupy výrazně eliminovaly tvorbu těchto problémů a trhliny či vady v materiálu již nejsou hlavním důvodem selhání dílu, čímž se zvýšila celková životnost. Zároveň se ovšem také zvýšily požadavky průmyslu na provozní podmínky, životnost a trvanlivost, přičemž viskozita maziv, hmotnost a cena konstrukcí se snížily. To vedlo k soustavnému snižování tloušťky filmu až na hodnotu, která se v dnešní době blíží nerovnostem povrchu, což má za následek vytvoření nového způsobu porušení díky těmto mikro-vadám (stopy po obrábění, vrypy, drážky atd.) [2].



Obr. 2.1 Rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu [5]

S těmito limity a přibližováním se k novým hranicím existuje i větší riziko porušení předepsaných provozních parametrů. V důsledku nadměrného zatížení či vysoké rychlosti může dojít až k nedostatečnému zásobení kontaktu mazivem, kdy nemusí být kontaktní plochy plně odděleny a dochází k poškození třecích povrchů [6].

Množství maziva dodávaného do elastohydrodynamicky mazaného (EHL) kontaktu má vliv na tloušťku mazacího filmu. Na Obr. 2.1 lze pozorovat rozložení tloušťky mazacího filmu a tlaku při průchodu kontaktem vytvářeným mezi dvěma se odvalujícími válci. Na levém detailu lze vidět plně zaplavený kontakt a na pravé straně hladovějící kontakt.

Při plně zaplavených podmínkách [7], [8] (levý detail Obr. 2.1) je mezera mezi dvěma tělesy kompletně zásobována mazivem. Konvergující mezera, která je vytvářena geometrií těles a jejich deformacemi způsobuje, v kombinaci s relativním pohybem, vtahování maziva do kontaktu. Díky geometrii mezery dochází k nárůstu tlaku v mazivu, výraznému zvýšení viskozity a tím generování vrstvy maziva, která plně odděluje tělesa [5].

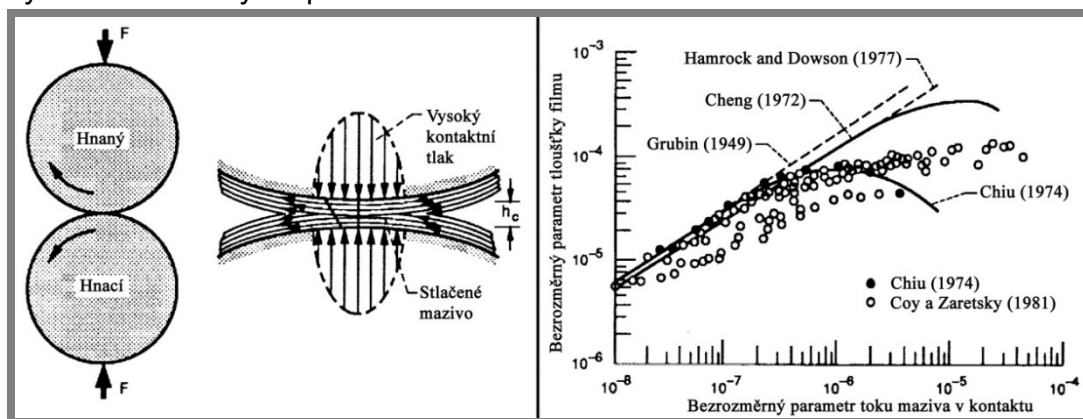
Při podmínkách hladovění [1], [9], [10] (pravý detail Obr. 2.1) je dostupná oblast pro nárůst tlaku značně zmenšena. V oblasti, kde

v případě plně zaplaveného kontaktu již nárůst probíhal, totiž není k dispozici mazivo. V tomto případě je tlak v kontaktu rozdílný v porovnání s plně zaplaveným kontaktem, což sekundárně způsobí menší tloušťku mazacího filmu mezi povrchy.

Chování mazacího filmu je za reálných podmínek výrazně odlišné a komplikovanější než čisté EHL dle prvních teorií. Jelikož byla teorie elastohydrodynamického (EHD) mazání hladkých povrchů dostatečně popsána [7], [8], zaměřily se od té doby výzkumné týmy na zjišťování mazání drsných [11], [12] nebo záměrně tvarově modifikovaných povrchů. Toto je pochopitelné, jelikož výraznější nerovnosti mohou vést k úplnému selhání mazacího filmu, a tím i součásti. Pokud je ale z nějakého důvodu omezeno množství dostupného maziva přicházejícího do kontaktu, dochází k jeho hladovění, což je ve většině případů negativní jev [1], [9].

2.2. Hladovění

První studie zabývající se pojmem hladovění zkoumali závislost mezi valivou rychlostí a centrální tloušťkou mazacího filmu. Při plně zaplaveném režimu je tento průběh, vynesení v grafu s logaritmickými osami, ve formě rostoucí přímky. Při projevu hladovění dojde s dalším navyšováním rychlosti k poklesu tloušťky namísto dalšího růstu. Některé počáteční experimenty či numerické modely lze vidět v grafu na Obr. 2.2. Na levé straně v tomto obrázku lze vidět popis EHD kontaktu a napravo vykreslení výsledků některých počátečních studií.

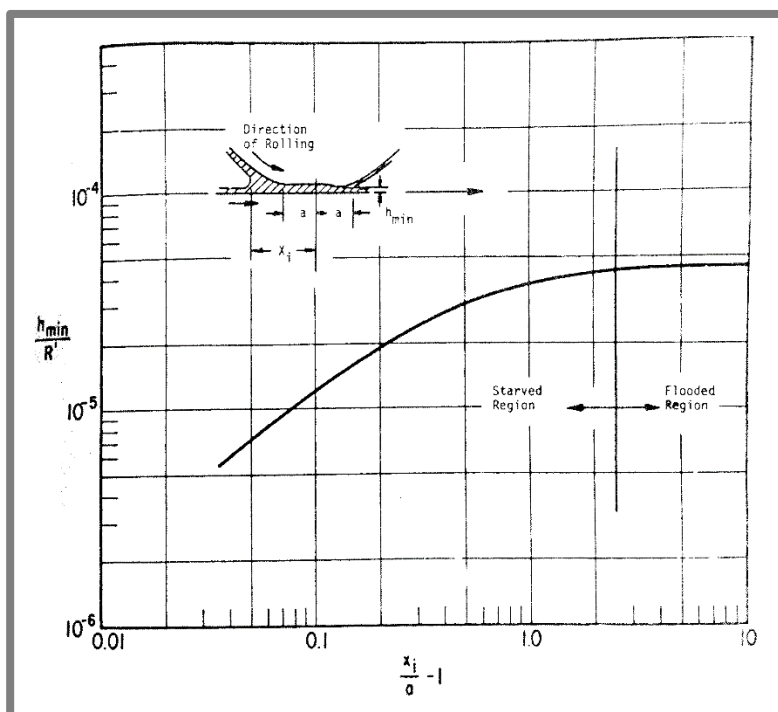


Obr. 2.2 Vlevo – EHD kontakt, vpravo – rané studie zaměřené na EHD mazání/hladovění [13].

Prvními, kdo se zabýval výzkumem hladovění, byli Orcutt a Cheng [14], kteří pozorovali posun vstupní hranice (dále označovaná jako vstupní meniskus) blíže ke kontaktu. Autoři se zabývali posunem menisku blíže ke kontaktu při zvyšující se úrovni hladovění a definovali vstupní hranici jako oblast limitující nárůst tlaku před kontaktem, což je činitel způsobující

snížování tloušťky vůči plně zaplavenému kontaktu. Vztah mezi polohou vstupního menisku a centrální tloušťkou z této práce je na Obr. 2.3. Autoři jako jedni z prvních pozorovali a popsali hladovění, ale nepopisovali jej pouze jako negativní jev. Při poklesu tloušťky totiž dochází k snížení tření. Autoři spíše spatřovali problém v nestacionárních podmínkách, které hladovění způsobuje, jelikož se zabývali mazáním přístrojových ložisek, které vyžadují konstantní průběh součinitele tření. Současně ovšem popsali, že nedostatečné zásobování ložiska mazivem má negativní vliv na jeho životnost.

Podobnou studii publikoval i Nogi [15], který teoreticky i experimentálně zkoumal závislost valivého odporu na přibližování se vstupního menisku ke kontaktu.

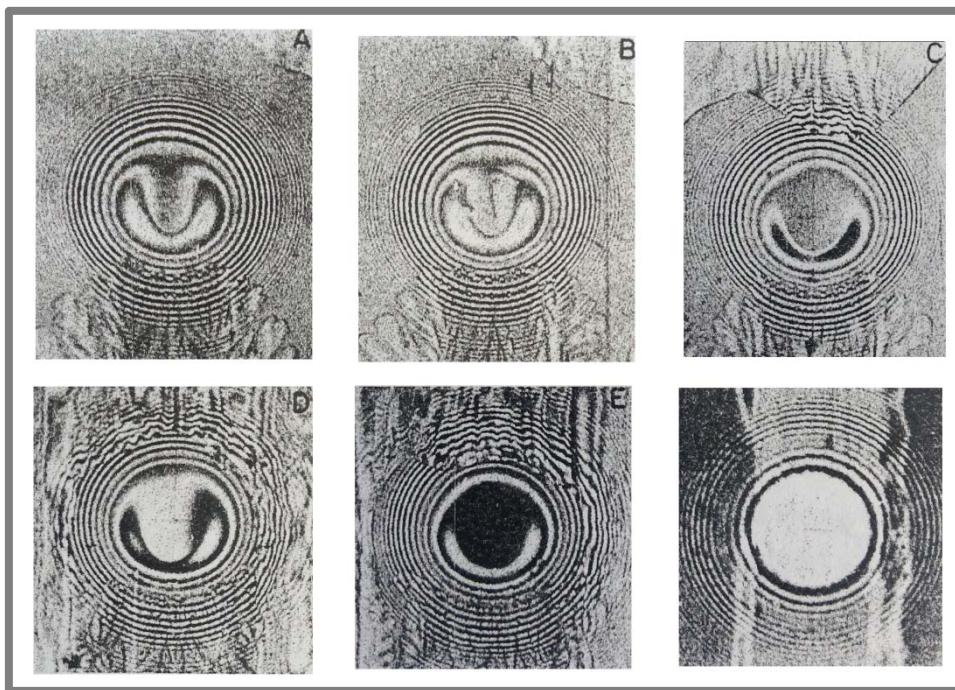


Obr. 2.3 Vliv polohy vstupní hranice na minimální tloušťku mazacího filmu [14]

Dalším, podrobnějším studiem jevu hladovění, se zabývali Wedeven a kol. [16], kteří experimentálně pomocí optické interferometrie sledovali utváření mazacího filmu v hladovějícím EHD kontaktu. Experimenty ukázaly i kavitaci, zachycení maziva v kontaktu, použití plastického maziva či hranový efekt liniového kontaktu. Na Obr. 2.4 lze pozorovat změnu distribuce a pokles tloušťky filmu pro snižující se vzdálenost hranice vstupní oblasti. Z interferogramů je patrné, že pro zvyšující se stupeň hladovění se rozložení přibližuje Hertzovu rozložení.

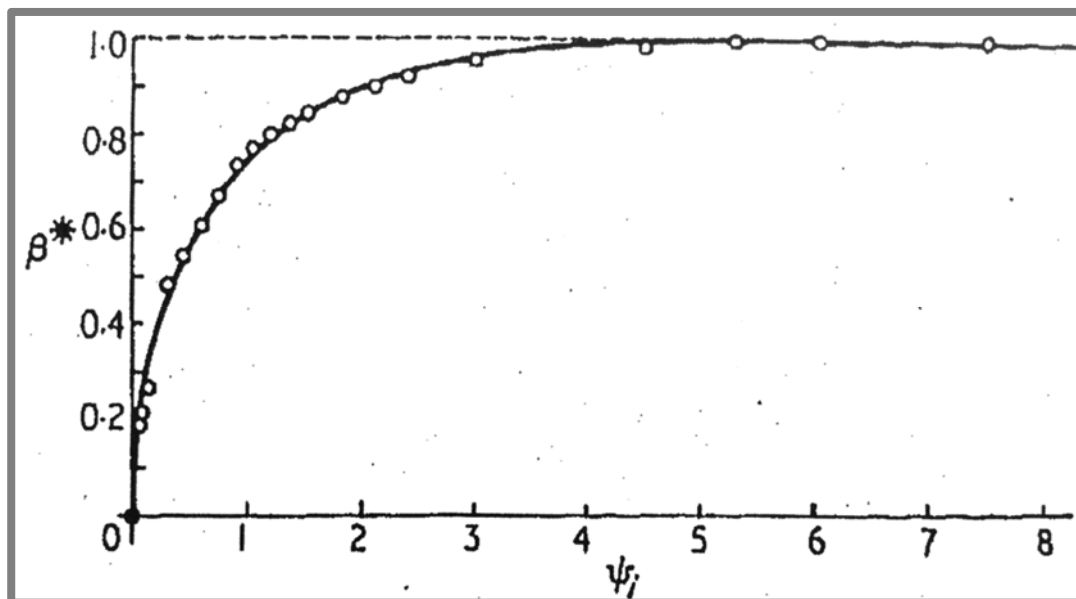
V článku byla ověřena hypotéza, že tloušťka EHD filmu je definována již na vstupu kontaktu. Hlavní důvod hladovění je, že se

zkracuje prostor pro nárůst tlaku, čímž snižuje tloušťku mazacího filmu. Tento efekt byl experimentálně ověřen a bylo prokázáno, že je v souladu s EHD teorií na základě Grubinových předpokladů [17]. Dále empiricky stanovili vztah mezi úrovní hladovění a polohou hranice vstupní oblasti od tlakové oblasti (Hertzovy).



Obr. 2.4 Interferogramy znázorňující pokles tloušťky mazacího filmu v závislosti na přibližující se vstupní hranici [18]

Wolveridge a kol. [18] rozšířili studium hladovění na analýzu vlivu hladovění na únosnost liniového kontaktu. V této práci je prezentován semi-analytický přístup řešení vlivu polohy hranice vstupní oblasti na únosnost liniového kontaktu. V grafu na Obr. 2.5 je popsána závislost vzdálenosti polohy hranice vstupní oblasti od hranice tlakové oblasti na redukci centrální tloušťky pro liniový kontakt.



Obr. 2.5 Vliv polohy vstupní oblasti (ψ_i) na redukci centrální tloušťky [18]

β^* – vliv hladovění na centrální tloušťku v oblasti tlakového maxima (h^*/h^*_{∞})

h^* – tloušťka filmu v tlakovém maximu

h^*_{∞} – tloušťka filmu v tlakovém maximu při poloze hranice vstupní oblasti v ∞ .

$\psi_i = X_i$ – bezrozměrná poloha hranice vstupní oblasti

Pozn.: ve vztahu se vyskytují další proměnné, které ovšem byly v tomto případě konstantní, takže zde nejsou uvedeny.

Řešení ukázalo, že parametr, který byl doposud zvažován jako konstantní (∞), má významný vliv na tloušťku mazacího filmu, a to zejména v oblasti blízké nule a je zapotřebí se jím nadále zabývat, jelikož snížená tloušťka ovlivňuje únosnost kontaktu, jejíž studium byl původní cíl práce.

Zároveň je diskutován předpoklad, že vyvinutý model bude velmi pravděpodobně podobný tomu, který by se dal využít pro bodový kontakt. Zde se pouze musí zvážit boční výtok.

Jako rozšíření této studie lze považovat práci Hamrocka a Dowsona [19], kteří navázali i na svou předchozí práci [20], ve které představili elastický model, ve kterém je kontaktní zóna rozdělená na rovnoměrné obdélníky a je uvažován rovnoměrný tlak na každý z nich. V další práci [21] již poskytli kompletní přístup k řešení EHL bodového kontaktu. Nejvýznamnější v této práci [21] je určení minima tloušťky v kontaktu. Ve dvou zmíněných článcích je probírána pouze teorie, jejíž výsledky jsou prezentovány v třetí práci [7]. Vztahy Hamrocka a Dowsona pro výpočet minimální a centrální tloušťky EHD kontaktu dodnes patří mezi standardy v oblasti tribologie, jak i dokazuje srovnání v aktuální práci Lubrechta [22].

Výše uvedená práce [19] dále rozvíjí vyvinutý model o redukci tloušťky mazacího filmu při hladovějících podmínkách. Autoři našli jednoduchý vztah bezrozměrných veličin, kterým lze popsat redukci centrální (2.1) resp. minimální (2.2) tloušťky mazacího filmu v závislosti na poloze hranice vstupní oblasti.

$$H_{c,S} = H_{c,F} \left(\frac{m-1}{m^*-1} \right)^{0.29} \quad 2.1$$

$$H_{min,S} = H_{min,F} \left(\frac{m-1}{m^*-1} \right)^{0.25} \quad 2.2$$

$H_{c,S}$ - centrální tloušťka hladovějícího kontaktu

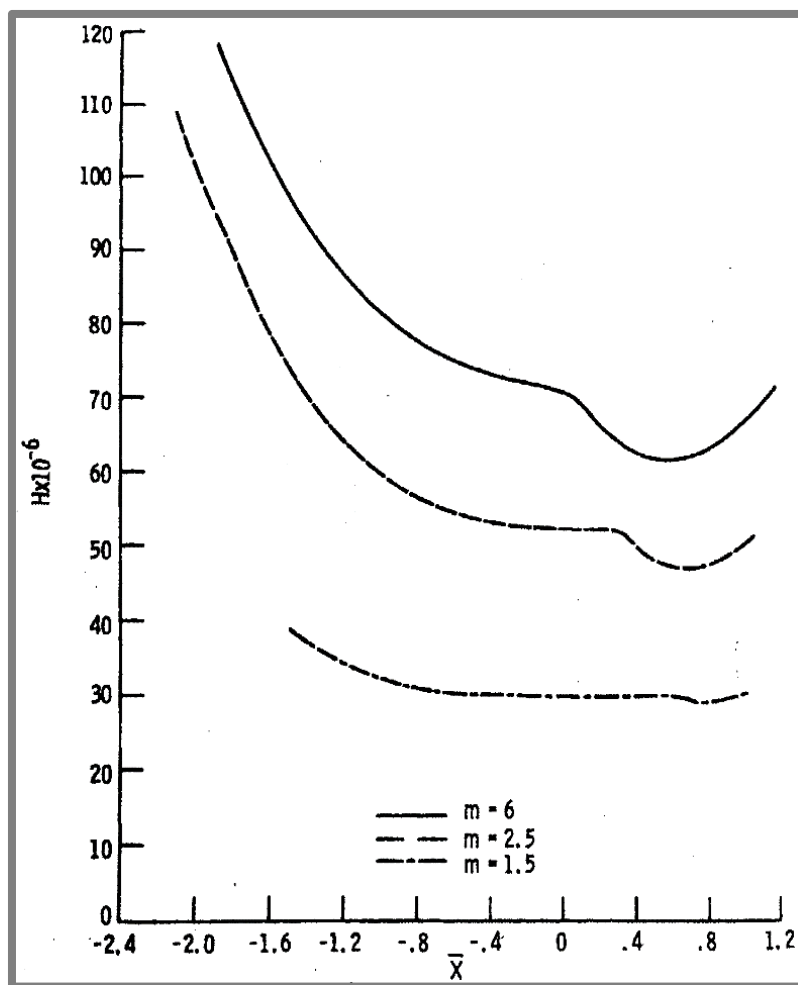
$H_{c,F}$ - centrální tloušťka plně zaplaveného kontaktu

$H_{min,S}$ - minimální tloušťka hladovějícího kontaktu

$H_{min,F}$ - minimální tloušťka plně zaplaveného kontaktu

m - bezrozměrná vzdálenost vstupní oblasti

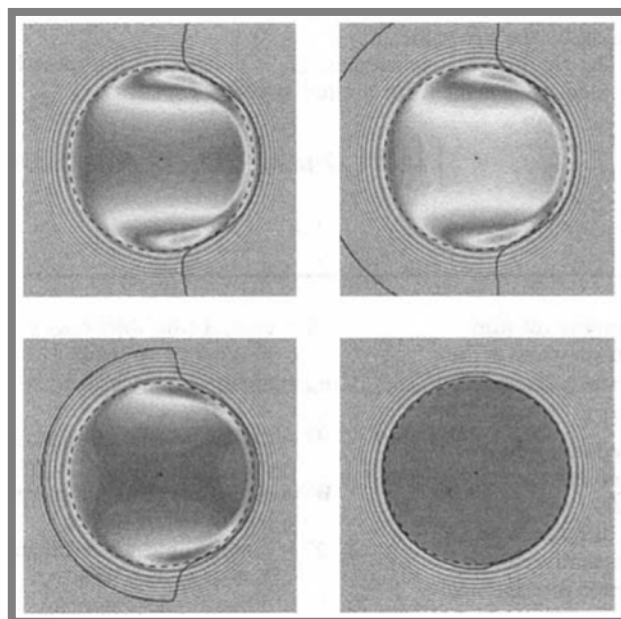
m^* - bezrozměrná vzdálenost mezi vstupními hranicemi pro plně zaplavený a hladovějící kontakt.



Obr. 2.6 Bezrozměrná tloušťka filmu ($H = h / R_x$) na ose X pro tři hodnoty polohy vstupní oblasti m . Hodnota Y je konstantní poblíž středu kontaktu [19].

Série čtyř zmíněných prací poskytuje komplexní popis raného teoretického výzkumu hladovějícího (ale i plně zaplaveného) bodového kontaktu. Touto prací byla prokázána zejména závislost poměru mezi H_c a $H_{\min}$ na úrovni hladovění. Tato závislost jde vidět i na profilech na Obr. 2.6. Profily jsou vykresleny pro různou vzdálenost vstupní hranice m , čímž je zde kontrolována úroveň hladovění. Tato práce vytvořila důležitou teoretickou základnu pro další výzkum problému elastohydrodynamického mazání za hladovějících podmínek.

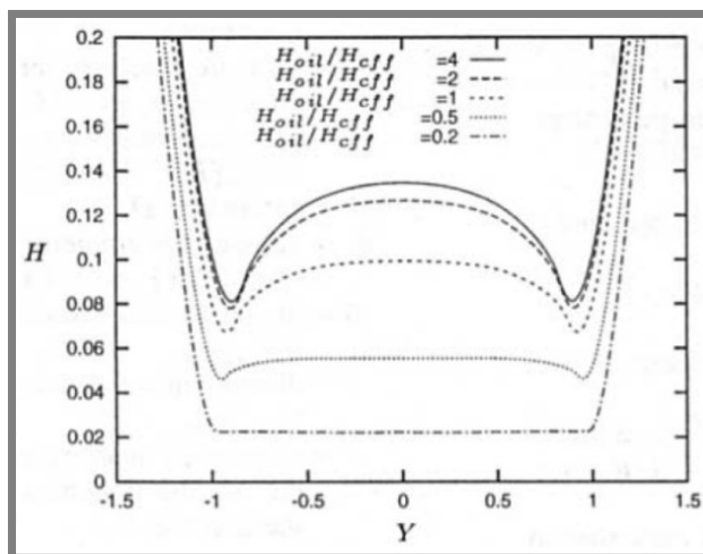
Ve všech doposud uvedených studiích byla úroveň hladovění zjišťována vždy pomocí parametru definujícího vzdálenost hranice vstupní oblasti od hranice tlakové oblasti. Obecně lze říci, že čím menší je tato vzdálenost, tím je větší redukce tloušťky mazacího filmu.



Obr. 2.7 Poloha vstupního menisku dopočítaná při definované tloušťce maziva před kontaktem [9].

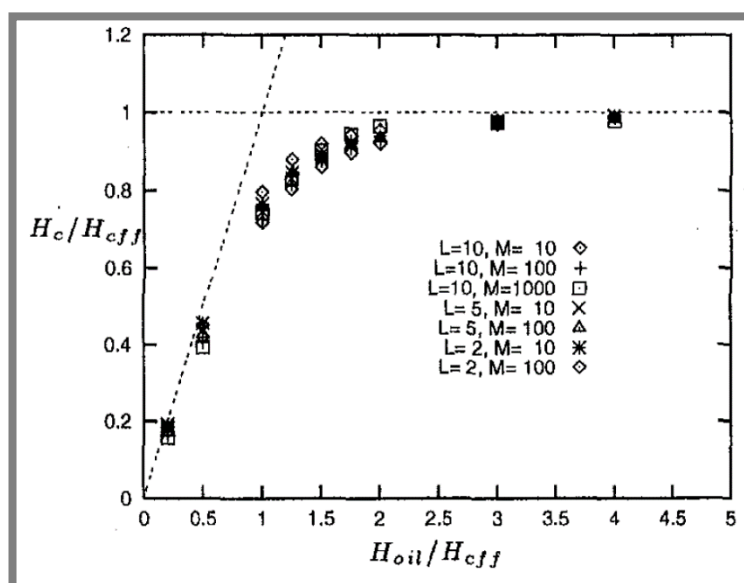
Chevalier a kol. [9] poznamenali, že takto definovaná kontrola úrovně redukce mazacího filmu je nepraktická. Se zvyšující se úrovní hladovění začíná být tloušťka filmu na poloze hranice vstupní oblasti extrémně citlivá a v reálných aplikacích se jedná o téměř neměřitelnou hodnotu. Dalším problémem je, že v případě pokračujícího hladovění dochází k sloučení těchto dvou hranic, přičemž redukce tloušťky mazacího filmu stále pokračuje. Pro vysoké úrovně hladovění je tento přístup tedy nepoužitelný.

Namísto této polohy autoři využili pro kontrolu úrovně hladovění tloušťku maziva H_{oil} , kterou má EHD kontakt k dispozici na vstupu. Za pomoci tohoto parametru lze poté obdržet jak polohu vstupního menisku (hranice vstupní oblasti na Obr. 2.7), tak také redukci centrální tloušťky.



Obr. 2.8 Profily filmu pro různé stupně hladovění [9]

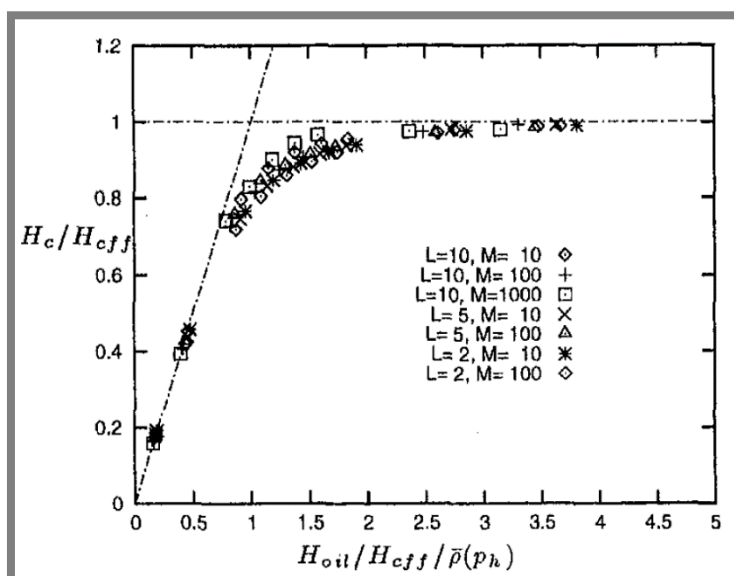
- H_{oil} - tloušťka maziva na vstupu kontaktu
- H_{cff} - centrální tloušťka při plně zaplaveném kontaktu
- H - bezrozměrná tloušťka mazacího filmu
- Y - bezrozměrná souřadnice ve směru kolmém na směr valení



Obr. 2.9 Centrální tloušťka mazacího filmu jako závislost tloušťky filmu na vstupu kontaktu [9]

Na Obr. 2.8 jsou vykresleny výsledné příčné profily mazacího filmu pro různé stupně hladovění. Tento stupeň je zde definován pomocí poměru H_{oil} / H_{cff} . Na těchto řezech středem kontaktu lze pozorovat, že při zvyšující se úrovni hladovění klesá centrální tloušťka rychleji, než

minimální. Distribuce tloušťky maziva se přibližuje plochému Hertzovu rozložení tím více, čím je hodnota H_{oil}/H_{cff} menší.



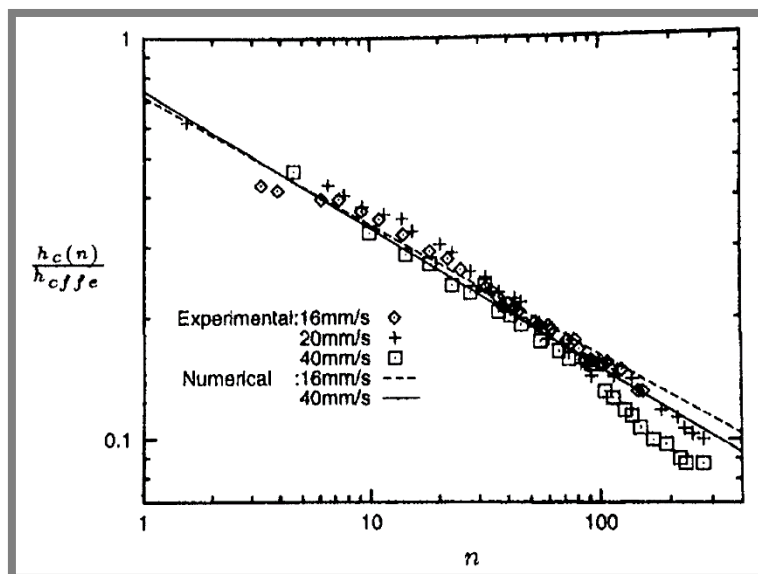
Obr. 2.10 Centrální tloušťka mazacího filmu jako závislost tloušťky filmu na vstupu kontaktu dělená relativní hustotou – negace vlivu stlačitelnosti maziva [9]

Na Obr. 2.9 lze pozorovat, že křivky hladovění pro různé podmínky (Moes) jsou téměř identické. Drobný rozptyl je diskutován jako vliv provozních podmínek, ten je ovšem minimální. Současně je diskutováno, že nedochází ke konvergenci výsledků s asymptotami. To je dááno za vliv vlivu stlačitelnosti maziva. V grafu na Obr. 2.10 jsou výsledky z předchozího grafu dělené relativní hustotou maziva v kontaktu vůči hustotě při ambientním tlaku. Poté již dojde ke konvergenci s asymptotami.

V druhé části práce je analyticky zkoumán vliv opakovaného průchodu maziva kontaktem a vliv na degradaci mazacího filmu. Je zde představen jednoduchý vzorec (2.3), který definuje redukci mazacího filmu po každém dalším odvalení.

$$R(n) = \frac{1}{\sqrt[\gamma]{\frac{1}{r_0^\gamma} + n}}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} R(n) = n^{\frac{-1}{\gamma}} \quad 2.3$$

- n - počet průchodů kontaktem
- R - redukce centrální tloušťky mazacího filmu (H_c/H_{cff})
- γ - odpor proti bočnímu tečení (Pro EHL se pohybuje mezi 2 a 5)
- r_0 - relativní tloušťka mazacího filmu $H_{oil} / H_{cff} / \rho$
- ρ - bezrozměrná hustota



Obr. 2.11 Porovnání teorie a experimentu definující závislost poklesu tloušťky filmu na počtu průchodů kontaktem (Predikce - 40 mm/s - $\gamma=2.9$; 16 mm/s - $\gamma=3.1$) [9]

Díky tomuto modelu lze polohu menisku a redukci centrální tloušťky dopočítat z tloušťky maziva na vstupu kontaktu. Tento přístup je navíc vhodný pro popis kterékoliv úrovně hladovění. Jeho nevýhodou je absence experimentální verifikace, jelikož množství maziva v řádech desítek až stovek nanometrů se velmi obtížně vytváří.

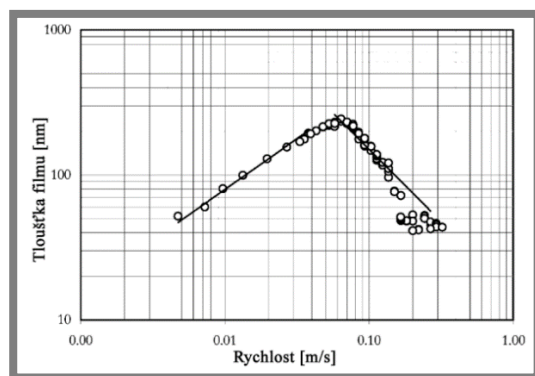
Dalším významným přínosem bylo definování poklesu tloušťky mazacího filmu v důsledku bočního výtoku maziva z kontaktu. S každým dalším průchodem maziva kontaktem se v důsledku tohoto jevu snižuje tloušťka mazacího filmu. Dřívější studie, které se zabývali liniovými kontakty, tento efekt nezvažovali vůbec, jelikož se u liniového kontaktu boční výték zanedbává. Autoři ovšem úplně zanedbali mechanismy znovudoplnění maziva do kontaktu. Z tohoto důvodu tento model pro vysoký počet průchodů vyústí v selhání filmu – tloušťka filmu se blíží nule, což není situace běžně pozorovaná experimentálně. Experimenty zde byly účelově realizovány s velmi viskózními mazivy (1,2 Pas), aby nedocházelo ke znovu-vtékání maziva do valivé dráhy. V teoretickém modelu byl vliv zanedbán úplně.

Cannová a kol. [23] se zabývali definováním stavu, kdy dojde k přechodu z plně zaplaveného režimu do hladovějícího. V dřívějších pracích bylo uvedeno, že právě tato oblast je velmi citlivá na provozní podmínky a obtížně popsitelná. Autoři zde uvedli dílčí vlivy některých parametrů a prezentovali jeden unifikovaný parametr SD (2.4), který popisuje pomocí jednoho čísla úroveň hladovění (Starvation Degree) v závislosti na několika vstupních hodnotách, jako např. valivé rychlosti

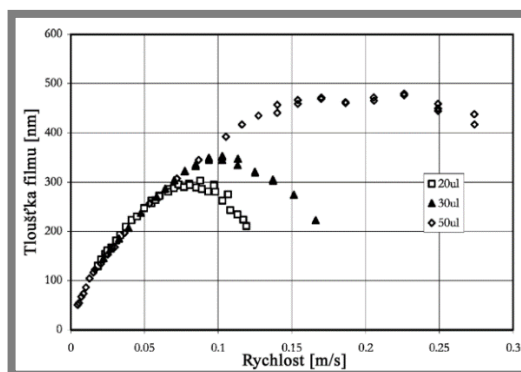
(Obr. 2.12), množství maziva (Obr. 2.13), rozměrech kontaktu či viskozitě maziva.

$$SD = \frac{\eta_0 u a'}{h_{oil} \sigma_s} \quad 2.4$$

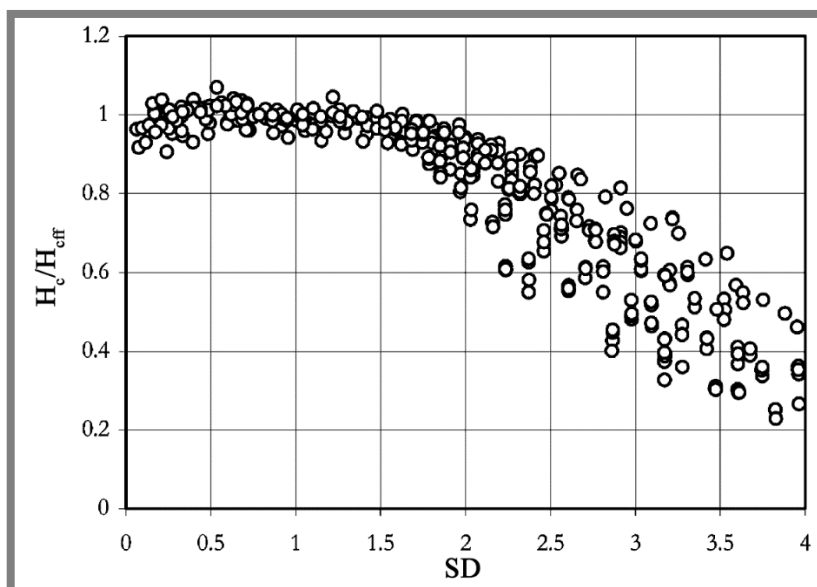
- SD - Stupeň hladovění
 u - rychlost
 a' - šířka valivé dráhy
 σ_s - povrchové napětí
 $h_{oil\infty}$ - množství maziva v blízkosti kontaktu



Obr. 2.12 Vliv rychlosti valení na tloušťku mazacího filmu [23]



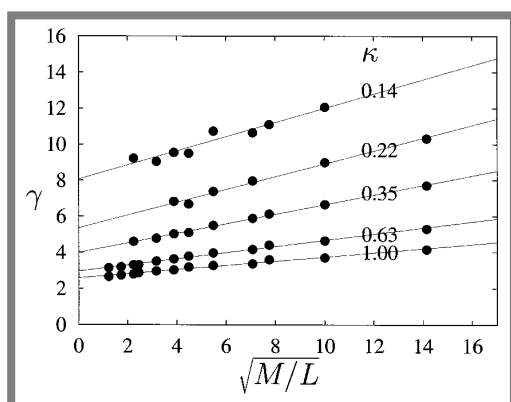
Obr. 2.13 Vliv množství maziva na tloušťku mazacího filmu [23]



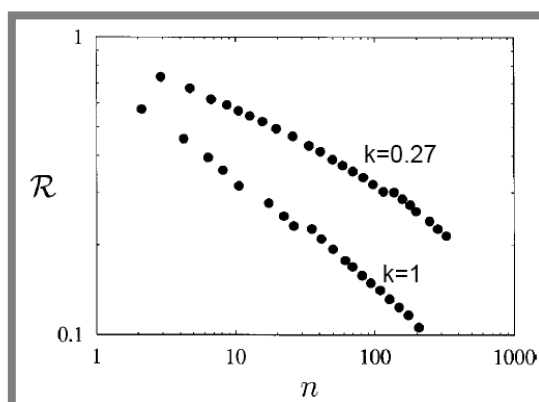
Obr. 2.14 Sdružení důležitých provozních parametrů do souhrnného parametru SD [23]

Na rozdíl od předchozích publikací je v tomto článku zahrnut lokální model znovudoplnění maziva. Bylo zjištěno, že pro $SD=1,5$, dochází k přechodu z plně zaplaveného do hladovějícího kontaktu, jak je vidět na Obr. 2.14. Dále byl určen vztah mezi SD a tloušťkou mazacího filmu: Pro $SD < 1,5$ – $h_c/h_{eff} = 1$ a pro $SD > 1,5$ – $h_c/h_{eff} = (1.5/SD)^{1.67}$. V této práci je parametr označován jako h_{oil} , který znamenal v předchozí práci tloušťku maziva na vstupu, použit obecněji. Popisuje objem maziva dodaného před kontakt.

Damiens a kol. [1] dále rozvedli svou předchozí práci [9], kde autoři prezentovali model popisující hladovějící bodový EHD kontakt. V této práci [1] je uvedeno rozšíření modelu na eliptický kontakt. Hlavním záměrem práce bylo popsat vztah parametru γ k ostatním provozním veličinám a parametru elipticity k .



Obr. 2.15 Vliv MOES parametrů M a L na hodnotu γ pro různé elipticity [1]

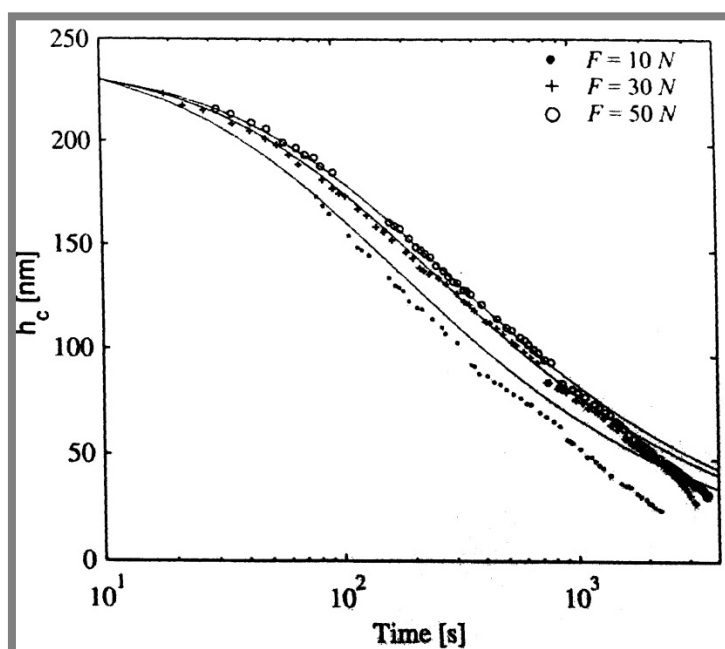


Obr. 2.16 Vliv počtu průchodů kontaktem n na redukci centrální tloušťky mazacího filmu R pro kruhový a eliptický kontakt [1]

Na Obr. 2.15 lze pozorovat velikost vlivu rozdílných parametrů M a L (Moes) na parametr γ . Zde je patrný trend, že pro zvyšující se šířku kontaktu ve směru kolmém na směr valení dochází ke zvyšování odporu proti bočnímu výtoku γ . Toto je logický výsledek, jelikož pro liniový kontakt ($k \rightarrow 0$) lze boční výtok zanedbat úplně ($\gamma \rightarrow \infty$).

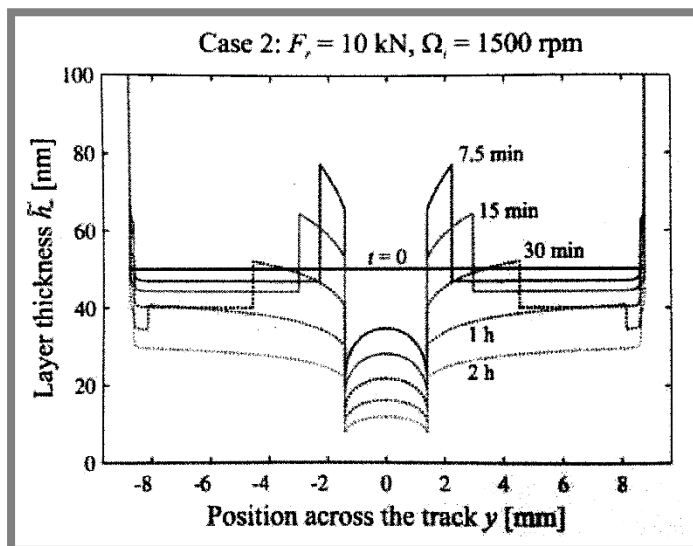
Na Obr. 2.16 je zobrazen výsledek experimentu měření redukce centrální tloušťky mazacího filmu (R) pro kruhový a eliptický kontakt v závislosti na počtu průchodů kontaktem n . Zde lze opět pozorovat nižší redukci pro eliptický kontakt. To je dáno jeho šířkou, která na základě Obr. 2.15 poskytuje větší odpor proti bočnímu výtoku γ .

Zoelen [24] vyvinul model, který řeší změnu vstupní vrstvy maziva a centrální tloušťku pro kruhové a eliptické kontakty. Výsledky poklesu tloušťky mazacího filmu byly experimentálně verifikovány. Bylo např. zjištěno, že pro vyšší zatížení se centrální tloušťka snižuje pomaleji (Obr. 2.17), než pro nižší. Toto je diskutováno jako vliv vyšší solidifikace maziva a tím pádem snížení bočního výtoku. Článek zanedbává vliv doplňování maziva ve volné valivé dráze. I během verifikace bylo záměrně posunuto valivým elementem do stran, aby došlo k odsunutí maziva po stranách dráhy. Práci úzce předcházela článek, který popisoval chování volné vrstvy maziva na různých tvarech ložiskových kroužků, včetně experimentální validace na optickém profilometru [25].



Obr. 2.17 Rychlost poklesu tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase pro různá zatížení (22)

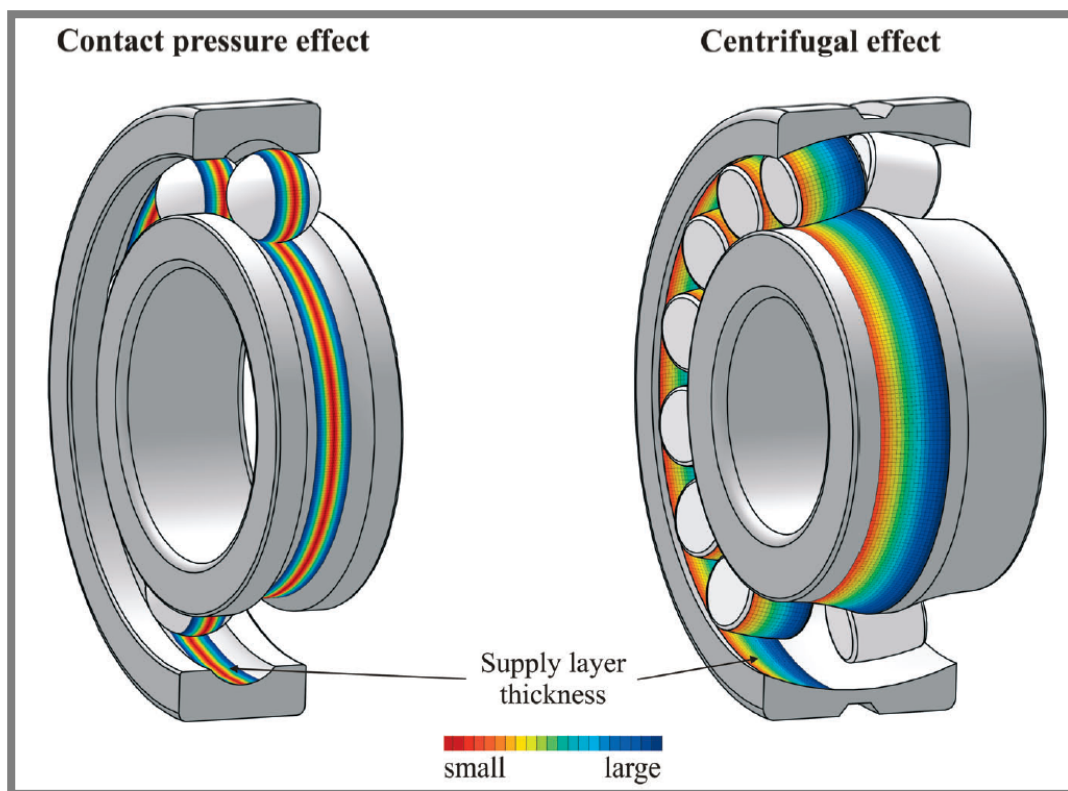
Ve své další práci Zoelen [26] představil model, který je schopen simulovat pokles mazacího filmu pro kompletní kuličkové a soudečkové ložisko (Obr. 2.18). Výsledky představené v článku ukázaly, že soudečkové ložisko má podstatně delší časy pro stejný pokles filmu než kuličkové, což je vysvětleno geometrií ložiska. Vyšší rychlost ložiska má za následek také prodloužení času.



Obr. 2.18 Výsledky pro soudečkové ložisko – změna distribuce mazacího filmu v kontaktu pro různé časové intervaly (24)

Z praktického hlediska se ale prokázalo, že pokud nebude vzato v úvahu výrazné znovu-doplňování maziva do kontaktu, tak jsou jakékoliv časy poklesu tloušťky výrazně nižší, než reálná životnost ložiska a hlavně nereálné. Ložisko si po většinu své životnosti na základě modelu nemůže udržet adekvátní vrstvu maziva.

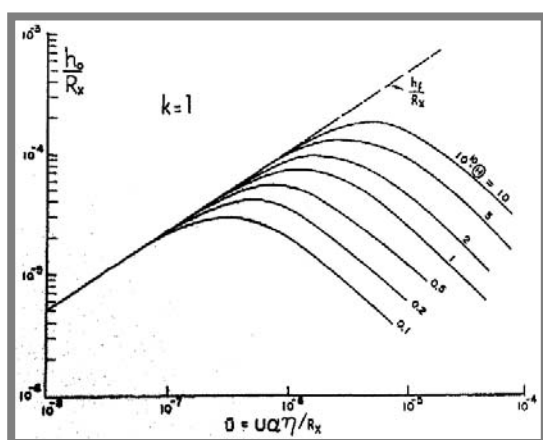
Venner a kol. [27] v další práci rozšířili předchozí modely o možnost modelování plastických maziv, které mají na rozdíl od kapalných komplexní reologii a skládají se z více součástí s jinými vlastnostmi. Model navíc umožňuje řešit migraci vrstvy maziva způsobenou odstředivými silami. Vyvinutý model poskytuje jednoduchou možnost, jak určit nejkratší možnou dobu, za kterou dojde ke snížení mazacího filmu na kritickou hodnotu. V modelu se ovšem neuvažuje vstup opotřebovaného mýdla do hladovějícího kontaktu. Tento aspekt může prodloužit dobu snížení tloušťky mazacího filmu. Mýdlo totiž, jakožto viskóznější složka směsi, zvyšuje viskozitu maziva obsaženého v kontaktu.



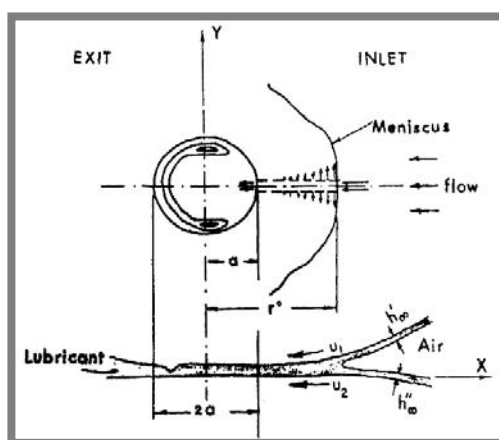
Obr. 2.19 Vliv odstředivého zrychlení na distribuci maziva u soudečkového ložiska a geometrie na kuličkové ložisko (25)

2.3. Pohyb maziva (uvnitř a vně kontaktu) – efekt doplňování

Chiu [28] jako jeden z prvních uvažoval jev, který působí proti mechanismu hladovění (bočnímu výtoku maziva) a to efekt znovudoplňování maziva do valivé dráhy (replenishment). Pokud by totiž v modelech žádný takovýto jev nebyl zahrnut, tak by nepochybně po konečné době došlo k výtoku veškerého maziva z valivé dráhy a kontakt by se stal suchým. Mazivo má ovšem po průchodu kontaktem tendenci opět vytvořit rovnoměrnou vrstvu. Hlavní roli má v tomto dle autorů povrchové napětí. Intenzita jevu dále závisí na času mezi průchody kontaktem či na vzdálenosti mezi po sobě jdoucími kontakty.



Obr. 2.20 Teoretické predikce tloušťky filmu pro různé vstupní podmínky (26)



Obr. 2.21 Schéma filmů vstupujících do kontaktu a formujících meniskus (26)

Na Obr. 2.20 lze vidět teoretické predikce závislostí tloušťky mazacího filmu na parametru $\ddot{U}$ (2.5).

$$\ddot{U} = \frac{ua\eta}{R_x} \quad 2.5$$

- u - střední valivá rychlost
- a - velikost kontaktní oblasti
- η - absolutní viskozita maziva
- R_x - poloměr křivosti kontaktní plochy

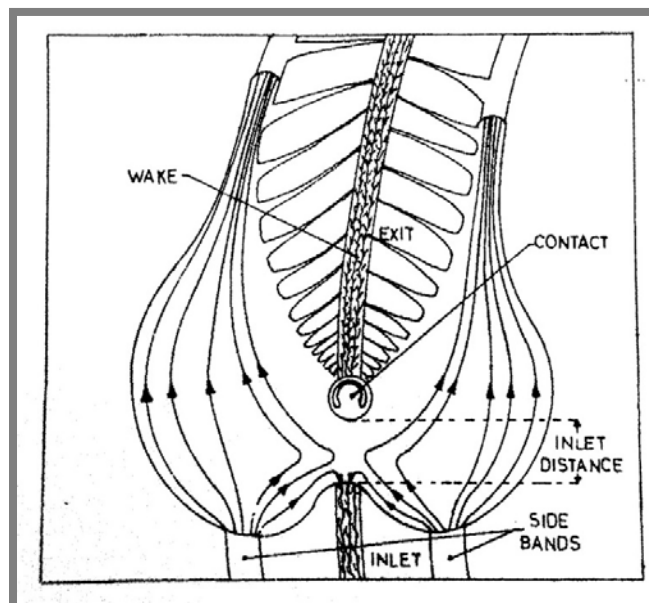
Parametr způsobující odlišnou polohu křivek na Obr. 2.20 je θ (2.6), který se počítá s parametry níže.

$$\theta = \frac{C_0 s T a}{2 R_x^2} \quad 2.6$$

- C_0 - poměr získaný z předchozího výpočtu (závisí na h_∞)
 s - vzájemná vzdálenost kontaktů
 T - povrchové napětí rozhraní olej-vzduch

Na Obr. 2.21 je znázorněno schéma vrstev maziva vstupujícího do kontaktu použité autory. Z grafu na Obr. 2.20 jde vidět vliv časové prodlevy mezi jednotlivými průchody a povrchového napětí na hladovění a jeho stupeň. Vliv povrchového napětí na doplňování maziva zpět do valivé dráhy lze ovšem uvažovat do doby, než se vytvoří příliš masivní vrstva maziva po stranách valivé dráhy. V té chvíli již začínají působit další síly (gravitační, odstředivá), které ovlivní působení povrchového napětí či lze jeho vliv úplně zanedbat. Autoři vliv zmíněných sil v této práci nestudovali.

Experimentálním studiem utváření pásů s mazivem po stranách kontaktu se zabývali Pemberton a Cameron [29]. Tyto pásy (side bands) jsou vytvořeny po průchodu maziva kontaktem a nadále fungují jako zásobníky, ze kterých se mazivo postupně vrací zpět do valivé dráhy. Autoři zde využili obohacení maziva o vzduchové bublinky, které poté při vhodně nastavené expoziční době kamery vytvářely trajektorie svého pohybu. Na Obr. 2.22 lze pozorovat trajektorie maziva v okolí kontaktu. Tyto trajektorie byly překresleny právě na základě pohybu vzduchových bublin obsažených v mazivu.



Obr. 2.22 Schéma toku maziva v okolí hladovějícího EHD kontaktu (27)

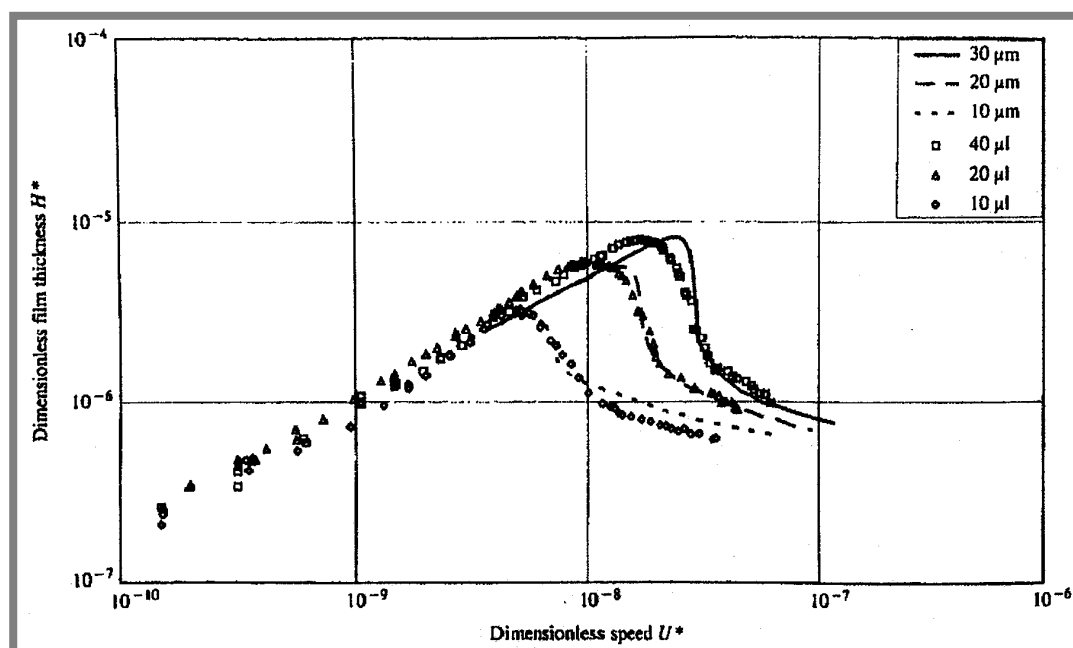
Pro méně vážné úrovně hladovění či plně zaplavený kontakt bylo pozorováno, že dochází, jak na vstupu tak, na výstupu kontaktu ke spojení pásů maziva a valivá dráha je plynule doplňována. Pro jistou kritickou rychlost již nedojde na výstupu z kontaktu ke spojení a mazivo pokračuje podél valivé dráhy ve formě dvou pásů a samotná valivá dráha obsahuje menší množství maziva. Při této situaci ovšem dojde k doplnění (spojení pásů) na vstupní části dalšího kontaktu (Obr. 2.22). Pro ještě vyšší rychlost ovšem nedojde ke spojení již ani na vstupu kontaktu a mazivo již prakticky není doplňováno, což je nejvíce nebezpečná varianta z hlediska poškození valivých povrchů.

Dalším diskutovaným, ale nepozorovaným jevem je efekt spinu kuličky v reálném ložisku. Díky rotaci by se mazivo pohybovalo částečně i kolmo ke směru valení a vytvářelo fluktuaci v tloušťce filmu. Profil toku by již nebyl symetrický.

V předchozích pracích se jakožto vliv působící proti vytlačování maziva z valivé dráhy (a způsobujícího hladovění) uvažovalo povrchové napětí. Tento jev ovšem nevysvětluje oblast extrémního hladovění (parched lubrication), při kterém nedojde k úplnému selhání kontaktu, ale spíše k jeho stabilizaci na hodnotě kolem 10-20 nm. Navíc se při této stabilizaci stává tloušťka kontaktu prakticky nezávislá na dalším zvyšování rychlosti.

Guangteng a Spikes [30] se snažili obohatit existující model, který používal Chiu [28] o Van der Waalovy síly. Na výsledcích na Obr. 2.20 lze pro závažné hladovění pozorovat přímý trend křivek. Toto ovšem nebylo pozorováno při experimentech. Jev byl pozorován i při dřívějších experimentech [31]. Kingsbury ve své práci zvažoval jako důvod tohoto

jevu ulpívání rozpuštěných částic maziva a vytvoření vrstvy deponované na valivých površích [32].

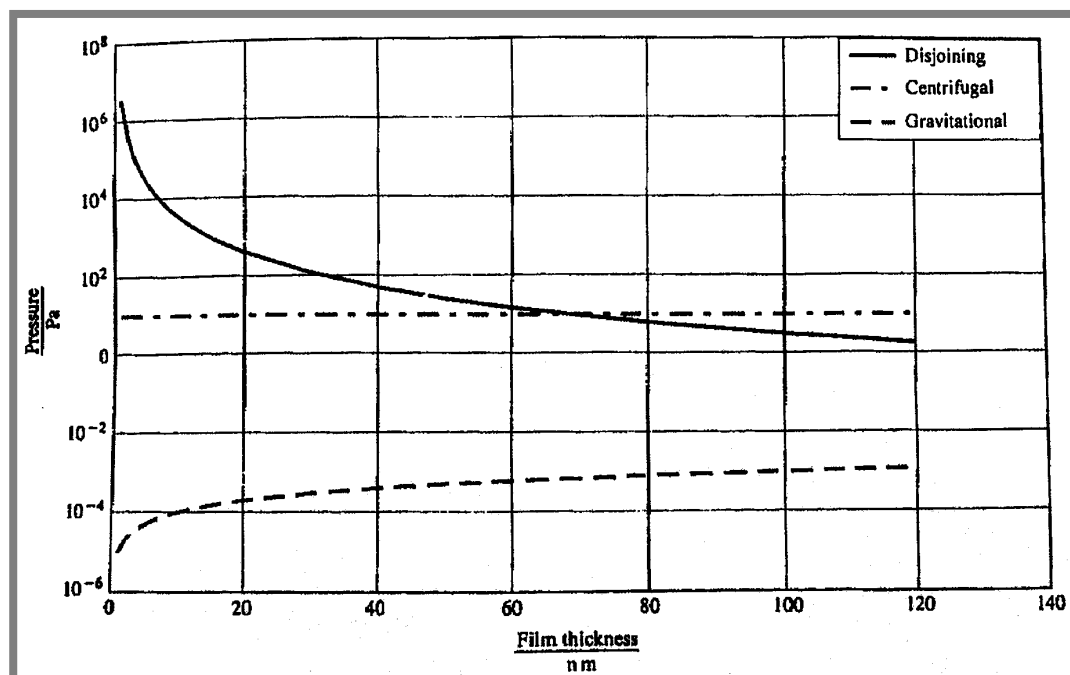


Obr. 2.23 Výsledky teoretické predikce zahrnující Van der Waalsovy síly a jejich experimentální verifikace (28)

Na Obr. 2.23 jsou zobrazeny výsledky obdržené pomocí modelu úspěšně doplněného o oblast nízkých tloušťek mazacího filmu. I experimentální verifikace potvrzuje dřívější práci [31] a ukazuje možné rozdělení na tři stádia hladovění. Při každém z nich je dominantní jiná složka mechanismu doplňování maziva zpět do kontaktu.

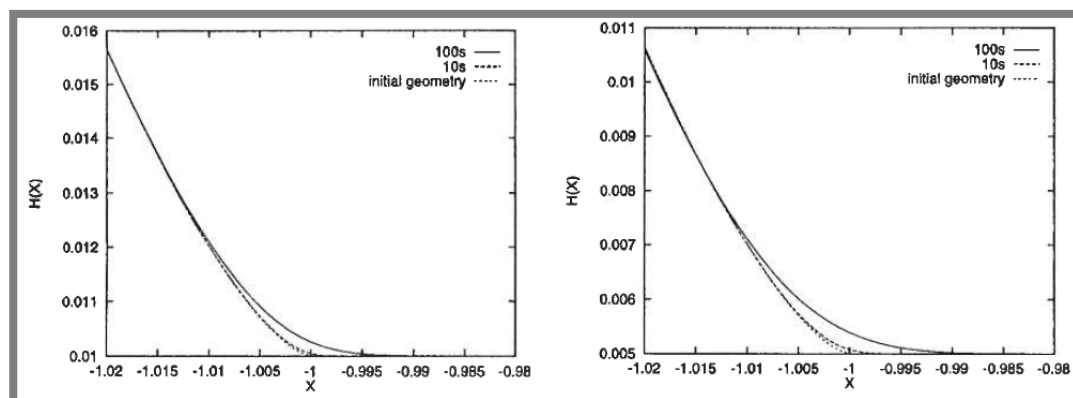
Pro nízké hladovění dochází ke spojení pásů vytvořených průchodem elementu přímo na výstupu kontaktu díky působení kapilárních sil a kontakt lze popsat jako plně zaplavený.

Pro jistou kritickou rychlost se již tyto pásy nespojí a jedinou možností zpětného doplnění je uzavření stopy díky povrchovému napětí. Kapalina se snaží zachovat si rovný (minimální) povrch. Ovšem pro extrémní rychlosti či hladovění mazací film zkolabuje a stabilizuje se na tloušťkách kolem 10-20 nm. Toto vyrovnání je způsobeno díky Van der Waalsovým přitažlivým silám na rozhraní pevného tělesa a kapaliny, které poskytují intenzivní mechanismus doplňování pro velmi malé tloušťky filmu (jednotky nanometrů). Na Obr. 2.24 lze pozorovat relativní důležitost jednotlivých složek v závislosti na tloušťce mazacího filmu.

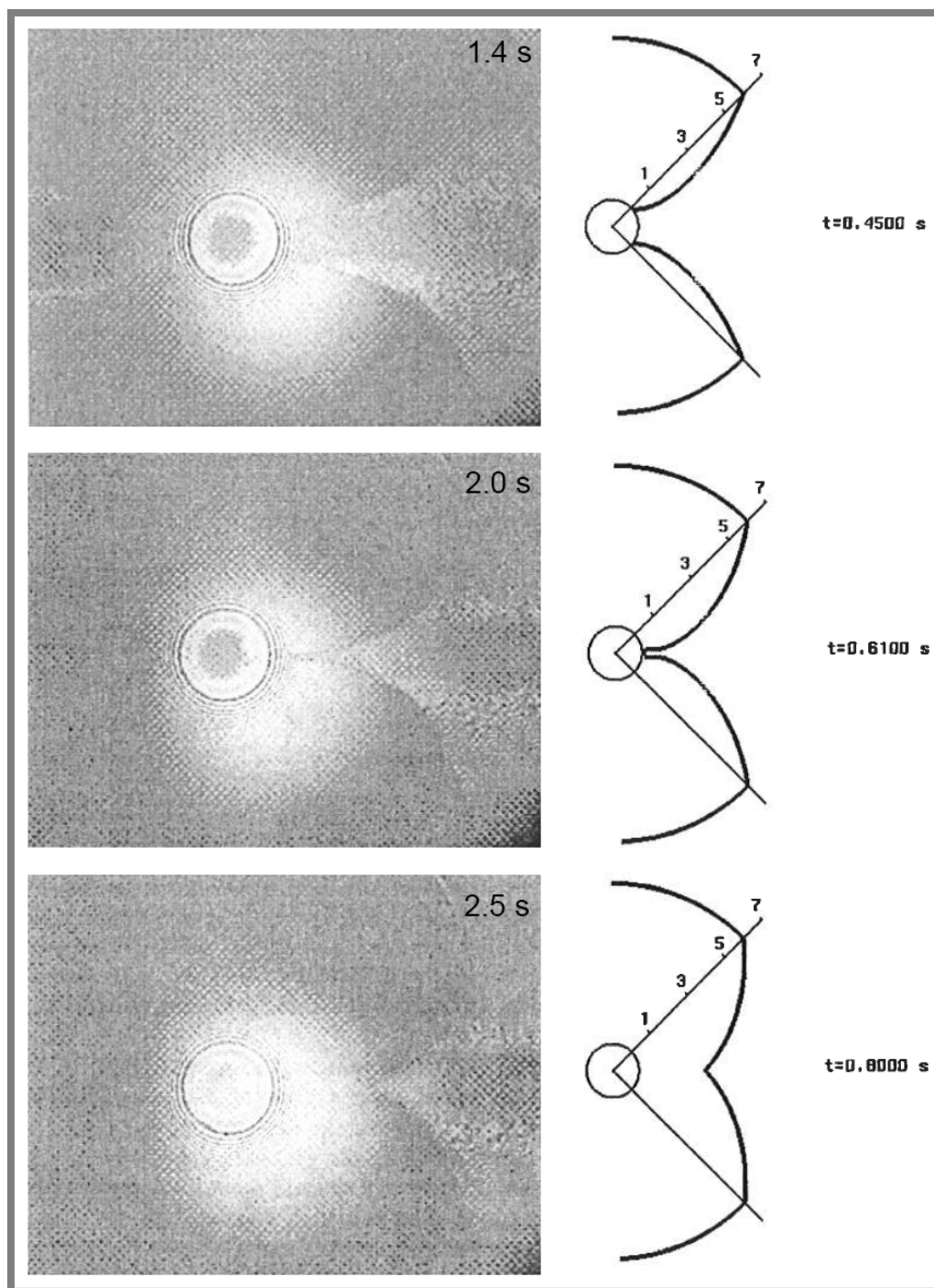


Obr. 2.24 Relativní vliv jednotlivých složek na mazací film (28)

Pokračování ve studiu vlivu Van der Waalsových sil publikoval Jacod a kol. [33]. Tato práce je pokračováním dřívějších prací autorů [9], [34]. Z jejich předchozích modelů lze usuzovat, že bez mechanismů doplňování maziva do kontaktu dojde po určitém čase nezbytně k selhání komponenty. Na rozdíl od předchozí práce [30] je zde zmíněno, že proces doplňování maziva ve volné mazací vrstvě je zanedbatelný pro režim závažného hladovění. Na Obr. 2.25 je demonstrován vliv Van der Waalsových sil na dvě různé tloušťky mazacího filmu. Je zde patrné, že zejména kolem $X = -1$ proběhlo jisté navýšení (vyšší pro $h_c = 5$). Autoři zmínili, že tento nárůst by byl pravděpodobně podstatnější pro ještě tenčí filmy ($h_c < 5$ nm), nicméně v takovém případě by již postrádal reálný význam.

Obr. 2.25 Vliv Van der Waalsových sil na vrstvu maziva v různém čase a pro různé počáteční vrstvy maziva (nalevo $h_c=10$ nm, napravo $h_c=5$ nm) (31)

Autoři se dále zabývali pohybem maziva v blízkosti kontaktu v důsledku působení lokálních kapilárních sil. Jako první byl sledován pohyb maziva v blízkosti statického kontaktu v krátké době (na Obr. 2.26 vlevo) po zastavení pohybu a byl vytvořen numerický model. Tento model byl poté rozšířen na pohybující se kontakt a byly dopočteny tvary hranice mezi mazivem a okolím (Obr. 2.26 vpravo). Existující model byl tedy obohacen o vliv kapilárních sil v blízkosti kontaktu, které dokáží podstatně změnit tok maziva a snížit závažnost hladovění.

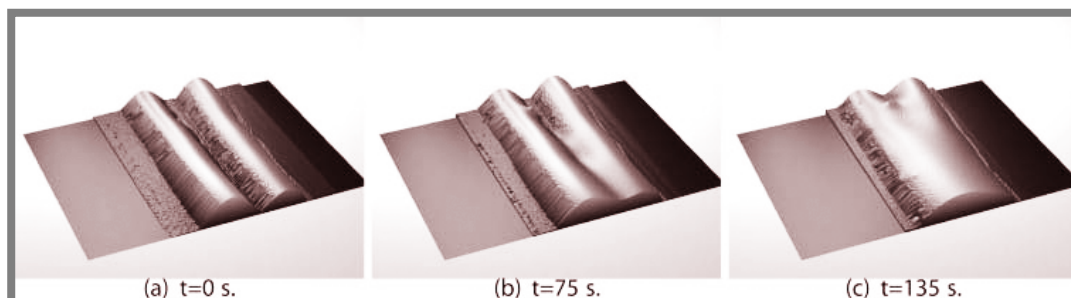


Obr. 2.26 Experimentálně získané tvary hranice mazivo/vzduch na výstupu kontaktu (nalevo) a numericky získané varianty (vpravo) [33]

Vliv doplňování maziva po výstupu z kontaktu zpět do valivé dráhy studoval jak teoreticky, tak numericky i Nogi [35], který použil Coyne-Elrodovu teorii pro definici polohy vstupního menisku na základě výstupního profilu doplněnou o doplňování maziva.

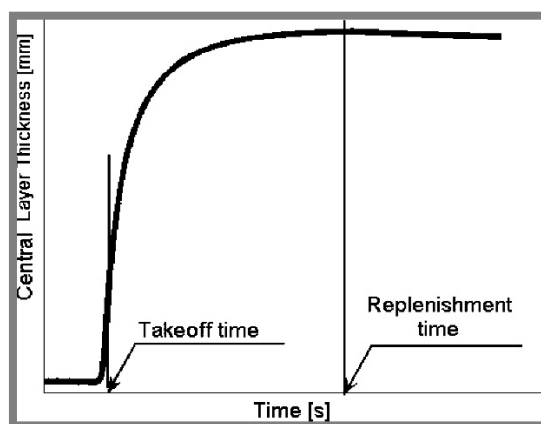
V předchozích modelech pro doplňování maziva nebyly uvažovány jakékoliv odstředivé či tíhové síly. Gershuni [36] doplnil model právě o

tento vliv, jelikož je zmiňován jako velmi podstatný pro reálné aplikace. V ložiskách pracujících při vyšších otáčkách může totiž docházet k velmi odlišným jevům právě v důsledku odstředivých sil.



Obr. 2.27 Měření dvou pásů maziva vytvořených po průchodu kontaktem pro tři různé časy [36]

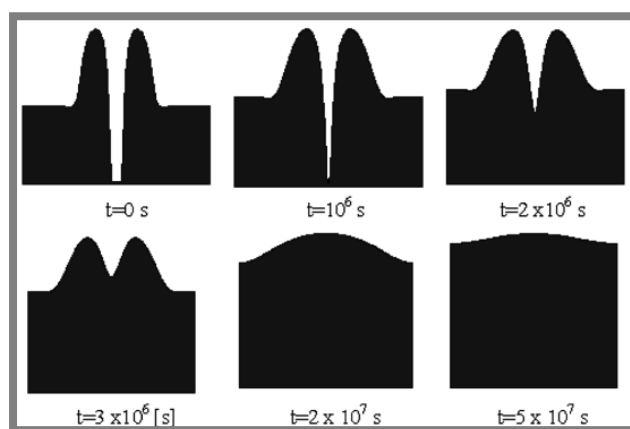
Na Obr. 2.28 lze vidět autory modelované extrémně nelineární chování vrstvy maziva v důsledku povrchového napětí. Toto chování bylo i ve třech časech ověřeno pomocí optického profilometru (Obr. 2.27). Tato nelinearita je dána sledováním pouze středového bodu ve vrstvě maziva ve valivé dráze. Zpočátku se totiž k sobě přibližují pásy maziva po stranách dráhy a zmenšuje se mezera mezi nimi. Centrální tloušťka se nemění, ale celkový profil v kontaktu ano. Po setkání pásů ve středu valivé dráhy dojde k prudkému nárůstu tloušťky následovaného pozvolným přibližováním se profilu k rovinnému tvaru.



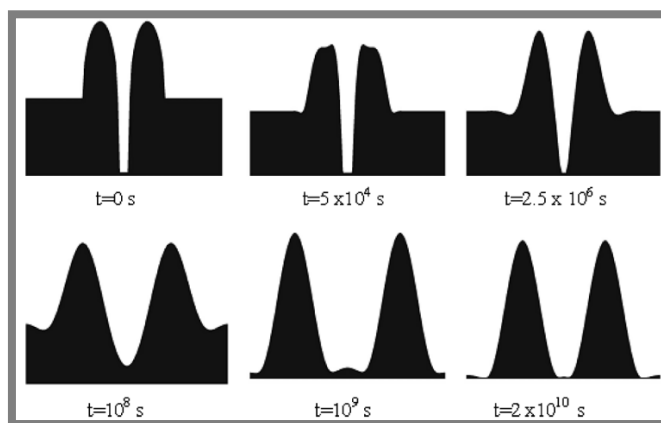
Obr. 2.28 Tloušťka mazací vrstvy uprostřed stopy jako funkce času [36]

Chování maziva na geometrii typické pro simulátor typu ball-on-disc je znázorněno na vypočtených profilech na Obr. 2.29. Zde je vidět zmíněnou nelineární změnu centrální tloušťky vrstvy maziva. Na Obr. 2.30 jde vidět doplnění výpočtu o zrychlení 1 m/s v normálovém směru vůči rozhraní maziva a podkladové vrstvy. Jde tedy o simulaci maziva na vnitřním kroužku ložiska. Zde je patrné, že i poměrně nízká odstředivá síla může způsobit negaci jevu povrchového napětí volné mazací vrstvy a tedy procesu doplňování maziva.

Autoři dále zmiňují, že vzhledem k vypočteným časům je jev zanedbatelný ve valivých ložiscích. Podstatný pro budoucí výzkum v této oblasti je tedy pohyb maziva v blízkosti kontaktu.



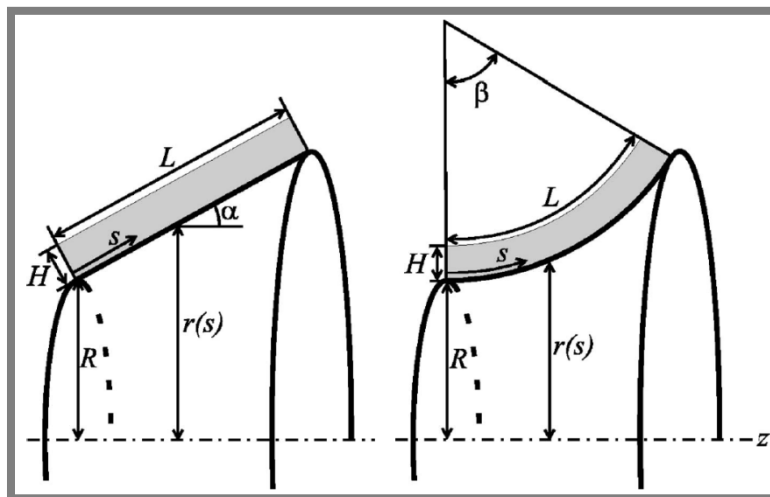
Obr. 2.29 Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor [36]



Obr. 2.30 Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor s přidaným zrychlením -1 m/s [36]

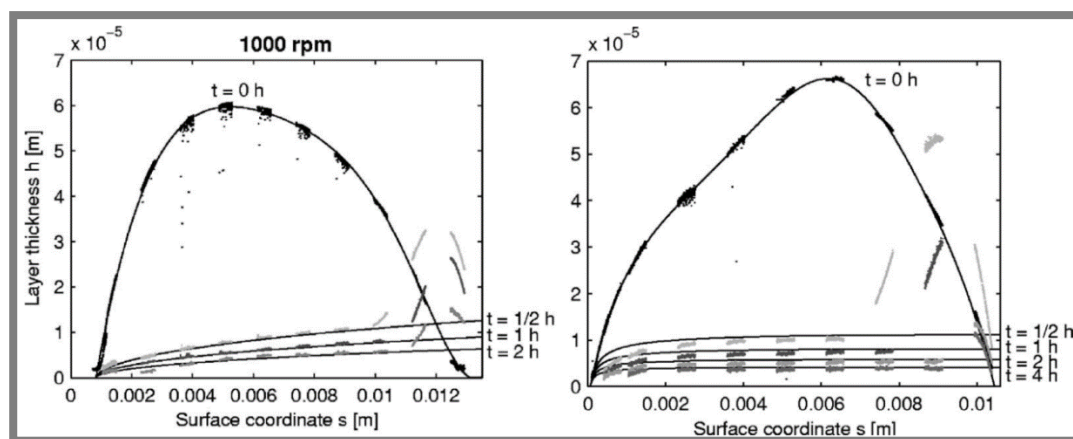
Tato práce se omezuje pouze na liniovou podkladovou geometrii a je tedy v praktických aplikacích využitelná pouze pro válečková ložiska. Obohacením modelu pro použití pro komplikovanější geometrii kontaktních

ploch kuželíkových a soudečkových ložisek se zabýval Zoelen [25], jehož hlavním cílem byla snaha o doplnění předchozích modelů o analýzu pohybu volné vrstvy maziva na povrchu kontaktních ploch ložisek (Obr. 2.31). Jejich geometrie totiž umožňuje pohyb maziva po volném povrchu vlivem odstředivých sil.



Obr. 2.31 Schéma geometrie zvažované v modelu (kuželíkové ložisko nalevo a kuličkové napravo) [25]

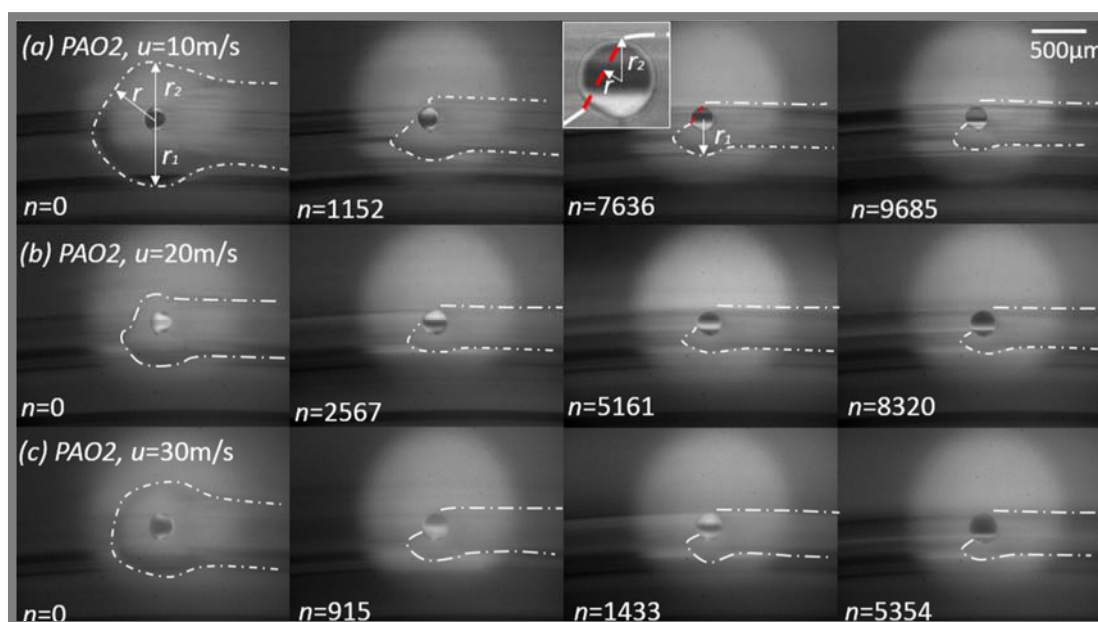
Na Obr. 2.32 lze pozorovat výsledky teoretické predikce (plnou čarou) a jejich verifikaci. Ta probíhala experimentálně za pomoci optického profilometru, jímž byly měřeny tloušťky mazací vrstvy pro 9 bodů napříč povrchem. Měření bodů zabralo asi 20 minut, nicméně byl údajně použit vysoce viskózní olej pro minimalizaci zkreslení v důsledku např. gravitace.



Obr. 2.32 Výsledky efektu odstředivé síly pro různé časy a pro 1000 ot/min. Kuželíkové ložisko nalevo a kuličkové napravo. Plnou čarou jsou znázorněny výsledky modelu. Data z optického profilometru jsou vyneseny přerušovanou čarou. [25]

Autoři uvedli, že časy mezi průchody valivých elementů jsou podstatně nižší než ty, které byly naměřeny, nicméně i tak můžou mít výsledky reálnou aplikaci. Například pro dlouhodobou migraci maziva v ložiscích a jeho shromažďování se v některých částech.

Pohybem maziva za vysokých rychlostí se zabýval i Liang a kol. [37], který experimentálně ověřil, že velmi vysoké odstředivé rychlosti jsou schopné negovat probíhající proces doplňování maziva zpět do valivé dráhy. Výsledné interferogramy z této studie jsou Obr. 2.33. Z obrázku lze vidět, že přiblížení menisku je mnohem rychlejší při vysokých rychlostech, což se připisuje odstředivým silám, které sice způsobují přísun maziva ze středu rotace (dolní strana interferogramů), nicméně současně způsobují hladovění horní části kontaktu tím, že zabraňují tečení maziva zpět do stopy.



Obr. 2.33 Snímky polohy menisku jako v závislosti na různých valivých rychlostech a počtech otáček disku. [37]

Chování maziva po výstupu z kontaktu

Velká část prací se zabývala studiem pohybu maziva v rovině kontaktu. To je celkem pochopitelné, jelikož právě v této rovině dochází k nejvýznamnějším dějům z hlediska utváření kontaktu a rovnováhy mezi hladověním a doplňováním maziva. Současně může být důvod většího množství publikací v této oblasti spojen s již relativně kvalitně vyvinutými a odzkoušenými modely či metodami pro experimentální studium (ball-on-disc aparatury, metoda optické interferometrie apod.). Neméně důležité děje se ovšem odehrávají i v rovině, která kontaktem také prochází, nicméně je kolmá na kontaktní oblast. Je to rovina, ve které lze pozorovat

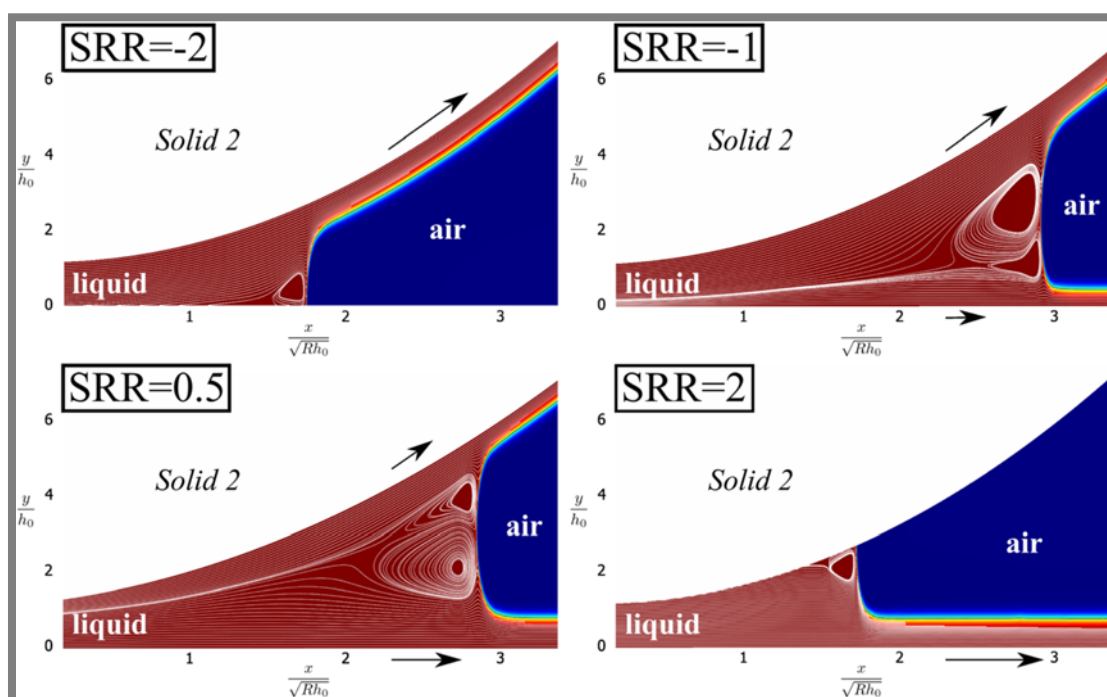
či definovat mechanismus formování vstupního menisku či poměr dělení maziva mezi dva kontaktní povrchy po průchodu kontaktem. Tento poměr totiž definuje množství maziva dostupného pro další kontakt v pořadí. Poslední zmíněná položka je pro potřeby této práce jedna z klíčových informací, z toho důvodu zde bude zmíněno několik prací, které se touto problematikou také zabývaly.

Oblasti, kde je kapalina dělena mezi dva povrchy, jsou v technické praxi jednoduše dohledatelné. Z průmyslových aplikací to může být například mazání, tvorba vrstev na površích, tisk, průmyslové malby apod [38]. Počáteční studie byly zaměřeny zejména na popis a pochopení kavitace v kluzných ložiscích [39]. Správný přístup k popisu tvorby tenkých filmů v kontextu tvorby vrstev pomocí válcování byl použit poprvé Ruschakem [40]. Jeho přístup je ovšem poměrně časově náročný a je odkázán na konkrétní geometrii. Současně ovšem může být použit na řešení formování jakéhokoliv tenkého filmu. Tato práce byla následována Taronim [41], který model rozšířil i pro konečný kontaktní úhel.

Tato problematika byla zkoumána i v oblasti tribologie, jelikož je možné dle mechanismu dělení maziva na výstupu počítat množství maziva dostupné dalšímu kontaktu, či tomu samému kontaktu po znovu-odvalení. Coyne a Elrod [42], [43] teoreticky popsali separaci mazacího filmu vytvářeného kontaktem mezi dvěma válci, přičemž jeden válec byl statický. Tato studie ovšem prokázala, že existující přístup není použitelný pro lehce zatížená kluzná ložiska. Okrajové podmínky definované Reynoldsem [44], Coynem a Elrodem [42], [43] a Hewsonem [45], [46] jsou pro takovéto aplikace vhodnější, jelikož poskytují přesnější výsledek. Studium těchto jevů pro velmi tenké filmy o rozměrech několika průměrů molekul maziva prezentoval Chong [47].

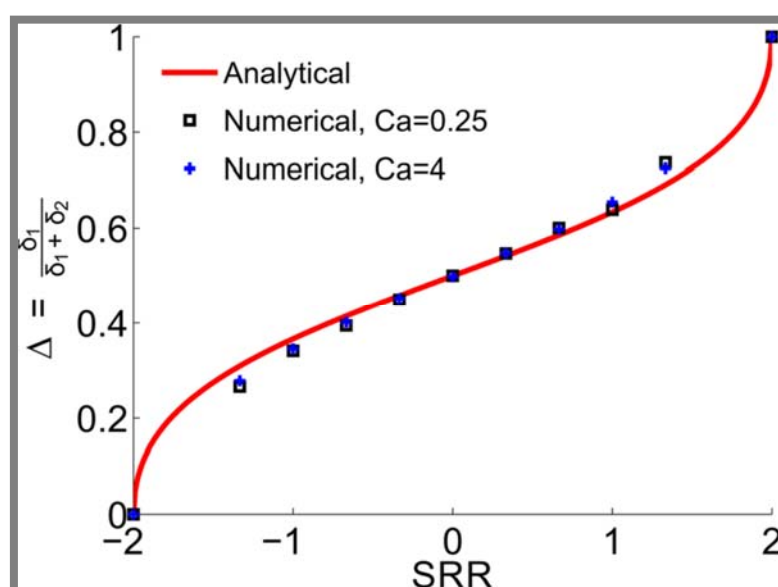
Jedna z posledních teoretických studií realizovaná Bruyerem [48] navíc zahrnuje i vliv skluzového poměru. V rámci této studie byl uvažován vliv skluzového poměru SRR na dělení maziva mezi dva povrchy opouštějící kontaktní oblast. V části numerického modelu byly prezentovány výsledky rozdělení maziva, které jsou vidět na Obr. 2.34. Pro extrémní hodnoty SRR -2 a 2 je jeden povrch statický, což znamená,

že veškeré mazivo procházející kontaktem je odnášeno druhým, pohybujícím se povrchem.



Obr. 2.34 Dělení maziva mezi povrchy v závislosti na SRR - numerický model [48]

Na základě numerického řešení autoři navrhli analytický vztah pro výpočet poměru dělení maziva na površích. Průběh poměru vypočtený na základě vztahu je uveden na Obr. 2.35.



Obr. 2.35 Analytický model pro výpočet poměru dělení maziva v závislosti na SRR [48]

Vztah, podle kterého byla data na Obr. 2.35 obdržena, je uveden níže (2.7). Z pohledu na vztah je patrný závěr, že poměr dělení maziva mezi dva povrchy je závislý jen a pouze na skluzovém poměru mezi povrchy.

$$\Delta = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{1}{2} + \frac{SRR \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{SRR}{2} \right)^2} \right)}{-SRR^2 + 8 \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{SRR}{2} \right)^2} \right)} \quad 2.7$$

- Δ – poměr tloušťek maziva na kontaktních površích po výstupu z kontaktu
 δ_1 – Tloušťka filmu na povrchu č. 1
 δ_2 – Tloušťka filmu na povrchu č. 2
 SRR – skluzově valivý poměr $(u_1 - u_2)/u_m$
 $u_{1,2}$ – rychlost pohybu kontaktních povrchů 1 a 2
 u_m – střední rychlost

3. ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Běžné dělení vědeckých prací na teoretické a experimentální v oblasti hladovějícího EHD kontaktu nelze plně aplikovat. Většina zmíněných prací je totiž teoretická se sporadickou experimentální validací. Jsou zmíněny i čistě teoretické či experimentální práce, nicméně těch je podstatně menší množství.

Z teoretických prací (či jejich částí) je zřejmé, že dnešní modely dokáží velmi přesně předpovědět tloušťku mazacího filmu [1], [9], [19] za různých podmínek, což bylo i prokázáno experimentálně. Poměrně neprobádaná je oblast reálných povrchů, které jsou zejména rizikové pro kolaps mazacího filmu v kombinaci s hladověním. Pokroky v této oblasti udělal Venner [11], [12], který rozšířil práci Chevaliera [9], [49]. Obecně v literatuře chybí práce zabývající se eliptickým kontaktem, což konstatoval i Lugt [10].

Hlavní problém v oblasti EHL hladovění je tloušťka vstupní vrstvy maziva [10]. Tento parametr totiž dokáže podstatně ovlivnit redukci tloušťky mazacího filmu zmenšením oblasti pro nárůst tlaku. Nejbližší práci na toto téma publikoval van Zoelen [26], nicméně tato práce by se dala zařadit spíše do teoretické oblasti. Ve své jiné práci [5] publikoval v kapitole trendů budoucího vývoje potřebu experimentů s vícenásobným kontaktem pro validaci již existujících modelů. Pokud chceme studovat vliv vstupní vrstvy maziva, je totiž typická konfigurace kulička-disk nepoužitelná. Než dojde k otočení o téměř jednu otáčku a znovu-odvalení valivého elementu, tak dojde k částečnému vtečení maziva zpět do valivé dráhy [36]. Je tedy nezbytné mít předchozí kontakt co nejbližší měřenému, aby bylo možné tyto vlivy kontrolovat či zanedbat.

Malá pozornost se doteď také věnovala problému pohybu maziva v kontaktu, jeho okolí, či přímo ve volné vrstvě mezi průchody valivého elementu. Tento jev má za následek změnu podmínek v kontaktu v závislosti na čase či počtech průchodů elementu [29], [36] a zejména pro reálné aplikace může způsobit významné odchylky od laboratorních měření.

V literatuře se někdy uvádí parametr h_{oil} jako množství (objem) maziva dávkovaného před kontakt a používá se jako objem maziva, které má kontakt k dispozici. Tento přístup není příliš přesný. Toto tvrzení lze vysvětlit jednoduchou úvahou: Při tloušťce mazacího filmu v kontaktu 500 nm, šířce kontaktu 300 μm a průměru disku zařízení typu ball-on-disc 120 mm, což jsou všechno průměrné parametry experimentu lze dopočítat hodnotu objemu maziva, které reálně prochází kontaktem na 0,057 μl . Sice je zde zanedbáno množství maziva, které ulpí na valivých elementech

a další ztráty, ale lze si udělat představu o minimálním množství maziva, které je teoreticky potřebné pro vytvoření EHD kontaktu a realizaci experimentu. V praktických aplikacích je zbylé množství maziva využito pro další účely, jako například odvod tepla, ochrana proti korozi či odvod abrazivních částic, nicméně zde se uvažuje čistě objem potřebný pro formování EHD mazaného kontaktu. Při využití h_{oil} , jako objemu maziva se pro podmínky hladovění používají objemy např. 20-50 μl , jak lze vidět např. v tomto článku [23] a na Obr. 2.13. Z tohoto důvodu je použití objemu maziva dávkovaného pro experiment na disk velmi nepřesné. Neexistuje totiž žádná kontrola, kolik maziva prochází tlakovou oblastí kontaktu a kolik kontakt pouze obtéká po stranách bez průchodu tlakovou oblastí. Mazivo, které kontakt obtéká po stranách je totiž pro potřeby kontaktu samotného téměř zbytečné. Z tohoto faktu vyplývá cíl disertační práce, jak je popsáno v další kapitole.

4. VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Základní podstatou disertační práce je experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem pomocí optické interferometrie. Vzhledem k rešeršní části je zřejmé, že v této oblasti je výrazná snaha o kvantifikaci úrovně hladovění. Parametr h_{oil} , označovaný jako tloušťka či množství maziva na vstupu kontaktu, může být jedním z možných a široce uplatnitelných způsobů. Studium vlivu tloušťky vrstvy maziva na vstupu kontaktu na tloušťku a distribuci mazacího filmu je tedy hlavním cílem.

Cílem této práce je tedy tento problém experimentálně popsat a prokázat závislost mezi úrovní hladovění a tloušťkou vrstvy maziva, která vstupuje do kontaktu, nikoliv pouze množstvím dávkovaného maziva. Tyto výsledky je dále možné porovnat s uvedenou teoretickou studií [9].

Část experimentální

- Modifikace experimentálního zařízení [50] nezbytné pro opakovatelnost měření.
- Návrh a výroba stírače maziva pro potřeby realizace experimentů.
- Úprava povrchu testovaných vzorků na požadovanou drsnost
- Stanovení závislosti mezi množstvím dodávaného maziva a stupněm hladovění.
- Studium vlivu vzájemné vzdálenosti kontaktů – efekt zpětného toku maziva do kontaktu.
- Zjištění poměru dělení maziva mezi dva povrchy na výstupu kontaktu. Zjištění vlivu skluzově-valivého poměru na tento parametr.
- Zjištění závislosti centrální tloušťky maziva a jeho distribuce na tloušťce maziva na vstupu kontaktu.

Část teoretická

- Zpracování výsledků
- Vyhodnocení experimentů a zobecnění parametrů do formy bezrozměrných veličin.
- Porovnání obecné závislosti s teoretickým modelem a učinění obecných závěrů a nových, obecně platných, pravidel.

4.1. Vědecká otázka:

Jaký je vliv tloušťky maziva na vstupu kontaktu (h_{oil}) na tloušťku (h_c) a rozložení mazacího filmu elastohydrodynamického kontaktu?

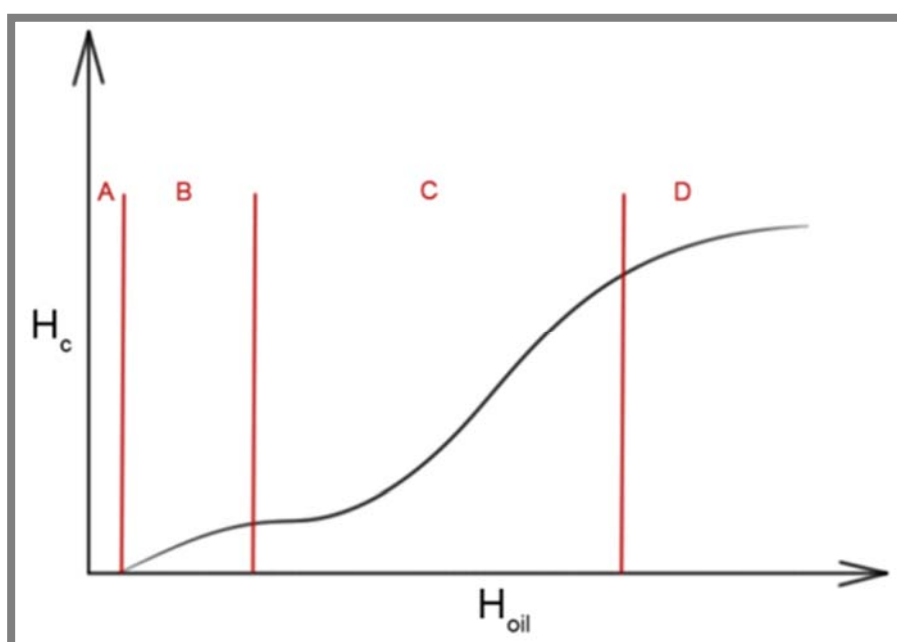
4.2. Pracovní hypotéza

Pracovní hypotéza se odvíjí od interpolace dvou základních poznatků:

- 1) Distribuce tloušťky mazacího filmu pro silně hladovějící kontakt se blíží tvaru známému pro profil Hertzova (suchého) kontaktu. Tyto podmínky často vedou ke smíšenému až meznému režimu. To platí pro $H_{oil} \ll H_{oilff}$ ($H_{oilff} - H_{oil}$ pro plně zaplavený kontakt).
- 2) Druhým poznatkem je fakt, že od jisté polohy vstupního menisku od Hertzovy oblasti (udává se zhruba trojnásobek průměru kontaktní oblasti) jím již není kontakt ovlivněn a pro další zvyšování H_{oil} se již kontakt chová podle vztahů platných pro plně zaplavený režim.

Z těchto předpokladů a z již provedených experimentů se dá odvodit chování závislosti H_c na H_{oil} (Obr. 4.1). Tato závislost by měla hypoteticky vykazovat následující oblasti:

- A) H_{oil} blízké nule (řádově jednotky nm) – suchý kontakt přecházející v mezné mazání. Tato oblast nevykazuje měřitelné hodnoty tloušťky. Mazivo je zachyceno mezi vrcholky povrchových nerovností.
- B) Oblast mezného mazání, která přechází s dalším zvyšováním H_{oil} do oblasti smíšeného a hladovějícího EHL mazání.
- C) Oblast hladovějícího kontaktu. Na začátku této oblasti je Hertzova oblast prolomena. Do kontaktu vstupuje směs maziva a okolní atmosféry. Při postupném zvyšování H_{oil} se závažnost hladovění snižuje a objevuje se viditelný vstupní meniskus vstupující do kontaktní oblasti.
- D) Zde již je meniskus pozorován ve větší vzdálenosti od kontaktní oblasti (typicky větší než trojnásobek průměru kontaktní oblasti). To je již vzdálenost, kdy se může režim mazání považovat za plně zaplavený. V jistém okamžiku již tloušťka filmu nebude narůstat, nezávisle na tom, o kolik se bude zvyšovat hodnota H_{oil} .



Obr. 4.1 Pracovní hypotéza

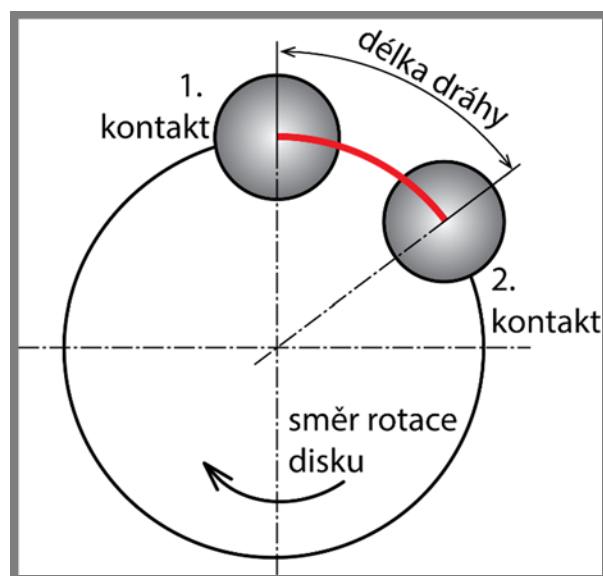
5. MATERIÁLY A METODY

5.1 Experimentální část

Tato část je rozdělena na několik podkapitol, podle hlavního cíle. První část obsahuje teoretický popis principu měření, popis experimentální aparatury a modifikace, které bylo nutno vytvořit pro úspěšné řešení vytyčeného problému. Dále je popsána část přípravy a měření vzorků použitých pro měření, včetně jejich vlastností. Poslední částí jsou metody použité pro vyhodnocování měření.

5.1.1. Teoretický popis principu měření

Základní koncept tribologického simulátoru byl inspirován situací, která nastává v reálných valivých ložiscích. Například u mazaného kuličkového ložiska, kdy první kulička ve směru pohybu vytvoří stopu, tím, že vytlačí mazivo k okrajům valivé dráhy, ve které se pak pohybují všechny následující kuličky, a těm se již nedostává tolik maziva, kolik měla k dispozici první kulička. Zkušební zařízení bylo tudíž navrženo ve stejném schématu – zařazení dvou valivých elementů do stejné valivé trajektorie. Skica tohoto konceptu je na Obr. 5.1.

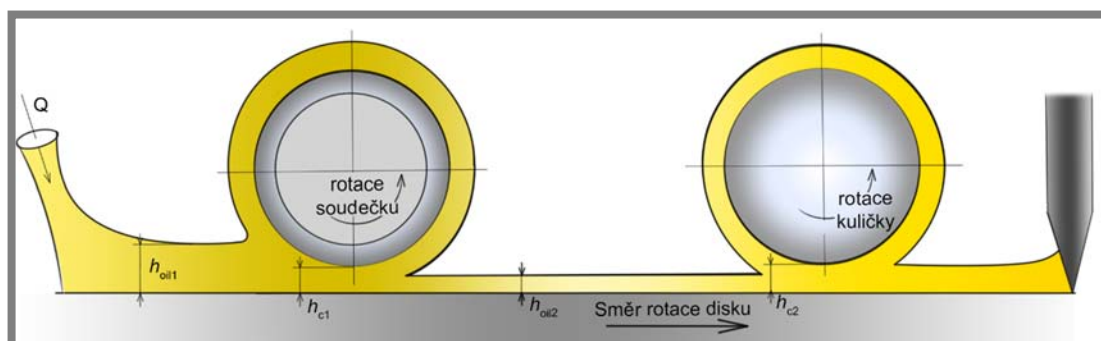


Obr. 5.1 Koncept zkušebního zařízení

Princip měření spočívá v zařazení dvou valivých elementů do jedné valivé dráhy a současně v možnosti vyhodnotit tloušťku mazacího filmu u obou kontaktů v rychlém sledu. První valivý element slouží pouze jako nástroj k vytvoření vrstvy maziva. Druhý valivý element již vykazuje tloušťku mazacího filmu náležící podmínkám, kdy vstupuje vrstva maziva o tloušťce odpovídající tloušťce vrstvy vytvořené předchozím elementem. Metoda je názorně zobrazena na Obr. 5.2. Jako první valivý element může být

použita kulička či soudeček o různé elipticitě. Přesto, že je na obrázku pro jednoduchost použita koule, soudeček poskytuje lepší výsledky a to z praktického důvodu, že vytváří širší stopu, než koule a lze zanedbat drobná házení produkovaná výrobními nepřesnostmi. Sesadit dvě koule o stejném průměru kontaktní oblasti do jedné stopy by z důvodu házení bylo téměř nemožné. Druhý valivý element je již koule, která je měřena a vyhodnocována. Na Obr. 5.2 lze vidět dva valivé elementy.

Šipka Q na levé straně obrázku interpretuje dodávku nového maziva. Mazivo je po průchodu oběma kontakty stíráno z valivé dráhy pryč. To se provádí zejména za účelem dodržení stabilních podmínek, které by nebylo možné zaručit při použití konstantního množství maziva nadávkováného jen před měřením. Při takové situaci dojde k postupnému vytlačení maziva z valivé dráhy do stran a nevyhnutelnému zhoršení úrovně hladovění. Takovýto koncept by postrádal požadavek na ustálené podmínky. Ty jsou nezbytné, jelikož se neměří oba kontakty současně, ale sousledně. Při jakékoliv změně podmínek v době mezi měřeními prvního a druhého kontaktu je tudíž celé měření znehodnoceno a nelze jej použít. Takový stav se zjistí pomocí postupu měření. Pro každé podmínky je měření realizováno ve sledu soudeček-koule-soudeček-koule a je vyhodnocena odchylka dvou měření stejného elementu. Pokud je příliš rozdílná, hodnota není použita a měření je opakováno.



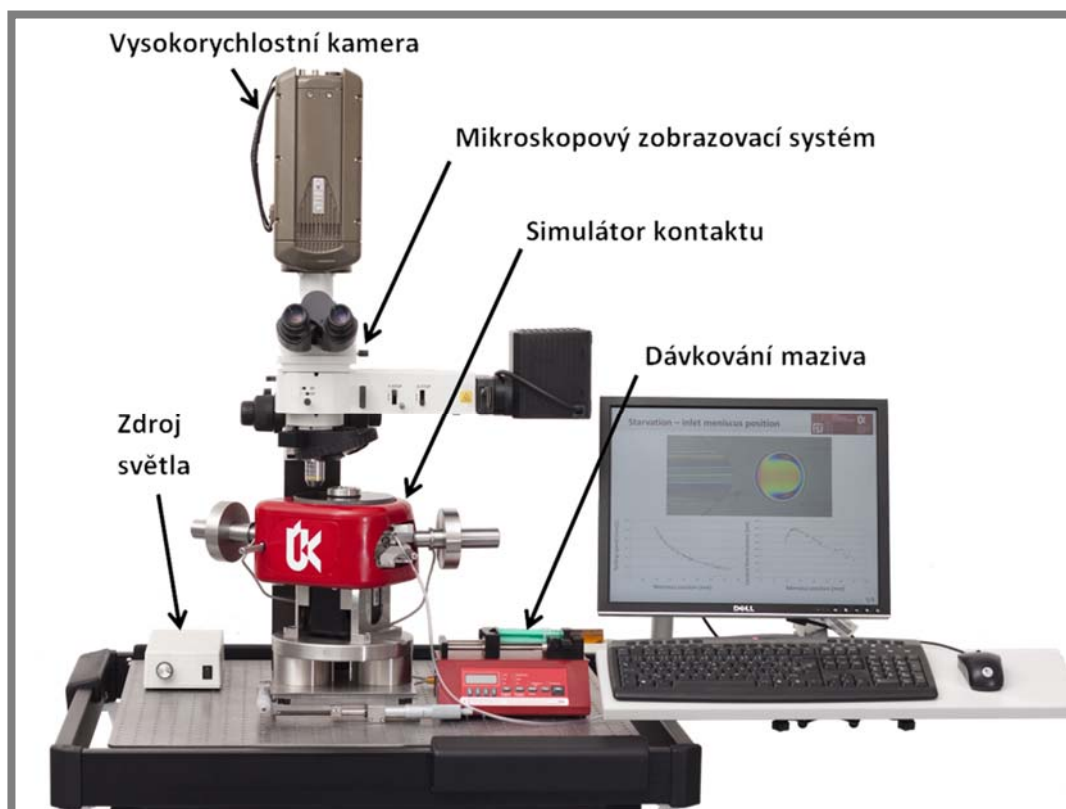
Obr. 5.2 Popis metody

Tloušťka mazacího filmu na vstupu kontaktu h_{oil} se z hlediska tohoto konceptu získá jako polovina centrální tloušťky prvního kontaktu h_{c1} a polovina tloušťky z druhého kontaktu h_{c2} . Sečtením těchto dvou tloušťek obdržíme tloušťku maziva v blízkosti vstupu do kontaktu, označovanou jako h_{oil} (uvedeno v rov. 5.1).

$$h_{oil} = \frac{h_{c1}}{2} + \frac{h_{c2}}{2} \quad 5.1$$

5.1.2. Popis experimentální aparatury

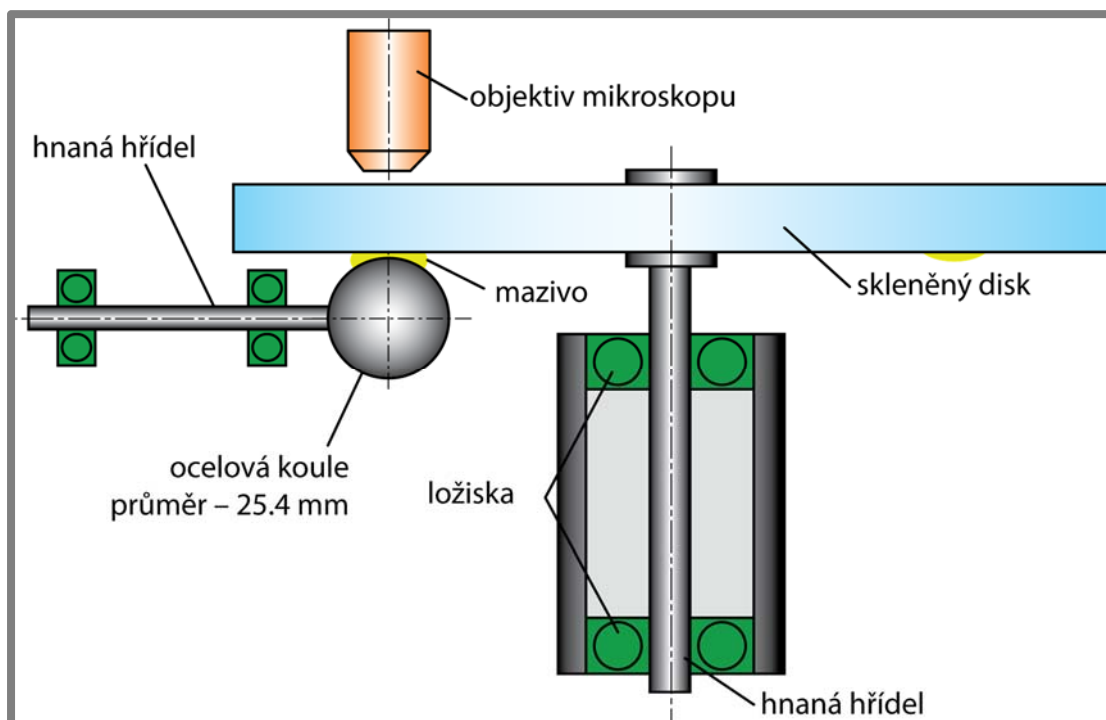
Metoda optické interferometrie a fluorescence, které jsou použity pro vyhodnocení, jsou popsány dále v kapitolách 5.1.5 a 5.1.6, stejně jako použitý mikroskop a kamery. V této kapitole bude dále rozebrána pouze mechanická část experimentální aparatury. Tu lze vidět na Obr. 5.3, kde je skryta pod červeným krytem (popisek simulátor kontaktu).



Obr. 5.3 Celkový pohled na simulátor

Simulátor s jedním kontaktem

Použitá měřící aparatura se zakládá na principu zařízení typu „ball-on-disc“, který byl poprvé navržen Goharem [51]. Jedná se o simulátor tribologického kontaktu, kdy se koule odvaluje po spodní straně skleněného disku, přes který se pozoruje kontaktní oblast a vyhodnocuje pomocí metody optické interferometrie či fluorescence. Tento přístup byl poprvé použit Kirkem [52] a Cameronem [53]. Schéma základní verze zařízení lze vidět na Obr. 5.4. V základní verzi simulátoru mohou být jak koule, tak i disk poháněny nezávisle, čímž je možné dosáhnout různých poměrů rychlostí a tudíž podmínek skluзу. Zatěžování se provádí přes pákový mechanismus. Modifikace tohoto konceptu s jedním elementem je popsána v kapitole 6.4

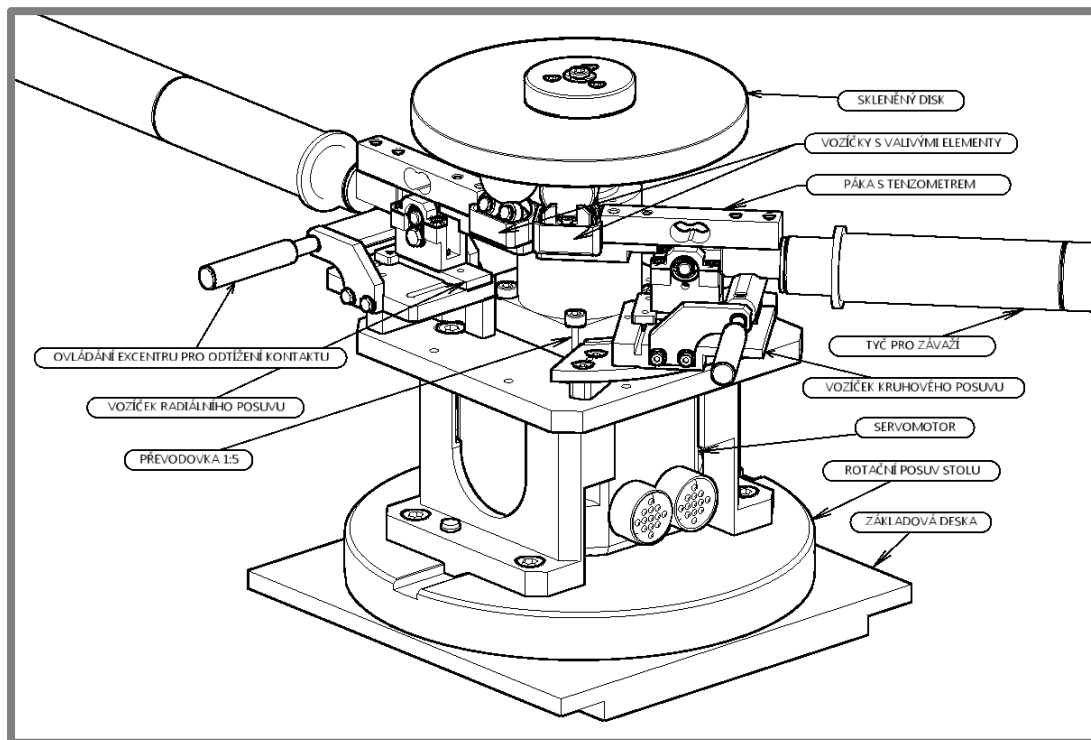


Obr. 5.4 Schéma standartního zařízení typu ball-on-disc

Simulátor s dvěma kontakty

V této práci byla nejvíce používaná odlišná aparatura, která je modifikací zmíněného zařízení typu ball-on-disc. Byla ovšem navržena pro specifické potřeby výzkumu tématu této práce a poprvé již byla využita v diplomové práci autora [50] a byla popsána v samostatném článku [54].

Hlavním rozdílem je použití dvou valivých elementů tak, jak je ilustrováno na Obr. 5.1. Skicu celého zařízení lze vidět na Obr. 5.5. Základními částmi jsou opět skleněný disk a dvě páky, které přitlačují valivé elementy a tím vytváří kontaktní oblasti. V této variantě zařízení je poháněn pouze disk a zařízení tak pracuje pouze v režimu čistého valení. Valivé elementy jsou poháněny pouze trakční silou skrz mazací film elastohydrodynamického kontaktu. Výjimkou je použití popsané v kapitole 6.5.3 kde je použita varianta s prvním elementem hnaným elektromotorem pro dosažení vyšší tloušťky maziva. Zatížení valivých elementů je měřeno pomocí snímačů síly, které jsou umístěny přímo na obou pákách. Celé zařízení je umístěno na stole, který umožňuje polohování ve dvou osách ve vodorovné rovině a dále rotaci celého zařízení kolem osy rotace disku. Tím je umožněno střídavé pozorování obou kontaktů pomocí jednoho mikroskopu.



Obr. 5.5 Skica experimentálního zařízení [50]

5.1.3. Modifikace aparatury

V rámci diplomové práce autora [50], ve které je zařízení popsáno detailněji, je uvedena kapitola trendů budoucího vývoje. V této kapitole jsou uvedeny i některé nedostatky experimentální aparatury, které byly zjištěny při zkušebních měřeních a v rámci diplomové práce už nebyly řešeny. Jejich seznam je níže přímo citován z práce a ke každému bodu je dále uvedeno, jak byl vyřešen.

- Během měření by bylo vhodnější mít možnost plynulého dávkování maziva do kontaktu, například pomocí automatické pipety a jeho následné odstraňování mechanickým způsobem.
- V nízkých rychlostech nebylo naopak možno měřit prakticky vůbec, jelikož motor vykazoval i s převodovkou značně nepravidelný chod. Řešením by bylo použít převodovku s větším převodovým poměrem.
- Hlavní změna konstrukce by ovšem měla spočívat v úpravě nastavení radiálního posuvu celé páky. Stávající nastavování je nepřesné a již drobné přesazení elementů způsobí výraznou odchylku v měření.

Ad a)

Konstantní dávkování je parametr, který je nezbytný pro udržení ustálených podmínek v době, mezi měřeními prvního a druhého kontaktu. Při předchozí variantě, tzn. nanesení přesného objemu maziva před začátkem experimentu a využívání tohoto objemu po celou dobu

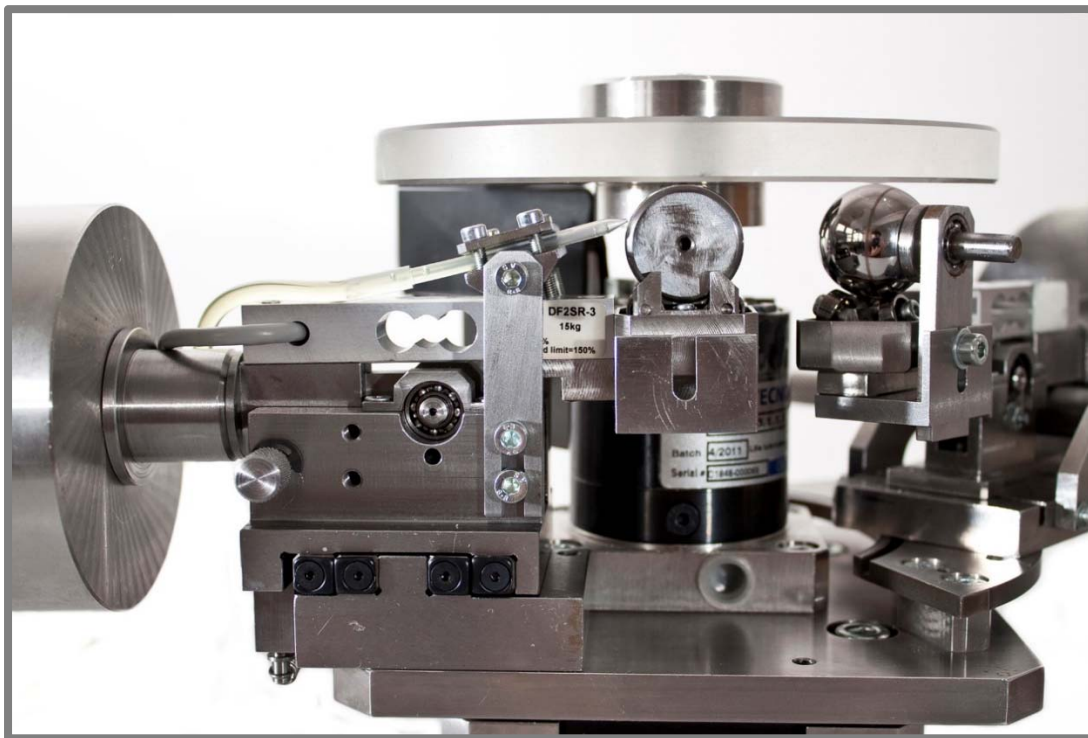
experimentu, produkovalo několik nevýhod. U maziv může dojít k degradaci po průchodu kontaktem. Tato degradace má za následek postupné snižování viskozity maziva a tím ovlivnění tloušťky mazacího filmu. Dále dochází k mechanickému vytlačování maziva do stran valivé dráhy, což způsobuje zvýšení úrovně hladovění během průběhu experimentu. V neposlední řadě je malý objem maziva náchylný na zvýšení teploty. Pro představu byl při měření v rámci diplomové práce použit objem 28 μl . Takto malý objem maziva se poměrně jednoduše dokáže při opakovaném průchodu kontaktem zahřát a zvýšená teplota způsobí pokles viskozity, čímž opět dochází ke změně tloušťky mazacího filmu.

Z výše uvedených důvodu byla využita pro dávkování maziva automatická pumpa (Syringe pump NE-1000), která je vidět na Obr. 5.6. Do této pumpy lze umístit běžnou laboratorní stříkačku, která poté dávkuje mazivo pomocí silikonové hadice a trysky přímo před kontakt.



Obr. 5.6 Syringe pump NE-1000 použitá pro dávkování maziva

Pumpa dokáže dávkovat mazivo rychlostí od 0,73 $\mu\text{l}/\text{hod}$ po 1,275 l/hod. [55]. Dávkování je navíc dostatečně plynulé pro zajištění konstantních podmínek. Pumpa posouvá injekční stříkačku, která vytlačuje mazivo přes hadici do trysky. Pomocí trysky je mazivo dávkováno přímo k povrchu valivého elementu na straně vstupu do kontaktu. Mechanismus k uchycení trysky včetně trysky je vidět na Obr. 5.7 a je součástí modifikace, která byla učiněna pro potřeby této disertační práce.



Obr. 5.7 Tryska pro dávkování maziva

Stírač maziva

Při prvních experimentech se ukázalo, že nové mazivo se po dodávce do kontaktu a průchodu kontaktem hromadí na kontaktních površích a jeho kumulace je stejně problematická, jako jeho nedostatek. Z toho důvodu bylo přistoupeno k tvorbě mechanismu, který odstraní nepotřebné mazivo z povrchu disku a odvede jej do rezervoáru. Na toto téma byla vypsána bakalářská práce [56] a autor této práce byl jejím vedoucím. Stírač byl konstruován tak, aby se při rotaci zařízení pod mikroskopem mohl pohybovat s celým zařízením a nelimitoval tak tuto funkci. Proto bylo jako místo umístění zvoleno volné místo na základní desce experimentálního zařízení. Výsledné umístění lze vidět na Obr. 5.8, kde je barevně zvýrazněna celá konstrukce stírače.

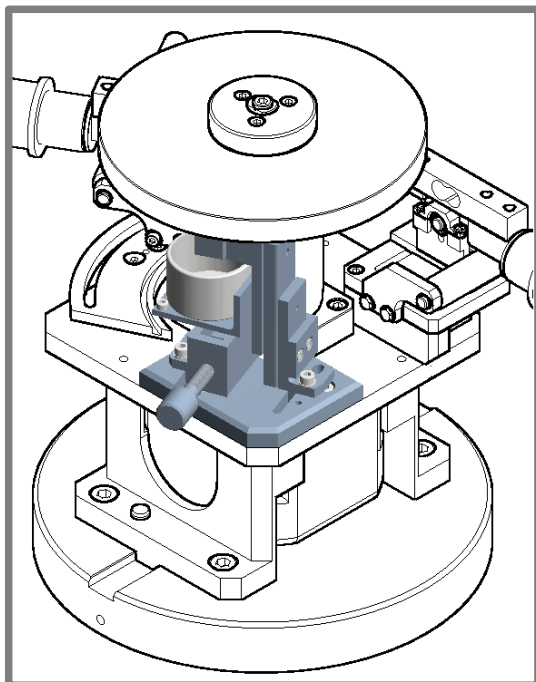
Konstrukci lze rozdělit na stírač samotný, podpůrnou konstrukci s přitlakem a místo pro shromažďování maziva:

Stírač je vytvořen ze silikonu (červená součást na Obr. 5.9), který byl na základě rešerše vybrán jako materiál, který nezpůsobí poškození disku a současně jsou jeho vlastnosti dostatečné pro setření požadovaného množství maziva, se kterým přijde do kontaktu. Je upnut pomocí několika stavěcích šroubů, které umožní i jeho případnou deformaci do tvaru V a možnost směřování maziva do valivé dráhy, či mimo ni.

Stírač je umístěn na lineárním vedení, které je pomocí pružiny přitlačováno směrem vzhůru vůči disku. Tento mechanismus zajistí rovnoměrné stírání maziva po celém obvodu disku i při házení disku ve

svislé ose. Mazivo je po odstranění z disku zachytáváno do laboratorní misky, která se umístí na držák pod stírač, jak je vidět na Obr. 5.8.

Předpětí pružiny a tím i přitlačení stírače lze regulovat pomocí klínového převodu a vodorovného šroubu. Díky tomuto mechanismu se očekává, že by bylo možné využít stírač pro nanesení předpověditelné vrstvy maziva podle teorie soft-EHD. Geometrie kontaktní plochy stírače by ovšem musela být mnohem přesnější. Nyní nemá dostatečně rovný povrch. Tato možnost je ponechána jako možnost budoucího vývoje.



Obr. 5.8 Stírač maziva [56]



Obr. 5.9 Konstrukce stírače [56]

Ad b)

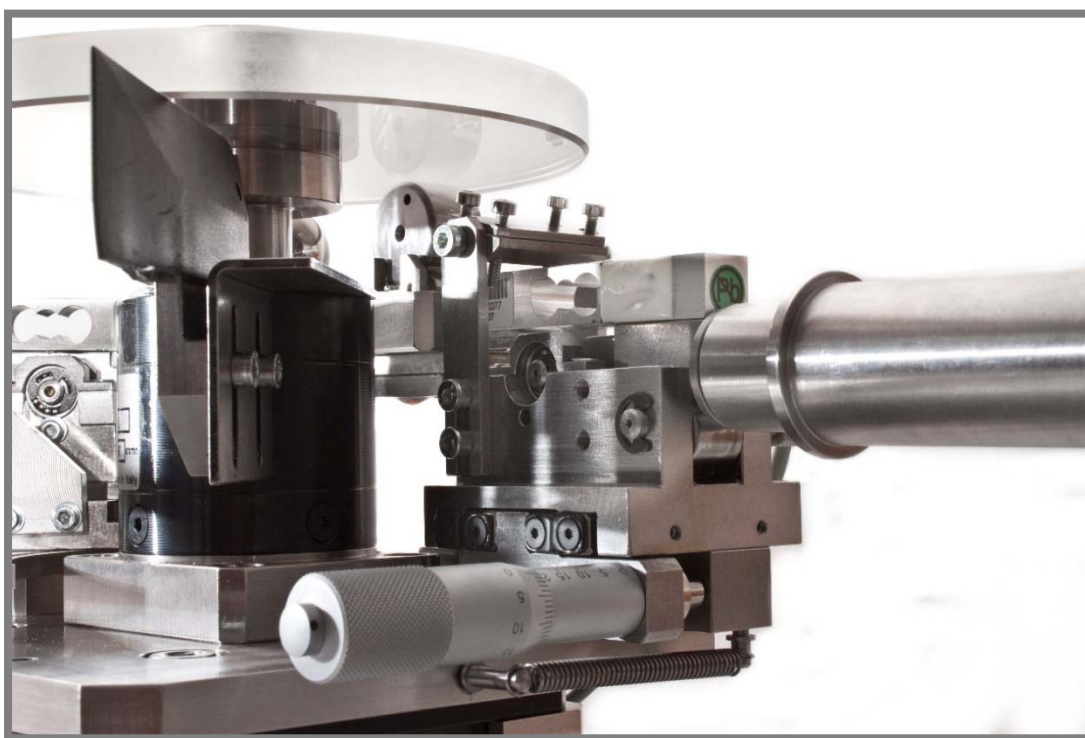
Jak již bylo navrženo v diplomové práci, došlo ke změně převodovky za obdobnou s vyšším převodovým poměrem. Původní převodový poměr 5 byl nahrazen za 12 a 36. Jsou tedy k dispozici dvě další převodovky. Výměna mezi těmito dvěma typy zabere pouze několik minut. Původní převodovka s převodovým poměrem 5 má ovšem méně převodových stupňů a díky tomu je nižší. Kvůli tomu bylo nutno zvýšit i základny pro páky. Výměna za tento kus je díky tomu již zdoluhavější. Výsledná maximální valivá rychlost se snížila z původních 4,4 m/s na 1,85 m/s při převodovém poměru 12 a na 0,62 m/s při převodovém poměru 36. Výsledná maximální rychlost je tedy samozřejmě nižší, ale chod v nízkých otáčkách je mnohem stabilnější.

Ad c)

Hlavním problém v této oblasti byla nemožnost přesného nastavení obou kontaktů do jedné valivé dráhy. Průměr kruhového kontaktu může při

běžných experimentálních podmínkách dosahovat hodnot kolem $200\mu\text{m}$. Původní varianta obsahovala možnost nastavení každé páky zvlášť a jejich aretaci pomocí šroubů. Tato varianta se v praxi příliš neosvědčila. I po velmi přesném nastavení do jedné dráhy, které ještě realizovatelné je, bohužel následuje aretace páky pomocí šroubů, které způsobí drobný posuv celé páky do strany. Tento posuv je ovšem vzhledem k průměru kontaktů příliš veliký a dojde k vzájemnému posuvu kontaktů a tím jejich přesazení.

Jako ideální varianta se jeví použít nastavování polohy pomocí mikrometru bez následné aretace v poloze pro měření. Tato varianta byla zkonstruována a vyrobena a je zobrazena na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Radiální posuv páky

Princip nastavení funguje na rovnováze dvou prvků. Mikrometr posouvá celou páku na dvojici lineárních vedení směrem od osy rotace disku. V protějším směru celou páku posouvá zpět tažná vinutá pružina. Celý systém je díky samosvornosti mikrometru v rovnováze, dokud nedojde ke změně polohy mikrometrem. Jelikož má pružina dostatečnou tuhost, není třeba páku nijak aretovat. Dvojice lineárních vedení pak zajišťuje přesné vedení s minimálními vůlemi v ostatních osách, kromě směru posuvu.

Další výhodou tohoto konceptu je možnost upravovat vzájemnou polohu valivých elementů během experimentu, tedy již za chodu zařízení. Celé zarovnání dvou elementů do valivé dráhy je pak jen otázkou

sledování jednoho kontaktu mikroskopem a otáčení mikrometrem, dokud nedojde k zarovnání. Další výhodou tohoto konceptu je možnost využití stupnice mikrometru pro odečtení přesného poloměru valení elementu na disku. Jelikož je hnaný pouze disk, tak je tento parametr nezbytný pro výpočet rychlosti valení (u). Ta se pro aktuální konfiguraci zařízení vypočítá z otáček motoru (n_d), hodnoty vzdálenosti na mikrometru (hm) a převodového poměru použité převodovky (i) dle vztahu. 5.2.

$$v = \pi \cdot 2 \cdot (0,071 - hm) \cdot \frac{n_D}{i} \quad 5.2$$

5.1.4. Experimentální materiál

V této podkapitole budou popsány vlastnosti těles a maziva, které se podílí na tvorbě elastohydrodynamického kontaktu. Celkem byly pro experimenty použity dva různé typy disků: kovový a skleněný; dva typy valivých elementů: koule a soudečky o různých poloměrech a několik typů olejů.

Disk

Pro experimenty s využitím optické interferometrie byl využit skleněný disk z materiálu BK7 s opticky hladkými povrchy o průměru 150 mm a tloušťce 12,6 mm. Povrch disku lze pro potřeby měření považovat za opticky hladký. Jeho drsnost je mnohem nižší, než drsnost používaných valivých těles. Disk je na straně kontaktu opatřen 10 nm tenkou polo-odrazivou vrstvou chromu. Na straně k objektivu je na disk nanесena antireflexní vrstva. Účel vrstev je podrobněji vysvětlen v kapitole 5.1.5.

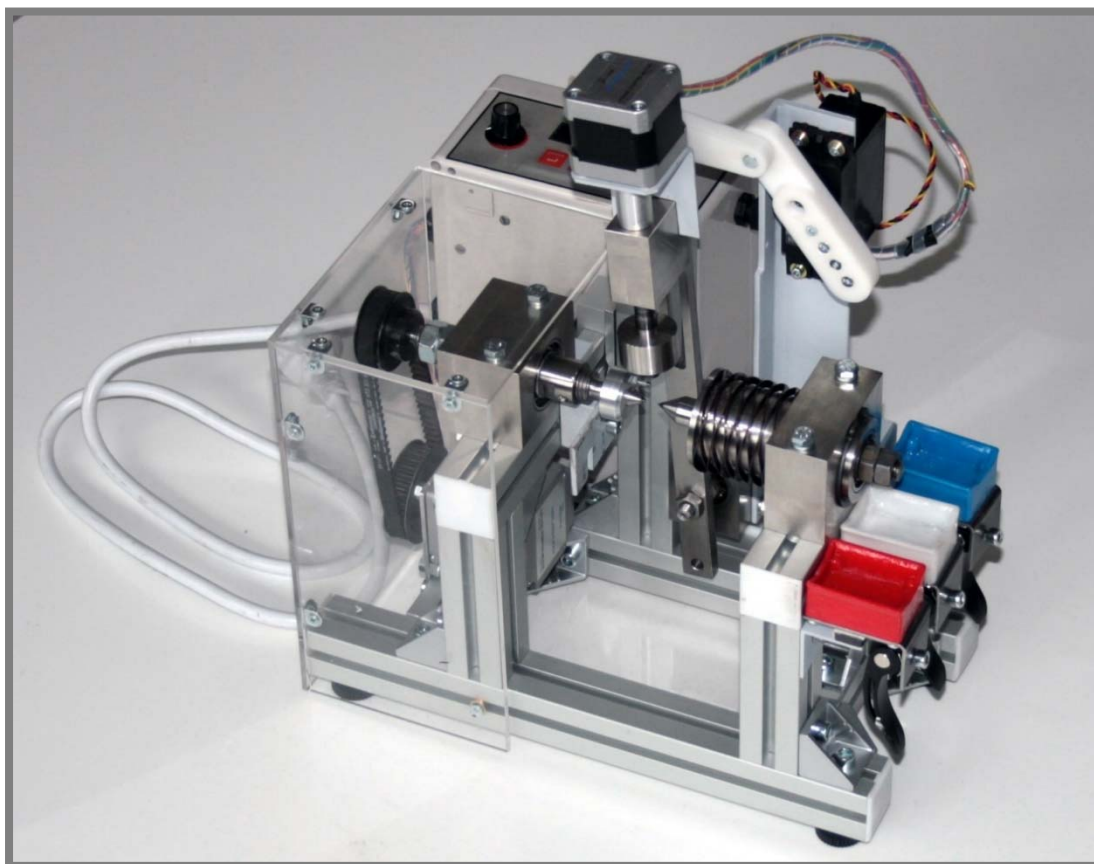
Koule

Ocelové koule používané pro měření mají jednotný průměr 1" (25,4 mm) a jsou vyrobeny z ložiskové oceli 100Cr6 (AISI 52100). Jejich drsnost povrchu (R_a) je již po dodání výrobcem na velmi kvalitní úrovni, obvykle pouze lehce přesahující 10 nm. Pro potřeby měření je ještě upravena pomocí ručního leštění diamantovými pastami různých zrnitostí na hodnotu asi 5 nm. Hodnoty drsností povrchů kontaktních těles se zjišťují na komerčním optickém profilometru Bruker Contour GT-X8, který pracuje na principu optické interferometrie a má rozlišitelnost ve svislé ose 0,01 nm, což je více než dostačující přesnost pro potřeby této aplikace.

Soudeček

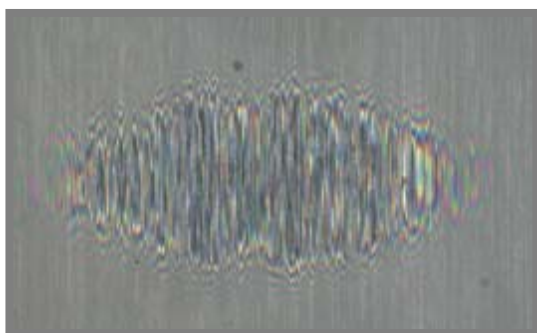
U těchto valivých elementů je dosažení potřebné jakosti povrchu, srovnatelné s povrchem koulí, složitější. U koulí je stejná křivost ve všech směrech na povrchu, takže lze využít jednoduché leštění mezi dvěma, vzájemně se pohybujícími plochami. To pro soudečky bohužel použít nelze, jelikož je křivost v různých směrech na povrchu různá. Současně s tím je jakost povrchu elementů dodávaných výrobcem mnohem nižší, než je tomu u koulí. Výrobce používá pouze broušení, které je schopno dosáhnout drsnosti kolem $R_a = 200 \text{ nm}$.

Během práce se vyskytl problém s dosažením potřebné jakosti povrchu soudečků a neschopnosti dodavatelů dosáhnout lepších hodnot. Pro potřeby měření je nezbytné mít drsnost povrchu pod úrovní 10-20 nm. Současně s tímto parametrem bylo nicméně zapotřebí sledovat i parametr vlnitosti základního profilu (W_a). Ukázalo se totiž, že i soudečky s dodanou vysokou drsností lze doleštit stejným způsobem, jako je tomu u koulí, tzn. pomocí diamantových past. Vzhledem k vyššímu množství odebíraného materiálu ovšem dojde nerovnoměrným leštěním (nástroj nemá definovanou geometrii) k poškození geometrie povrchu a vznikne nevhodně velká vlnitost povrchu i přesto, že drsnost je přijatelná.

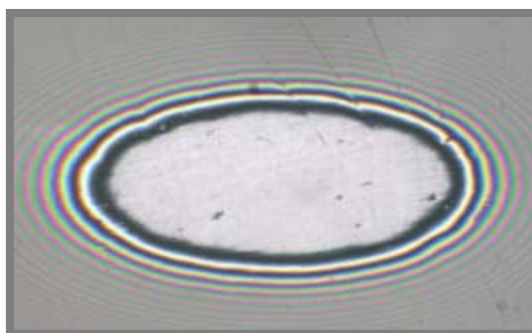


Obr. 5.11 Lapovací zařízení pro soudečky

Za účelem dosažení požadované jakosti soudečků bylo navrženo a sestaveno zařízení, které je schopno dosáhnout požadovaných jakosti parametrů povrchu. Toto téma bylo řešeno jako diplomová práce [57]. Vedoucím diplomové práce byl autor této disertační práce. Hlavním cílem práce bylo navrhnout a sestavit zařízení, které dokáže snížit drsnost a vlnitost povrchu broušených soudečků na úroveň, jaká je běžná u používaných koulí. Cílová drsnost je stanovena na základě parametrů, které jsou nezbytné pro bezproblémové vytvoření kalibrace pomocí optické interferometrie (podrobněji bude vysvětleno v kapitole 5.1.5. Orientačně se jedná o hodnoty pod 20 nm u obou parametrů (R_a a W_a). Zařízení je zobrazeno na Obr. 5.11. Skládá se ze základního rámu, tří motorů, upínacího systému pro soudeček, nástroje a nádob pro brousící kapaliny. Jeden motor otáčí soudečkem, který má osu rotace vodorovnou. Další dva motory pohánají nástroj. Jeden z nich je použit pro otáčivý pohyb nástroje, další pro jeho naklápění podle geometrie soudečku. Jako abrazivní kapalina je používána diamantová suspenze o několika zrnitostech (1; 3; 9 μm).



Obr. 5.12 Kontakt neobrobeného soudečku s diskem [57]



Obr. 5.13 Kontakt obrobeného soudečku s diskem [57]

Výslednou jakost povrchu, kterou je schopno zařízením docílit lze vidět na Obr. 5.13. Původní struktura je zobrazena na Obr. 5.12. Je poměrně zřetelné, že je zde mnohem homogennější centrální kontaktní oblast, což byl hlavní cíl.

Maziva:

Z důvodů transparentních vlastností byly využívány pouze základové oleje bez aditiv. Aditiva totiž mohou být ve formě relativně velikých částic, které poté mohou ovlivňovat chování kontaktu. Tento vliv by nebyl žádoucí, tudíž se používají pouze čisté minerální či syntetické základové oleje. Pro potřeby pozorování EHD kontaktu pomocí optické interferometrie nejsou kladeny speciální požadavky na transparentnost či barvu oleje. Vzhledem k měřeným tloušťkám je téměř každý olej průhledný a byl vybírán pouze na základě dynamické viskozity. Obecně lze říci, že

byly využity spíše maziva s vyšší viskozitou. Ta byla volena s ohledem na výslednou tloušťku podle parametrů experimentální aparatury. Maziva s nízkou viskozitou by totiž pro generování požadovaných tloušťek v měřitelném rozsahu metody vyžadovala vyšší otáčky, než je zařízení schopno poskytnout.

Tab. 5.1 Vlastnosti použitých maziv

Mazivo	η při 22 °C [Pa·s]	Index lomu [-]	Povrchové napětí [Nmm ⁻¹]
R834/80	0,200	1,498	6,6
R533/73	0,640	1,505	41,6
R560/88	1,400	1,496	28,5
SN650	0,450	1,488	31
Spectrasyn 6	0,053	1,457	-

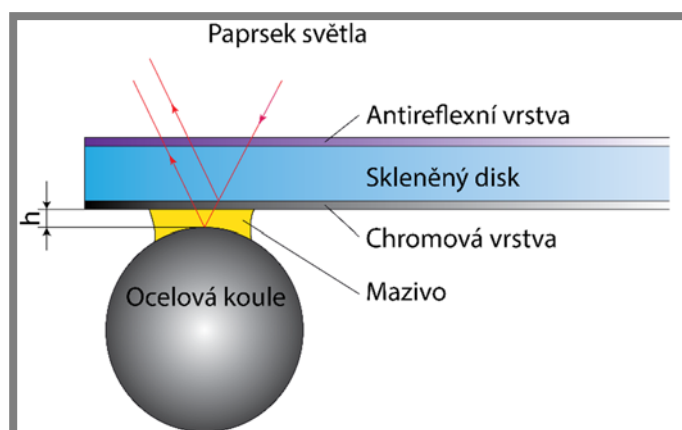
Parametry použitých maziv jsou uvedeny v Tab. 5.1. Maziva jsou uvedena pod názvy, pod kterými je uvádí dodavatelská společnost Paramo.

Optická část

Na Obr. 5.3 lze vidět kompletně zobrazené experimentální zařízení. Pro pozorování kontaktu tvořeného simulátorem je použit průmyslový mikroskop Nikon. Jedná se o episkopický mikroskop s planárními objektivy typu bright-field. Běžně se využívá zvětšení 5x; 10x; a 20x. Dále se konkrétní konfigurace liší podle použité metody. Z toho důvodu budou další podrobnosti uvedeny až v následujících podkapitolách 5.1.5 a 5.1.6.

5.1.5. Metoda měření - Optická interferometrie

Při použití optické interferometrie se využívá skleněného disku a ocelové odrazivé koule (Obr. 5.14). K osvětlení se v tomto případě využívá bílé světlo (halogenová žárovka). Jelikož se používá široké spektrum vlnových délek světla, jedná se o interferenci světla s nízkou koherencí.



Obr. 5.14 Princip interferometrie

Při osvětlení se paprsek dopadající na tenkou chromovou vrstvu na spodní straně disku dělí na dvě části. První část se odráží od chromové vrstvy a vrací se do objektivu. Druhá část paprsku pokračuje skrze vrstvu chromu a maziva k povrchu koule. Od tohoto povrchu se odrazí část zbylého světla a to se opět vrací k objektivu. Každý ze dvou svazků světla urazil jinou optickou vzdálenost a došlo k posuvu jeho fáze. Tento posuv se ve výsledném obrazu projeví interferencí, neboli změnou intenzity a barvy světla a po kalibraci lze konkrétní barvě přiřadit tloušťku vrstvy maziva. Více detailní popis metody lze najít např. zde: [58] [59].

Výsledný obraz je zachycen CCD digitální kamerou (Allied Vision – Manta G146C – viz. [60]). V případě potřeby vysokorychlostního záznamu se využívá kombinace 1kW xenonové výbojky a vysokorychlostní CMOS kamery (Vision research Phantom v710 – viz. [61]).

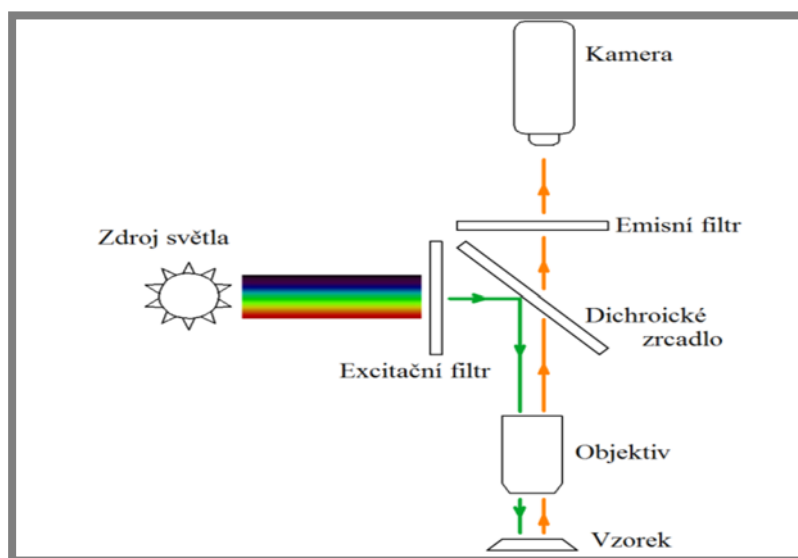
Po zachycení jsou interferogramy zpracovány v softwaru Achilles, ve kterém je metoda implementována, následujícím způsobem. Získaný obraz je převeden do barevného prostoru CIELAB. V tomto systému jsou pomocí diferenční formule kvantitativně porovnány barvy mezi vyhodnocovaným interferogramem a etalonem. Etalon je získán z monochromatického a chromatického interferogramu zaplaveného statického kontaktu. Monochromatický interferogram slouží pro definování geometrie, ke které se přiřadí paleta barev získaná statistickým zpracováním chromatického interferogramu. Rozlišitelnost kolorimetrické interferometrie je 1 nm [59].

5.1.6. Metoda měření – Fluorescence

Pro některé aplikace, uvedené později, je metoda optické interferometrie nevhodná z důvodu absence odrazivého povrchu pod mazacím filmem. V takovém případě byla využita metoda fluorescenční mikroskopie. Tato metoda patří také do skupiny optických metod, stejně jako optická interferometrie, nicméně pracuje na jiném principu. Simulátor kontaktu se při využití této metody ovšem využívá téměř stejný, jako je tomu u

metody optické interferometrie. Pokud se používá skleněný disk, nemá na površích vytvořeny vrstvy, jelikož je v tomto případě interference nežádoucí.

Metoda fluorescenční mikroskopie byla pro výzkum v oblasti tribologie využita poprvé v 70. letech 20. století např. v těchto pracích: [62], [63]. V uvedených studiích se jednalo spíše o snahu popsat metodu samotnou, její přesnost, kalibrace apod. Další, pro kvantitativní posouzení výsledků klíčové, studie se zaměřují na ověření lineární závislosti mezi intenzitou emitovaného záření a tloušťkou maziva, což bylo prokázáno a publikováno v těchto článcích: [64], [65]. Využitím této metody v oblasti výzkumu EHD mazání se zabývali například na Imperial College [66]. Následující popis metody a ilustrace jsou vyjmuty z práce Nečase. [67].

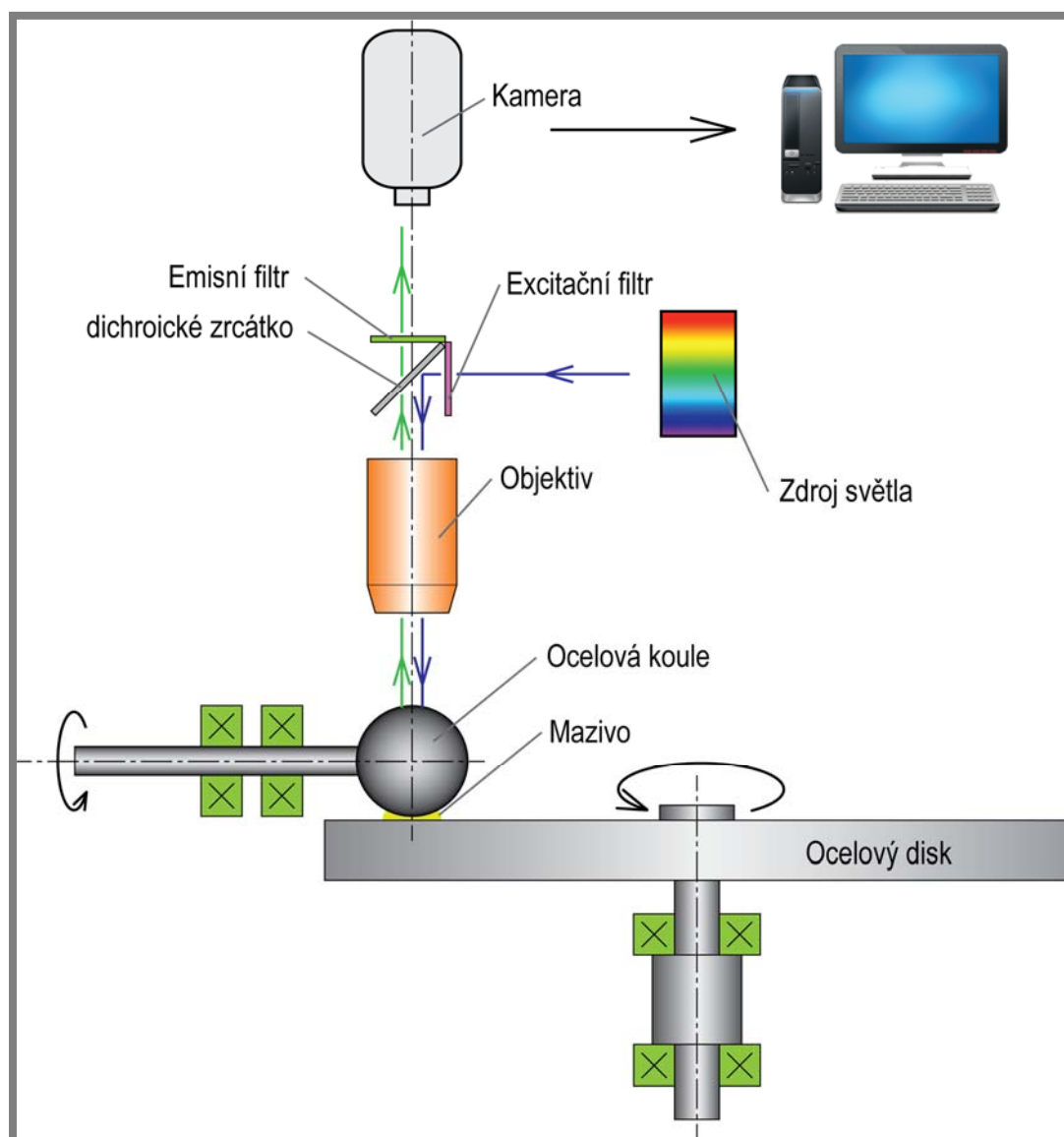


Obr. 5.15 Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie [67]

Proces fluorescenčního měření lze rozdělit do tří fází:

- Excitace - foton, který je excitován žhavicí lampou nebo laserem, je absorbován fluorescenčním barvivem, nastává fáze rozrušeného pohybu molekuly.
- Fáze rozrušeného pohybu – molekula setrvává v tomto stavu přibližně 1 až 10 ns, během této doby podstupuje excitované barvivo určitou formu relaxace (dochází k disipaci energie), následně může fluorescenční barvivo emitovat záření.
- Emise – vzhledem k disipaci energie během fáze rozrušeného pohybu má foton vyzařovaný barvivem nižší energii, tedy větší vlnovou délku. Tento rozdíl v hodnotách vlnových délek je známý jako Stokesův posun, který je z hlediska možné separace excitace a emise naprosto zásadní (umožňuje definovat výtěžek fluorescence).

Pro měření samotné je nezbytné snímat kamerou pouze emisi světla mazivem či barvivem. K oddělení dvou složek světla (emisní a excitační) slouží filtry. Jejich řazení lze vidět na Obr. 5.15. Celé schéma měřicího řetězce, včetně simulátoru kontaktu, lze vidět na Obr. 5.16. Na tomto obrázku je vyobrazena konfigurace aparatury s kombinací ocelové koule a ocelového disku pro měření použité v kapitole 6.4.



Obr. 5.16 Schéma měřicí aparatury [68]

Pro záznam měření se využívá vysokorychlostní monochromatická sCMOS kamera Andor Neo 5.5 schopná zachytit snímky v 16 bitové hloubce. Podrobnější specifikaci lze najít zde: [69].

Nejdůležitější výhodou a důvodem aplikace této metody oproti interferometrii je to, že metoda využívá snímání intenzity světla vyzařovaného mazivem a není nutno zajistit odraz od rozhraní. To je dokonce nežádoucí.

5.1.7. Měření vlastností maziv

Viskozita maziv byla experimentálně zjištěna na profesionálním rotačním reometru Haake RotoVisco 1 pro rozsah teplot 20 - 40°C a byla vždy využívána konkrétní viskozita pro teplotu, při které byl realizován experiment. Ve většině případů to bylo 22 °C a výsledné viskozity pro používaná maziva jsou uvedeny v Tab. 5.1. Index lomu byl pro každé mazivo zjištěn na komerčním refraktometru Carl Zeiss.



Obr. 5.17 Měření povrchového napětí

Povrchové napětí bylo experimentálně odměřeno pomocí účelově sestavené aparatury, která jde vidět na Obr. 5.17, založené na vlastnosti kapaliny vzlínat tenkou kapilárou. Po zachycení snímku kamerou Manta kolmo k ose kapiláry pak byl odměřen úhel u kraje kapiláry a výška elevace. Ukázkový snímek, použitý pro měření lze vidět na Obr. 5.18. Z těchto hodnot a známé hustoty maziva pak bylo dopočítáno povrchové napětí dle vztahu 5.3.

$$\sigma = \frac{h \cdot \rho \cdot r \cdot g}{2 \cdot \cos \theta} \quad 5.3$$

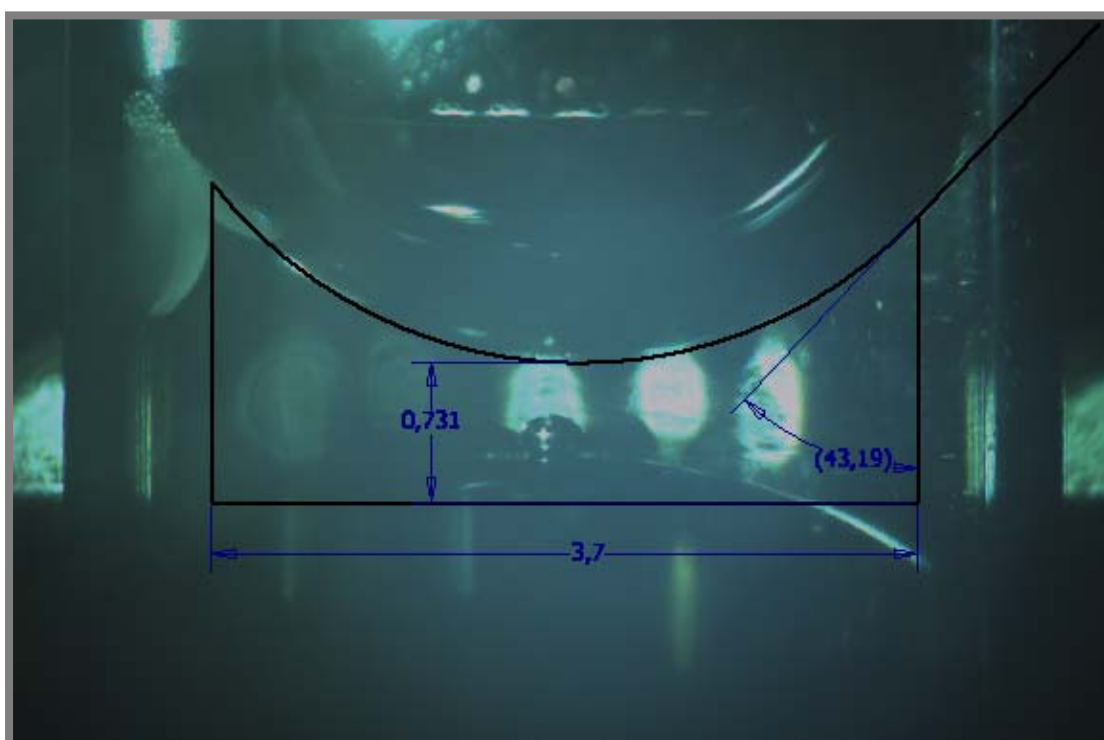
h - výška elevace kapaliny v kapiláře

ρ - hustota kapaliny

r - průměr kapiláry

g - tíhové zrychlení

θ - úhel smáčení stěny kapiláry



Obr. 5.18 Ukázka měření povrchového napětí

Ověřovací měření bylo provedeno pro Aceton, jelikož je to kapalina s běžně dostupnou informací o velikosti povrchového napětí o hodnotě 23,3 N/mm. Při experimentu na této aparatuře došlo k vypočtení hodnoty 22,48 N/mm, což bylo vzhledem k provizornosti aparatury považováno za vynikající shodu.

5.2. Teoretická část

Do této části spadá zejména predikce vhodných experimentálních podmínek pro realizaci experimentů a statistické zpracování výsledků po jejich realizaci. Jelikož je ovšem tato práce založena na principu empirické evidence, je očekávatelné, že bude obsah teoretické části minoritní vůči experimentální části.

5.2.1. Predikce parametrů experimentu

Predikce kontaktních parametrů byla tvořena zejména z důvodu možnosti aplikace metody optické interferometrie. Tato metoda má měřitelný rozsah 0-800nm. Veškeré experimenty bylo tudíž nutné realizovat v tomto rozsahu. Pro predikci výsledné centrální a minimální tloušťky byly nejčastěji využity vztahy publikované Hamrockem a Dowsonem [7]. Tyto vztahy byly vybrány, jelikož jsou v publikacích nejrozšířenější a poskytují přijatelnou shodu mezi experimentem a predikcí.

V případě porovnávání tloušťky hladovějícího filmu s plně zaplavenou variantou bylo ve většině případů využito reálně naměřených hodnot pro plně zaplavený film. V některých případech ovšem byla využita predikce podle Hamrock-Dowsona. V takovém případě je to explicitně uvedeno.

5.2.2. Zpracování výsledků

Pro zpracování výsledků se využívá v jednodušším případě pouze průměrování více hodnot či v případě většího počtu výsledků regresní analýza. Každé měření bylo opakováno a následně vyhodnocena odchylka dvou měření. V případě uspokojivé shody byl použit průměr z obou hodnot. V případě neshody bylo měření zopakováno a chyba popsána či zdůvodněna. Analýza vlivu chyb byla realizována pomocí výpočtu směrodatné odchylky datových hodnot.

5.2.3. Porovnání s teorií

Výsledky zmíněného modelu jsou na Obr. 2.9. Data v tomto grafu pochází z numerického modelu, tudíž nebude reálné experimentálně pokrýt její nejvyšší hodnoty. Logické omezení například vyplývá z neschopnosti vytvořit tlustší vrstvu maziva, než kterou disponuje plně zaplavený kontakt ($H_c/H_{c\text{ff}} \leq 1$). I přesto by měl být patrný trend dat.

5.2.4. Analýza možností vzniku chyb

Na závěr, v rámci diskuze, jsou uvedena kritická místa, kde se dá očekávat vznik nejvýznamnějších chyb v měření či vyhodnocení. Chyby jsou zde zdůvodněny a kvantifikovány.

6. VÝSLEDKY A DISKUZE

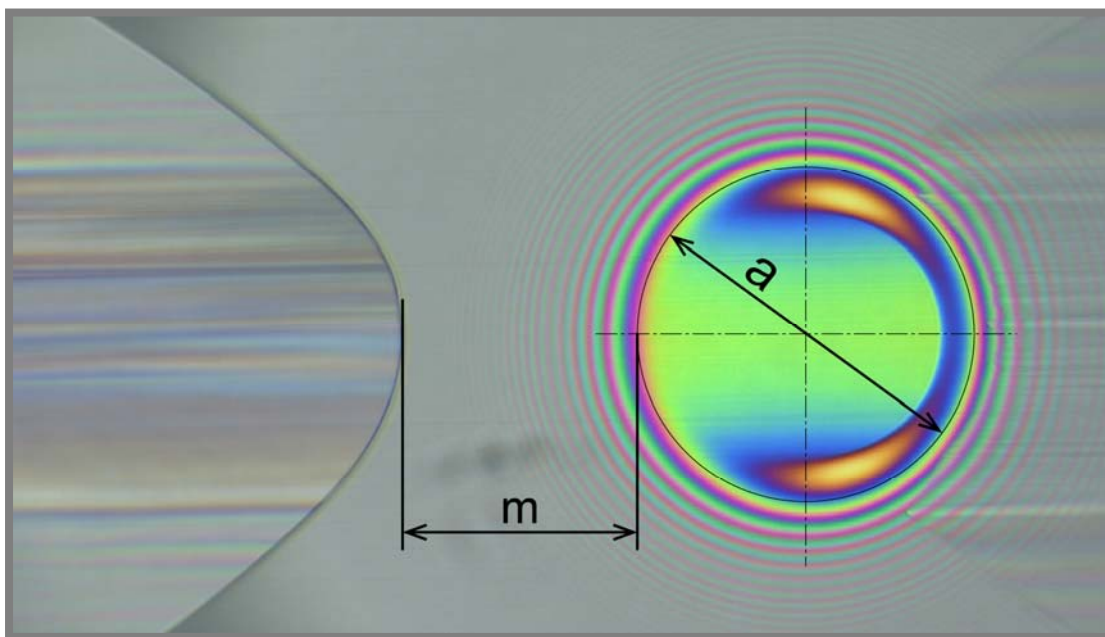
Výsledky uvedené v této kapitole jsou rozděleny do několika podkapitol. První by se daly označit za ověřovací, jelikož objasňují některé jevy, které doprovázejí hlavní měření. Tyto výsledky již byly publikovány v podobě samostatných článků a příspěvků na konferencích a jsou uvedeny v kapitolách 6.3 a 6.4. Následují výsledky, na jejichž základě je možné popsat hlavní cíle disertační práce a porovnat je s teorií. Ty jsou uvedeny zejména v kapitolách 6.5 a 6.6.

6.1. Kvantifikace hladovění

Jelikož se tato práce zabývá zejména popisem a kvantifikací úrovně hladovění kontaktu, je vhodné zde uvést přístupy, jak lze popsat míru hladovění. V literatuře lze dohledat dva nejpoužívanější přístupy. První je měření polohy vstupního menisku.

6.1.2. Poloha menisku

Vstupní meniskus je hranice, za kterou již směrem od kontaktu není jen mazivo, ale také okolní atmosféra, která není schopna díky řádově vyšší stlačitelnosti poskytnout možný nárůst tlaku, jako je tomu v případě maziva, takže dochází k produkci nižšího kontaktního tlaku a tím k poklesu centrální tloušťky mazacího filmu. Polohu menisku v těchto situacích tedy lze využít jako parametr, který popisuje úroveň hladovění. Čím blíže je ke kontaktní oblasti, tím je hladovění závažnější. Vstupní meniskus je možné vidět na Obr. 6.3 jako ilustraci. Vyhodnocení vzdálenosti z měření je prováděno dle Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Měření polohy vstupního menisku

Poloha menisku vynesená v závislost na tloušťce maziva či valivé rychlosti ještě moc neříká o úrovni hladovění. Pro zobecnění výsledků se používá převedení vzdálenosti menisku od kontaktní oblasti na podíl mezi jeho polohou a průměrem kontaktní oblasti (m/a). Existují sice empiricky zjištěné hodnoty tohoto poměru, ale ty se značně liší. V literatuře lze většinou dohledat hodnoty od 0.5 do 3 násobku.

Obecně lze říci, že poloha menisku je parametr, který je velmi citlivý na úroveň hladovění, současně ovšem není schopen pokrýt celou řadu provozních podmínek. V době, kdy již meniskus splývá s kontaktní oblastí a tím pádem již není měřitelná jeho poloha, dochází stále ke zvyšování úrovně hladovění.

Parametr snížení centrální tloušťky

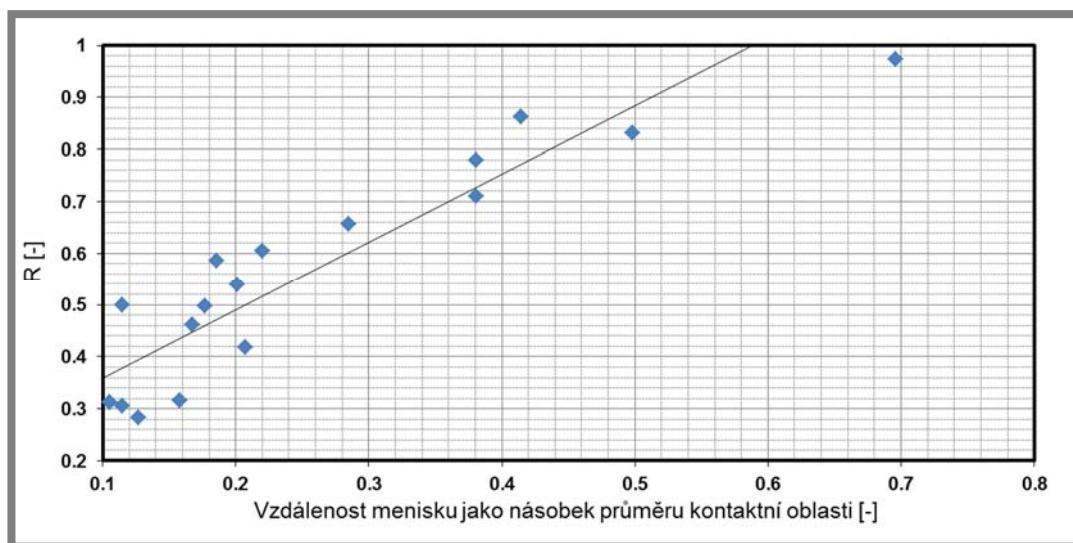
Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, poloha menisku není schopna pokrýt kompletní rozsah všech úrovní hladovění. Pro tyto účely je vhodné využít parametr R , který se označuje jako „central film thickness reduction“, neboli parametr snížení centrální tloušťky. Vypočítá se podle vztahu 6.1 jako podíl mezi centrální tloušťkou hladovějícího kontaktu a centrální tloušťkou plně zaplavené varianty.

$$R = \frac{h_c}{h_{c_{ff}}} \quad 6.1$$

Zde lze zmínit hlavní nevýhodu tohoto přístupu a tou je nutnost zjištění hodnoty tloušťky mazacího filmu pro plně zaplavený kontakt. Ta se dá obdržet buď experimentálně při identických podmínkách, jaké jsou nastaveny pro hladovějící kontakt, vyjma množství maziva, nebo teoreticky. Lze využít například predikční vztah podle Hamrock-Dowsona. Zde ovšem vstupuje několik nejistot, které mohou způsobit chybu. Například teplota maziva nemusí být identická jako ta, při které byla měřena viskozita, která je použita pro predikci. Již jeden stupeň dokáže způsobit odchylku v řádu jednotek %. Dalším problémem může být stanovení parametru α – tlakově viskózního koeficientu. V této práci je tedy z důvodu přesnosti preferováno využití experimentálního zjištění této tloušťky.

Porovnání obou metod

Pro porovnání dvou zmíněných přístupů bylo provedeno měření polohy menisku v závislosti na parametru snížení centrální tloušťky. Tyto výsledky lze pozorovat na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Poloha menisku v závislosti na úrovni hladovění dle par. R.

Dle provedených experimentů tedy lze učinit vlastní závěr, že od vzdálenosti menisku 0.6 násobku a více již nedochází k ovlivnění kontaktní oblasti a kontakt se chová jako plně zaplavený ($R \sim 1$). Současně lze vidět, že i při vzdálenosti menisku 0,1 je stále úroveň hladovění asi 0,35. To potvrzuje fakt, že poloha menisku není využitelná pro všechny úrovně hladovění.

6.2. Slabá místa navržené metody

Z navržené metody, uvedené v Obr. 5.2, vyplývají dva základní problémy či nejasnosti, které bylo zapotřebí vyjasnit a popsat před samotným měřením.

Prvním z nich je pojem doplňování maziva. Jak je zřejmé z konceptu, mezi kontakty je vždy nějaká vzdálenost, na které může dojít ke změně podmínek či tvaru stopy vytvořené prvním elementem. Jednoduchá rozměrová úvaha dokáže udělat představu o reálných rozměrech při experimentu. Pokud jsou k sobě téměř na kontakt během experimentu přiblíženy oba dva valivé elementy, je délka dráhy mezi středy obou kontaktů asi 25,6 mm. Dáno do poměru s kontaktní oblastí asi 0,3 mm dostáváme hodnotu 85 násobku vzdálenosti mezi kontakty vůči průměru kontaktu samotného. Během této vzdálenosti v rámci navržené metody není možné kontrolovat, jestli profil vytvořené stopy neprojde nějakou změnou. V závislosti na valivé rychlosti či čase je tedy vhodné ověřit, že se stopa dostane do druhého měřeného kontaktu tak, jak byla definována prvním kontaktem, nebo alespoň kvantifikovat změnu, pokud nějaká existuje. Tato problematika je studována v kapitole 6.3.

Druhým nejistým místem konceptu metody je předpoklad, že je mazivo po průchodu kontaktem rozděleno mezi dva povrchy (disk a valivý element) v poměru 0,5. Tento poměr totiž vystupuje ve vztahu (5.1) pro

výpočet h_{oil} . Dalším aspektem je ovlivnění tohoto poměru při zavedení nenulového poměru kluzu-valení (SRA). Lze očekávat, že oba elementy pracují v režimu blízkém čistému valení, ale jelikož nejsou elementy poháněny, může docházet k lehkému prokluzu z důvodu odporu uložení valivého elementu. Je tedy zapotřebí znát, jak může případný skluz ovlivnit poměr dělení maziva na kontaktní povrchy po průchodu kontaktem a změřit reálný skluz u experimentálního zařízení. Tento vliv je popsán v kapitole 6.4.

6.3. Doplnování maziva – vliv vzájemné vzdálenosti elementů

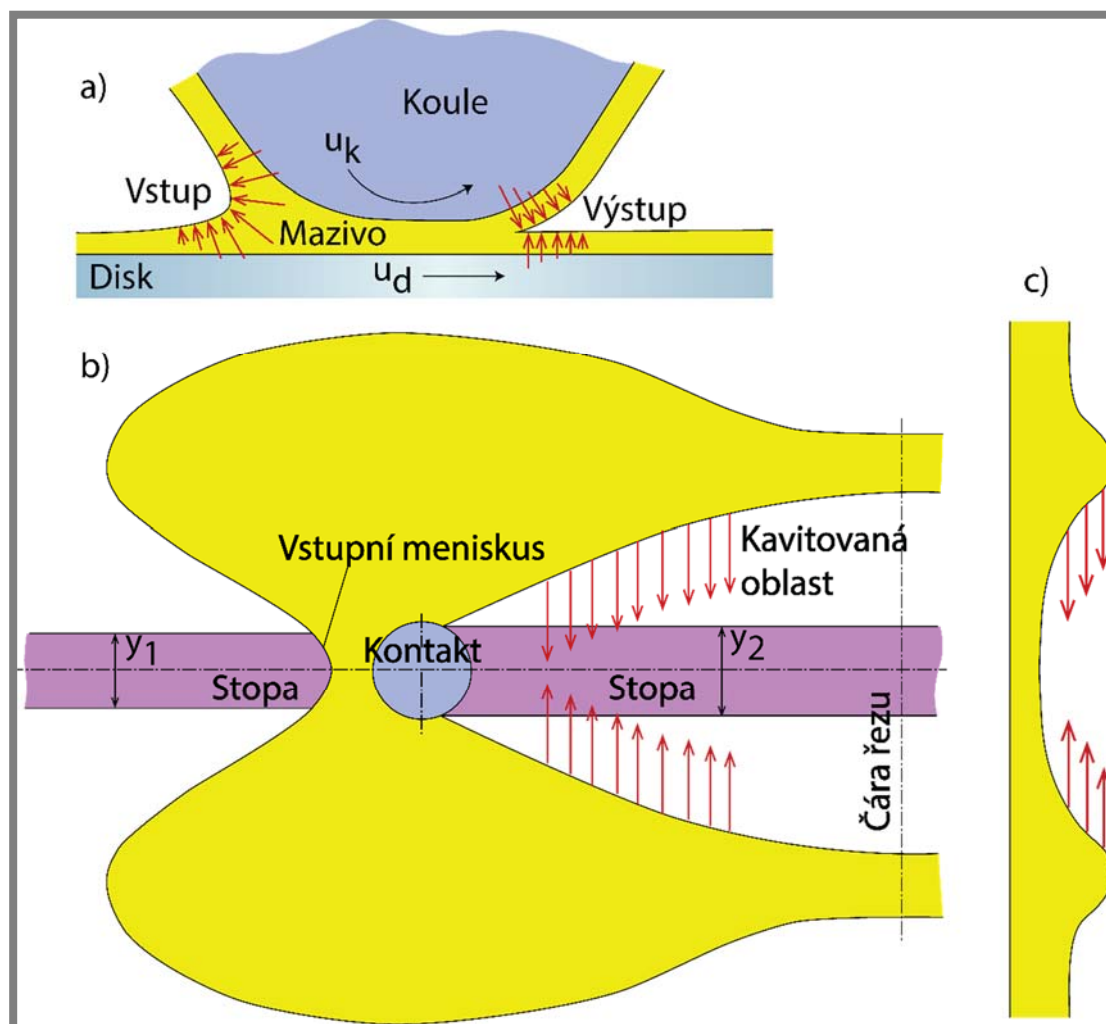
Toto téma bylo zpracováno jako samostatná práce a prezentováno na konferenci STLE 2013 v Detroitu (viz příspěvky na konferencích). Současně byly některé výstupy z této části publikovány do recenzovaného časopisu MM Science.

Předpokladem bylo, že stopa, která se v mazivu na ploše disku při experimentu typu ball-on-disc vytvoří, pokračuje beze změny do druhého kontaktu. Toto tvrzení samozřejmě nemůže být pravdivé pro neomezeně dlouhý čas přechodu vytvořené stopy z jednoho kontaktu ke druhému. Základním cílem této studie bylo ověření chování volné vrstvy maziva a čas, za jaký již dojde ke změně, která ovlivní následující kontakt. Celá studie byla uvažována jako změna v závislosti na čase. Díky tomu lze výsledky přenést na jakoukoliv situaci z hlediska různých rychlostí, valivých poloměrů apod. To by nešlo, pokud by byla jako určující parametr uvažována vzdálenost mezi kontakty. Výsledky jsou uvedeny pro jedno konkrétní mazivo, které bylo používáno pro své vhodné vlastnosti pro potřeby většiny experimentů, a to R834/80.

Jev, který je v této části popisován se označuje v angličtině pojmem „replenishment“. Tento pojem by se dal přeložit jako doplnění či doplňování. Samozřejmě se vztahuje k mazivu, nicméně není jasné místo, kam se mazivo doplňuje. To se již ve studiích popisuje různě. Na Obr. 6.3 je celý proces detailně ilustrován.

Obrázek má tři části (a, b, c). Jedná se o ilustrace několika pohledů. Pohled a) je řez ve směru toku maziva. Na tomto pohledu jde vidět pohyb koule a disku a mezi těmito povrchy zachycené mazivo. Červené šipky poté zachycují tzv. in-contact replenishment. Jedná se o typ doplňování, který funguje zejména díky kapilárním silám vytvořeným geometrií kontaktu. Tyto síly jsou v místě působení znázorněny červenými šipkami. Tento typ je pro tuto studii zanedbán, jelikož je jeho vliv na výstupu kontaktu při podmínkách hladovění zanedbatelný. Při dostatečné rychlosti se již dvě vrstvy maziva vytvořené průchodem kontaktu po stranách stopy (napravo v části b), nestihnou spojit a stopu zaplavit.

Experimenty byly tudíž plánovány tak, aby bylo vždy dosaženo této podmínky. Díky tomuto efektu je vrstva ve stopě maziva stejná za kontaktem, jako je ta uvnitř kontaktní zóny. Jediná změna je vlivem stlačitelnosti maziva, což bude popsáno později.

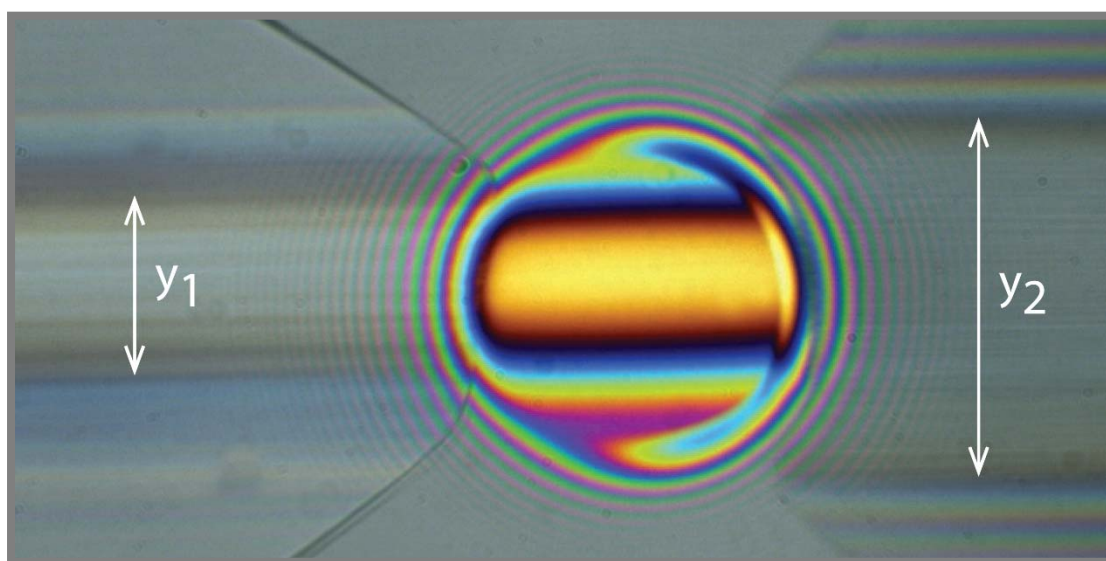


Obr. 6.3 Doplnění maziva – ilustrace

Druhým, pro tuto práci významnějším typem je tzv. out-of-contact replenishment. Ten probíhá v oblasti mimo kontakt, jak již název naznačuje. Je způsoben zejména povrchovým napětím v mazivu. Na Obr. 6.3 je vidět v pohledu c) stopa vytvořená v mazivu průchodem kontaktu. Jedná se o řez, vytvořený z pohledu b) v místě označeném „čára řezu“. Dvě vyšší vrstvy maziva po stranách valivé stopy jsou vytvořeny průchodem kontaktu. Snahou maziva je zaujmout co nejmenší povrch, za což je zodpovědné zejména povrchové napětí. Vlivem této síly dochází ke zpětnému zaplavení valivé stopy mazivem. Tento jev je zřejmý i během běžných experimentů, kdy je stopa vycházející z kontaktu (y_2) již na pohled širší, než je tomu u té, která do kontaktu vstupuje (y_1). Rozdíl mezi těmito

rozměry naznačuje přítomnost mechanismu doplňování maziva. Ukázku interferogramu z experimentu, u kterého tomu tak je lze vidět na Obr. 6.4. Na tomto interferogramu lze také vidět, že je změnou vstupující vrstvy maziva ovlivněna centrální tlaková oblast, která je deformovaná. To jen potvrzuje, že se jedná o jev, který je potřeba mít v případě experimentů se dvěma elementy pod kontrolou.

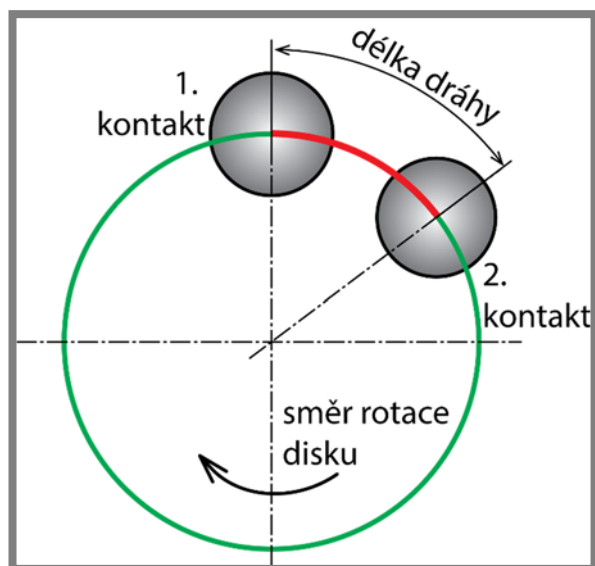
Dalším cílem této studie bylo experimentálně ověřit model publikovaný Gershunim [36] a uvedený v přehledu současného stavu poznání na Obr. 2.28.



Obr. 6.4 Porovnání šířky stopy před a za kontaktem

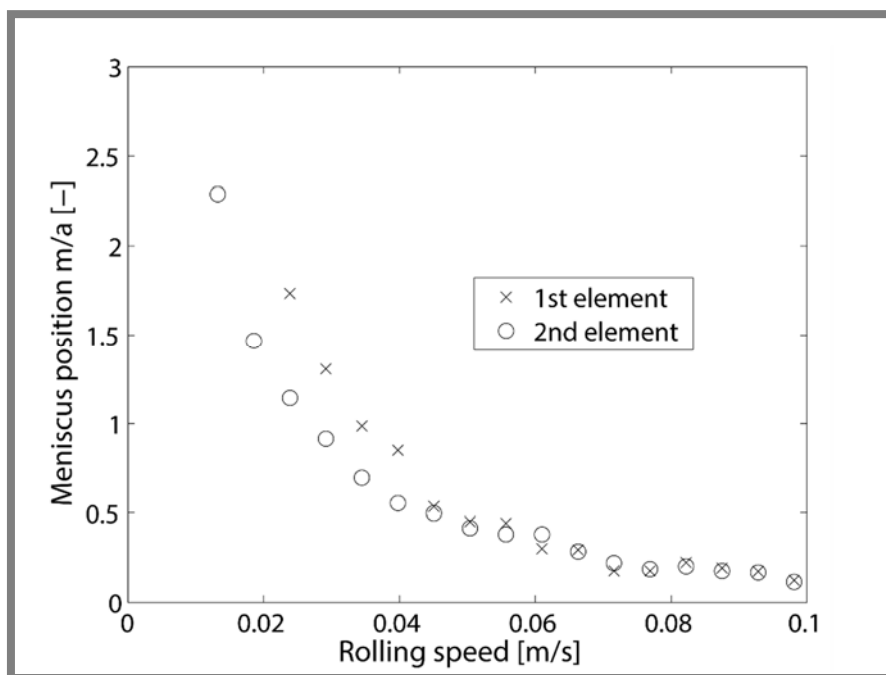
6.3.1. Přejíhlová oblast – poloha menisku

V této první části bylo měřeno, jak souvisí poloha menisku, čili prostor pro zaplavení stopy s úrovní hladovění v přejíhlové oblasti, tudíž v místě, kde se z plně zaplaveného kontaktu stává hladovějící. Pro kvantifikaci stupně hladovění se využilo měření polohy menisku. Konfigurace experimentálního zařízení byla konstantní po celou dobu měření. Cílem bylo zjistit vliv valivé rychlosti na polohu menisků obou kontaktů, přičemž před každým z kontaktů je rozdílný prostor pro doplňování maziva. Rozdíl lze vidět na Obr. 6.5, který poskytuje náhľad na rozložení kontaktů na disku při tomto experimentu. Vzdálenost před prvním kontaktem je asi 295 mm (zelený oblouk), přičemž před druhým kontaktem pouze asi 35 mm (červený oblouk), což je asi 8x méně. Z toho důvodu by se dalo očekávat, že bude druhý kontakt vykazovat nižší hodnoty polohy vstupního menisku.



Obr. 6.5 Schéma konfigurace aparatury pro měření polohy menisku

Výsledné polohy menisků jsou vykresleny společně do grafu na Obr. 6.6. Největší rozdíly v polohách obou menisků jsou pro nejnižší rychlosti $v < 0,05$ m/s. Pro zvyšující se rychlost se rozdíly snižují až na úroveň, kde mezi nimi není patrný rozdíl. Nicméně pro nižší rychlosti je z grafu zřejmé, že je zde prokazatelný vliv vzdálenosti mezi kontakty. Bohužel je patrný pouze v oblasti, kde se kontakt stěží dá nazvat hladovějícím. V kapitole 6.1 bylo uvedeno, že hladovějící kontakt vykazuje minimální poměr zhruba $m/a < 0,5$. To je zde současně hranice, pod kterou již téměř není patrný rozdíl mezi kontakty. Z toho důvodu se tato metoda měření ukázala jako nepřiliš vhodná, nicméně přesto užitečná ve faktu, že prokázala přítomnost mechanismu, který doplňuje mazivo zpět do valivé a dráhy a dále v tom, že je tento proces závislý na čase. Bylo tedy nutno přistoupit k alternativnímu způsobu.



Obr. 6.6 Polohy menisků dvou kontaktů

6.3.2. Hladovění – dva kontakty

V této části již byla opuštěna metoda kvantifikace úrovně hladovění podle polohy menisku, jelikož se ukázala v oblasti s vyšší úrovní hladovění jako nevhodná. Bylo zde využito parametru R . Tento parametr byl navíc studován jako funkce času pro konstantní rychlost, aby se eliminoval její možný vliv na měření v důsledku rozdílných setrvačných sil působících na mazivo.

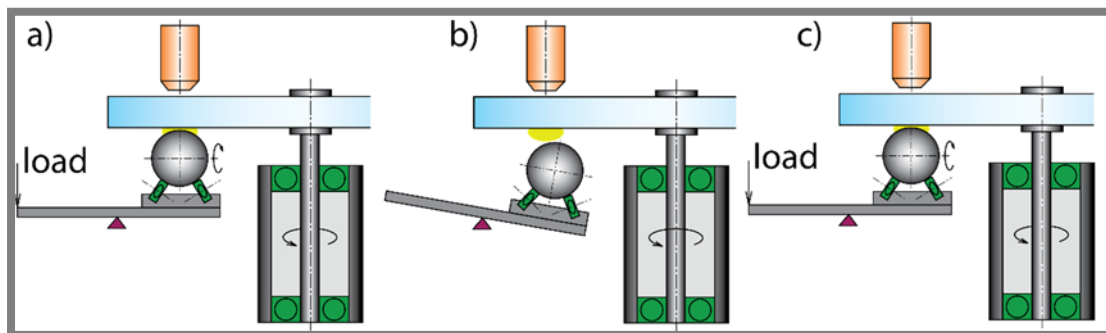
Konfigurace pro experiment byla lehce odlišná, opět byly sice využity dva elementy, nicméně tentokrát již ne pro konstantní vzájemnou vzdálenost. Ta byla proměnlivá od 30 do 300 mm, což pro zvolenou rychlost 0,4m/s prezentovalo čas od 0,05 s do 0,7 s. Rychlost byla zvolena na základě potřebné úrovně hladovění a vytvoření stopy v mazivu. Pro nižší rychlosti by již nedošlo k vytvoření stopy v mazivu, jelikož by se kontakt stíhal na výstupu zaplavovat pomocí mechanismu in-contact replenishment popsaného výše.

Při experimentu ovšem nedošlo ke zjištění žádného rozdílu v měřené hodnotě parametru R . Ten byl nezávisle na změně podmínek vždy velmi blízký hodnotě 0,2 pro oba kontakty. Z tohoto chování a podle predikce na Obr. 2.28 bylo usouzeno, že je čas pro jakékoliv doplnění maziva do kontaktu příliš krátký a v rámci křivky na zmíněném obrázku se data nachází před bodem „take-off time“, což bylo v článku definováno jako bod, který ve střední části stopy již vykazuje změnu tloušťky vrstvy maziva o 20 %. Z tohoto důvodu byla vytvořena další, lehce odlišná koncepce experimentu.

6.3.3. Hladovění – jeden kontakt

S předchozí konfigurací dvou kontaktů již nebylo možné dosáhnout vyšších časů, aby bylo mazivo schopno zaplavit stopu. Použití nižších rychlostí nebylo možné, jelikož by zase nedocházelo k hladovění kontaktu a ten by byl plně zaplaven či v režimu blízkém plně zaplavenému kontaktu. Byla tedy vyvinuta nová metoda, neboli spíše postup měření. Náskres jednotlivých bodů postupu je na Obr. 6.7.:

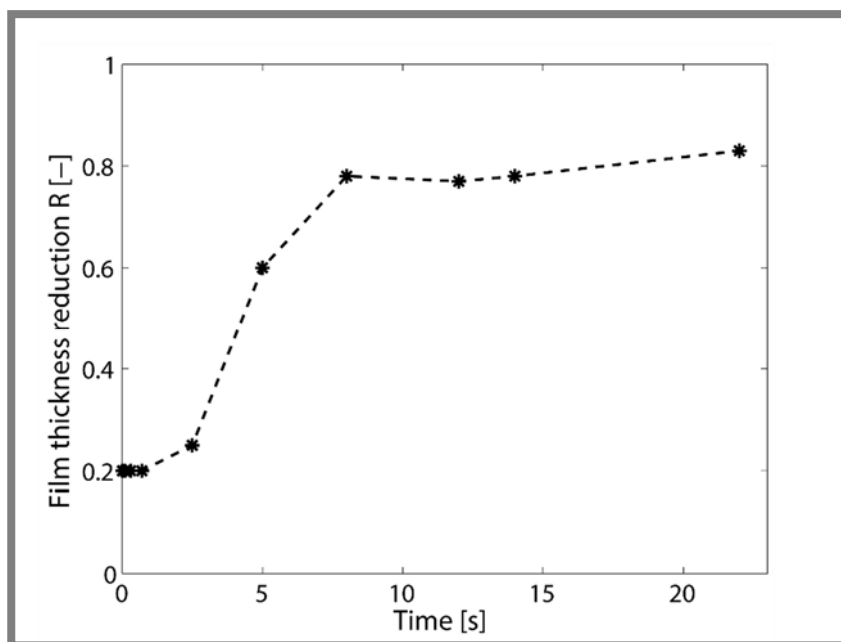
- a) S jedním valivým elementem a rychlosti dojde při dané rychlosti 400 m/s k vytvoření valivé stopy v mazivu.
- b) Po určité době, kdy dojde ke stabilizaci úrovně hladovění kontaktu na hodnotě parametru $R=0,2$ se valivý element odpojí z dráhy pomocí zatěžovací páky a disk se po zvolenou dobu otáčí stále stejnou rychlostí, ovšem bez vytvořeného kontaktu.
- c) Po daném čase dojde k opětovnému zapojení elementu do valivé dráhy a změření tloušťky mazacího filmu v tomto okamžiku.



Obr. 6.7 Koncept experimentu s jedním elementem

Výhodou tohoto postupu je možnost měřit po téměř neomezeně dlouhé časy. Nevýhodou je samotné odpojení elementů z valivé dráhy a zapojení zpět. Toto odpojení sice probíhalo maximální možnou rychlostí, nicméně i tak dojde pravděpodobně k vytvoření nehomogenit na povrchu maziva v důsledku kapilárních sil působících v mezeře v okolí valivého elementu. Tato nevýhoda byla eliminována využitím vysokorychlostní kamery za použití frekvence snímání o hodnotě 4000 snímků za sekundu. Díky ní bylo možné po zapojení elementu velmi přesně určit, kdy dojde k pootočení koule o půl otáčky a vyhodnotit až interferogram z tohoto okamžiku. Současně s tím byl element zapojen do jiného místa na disku, než ze kterého byl odpojen, jelikož byl disk stále rotován. Tím byl tento vliv vyloučen i na straně disku.

Výsledky obdržené touto metodou jsou společně s výsledky z předchozí kapitoly vykresleny do grafu na Obr. 6.8.



Obr. 6.8 Změna tloušťky maziva ve středu stopy v závislosti na čase

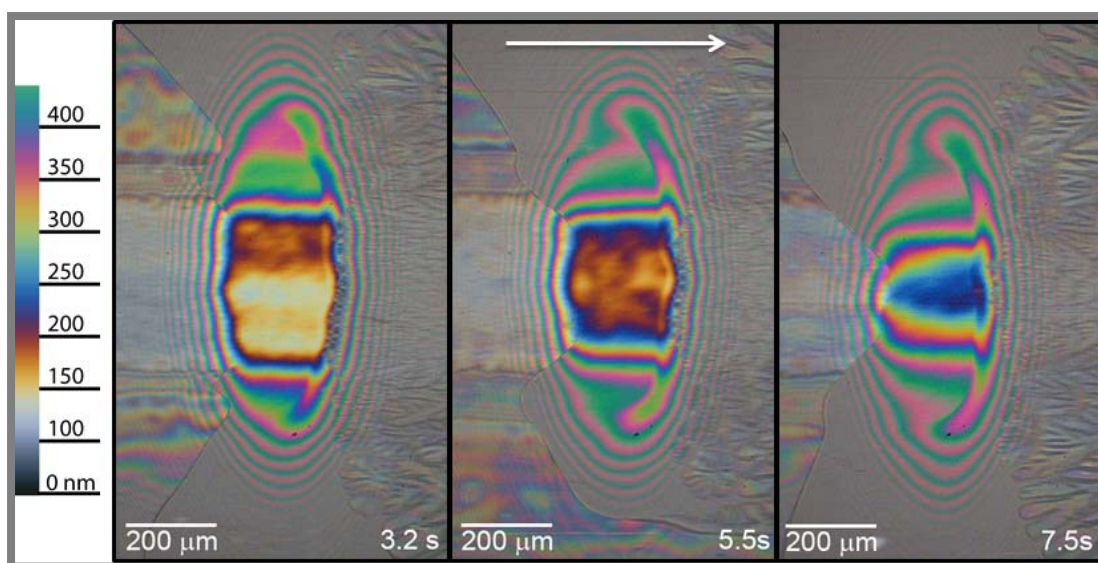
Podobnost se zmíněnou křivkou na Obr. 2.28. Je více než zřejmá. Jednou nejasností je fakt, že ani po obnovení mazacího filmu ve vyšších časech nedojde k návratu tloušťky mazacího filmu na hodnotu $R=1$. Tento jev je pravděpodobně způsoben nestacionárním chováním kontaktu v době těsně po zapojení valivého elementu. V této chvíli může docházet k menšímu prokluzu, který způsobí snížení tloušťky filmu.

6.3.4. Profil stopy v mazivu

V této kapitole je předchozí studie rozvinuta za cílem vykreslení tvaru stopy v mazivu. Konkrétněji vykreslení profilu ve směru kolmém na směr valení. Tato část byla realizována za účelem objasnění nelineárního chování procesu doplňování maziva. V neposlední řadě zde byl i cíl ověřit tentýž model jako v předchozím případě [36] a profily z Obr. 2.29.

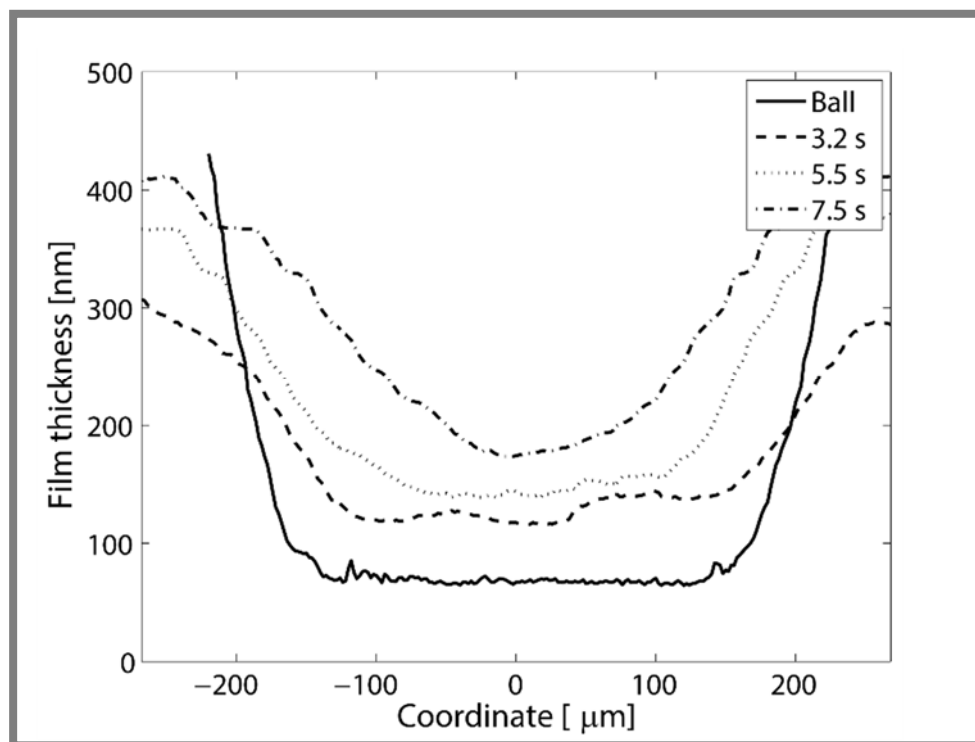
Jelikož metoda optické interferometrie vyžaduje pod vrstvou maziva odrazivý povrch, nelze měřit tloušťku volné vrstvy maziva, což by bylo ideální. Byla tedy využita následující modifikace předchozího přístupu s odpojením elementu. Po vytvoření ustálené stopy v mazivu byla koule využita jako valivý element odpojena. Po určitém čase byl na její místo ovšem zapojen soudeček. Důvodem pro tuto modifikaci je obtížnost zapojit stejný element zpět přesně do té samé valivé dráhy. Vůle v zařízení způsobí, že může být kontakt vytvořen o zlomek průměru kontaktu přesazený. To sice nevadí pro měření centrální tloušťky, ovšem při vyhodnocení celého profilu to ovlivní okrajové části. Soudeček na druhou stranu vytvoří mnohem širší kontakt a jeho okrajové části jsou již mimo

vytvořenou stopu. To umožní jednak jistou toleranci v opětovném zapojení, ale hlavně vyhodnocení celého profilu. Kontakt mezi soudečkem a diskem je totiž ovlivněn tvarem vrstvy maziva před kontaktem. Na Obr. 6.9 je zřetelně vidět ovlivnění tvaru kontaktu tvořeného mezi soudečkem a diskem v důsledku různých profilů stopy. Různé profily vznikají z důvodu odlišných časových prodlev mezi odpojením koule a zapojením soudečku do kontaktu. Čas, po kterém je soudeček zapojen, je uveden u každého interferogramu napravo dole. Na levé straně každého interferogramu je poměrně zřetelně vidět i rozdílná šířka stopy na vstupu kontaktu.



Obr. 6.9 Kontakt soudečku a disku ovlivněný tvarem stopy v mazivu

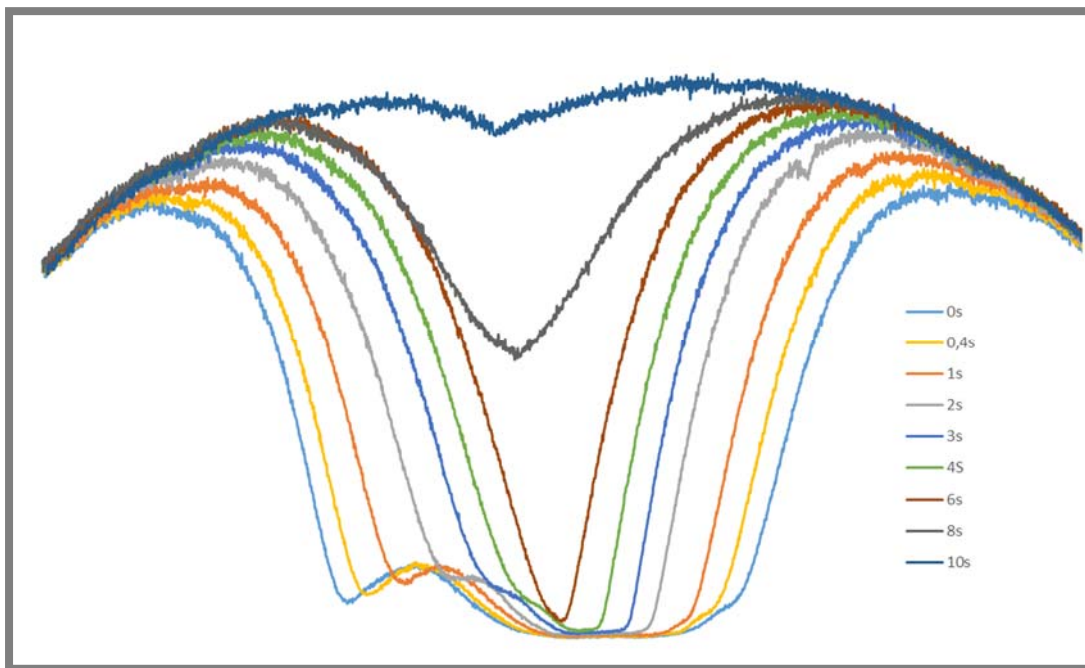
Na Obr. 6.10 lze vidět profily, které vznikly vytvořením svislého řezu přes středy kontaktů na Obr. 6.9. Tyto profily jsou pro stejné časy a je zde navíc uveden i profil, který odpovídá kuličce, která vytvořila počáteční stopu, do které byl po časové prodlevě zařazen soudeček.



Obr. 6.10 Profily vrstvy maziva mezi soudečkem a diskem pro různé časové prodlevy

Pro ověření výsledků bylo provedeno další měření se stejným mazivem (R834/80) za stejných podmínek pomocí jiné metody – fluorescence. Hlavní výhoda této metody je v její schopnosti měřit volnou vrstvu maziva, na rozdíl od interferometrie, která vyžaduje odrazivý povrch. Nevýhodou ovšem je obtížná kalibrace hodnot intenzity světla, které jsou výstupem z měření, na konkrétní tloušťku mazacího filmu. Bylo ovšem usouzeno, že to v této části není zapotřebí a proto jsou výsledky prezentovány pouze jako posouzení změn tvaru profilů v rozdílných časech. Výsledky pro jednotlivé časy jsou uvedeny na Obr. 6.11. Stopy zde vykreslené jsou měřeny asi 20 mm za kontaktem. Tato vzdálenost při valivé rychlosti 200 mm/s odpovídá času 0,1 sekundy, což je čas, který lze vzhledem k naměřeným hodnotám zanedbat. Z grafu je patrné, že časy odpovídají předchozím měřením pomocí optické interferometrie a zlomový okamžik změny stopy nastává mezi 6. a 8. sekundou.

Profil v nulté sekundě by měl odpovídat profilu označeného jako „Ball“ z Obr. 6.10. Důvod nárůstu filmu na levé straně stopy není znám, nicméně se nejedná z hlediska studie o podstatný vliv, proto nebyl dále studován.

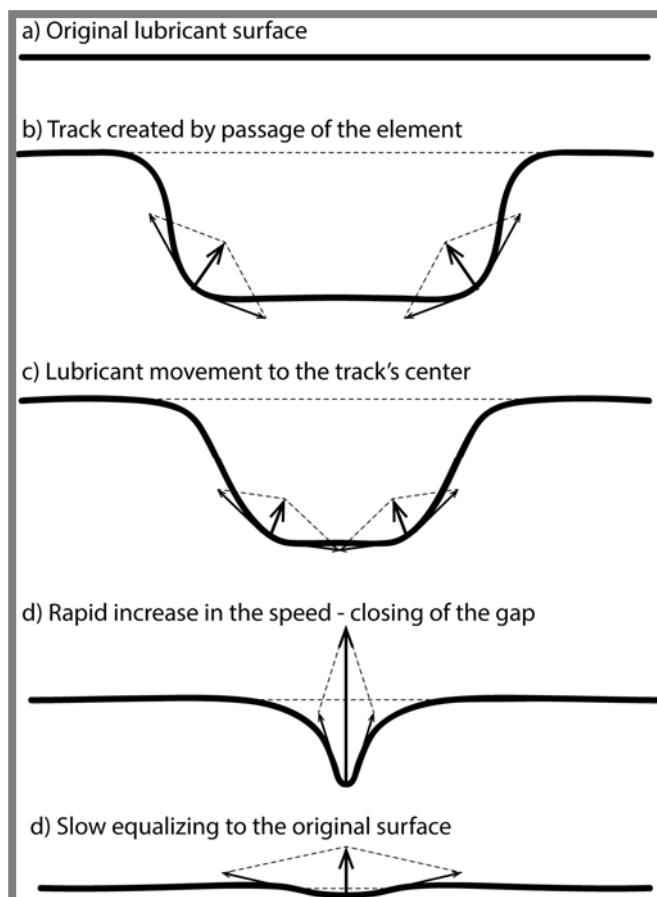


Obr. 6.11 Profily vrstvy maziva ve stopě v mazivu za koulí

6.3.5. Obecný závěr a shrnutí

Tato část se zabývala studiem chování stopy vytvořené ve vrstvě kapalného maziva průchodem valivého elementu tzv. out-of-contact replenishment, neboli doplňování maziva. Bylo popsáno chování centrální části stopy v čase a současně byl ověřen z hlediska chování teoretický model. Bylo také prokázáno extrémně nelineární chování maziva při zaplavování stopy. Toto chování je v souladu s teorií a dalo by se shrnout do tří základních částí. Tyto části jsou ilustrovány na Obr. 6.12.

- Po vytvoření stopy ve vrstvě maziva je část, která prošla tlakovou oblastí kontaktu téměř beze změny. Pouze boční části stopy se začínají přibližovat ke středu (a-c).
- Při přiblížení těchto dvou vrstev po stranách stopy dojde k jejich sloučení uprostřed valivé dráhy. Tento okamžik je označen jako „take-off time“ a jedná se o okamžik počátku rapidního růstu tloušťky maziva ve středu stopy (d)
- Poslední částí je již pouze pozvolné vyrovnávání volné plochy maziva, které se snaží vytvořit tvar s minimálním povrchem.



Obr. 6.12 Ilustrace procesu zaplavení valivé dráhy

6.3.6. Závěr pro potřeby řešení disertační práce

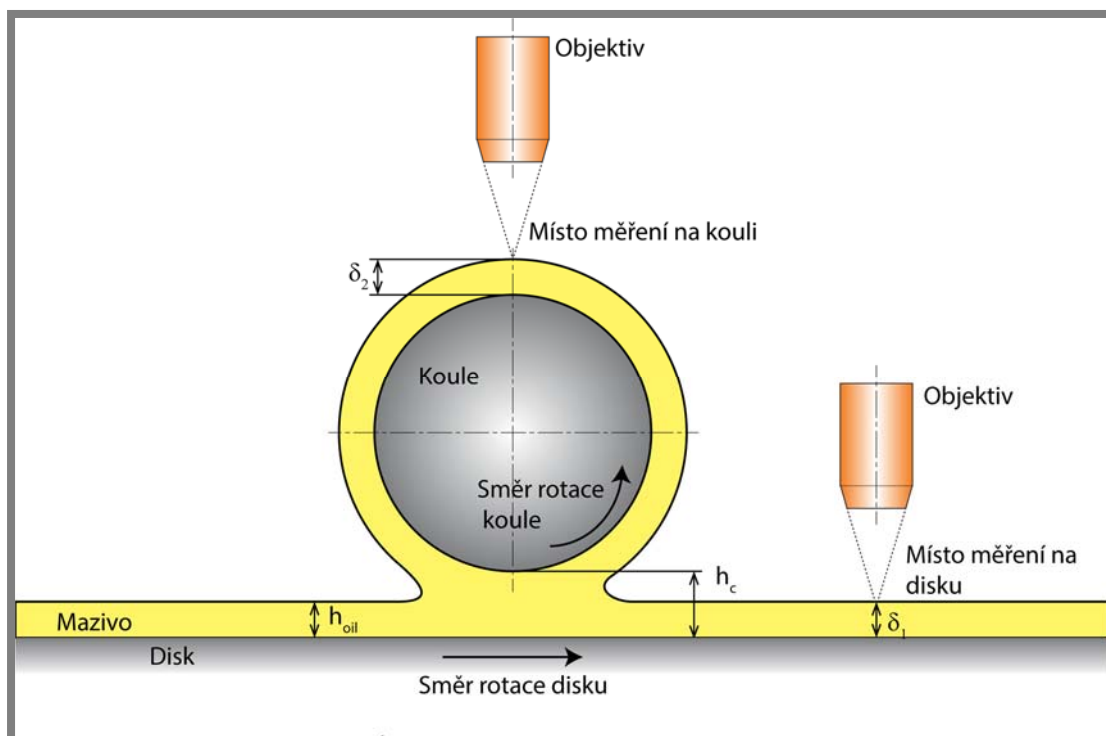
Hlavním cílem pro potřeby konceptu vytvořeného pro splnění cíle této disertační práce bylo ověřit, jestli je vrstva, která je vytvořena průchodem valivého elementu, bez významnější změny dopravena diskem ke druhému kontaktu. Kritický čas pro měřitelnou změnu centrální části stopy byl na základě této studie stanoven na 3 sekundy. To je mnohem delší čas, než je potřebný pro většinu experimentů realizovaných později. Lze tedy konstatovat, že tento děj měření neovlivní. Jako první element navíc bude použit soudeček, který vytváří širší stopu, takže se tento děj dá očekávat ještě podstatně delší.

6.4. Poměr dělení maziva po průchodu kontaktem

Koncept vytvořený pro řešení této disertační práce obsahuje další předpoklad, který doposud nebyl plně objasněn. Jedná se o poměr dělení maziva na valivé povrchy po výstupu z kontaktní oblasti. Na Obr. 5.2 je znázorněn koncept, který dle vztahu 5.1 předpokládá dělení v poměru 1:1 na oba valivé povrchy. To pro potřeby experimentu znamená, že je mazivo rozděleno na dvě stejně tlusté vrstvy, přičemž jedna je z kontaktu odnášena na povrchu koule a druhá na povrchu disku. Jedná se ovšem jen o předpoklad, který bylo nezbytné ověřit. Pokud by tomu tak totiž nebylo a opravdový poměr dělení by nebyl znám, tak je celý koncept nepoužitelný.

Dalším problémem je možný prokluz valivých elementů. Jelikož jsou oba elementy poháněny pouze trakční silou přenášenou kontaktem, tak se očekává přítomnost mírného skluzu. Konkrétně nižší rychlost valivého elementu. Bylo provedeno měření pomocí bezkontaktního otáčkoměru, které prokázalo přítomnost skluzu v míře do 4 % vůči valivé rychlosti disku. Disk je poháněn servomotorem s resolverem a jeho chod je kontrolován ovládacím softwarem. Zde je tedy změna rychlosti nepravděpodobná.

Skluz o velikost 4% je pro měření tloušťky EHD filmu sice téměř zanedbatelný, nicméně vliv skluzu na poměr dělení maziva znám není. I z tohoto důvodu byla vytvořena další studie, která se touto problematikou zabývala.



Obr. 6.13 Koncept měření poměru vrstev maziva na výstupu [68]

Některé závěry z této části byly prezentovány na konferenci TFC 2014 v Chicagu (viz sekce konference) a výsledky byly publikovány do časopisu Tribology Letters (viz sekce publikace). V této kapitole budou dále popsány základní principy měření a výsledky této studie.

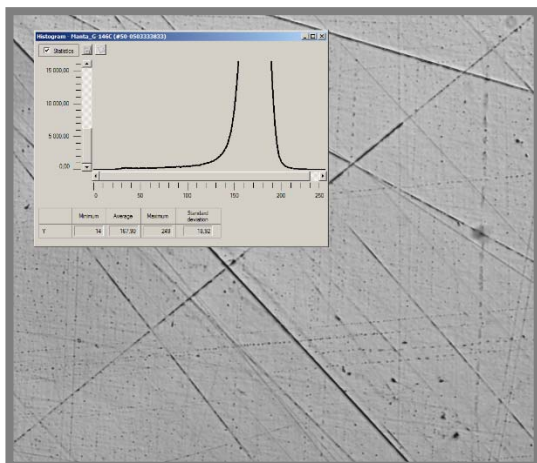
6.4.1. Modifikace aparatury

Pro experimenty za účelem ověření teoretického modelu chování maziva na výstupu z kontaktu publikovaného Bruyerem [48] bylo modifikováno experimentální zařízení popsané v kapitole 5.1. Modifikace byla nezbytná z důvodu nevhodnosti aparatury použité v předchozí kapitole vzhledem k této aplikaci. Při měření poměru maziva na površích opouštějících kontakt nelze použít metodu optické interferometrie kvůli absenci polo-odrazivého rozhraní mezi diskem, mazivem a koulí. Jednoduše řečeno se měří pouze volná vrstva maziva a není přítomna plocha, na které by došlo k rozdělení svazku světla, jako je tomu u měření v kontaktní oblasti.

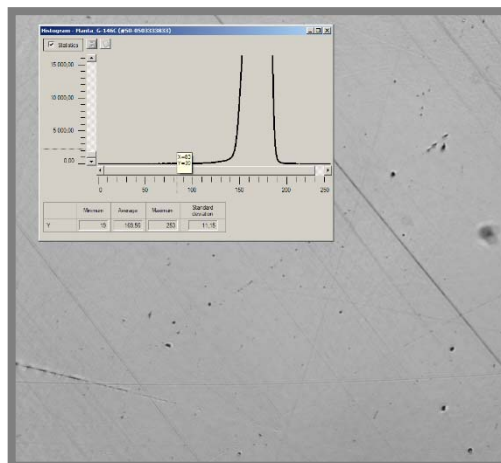
Pro tuto aplikaci se jako ideální, díky svému principu, jeví metoda fluorescence. S rostoucí tloušťkou látky produkující fluorescenci lineárně roste také intenzita jeho fluorescence. Princip této metody je detailněji popsán v kapitole 5.1.6. Zde bude již jen popsán koncept měření a modifikace experimentálního zařízení. Důležité ovšem je, že není zapotřebí dvou rozhraní pro dělení svazku světla, jako je tomu u interferometrie.

Byla zvolena inverzní varianta aparatury ball-on-disc, oproti těm použitým v ostatních kapitolách. Ta spočívala v přemístění koule ze spodní strany disku na horní stranu. Koncept je zřetelný z Obr. 6.13. Měření bylo prováděno střídavě na jednu či druhém místě. Kompletní koncepční popis aparatury použité při tomto měření lze vidět na Obr. 5.16. Je zde patrná inverzní forma s koulí nad diskem.

Další významnou modifikací je materiál disku. Při měření pomocí interferometrie se využívá skleněný disk. Tato možnost se zde nedá využít, jelikož při měření dle Obr. 6.13 by měření na dvou místech nebylo srovnatelné. I při předpokladu stejné vrstvy maziva by z důvodu různých optických vlastností materiálu byla naměřena jiná hodnota intenzity emitovaného světla. Jelikož je v konceptu této studie zjišťován pouze poměr mezi tloušťkami na dvou uvedených místech, musí být zaručeno, že jsou tato místa maximálně podobná co do optických vlastností. Byt tedy použit kovový disk, který je vyroben ze stejného materiálu jako koule, tedy ložiskové oceli 100Cr6.



Obr. 6.14 Povrch disku



Obr. 6.15 Povrch koule

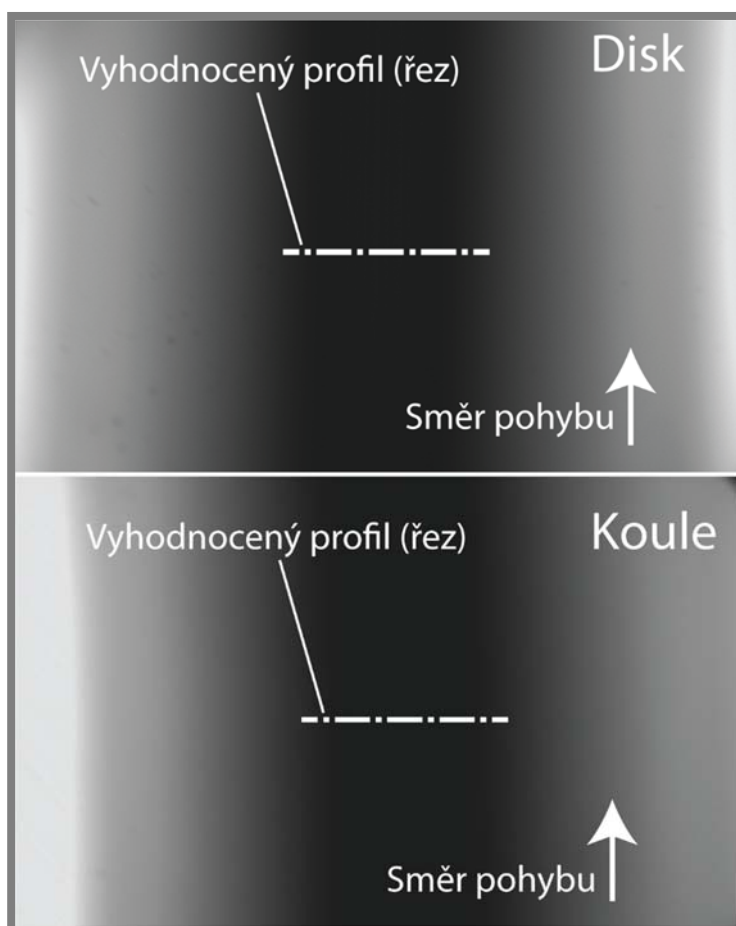
Pro ověření odrazivosti povrchů, která může výsledky experimentů ovlivnit nejvíce, byly provedeny měření. Před měřením jak odrazivosti, tak tloušťky filmu, byly oba povrchy vyleštěny pomocí diamantové lešticí pasty na úroveň drsnosti povrchu odpovídající hodnotám pod 10 nm. Leštění, vždy prováděné bezprostředně před měřením, má hlavní účel v odstranění oxidických vrstev, které se na takto hladkém, byť i zakonzervovaném povrchu velmi rychle tvoří a mohou ovlivnit odrazivost povrchů. Ověření bylo provedeno za pomoci průmyslového mikroskopu Nikon a CCD kamery Manta [60] a spočívalo v porovnání hodnot histogramu černobílého snímku. Na Obr. 6.14 a Obr. 6.15 lze vidět oba kontaktní povrchy. Průměrné hodnoty šedé barvy jsou 167,9 pro disk a 169,6 pro kouli se směrodatnou odchylkou 18,9 a 11,5. To bylo považováno za přijatelnou shodu a vzorky tímto byly uznány za vhodné pro měření.

Rozdíl, který by mohla způsobit změna kontaktní dvojice materiálu z varianty ocel-ocel na ocel-sklo, která bude využívána později, lze diskutovat obdobnou, velmi vysokou smáčivostí obou dvou materiálů. To je parametr, který by mohl teoreticky výsledky ovlivnit. Zmíněná teoretická studie [48] nezmiňuje žádné materiálové vlastnosti, které by mohly způsobit změnu poměru dělení maziva na výstupu kontaktu.

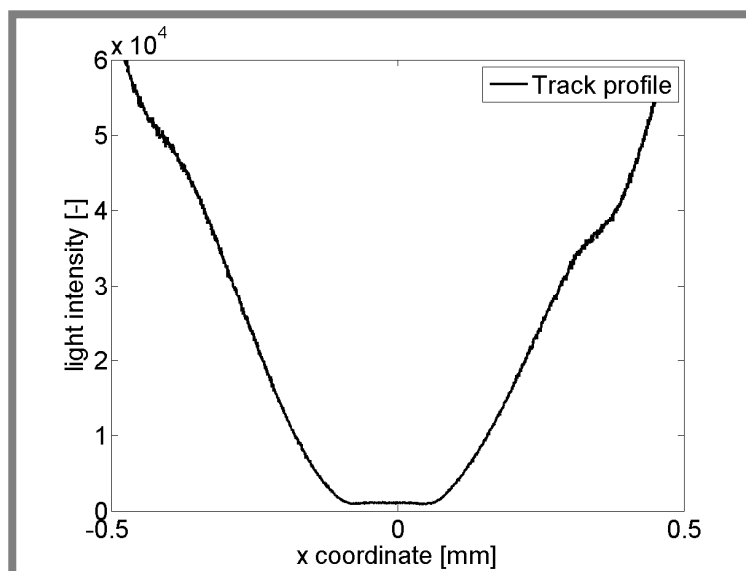
6.4.2. Vyhodnocení měření

Kamerou byly zachyceny černobílé snímky z míst na kouli a disku označených na Obr. 6.13. Snímky byly pořízeny vždy ve sledu koule – disk – koule – disk a byla vyhodnocena odchylka mezi oběma snímky pro stejné místo. Odchylka dvou měření byla průměrně kolem 2,5 % čímž se vyloučila nestacionarita provozních podmínek. Ukázka snímku stopy v mazivu je vyobrazena na Obr. 6.16. Je zde i znázorněno, ze které části snímku byly zachyceny profily stop. Jak bylo zmíněno v části popisující metodu, tmavé části snímku lze vyhodnotit jako místa, která obsahují nízkou tloušťku mazacího filmu a mezi intenzitou naměřeného světla a tloušťkou filmu je lineární závislost. Díky 16bitové hloubce snímků

jsou i části snímku, které se zdají již jako černé, bezpečně vyhodnotitelné, jelikož hloubka snímků poskytuje 2^{16} , tedy 65536 jasových hladin. Ukázka vyhodnoceného profilu je znázorněna na Obr. 6.17. Pro účely porovnání více snímků v grafu byl z centrální ploché části profilu vyhodnocen aritmetický průměr, který se uvažuje jako hodnota reprezentující centrální tloušťku maziva ve stopě za kontaktem a porovnává se s hodnotou z druhého povrchu vyhodnocenou stejně.



Obr. 6.16 Ukázka snímku zachyceného pomocí fluorescence [68]

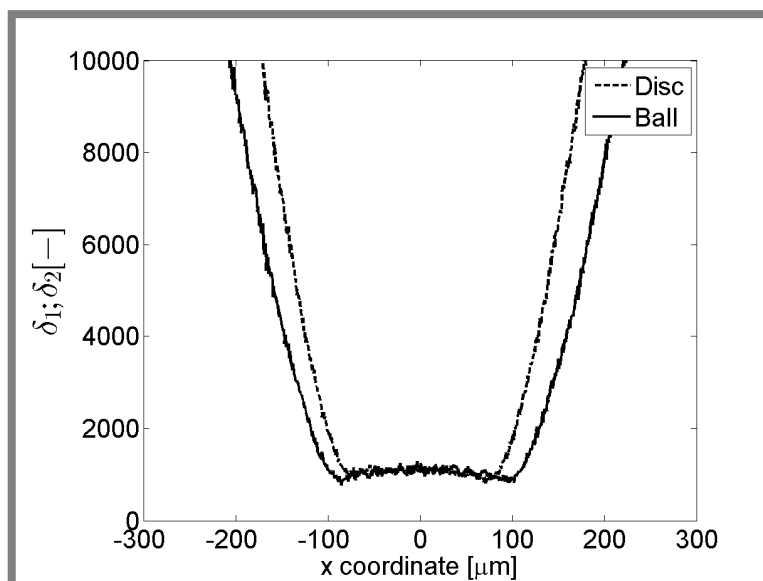


Obr. 6.17 Ukázka profilu stopy v mazivu [68]

6.4.3. Výsledky rozložení tloušťky pro podmínky čistého valení

Jako první bylo měřeno, jak dochází k dělení maziva na kontaktní povrchy při podmínkách čistého valení. Pro měření bylo použito mazivo R834/80 s parametry dle Tab. 5.1. Toto mazivo bylo zvoleno také z důvodu, že vykazuje silnou fluorescenční schopnost bez přidaného fluorescenčního barviva a navíc nedochází k útlumu svítivosti ani po dobách v řádu desítek minut. Při použití barviv to samé neplatí.

Naměřené profily obou stop (koule; disk) jsou vidět v grafu na Obr. 6.18. Z grafu je patrné, že jsou profily téměř identické. Tato informace se tedy týká zejména středové části, která prochází EHD kontaktem. Okrajové části vykazují malý rozdíl. Ten může být způsoben rozdílnou geometrií těles, či jiným směrem, na mazivo působících, setrvačných sil. Tento vliv ovšem není pro účely práce podstatný, takže nebyl dále studován.



Obr. 6.18 Profily stop při čistém valení [68]

6.4.4. Výsledky rozložení tloušťky pro podmínky různých hodnot skluzového poměru

V této části byl zkoumán vliv *SRR* na poměr mezi vrstvami maziva na kontaktních površích a jeho možné ovlivnění různou geometrií kontaktních těles, vlastností maziva či valivé rychlosti. Bruyere [48] ve své teoretické studii popisuje, že se vlivem měnícího skluzového poměru zvyšuje tloušťka maziva na rychlejším povrchu na úkor pomalejšího až do hodnoty, kdy pro čistý skluz všechno mazivo procházející kontaktem ulpívá na pohybujícím se povrchu. Cílem tedy bylo ověřit toto chování.

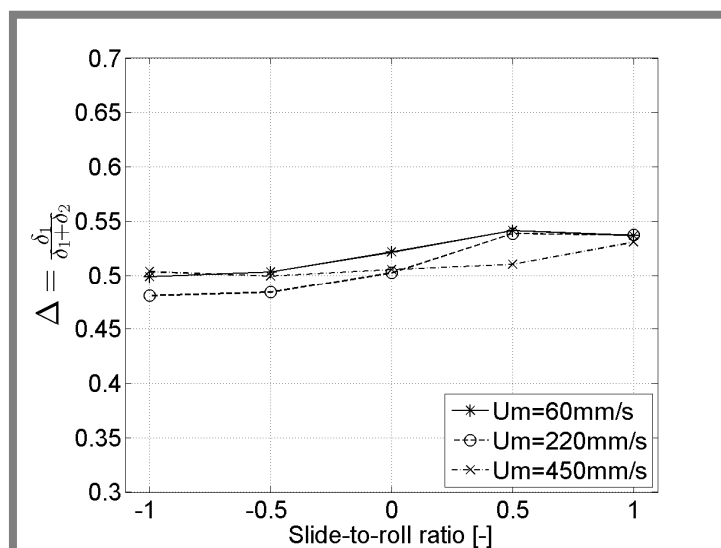
Skluzový poměr *SRR* byl v této práci variován v rozsahu -1,8; 1,8. Podmínky čistého skluzu (-2; 2) jsou totiž při experimentu dle zde uvedeného konceptu zbytečné. V takovém případě by byl jeden povrch, ať už koule či disk, statický a mazivo by se nemohlo dostat z kontaktu k místu, kde se tloušťka maziva měří. Výsledky by tudíž nebyly relevantní. Skluzový poměr o hodnotách 1,8 byl zvolen v závislosti na zvolené střední valivé rychlosti. Z této rychlosti lze dopočítat rychlost pomalejšího povrchu a na základě vzdálenosti mezi kontaktem a měřeným místem určit čas nezbytný pro transport vrstvy maziva od kontaktu k měřenému místu. Tento přesun musí být, na základě závěru předchozí kapitoly, kratší, než 3 sekundy. Po tomto čase by již v důsledku doplnění maziva do kontaktu z okrajových částí stopy došlo k ovlivnění centrální tloušťky a výsledky by nevypovídaly o skutečném poměru dělení.

6.4.5. Vliv valivé rychlosti

Při různé valivé rychlosti se mění jednak podmínky v EHD kontaktu, tak inerciální síly, které na mazivo působí okamžitě po výstupu z kontaktu.

Pokud by některý z těchto parametrů mohl ovlivnit poměr Δ , dalo by se očekávat, že pro různé valivé rychlosti se tato změna projeví.

Vliv střední rychlosti byl měřen pro tři hodnoty $u_m = 60, 220$ a 450 mm/s. Rychlost pro každý z povrchů byla měřena na základě udávaného *SRR*. Tloušťka mazacího filmu by dle predikce podle Hamrock-Dowsona měla být $h_c = 121, 289$ a 467 nm. To jsou stále hodnoty přijatelné pro měření pomocí fluorescenční metody.



Obr. 6.19 Poměr delta pro 3 různé střední rychlosti v závislosti na SRR. [68]

Změna poměru delta v závislosti na *SRR* je vyobrazena v grafu na Obr. 6.19. Je zde vidět drobná změna poměru Δ v závislosti na *SRR*, která je ovšem téměř stejná pro všechny tři valivé rychlosti. Teorie, kdy je více maziva na rychlejším povrchu, je tímto sice prokázána, nemění se ovšem s valivou rychlostí.

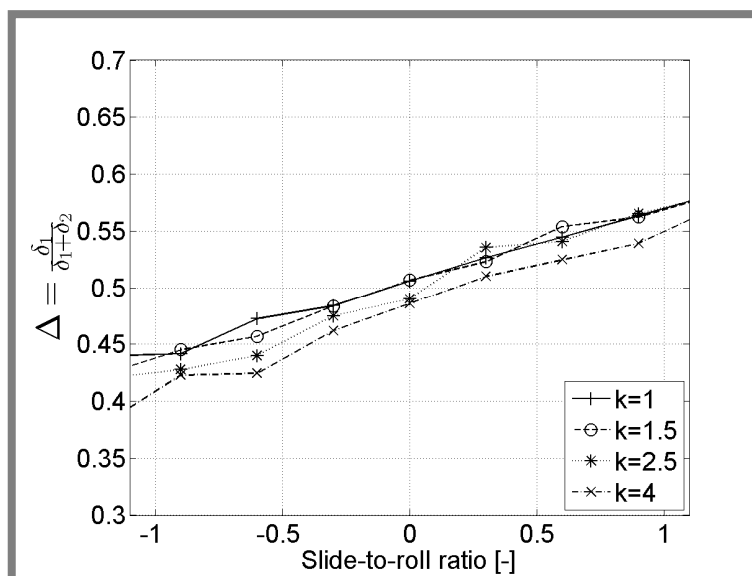
Výsledky z tohoto měření lze vidět v grafu na Obr. 6.20. Maximální odchylka měření dvou hodnot, která je zde vidět, je asi 6 % a to ještě pro nejvyšší poměr *SRR*. To je zhruba stejná hodnota, jako je hodnota opakovatelnosti měření. Lze konstatovat, že je vliv geometrie na poměr Δ zanedbatelný, nebo minimálně touto metodou neměřitelný.

6.4.6. Vliv vlastností maziva

Jelikož se v hlavní části počítá s měřením pro několik různých maziv, byl studován i možný vliv viskozity či povrchového napětí na poměr Δ . Experimenty byly provedeny pro 4 různé oleje, které jsou uvedeny v Tab. 5.1 (vyjma Spectrasynu). Mechanismus měření povrchového napětí je uveden v kapitole 5.1.7.

Na Obr. 6.21 lze vidět, že ani rozdílné viskozity a povrchová napětí pro různá maziva nezpůsobí podstatnější změnu. Nejmenší změna je zde

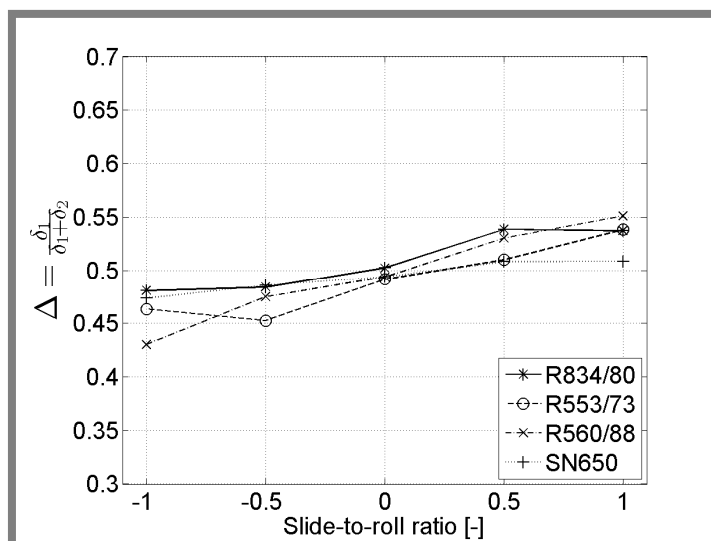
vidět pro mazivo SN650. Pro krajní hodnoty SRR se Δ změní od 0,47 do 0,51. Maximální rozdíl byl naměřen pro mazivo R560/88, kde je změna od 0,43 do 0,55. Jelikož se jedná o nejviskóznější mazivo, tak by se dalo odvodit, že viskozita bude řídící parametr. Se snižující se viskozitou u dalších maziv se ovšem tato domněnka nepotvrdila. Nelze tedy jasně říci, že by zde byla nějaká zřejmá závislost.



Obr. 6.20 Poměr delta pro 4 různé elipticity v závislosti na SRR [68]

6.4.7. Vliv geometrie povrchů

Pro měření tloušťky maziva na vstupu kontaktu dle konceptu v Obr. 5.2 se bude využívat zejména soudečků s různou geometrií. Proto je vhodné vědět, jestli rozdílná geometrie neovlivní poměr tloušťek maziva na kontaktních plochách na výstupu kontaktu. Jiná elipticita soudečku poskytuje při stejných provozních podmínkách jiný tvar kontaktní oblasti a jiné kontaktní tlaky. Pro měření se počítá s využitím soudečků s elipticitou $k = 1; 1.5; 2.5$ a 4 . Stejně soudečky tudíž byly použity i pro měření v této části. Druhé kontaktní těleso byl vždy stejný kovový disk. Pro tato měření byl zvolen minerální olej R860/88. Střední rychlost byla stejná pro všechny body $u_m = 220$ mm/s.



Obr. 6.21 Poměr delta pro 4 různá maziva v závislosti na SRR [68]

6.4.8. Kapilární číslo a porovnání s teorií

V této části je cílem experimentálně zjištěné chování dělené dle jednotlivých vlivů v předchozích kapitolách sjednotit pomocí jednoho parametru do jednoho grafu a porovnat s teorií. Tímto parametrem by mohlo být kapilární číslo, jak bylo definováno v teoretickém článku ohledně této problematiky. To se vypočítá podle vztahu 6.2.

$$Ca = \frac{\eta_0 \cdot U_m}{\sigma} \quad 6.2$$

- Ca – Kapilární číslo
- η_0 – viskozita při atmosférickém tlaku
- U_m – střední rychlost
- σ – Povrchové napětí

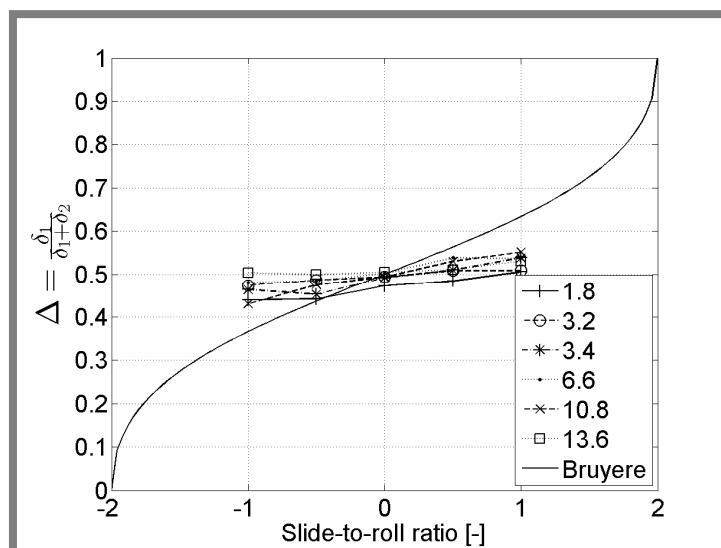
Kapilární číslo tedy zahrnuje všechny parametry, až na vliv geometrie. Tento parametr zde tedy nebude uveden. Konkrétní podmínky jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Podmínky experimentů a výsledná kapilární čísla

Označení výrobce	Dynamická viskozita pro 22°C [Pas]	Povrchové napětí [Nmm ⁻¹]	Střední rychlost u_m [ms ⁻¹]	Ca [-]
R834/80	0,2	6,6	0,22	6,6
R834/80	0,2	6,6	0,06	1,8
R834/80	0,2	6,6	0,45	13,6
R533/73	0,64	41,6	0,22	3,4
R560/88	1,4	28,5	0,22	10,8
SN650	0,45	31	0,22	3,2

Výsledky popsané parametrem Ca jsou zobrazeny na Obr. 6.22. experimentální výsledky jsou rozptýleny od 0,43 po 0,5 pro $SRR = -1$ a od 0,51 po 0,55 pro $SRR = 1$. Nejvyšší rozdíl je vidět u případu s kapilárním číslem 10,8, kde je rozdíl mezi $SRR = -1$ a 1 kolem 0,12. Nejnižší rozdíl s hodnotou 0,03 byl ovšem naměřen pro kapilární číslo 13,6. Ani u ostatních čísel není pozorovatelný jasný trend. Z tohoto lze usoudit, že kapilární číslo není určujícím parametrem tohoto chování, což potvrzuje tvrzení z literatury.

Vztah mezi Δ a SRR prezentovaný Bruyerem [48] je vykreslen pro porovnání do téhož grafu. Jelikož teorie popisuje chování na celém intervalu provozních podmínek $SRR = -2 - 2$ a $\Delta = 0 - 1$, tak jsou v tomto grafu za účelem porovnání rozšířeny osy tak, aby tyto podmínky pokryly. Díky tomu již nejsou jednoduše rozpoznatelné rozdíly mezi jednotlivými měřeními, nicméně závěr z této části je zřejmý. Chování popsané teoreticky bylo potvrzeno. Pomalejší ze dvou povrchů opouštějících kontaktní oblast obsahuje menší množství maziva než ten rychlejší. Při experimentech byla tato závislost ovšem pozorována ve znatelně menší míře, než je tomu u teorie.



Obr. 6.22 Poměr delta pro 6 různých kapilárních čísel v závislosti na SRR a porovnání s teorií. [68]

6.4.9. Obecný závěr a shrnutí

Tato práce se zabývala studiem a popisem poměru Δ , ve kterém se dělí mazivo opouštějící kontakt mezi dva povrchy kontakt vytvářející. Předpoklad pro čisté valení byl potvrzen, tedy vrstva se dělí rovnoměrně mezi dva povrchy. Poměr Δ je tedy 0,5. Pro podmínky nenulového skluzu, tedy $SRR \neq 0$ by mělo docházet k přesunu části maziva z pomalejšího povrchu na rychlejší a to až do podoby, kdy je pro čistý skluz ($SRR = 2;-2$) všechno mazivo odnášeno pohybujícím se povrchem. Tento extrém studován nebyl, ale již i pro $SRR = 1$ bylo chování potvrzeno. Trend je ovšem mnohem mírnější. Pro porovnání lze rozdíl vyčíslit. Poměr pro $SRR = 1$ je dle teorie 0,63. Průměrná hodnota z experimentů je 0,53. Pro $SRR = -1$ teorie stanovuje poměr 0,37, ale při experimentech byla průměrně zjištěná hodnota rovna 0,48. Výsledek se nezdá být závislý ani na jednom ze studovaných vlivů jako povrchové napětí maziva, viskozita, střední rychlost či geometrie povrchů.

6.4.10. Závěry pro potřeby řešení disertační práce

Tato práce byla realizována zejména pro potvrzení předpokladu, že je mazivo po průchodu kontaktem rovnoměrně děleno mezi dva povrchy. Pro čisté valení byla tato premisa potvrzena a díky tomu lze použít koncept pro měření tloušťky maziva na vstupu kontaktu (h_{oil}).

Bylo ovšem zmíněno, že zařízení, na kterém toto měření bude probíhat, vykazuje drobnou úroveň skluzu způsobenou nepoháněným valivým elementem. Tento prokluz byl měřením vyčíslen na 4%. To znamená, že povrch valivého elementu se otáčí o 4% pomaleji, než povrch disku. Převáděno na hodnotu skluzový poměr se jedná o hodnotu

$SRR = 0,04$. Poměr Δ vyčíslený pro tuto hodnotu SRR na základě průměrných experimentálních výsledků odpovídá hodnotě 0,50043. Pokud by tato hodnota byla zahrnuta do korekce pro výpočet h_{oil} z tloušťky filmu prvního kontaktu, tak by výpočet dle vztahu 5.1 byl změněn za vztah 6.3.

$$h_{oil} = 0,50043 \cdot (h_{c1} + h_{c2}) \quad 6.3$$

Výsledné ovlivnění tloušťky, pro běžně měřené hodnoty filmu, je na úrovni setin nanometrů, což je zanedbatelné. Závěrem tedy lze konstatovat, že je potvrzeno dělení maziva na dvě stejné poloviny pro čisté valení i pro mírné skluzy způsobené přenosem trakční síly přes vrstvu maziva v kontaktu.

6.5. Vliv tloušťky maziva na vstupu kontaktu na úroveň hladovění

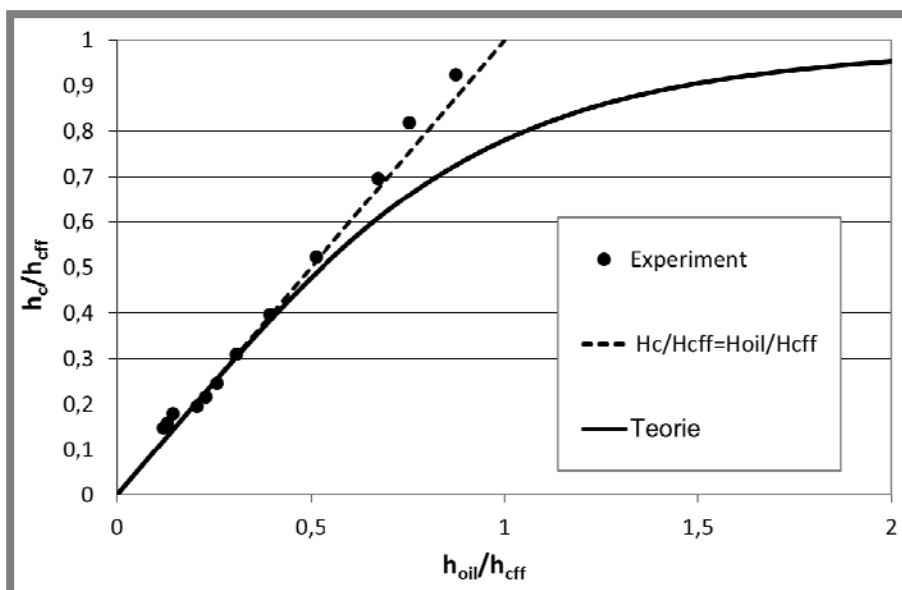
Některé výsledky z této oblasti již byly realizovány a publikovány v časopisu *Tribology International* [54]. Jelikož se již týkají hlavní části této disertační práce, budou zde ty důležité postupně uvedeny a popsány. Hlavním cílem je experimentální popis chování hladovějícího kontaktu na základě změny parametru h_{oil} teoreticky popsaného Chevalierem [9].

6.5.1. Konstantní množství maziva

Experimenty v této části byly prováděny za podmínek konstantního množství maziva. Před kontakt bylo pomocí mikropipety nadávkováno 28 μl maziva, které bylo použito pro celou dobu experimentu. Po ukončení dávkování byla prodleva několik minut, dokud nebylo mazivo rovnoměrně rozprostřeno na kontaktních površích.

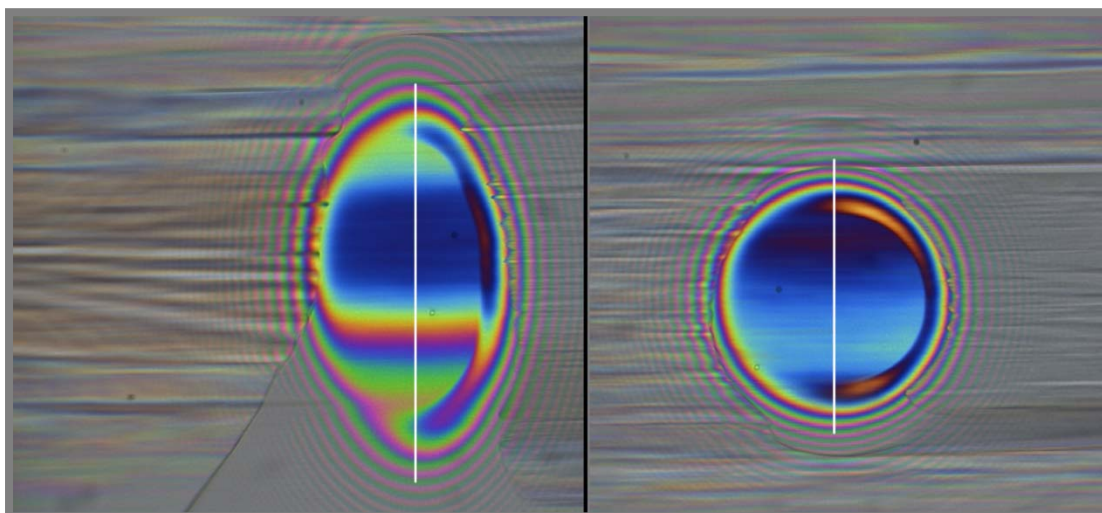
Jako první element byl zde využit soudeček, který poskytuje mnohem širší stopu v mazivu, než by tvořila koule. Díky omezenému množství maziva ovšem i první kontakt vykazoval známky hladovění. Stabilita tloušťky mazacího filmu v kontaktu je při hladovění poměrně nejistá, jelikož se bez dodávek nového maziva stále snižuje. Z toho důvodu byly všechny snímky dvojice prvního a druhého kontaktu neprodleně opakovány a byla sledována případná změna mezi hodnotami.

Výsledky experimentu, které jsou vidět na Obr. 6.23, jsou porovnány s teoretickou predikcí vytvořenou Chevalierem [9].



Obr. 6.23 Experimenty s konstantním množstvím maziva - porovnání s teorií. [54]

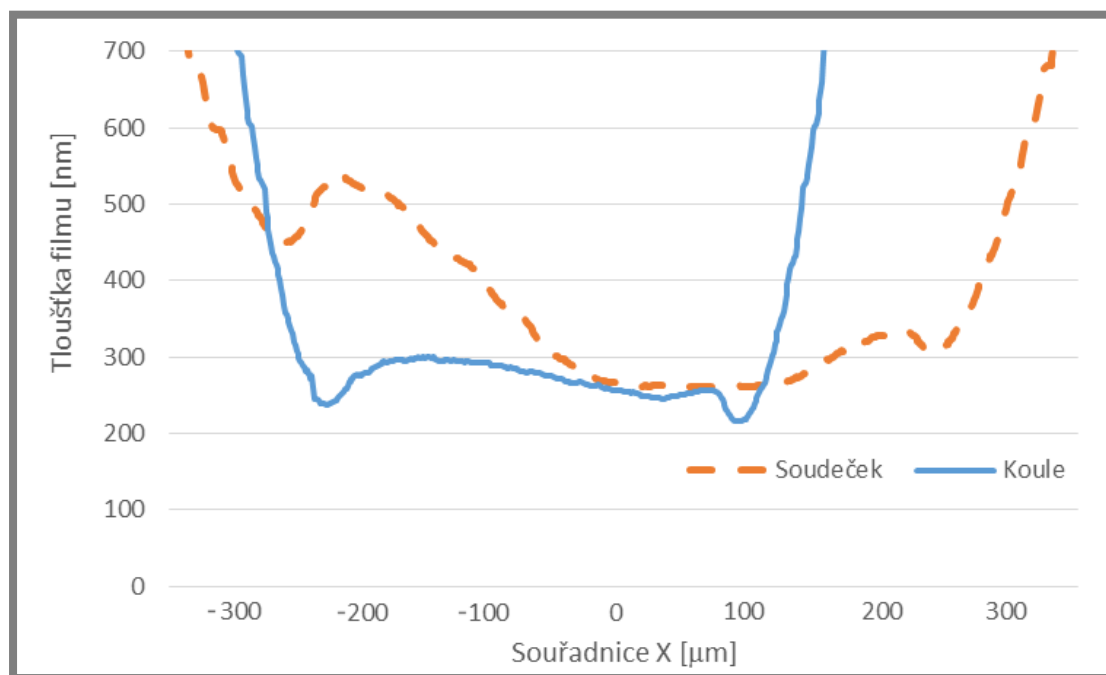
Na grafu jde vidět, že zhruba do hodnoty $h_{oil}/h_{cff} = 0,5$ je shoda výsledků s teorií výborná. Od této chvíle ovšem nikoliv. Nad hodnoty 0,6 byla již špatná opakovatelnost, což bylo přisuzováno vzájemnému ovlivnění kontaktů v obou směrech. První kontakt sice druhý ovlivnit má, naopak ovšem ne a k tomu právě pravděpodobně docházelo. První kontakt byl ovlivněn stopou, která byla vytvořena kontaktem druhým. Tento vliv lze pozorovat na Obr. 6.24. Na tomto obrázku jde vidět i stopa, která je vytvořena druhým kontaktem. Díky této stopě je část kontaktu soudečku hladovějící a část se chová téměř jako plně zaplavená.



Obr. 6.24 Ukázka ovlivnění prvního kontaktu druhým

Při pohledu na řezy, které jsou vytvořeny v místě bílých čar v Obr. 6.24 a zobrazeny na Obr. 6.25 jde jednoznačně vidět, že profily nejsou symetrické. Zejména nárůst tloušťky u levé strany profilu soudečku je

výrazný. Tento nárůst je způsoben profilem stopy na vstupu kontaktu soudečku a disku.



Obr. 6.25 Ukázka profilů filmu v sousledných kontaktech

Pro druhý kontakt není vliv změny tloušťky natolik patrný, jelikož celý kontakt koule se vyskytuje ve stopě, kterou vytvořila Hertzova oblast kontaktu soudečku. Kontakt soudečku je naopak ovlivněn mnohem více, jelikož vstupní vrstva maziva již obsahuje i části profilu, které kouli obtékaly mimo tlakovou oblast a zde je tloušťka podstatně vyšší, již v řádech jednotek mikrometrů.

Hlavní problém, který doprovází toto chování je jednak jeho dynamická povaha, která způsobí fluktuaci filmu v čase, ale hlavně neschopnost určit hodnotu h_{oil} . Ta vychází z centrální tloušťky prvního kontaktu, která v takovémto případě není jednoznačná. Konkrétně vyčísleno se u ukázkového profilu centrální tloušťka kontaktu mění mezi 250 – 500 nm.

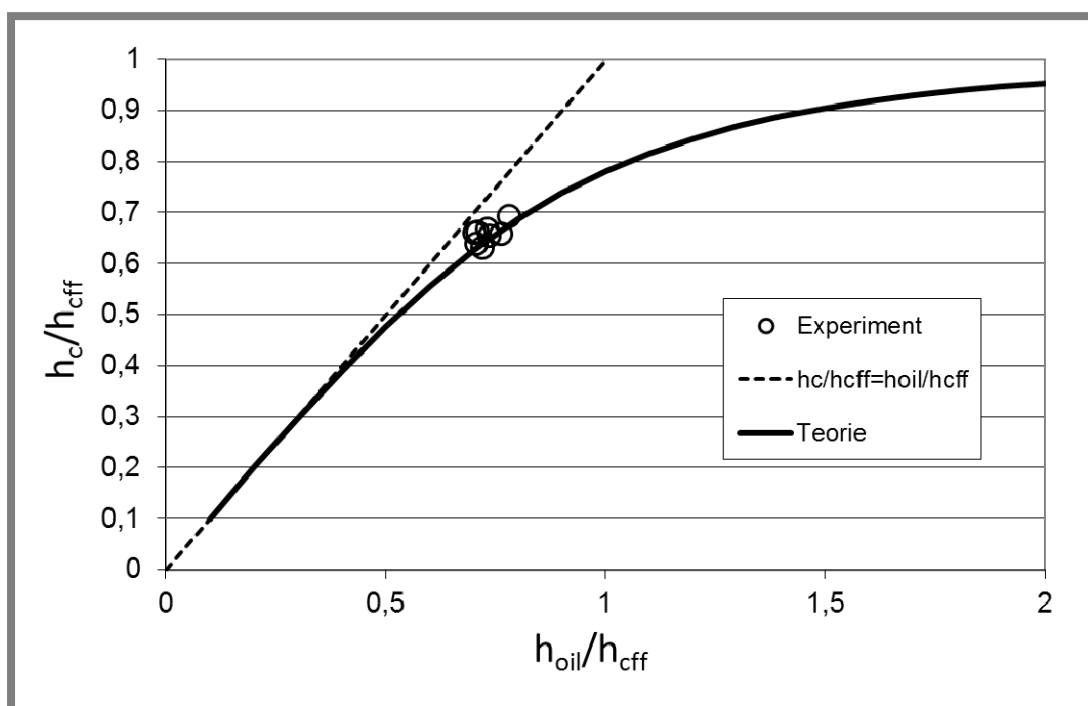
Z důvodu příliš vysoké nejistoty tohoto způsobu měření byla upravena koncepce tohoto měření, která je podrobněji popsána v další kapitole.

6.5.2. Kontinuální dodávka maziva

V této části je problém s nehomogeností distribuce tloušťky filmu prvního kontaktu řešen nepřetržitou dodávkou nového maziva. Zařízení je tedy provozováno v konfiguraci dodávka maziva – první kontakt – druhý kontakt – stírač maziva. Tím se docílí stabilních podmínek a současně je po

setření maziva a dávkování nového pomocí pumpy vytvořena nová, stálá vrstva maziva.

První experimenty při konstantní konfiguraci vzdálenosti a pouze změně valivé rychlosti obou elementů jsou ukázány na Obr. 6.26. Z výsledků těchto experimentů je patrné, že jsou sice v dobré shodě s teorií, nicméně popisují velmi omezenou část celého rozsahu operačních podmínek teoretické křivky a to i přesto, že byl použit rozsah rychlostí od 0,01 do 0,1 m/s. Je tedy zřejmé, že pouhou změnou valivé rychlosti nelze docílit popsání širšího rozsahu operačních podmínek.

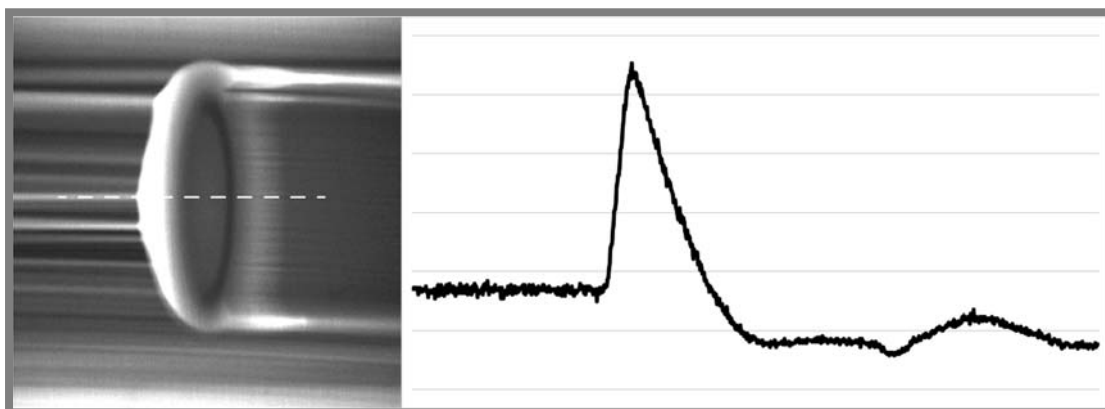


Obr. 6.26 Experimenty s kontinuální dodávkou maziva - porovnání s teorií [54]

Celý problém pravděpodobně spočívá ve faktu, že díky neustálé dodávce nového maziva je první kontakt plně zaplaven, což je rozdíl od předchozí verze. V té byl i první kontakt mírně hladovějící. To sice snížilo opakovatelnost experimentů, nicméně zvětšilo rozsah podmínek, který se dá pomocí jedné série experimentů pokrýt. Pokud je totiž první kontakt plně zaplaven, jak je tomu v tomto případě, tak dojde při jakékoliv změně valivé rychlosti k poměrově adekvátní změně tloušťky obou dvou kontaktů. Díky tomu poté vychází téměř stejný bod v grafu.

Během experimentů s dávkováním maziva se prokázalo, že i minimální množství maziva, které je pumpa schopna dodávat, stačí prvnímu kontaktu k tomu, aby byl téměř plně zaplaven, či velmi blízko tomuto režimu. Z experimentů realizovaných při kontinuálním dávkování maziva a měřených pomocí fluorescence je patrné, že množství maziva

před prvním kontaktem je dostačující pro jeho fungování téměř v plně zaplaveném režimu.



Obr. 6.27 Ukázka profilu mazacího filmu soudečku při dávkování minimálního množství maziva

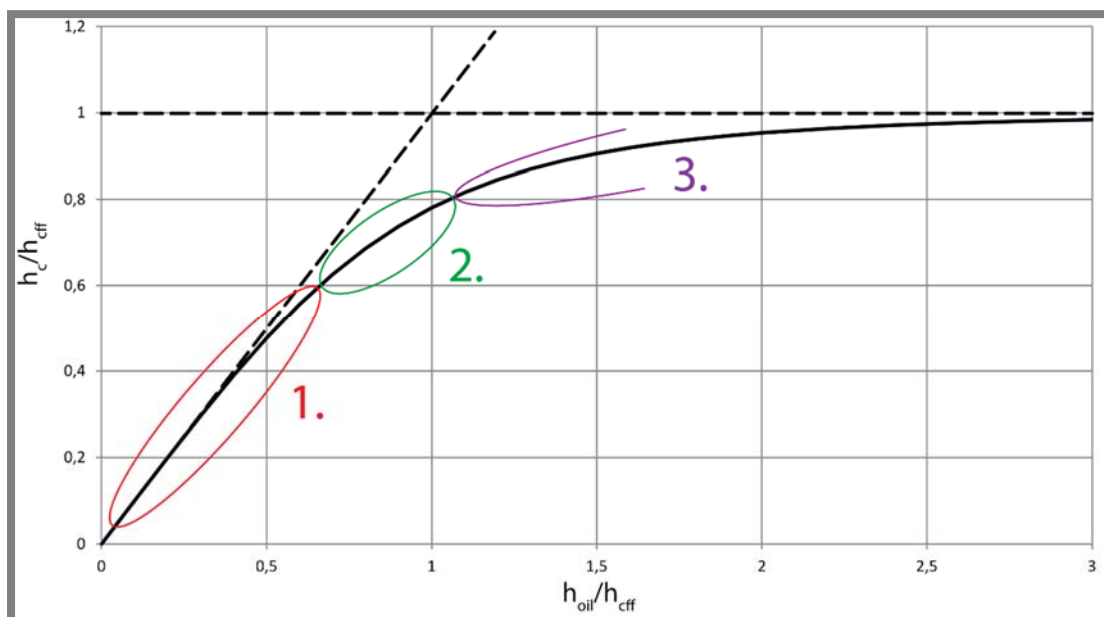
Profil z experimentu, včetně originálního snímku, je vyobrazen na Obr. 6.27. Na tomto snímku je dávkování maziva realizováno na levé straně před kontaktem. Vektor valivé rychlosti směřuje doprava. Na snímku je zřetelně vidět kontaktní oblast s konstrikcí, které předchází vysoká vrstva maziva, která je dostačující pro generování tloušťky odpovídající plně zaplaveným podmínkám. Konkrétní hodnoty nejsou kalibrovány, takže je lze brát pouze relativně. Pro názornost je to ovšem dostačující.

Dávkování maziva bylo při tomto experimentu nastaveno na $0,2 \mu\text{l}/\text{min}$. Při snížení dávkování na nižší hodnoty ovšem již nedošlo ke snížení množství maziva před kontaktem a ani k poklesu centrální tloušťky. To si lze vysvětlit tak, že stírač není schopen již takto tenké filmy efektivně odstranit. Samotný stírač je totiž tvořen silikonovou stěrkou s vlastní geometrií, která je přitlačována pomocí pružiny k ploše disku. Nejedná se tedy samozřejmě o ostrý břit a díky tomuto tvaru lze popsat kontakt stírače a skleněného disku podle teorie soft-EHD mazání jako kontakt poddajných těles s izoviskózním chováním maziva. Nedá se tedy očekávat, že by stírač odstranil všechno mazivo, jako že spíše vytvoří vrstvu maziva.

6.5.3. Způsob realizace experimentů v maximálním rozsahu

Díky této informaci lze doplnit koncepci o nový přístup. Popsání celé teoretické křivky v rozsahu experimentálně dosažitelných podmínek lze realizovat kombinací tří typů experimentů. Orientační umístění oblastí je znázorněno v grafu na Obr. 6.28.

- 1) Jednoduchá modifikace experimentu s konstantním množstvím maziva umožní popis nízkých hodnot h_{oil} . Zde je ovšem potřeba řešit problém s opakovatelností měření způsobený nehomogenitou distribuce tloušťky mazacího filmu prvního kontaktu, který je hladovější. To lze realizovat pomocí, v předchozí kapitole popsaného, stírače. Ten funguje jako třetí kontakt, který lze zařadit do systému a použít pro re-distribuci maziva, které již prochází kontaktem na disku a po výstupu z kontaktu mezi druhým elementem a diskem je velmi nestejnorodě distribuováno na disku, co se týče profilu ve směru kolmém ke směru valení. Stírač sice díky vlastní geometrii také vytvoří jisté nestejnorodosti, nicméně ty jsou podstatně nižšího řádu, než je tomu u pouhého použití dvou kontaktů.
- 2) Střední oblast h_{oil} bude popsána pomocí experimentů s plně zaplaveným prvním kontaktem pomocí dávkování maziva před kontakt a odebírání maziva stíračem. Širší rozsah hodnot tloušťky maziva na vstupu h_{oil} lze zajistit pomocí použití soudečků s různou geometrií a změnou zatížení kontaktu.
- 3) Pro tvorbu vyšších hodnot tloušťky h_{oil} , než lze vytvořit podle bodu 2, je využito zvýšení valivé rychlosti prvního kontaktu pomocí nezávislého pohonu prvního elementu. Kvůli společné rychlosti pro oba elementy pak na prvním elementu vzniká výrazný skluz. Přídavným pohonem v provizorním uspořádání je pomocí stejnosměrného motoru poháněn první element. Rychlost na povrchu elementu je vyšší, než je tomu u disku, čímž dojde ke zvýšení střední hodnoty rychlosti u_m a tím i celkovému navýšení tloušťky mazacího filmu. V tomto uspořádání je ovšem již zapotřebí kompenzovat změnu poměru tloušťek maziva na výstupu kontaktu dle kap. 6.4. Kvůli nutnosti této kompenzace je tato možnost využita až pro podmínky, které již nelze realizovat pomocí metod v bodě 1 a 2, přestože by pomocí ní bylo možné realizovat pravděpodobně téměř celý rozsah.

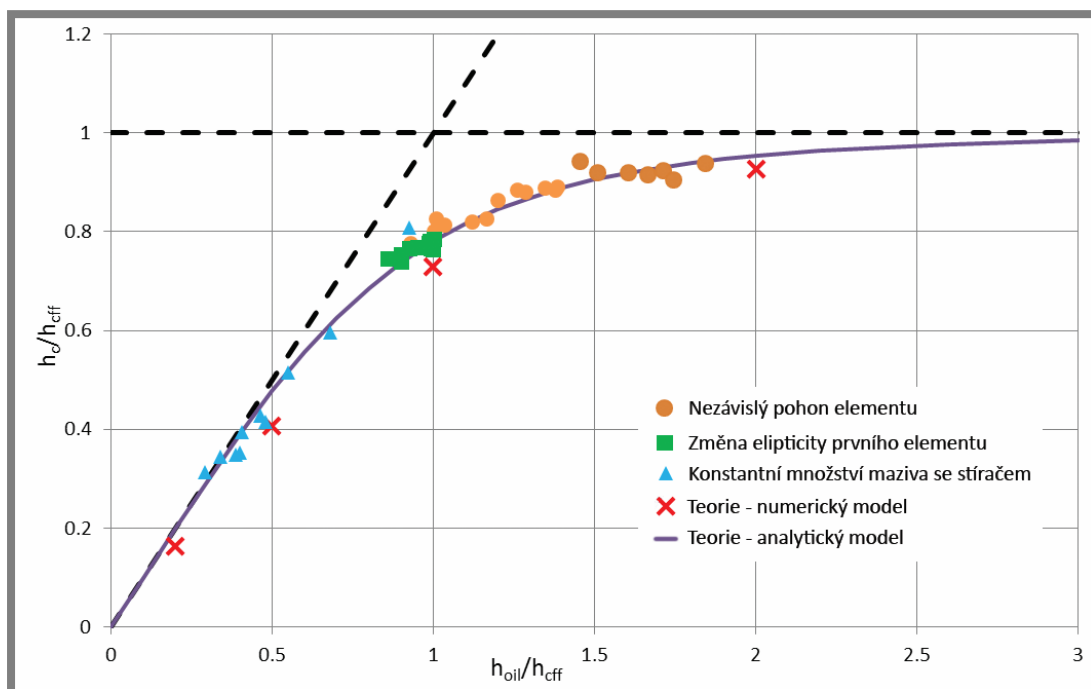


Obr. 6.28 Znázornění oblastí s různým experimentálním přístupem

Výsledky z těchto tří typů experimentů jsou zkombinovány do jednoho grafu na Obr. 6.29.

V tomto grafu jsou uvedeny i teoretické predikce. Čárkovanou čarou je vyznačeno předpokládané teoretické chování při izo-viskózním režimu, plnou čarou je znázorněna predikce chování reálného kruhového EHD kontaktu. Červené křížky pak uvádí numerickou predikci stejného autora pro srovnatelné podmínky. V tomto grafu jsou vyneseny výsledky numerického modelu pro podmínky s Moesovými parametry $L = 10$ a $M = 100$. Tyto výsledky jsou zde uvedeny, jelikož jsou nejbližší podmínkám, při kterých byly realizovány experimenty. Konkrétně vypočtené Moesovy parametry dle parametrů experimentu jsou $L = 9,75$ a $M = 119$. Autoři v článku uvádí, že je vliv těchto parametrů na chování kontaktu minimální, takže je drobná odchylka hodnot považována za přijatelnou pro porovnání teorie a experimentů.

Experimentální výsledky jsou zobrazeny modrými trojúhelníky pro data obdržena metodou 1. Zelené čtverce jsou pak obdrženy za pomoci metody 2, čili změnou elipticity prvního kontaktu a oranžové kroužky jsou vykresleny pomocí nezávislého pohonu prvního elementu (metoda dle odstavce 3 kap. 6.5.3).



Obr. 6.29 Závislost mezi tloušťkou maziva na vstupu a centrální tloušťkou

6.5.4. Zpracování dat

Nutno ještě zmínit, že na osách uvedených grafů jsou uvedena malá písmena h , což znamená konkrétní hodnoty tlouštěk filmů. V teoretických studiích se téměř vždy uvádí velká H , což jsou hodnoty bezrozměrných tlouštěk. Pro převod na bezrozměrné hodnoty se musí změřená tloušťka filmu podělit hodnotou redukováného parametru křivosti, který je v tomto případě $6,35 \times 10^{-3}$. Jelikož jsou ovšem na obou osách dvě tloušťky v poměru, stejně by došlo ke zkrácení této proměnné. Z toho důvodu je uváděna konkrétní hodnota tloušťky.

V tomto grafu jsou uvedeny výsledné hodnoty tlouštěk tak, jak byly naměřeny. Pro přesné vyhodnocení je ovšem nutné data kompenzovat na dva vlivy.

Vliv prokluzu

Prokluz prvního elementu použitý pro navýšení tloušťky mazacího filmu. Tato část se týká pouze dat, která jsou získána pomocí aparatury s poháněným elementem (viz. Sekce 3 na Obr. 6.28). Zavedení prokluzu ovlivní vzorec použitý pro výpočet h_{oil} . Ostatní hodnoty zůstanou nedotčeny. Díky tomu dojde k posunu datových bodů v grafu doprava či doleva.

Korekce byla provedena následovně: Byla známá pouze rychlost disku a tloušťka mazacího filmu. Rychlost druhého povrchu, soudečku, známá nebyla, jelikož pro jeho pohon bylo použito provizorní uspořádání se stejnosměrným elektromotorem bez resolveru. Zprv bylo tedy nezbytné dopočítat rychlost druhého povrchu. Na základě naměřených

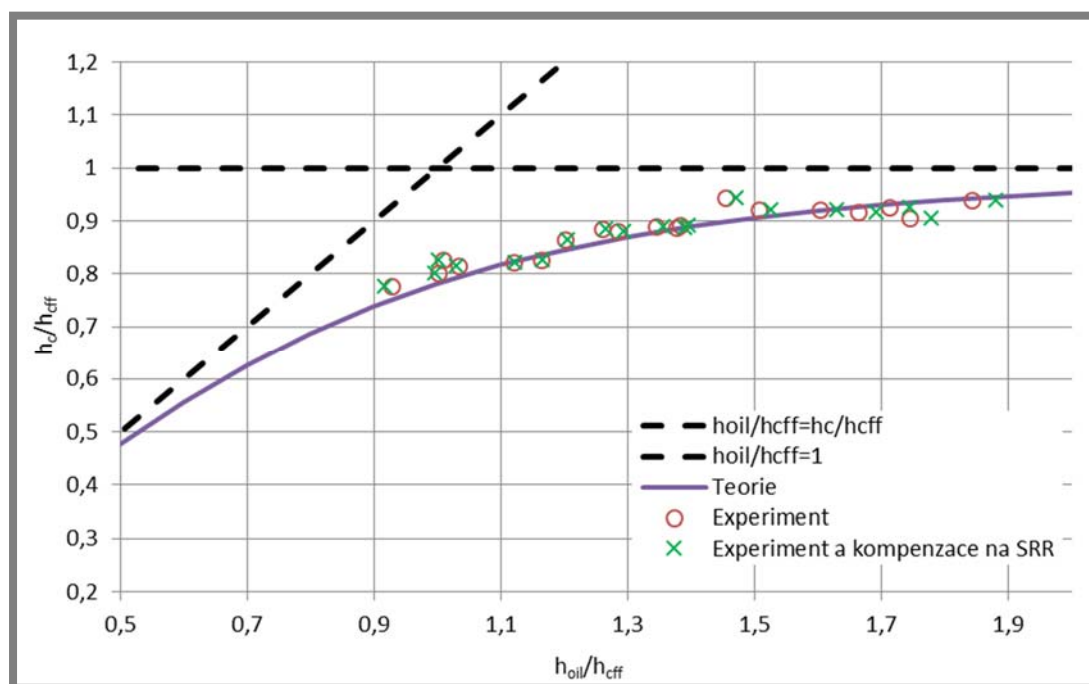
tloušťek na prvním elementu pro známou konstantní rychlost a známý průběh tloušťky na rychlosti za stejných podmínek byla určena ekvivalentní střední rychlost pro každý bod. Tloušťka filmu je totiž definována zejména střední rychlostí. Skluzový poměr ji nijak významně neovlivňuje. Při známé střední rychlosti, které odpovídá daná tloušťka filmu, bylo možné dopočítat rychlost povrchu soudečku. Z těchto dvou hodnot již lze určit SRR . Z kapitoly 6.4, popisující poměr dělení maziva na površích, byl použit výsledný poměr Δ pro danou hodnotu SRR , který byl vyjádřen do empirického vztahu 6.4.

$$\Delta = 0,0108 \cdot SRR + 0,5 \quad 6.4$$

Zahrnutím parametru Δ byl upraven vztah 5.1 do podoby vztahu 6.5. Samozřejmě se zde uvažuje skluzový poměr SRR prvního kontaktu. Druhý kontakt je v každém experimentu pouze v režimu čistého valení, tedy $SRR = 0$. Mohli bychom sice zahrnout změřený 4% skluz o hodnotě $SRR = 0,00043$, ten je ovšem, jak již bylo uvedeno, zanedbatelný.

$$h_{oil} = h_{c1} \cdot (0,0108 \cdot SRR + 0,5) + h_{c2} \cdot 0,5 \quad 6.5$$

V grafu na Obr. 6.30 je zobrazena změna hodnot h_{oil} při použití vztahu 6.5 namísto 5.1. Současně s tím je lehce zúžen rozsah os, aby byla změna polohy bodů názornější. Z grafu je patrné, že nenulový skluzový poměr prvního elementu sice vliv má, tento vliv je ovšem minimální. I přesto budou dále uvedené výsledky takto kompenzovány.



Obr. 6.30 Vliv SRR na hodnotu h_{oil}

Vliv stlačitelnosti maziva

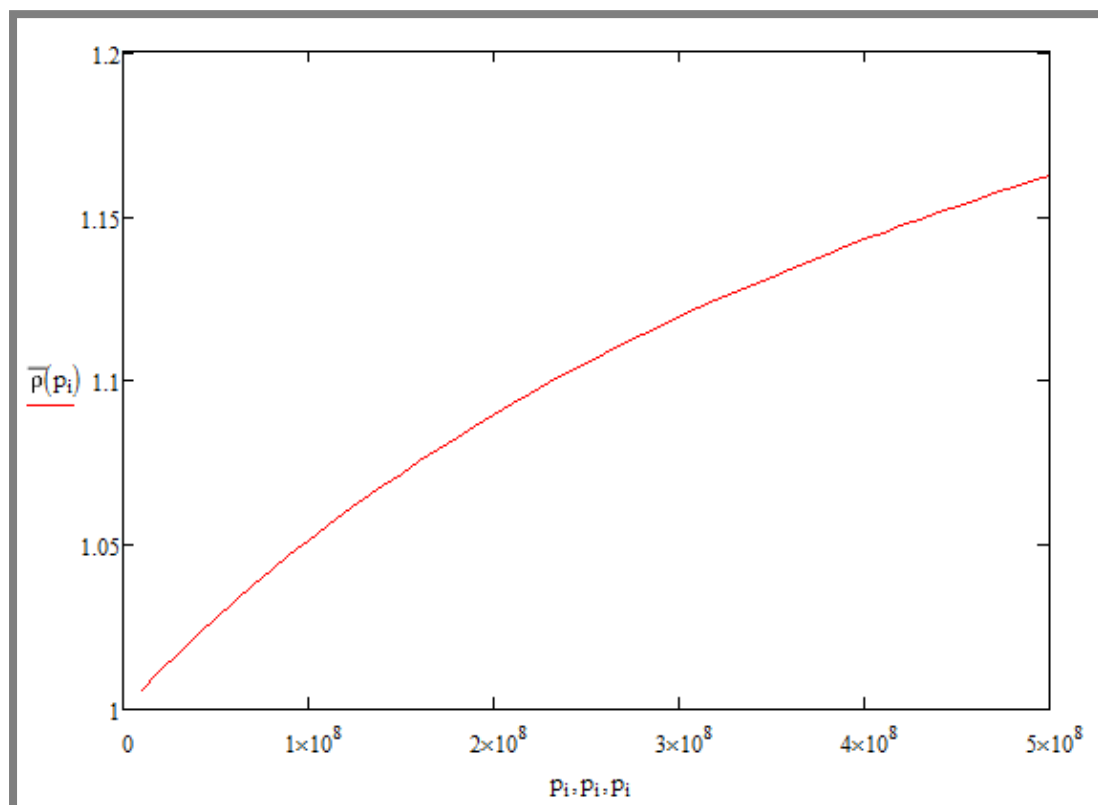
V této části je zvažován vliv stlačitelnosti maziva. Výsledky v grafu na Obr. 6.29 tento vliv neuvažují. V rámci konceptu tento vliv také uvažován původně nebyl, jelikož bylo počítáno se zařazením dvou stejných elementů do jedné valivé dráhy. V takovém případě by měla tloušťka prvního kontaktu vliv na parametr h_{oil} vztahu 5.1. pokud ovšem první element vyměníme za soudeček, tak dochází k nestejnorodosti vzhledem k jinému kontaktnímu tlaku v prvním a druhém kontaktu. Pokud by oba kontakty obsahovaly stejný kontaktní tlak, tak by to neznamenovalo problém, v konfiguraci se soudečkem tomu tak ovšem není. V kontaktu s elipticitou $k > 1$ (širší kontakt v příčném směru) je obecně nižší tlak, než je tomu u kruhového kontaktu ($k = 1$).

Větší efekt ovšem může mít vliv stlačení maziva v kontaktu vzhledem k volné vrstvě před kontaktem. Hodnota h_{oil} je totiž v literatuře uváděna za atmosférického tlaku, tudíž nestlačená, jako je tomu v kontaktu. Pokud chceme porovnat výsledky s literaturou, musíme vliv stlačitelnosti maziva zahrnout do mechanismu výpočtu h_{oil} .

Pro kompenzaci stlačitelnosti v rámci této práce je využit vztah podle Dowson-Higginsona (6.6), který je vytvořen pro předpověď změny hustoty minerálních olejů v závislosti na tlaku, což je v souladu s použitými mazivy.

$$\rho(p) = \left(1 + \frac{0,6 \cdot 10^{-9} \cdot p}{1 + 1,7 \cdot 10^{-9} \cdot p} \right) \quad 6.6$$

Vztah mezi tlakem a hustotou maziva je vykreslen v grafu na Obr. 6.31. Tento vztah je dle některých publikací [70], [71] pro numerické simulace EHD problémů nepřesný, nicméně pouze pro korekci hustoty v závislosti na tlaku může být s přijatelnou chybou využit. Uvádí relativní hustotu maziva vůči atmosférickému tlaku v závislosti na kontaktním tlaku. Např. pro kontaktní tlak 0,3 GPa je relativní změna hustoty 1,12. Tuto hodnotu lze interpretovat tak, že tloušťka mazacího filmu v zatíženém kontaktu je o 12 % vyšší, než tloušťka maziva po výstupu z kontaktu.



Obr. 6.31 Vztah mezi hustotou maziva a tlakem

Korekce je provedena, stejně jako v případě SRR , vložením koeficientu do vztahu pro výpočet h_{oil} . Vztah se díky této korekci rozšíří do podoby dle rov. 6.7.

$$h_{oil} = h_{c1} \cdot (0,0108 \cdot SRR + 0,5) \cdot \bar{\rho}_1 + h_{c2} \cdot 0,5 \cdot \bar{\rho}_2 \quad 6.7$$

h_{oil} – tloušťka maziva na vstupu kontaktu za atmosférického tlaku

h_{c1} – změřená centrální tloušťka prvního kontaktu

h_{c2} – změřená centrální tloušťka druhého kontaktu

SRR – skluzově valivý poměr $SRR = (2 \cdot (u_1 - u_2) / (u_1 + u_2))$

$\bar{\rho}_1$ – relativní hustota dle Obr. 6.31 pro první kontakt

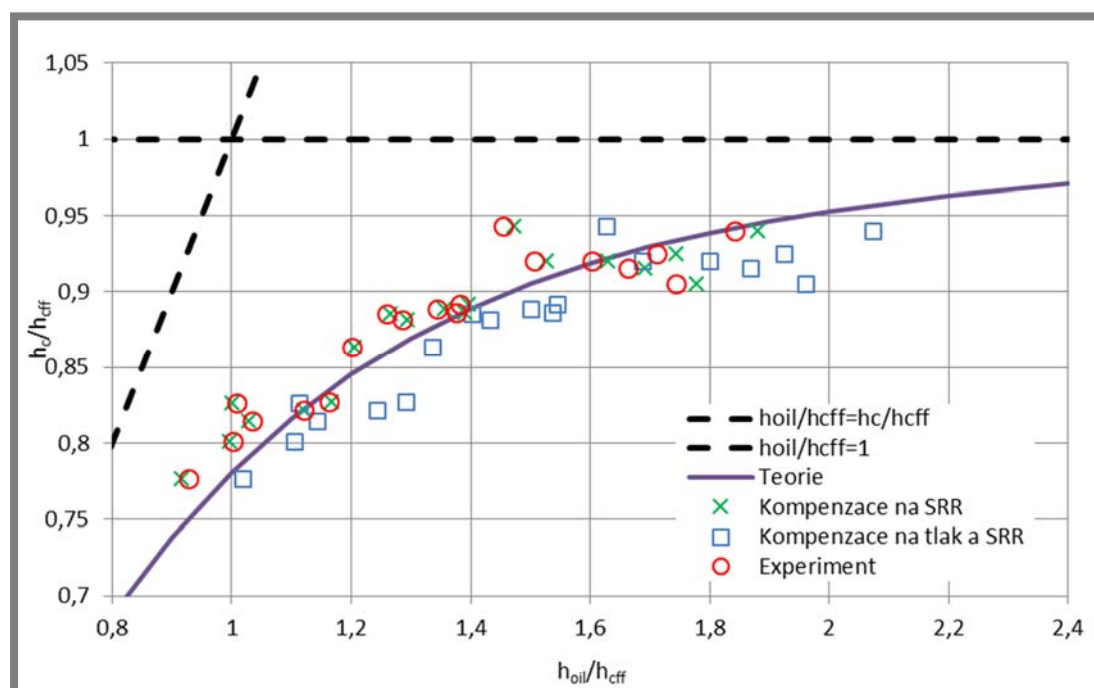
$\bar{\rho}_2$ – relativní hustota dle Obr. 6.31 pro první kontakt

Konkrétní hodnoty relativních hustot dle Obr. 6.31 jsou uvedeny v Tab. 6.2. Jsou zde uvedeny i hodnoty korekcí použité v následující kapitole. Pro některé valivé elementy bylo z praktických důvodů schopnosti realizace experimentů použité jiné zatížení, než pro jiné. Výsledné tlaky tudíž mezi sebou nejsou ekvivalentní z toho pohledu, že by se jednalo pouze o změnu geometrie.

Tab. 6.2 Seznam hodnot korekcí hustoty

elipticita (-)	velká poloosa (μm)	malá poloosa (μm)	maximální tlak (MPa)	relativní hustota (-)
0,44	84	191	808	1,20
1,00	164	164	481	1,14
1,83	248	136	383	1,14
2,06	368	179	196	1,09
3,99	520	130	191	1,09

Vztah je doplněn o obě nezbytné korekce a může být využit pro výpočet finální podoby výsledků. Tato korekce se, na rozdíl od korekce na *SRR*, týká všech datových bodů. Stejně jako v minulém případě ovšem korekce ovlivní pouze hodnotu h_{oil} . Tím pádem dojde k posunu datových bodů v grafu ve vodorovném směru.



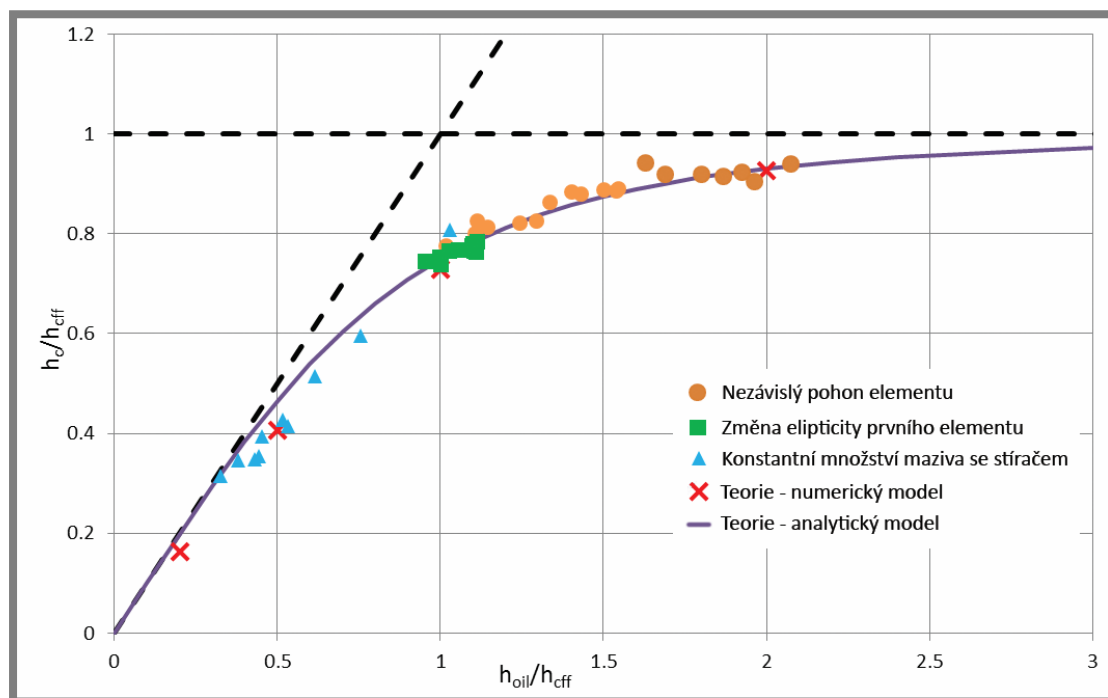
Obr. 6.32 Ukázka obou korekcí vůči originálním datům

Z grafu na Obr. 6.32 je patrné, že obě korekce ovlivňují jen vodorovnou polohu bodů. Rozsah os grafu byl v tomto obrázku značně omezen, aby byl patrný vliv korekcí. U *SRR* je korekce pro body z měření k nižším hodnotám h_{oil} v situacích, kdy byl zaveden prokluz s pomalejším soudečkem a naopak k vyšším hodnotám, pokud byl soudeček rychlejší, než disk. Pro korekci tlaku je posun vždy k vyšším hodnotám. Tloušťka

h_{oil} je totiž za atmosférického tlaku vždy vyšší, než je tomu v EHD kontaktu, ze kterého je odvozena. V některých situacích se tedy korekce téměř vzájemně eliminují, nicméně v jiných můžou značně ovlivnit výsledek.

Pokud porovnáme body před korekcí a po korekci, je zřejmé, že stejný efekt mělo v teoretické studii dělení výsledků relativní hustotou maziva. Tento vliv je vidět na rozdílu mezi Obr. 2.9 a Obr. 2.10. Obrázek Obr. 2.9 by měl odpovídat výsledkům po korekci, jelikož je zde uvažována stlačitelnost maziva. Naopak v grafu na Obr. 2.10 jsou výsledky za účelem objektivnějšího porovnání děleny relativní hustotou, což neguje vliv stlačitelnosti maziva. Posun dat, zejména v části hladovějícího kontaktu je obdobný.

Všechny další výsledky od tohoto bodu dál jsou již uváděny včetně uvažovaných korekcí. Výsledky z grafu na Obr. 6.29 doplněné o zmíněné korekce jsou vykresleny v grafu na Obr. 6.32.



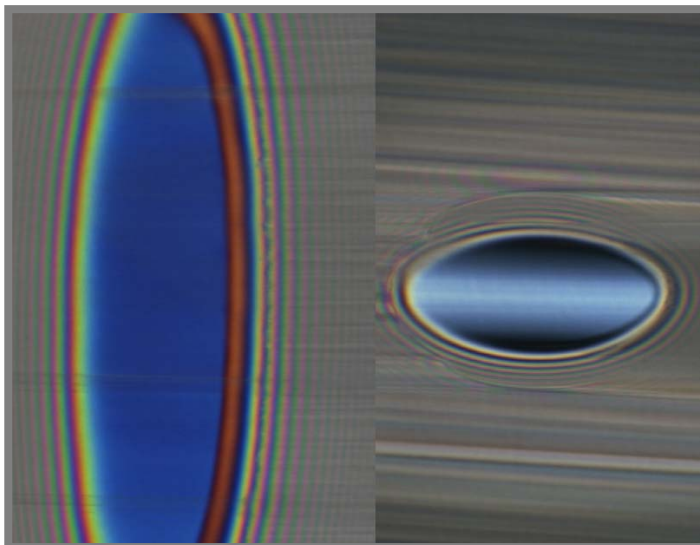
Obr. 6.33 Výsledky zkorigované na dva zmíněné vlivy (*SRR* a kompresibilita maziva)

6.6. Vliv parametru γ na závislost h_{oil} na h_c

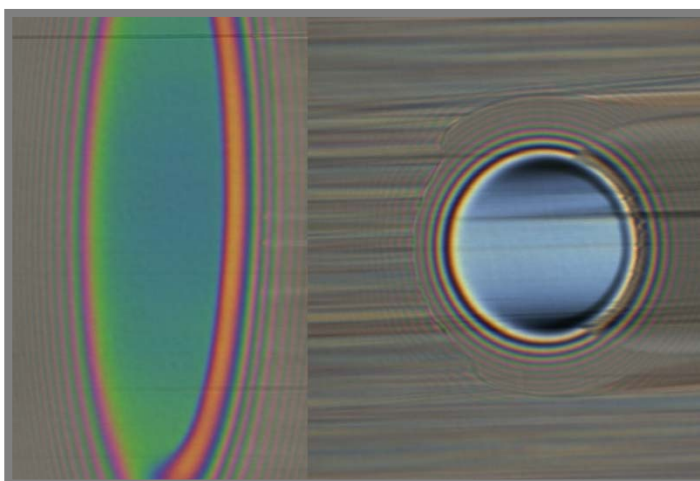
Z předchozí kapitoly vyplývá, že i pokud je před kontakt dodáváno 100% tloušťky maziva, která by byla v plně zaplaveném kontaktu, tak nebude kontakt pracovat v plně zaplaveném režimu, ale bude vykazovat zhruba o 20% nižší tloušťku. I pokud dodáme 150% maziva, tak stále nebude plně zaplaven. Toto zjištění, nyní ověřené experimentálně, je relativně překvapující při zjednodušené představě, že tok maziva v okolí blízkém vtoku do kontaktu, se odehrává jen ve směru valení. Mazivo se pohybuje ve všech třech osách a část objemu maziva má tendenci kontakt spíše obtéci, než projít skrz tlakovou oblast. Tento pohyb se označuje jako boční výtok maziva a je jedním z fundamentálních důvodů procesu hladovění. Čím je boční výtok větší, tím rychleji dochází k hladovění, jelikož velmi rychle dochází k nedostatku maziva ve valivé dráze a tudíž k dispozici pro tlakovou oblast.

Damiens ve své práci [1] popsal parametr γ , který byl poprvé využit Chevalierem [9] jako odpor proti bočnímu výtoku a definoval jej na základě kontaktní geometrie a provozních podmínek. Teoreticky je tedy popsáno, že eliptický kontakt, který má širší valivou dráhu, než kruhový, má nižší tendenci k vytlačování maziva do stran a tudíž má parametr γ vyšší hodnotu. To je poměrně logické, jelikož teoreticky lze pro liniový kontakt, který má $\gamma = \infty$, boční výtok zanedbat. Tento parametr se také používá v analytickém vztahu pro výpočet teoretické křivky, která je použita v grafu na Obr. 6.29. V tomto grafu je na základě teoretické práce zvolen parametr $\gamma = 2,8$ pro variantu bez korekcí a 2,4 pro korigovanou na *SRR* a stlačitelnost maziva, což je ve shodě s teorií.

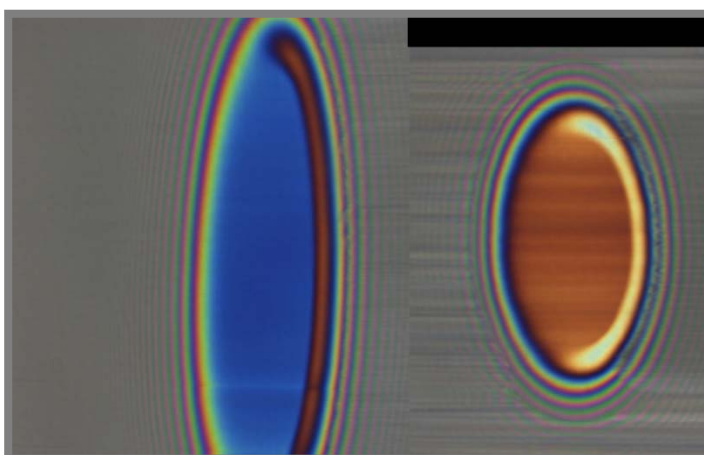
V této kapitole je dále popsána snaha o experimentální ověření vlivu parametru γ na závislost mezi vstupní vrstvou maziva a úrovní hladovění. Dle Obr. 2.15. nevede změna provozních podmínek M a L na výraznou změnu parametru γ . Závislost zde sice je, nicméně experimentální aparatura by umožnila změnu hodnoty $\sqrt{M/L}$ maximálně v rozmezí 1-5. Z grafu na obrázku je patrné, že by změna γ nebyla nijak významná a tudíž by se ani významně nezměnila popisovaná závislost. Rozdíl by byl pravděpodobně pod úrovní chyby měřící metody. Mnohem významnější by měla být změna geometrie valivého elementu za eliptický. V uvedeném článku [1] jsou elipticity uváděny v opačném poměru, $k < 1$ tedy znamená širší stopu. V této disertační práci je konvence opačná. Pokud jsou zvoleny vhodné soudečky namísto koule, která byla použita při všech předchozích experimentech, jako druhý kontakt, měl by být patrný rozdíl ve studované závislosti.



Obr. 6.34 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=0,44$)



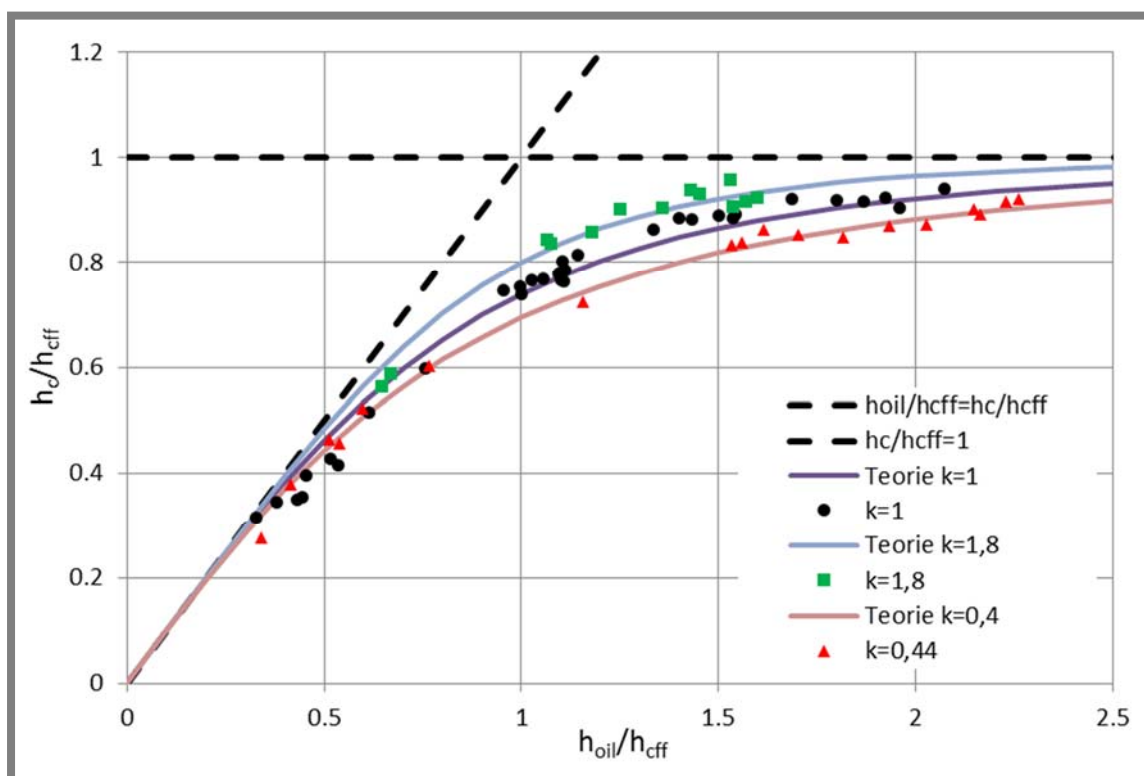
Obr. 6.35 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=1$)



Obr. 6.36 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=1,8$)

Pro měření byly použity dva soudečky. Jeden měl elipticitu menší, než je tomu u koule, konkrétně $k = 0,44$ (2,27 dle konvence článku [1]) a druhý naopak větší, $k = 1,8$ (0,55 dle konvence článku [1]). Jako první valivý element, který vytváří vrstvu maziva, byl použit soudeček s elipticitou 4, jelikož ten jediný je schopen vytvořit dostatečně širokou stopu i pro soudeček s elipticitou 2 použitý v druhém kontaktu. Na Obr. 6.34, Obr. 6.35 a Obr. 6.36 je vidět poměr mezi velikostmi kontaktních oblastí a šířek kontaktů. I pro nejširší soudeček jako druhý element je zřejmé, že šířka předchozího, prvního elementu, je stále více než dostačující pro vytvoření homogenní vrstvy maziva. Na obrázcích je vždy nalevo první element v pořadí a napravo pak druhý.

Výsledné hodnoty tloušťek jsou vykresleny v grafu na Obr. 6.37. V tomto grafu je jako hodnota γ pro výpočet teoretické křivky použita hodnota 1,9; 2,3 a 3,1 pro valivý element o elipticitě 0,44; 1 a 1,8. Tyto hodnoty byly voleny tak, aby orientačně respektovali teoretické modely z článku [1] a současně poskytovali nejbližší proložení experimentálních dat. V článku nejsou uvedeny konkrétní hodnoty, ale pouze graf, ze kterého lze odečíst hodnoty γ , proto lze použít pouze odhadnuté hodnoty. Spolehlivost proložení dat byla kontrolována odchylkou sumy hodnot vůči teorii. Dle voleného parametru γ byly dle experimentálních hodnot h_{oil}/h_{cfr} dopočítány hodnoty h_c/h_{cfr} a jejich celková suma byla srovnána se sumou experimentálních výsledků. Rozdíl byl vždy pod hodnotu 1 %.



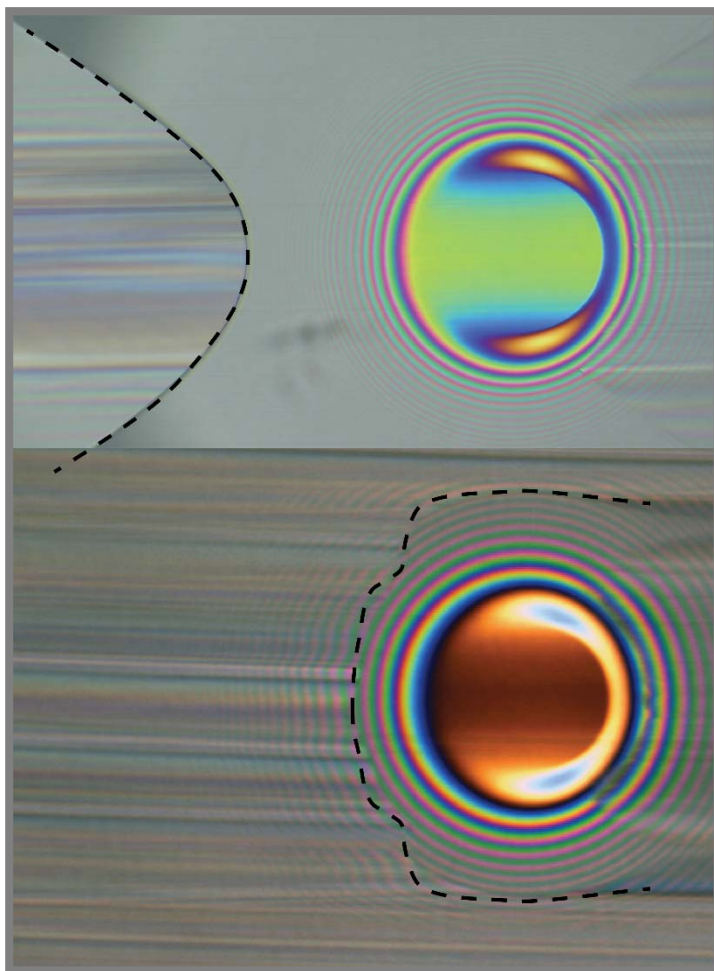
Obr. 6.37 Vliv parametru γ na poměr mezi h_{oil} a h_c

6.7. Tvar vstupního menisku

Za zmínku i stojí drobnost, která byla pozorována při experimentech a to je tvar vstupního menisku. Jeho tvar logicky úzce souvisí s profilem vrstvy maziva, která vstupuje do kontaktu. Za „běžný“ se v experimentálních studiích při experimentech na ball-on-disc aparaturách považoval tvar který je například uveden na Obr. 6.1. Tento tvar ovšem vyplývá z tvaru stopy, který zanechal předchozí průchod kontaktu doplněný o částečné zpětné natečení maziva do valivé dráhy.

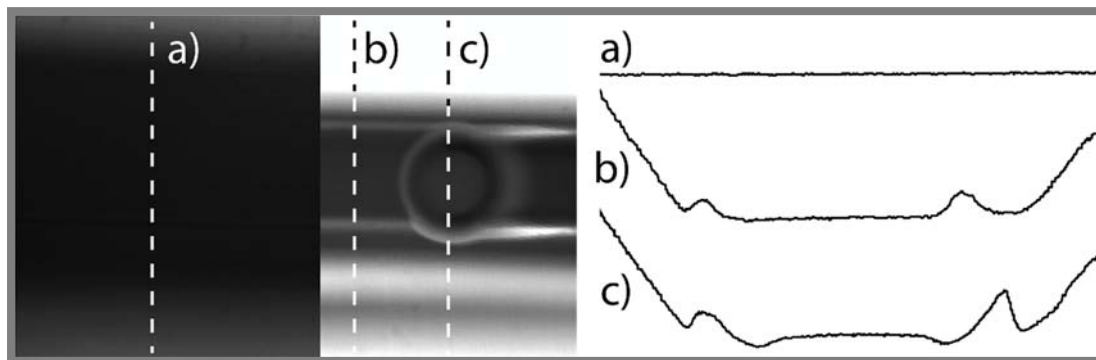
Na Obr. 6.38 jsou uvedeny oba dva základní tvary menisků pozorovaných během experimentů. Horní je v experimentálních pracích běžně uváděný tvar, který vyplývá ze stopy, kterou vytváří koule a stopa je během jedné otáčky disku postupně zpětně zaplavována a před vstupem je tudíž lehce širší. Minimální tloušťka v rámci celého profilu nicméně zůstává uprostřed a profil nabývá na tloušťce směrem k okrajům, proto vzniká tento typický tvar. Na dolní části obrázku je na druhou stranu meniskus, který je vytvořen stopou, kterou na disk nanáší soudeček. Tato stopa se se dá považovat za téměř rovnou, pokud neuvažujeme lokální změny způsobené kavitací, a tudíž meniskus těsně kopíruje tvar kontaktní oblasti. Tento tvar je v souladu s teoretickými studiemi, které jako vstupní vrstvu uvažovali uniformní profil maziva o konstantní tloušťce, který je zobrazený např. na Obr. 2.7.

Drobné nepravidelnosti po stranách jsou pravděpodobně způsobeny tím, že rovnoměrná vrstva je nanесena pouze na jednom z povrchů. Je totiž nutné si uvědomit, že profil stopy na kouli zůstává nezměněn pro oba dva typy menisků. Jedná se tedy spíše o kombinaci horní varianty a stavu, kdy na obou površích je uvažována rovnoměrná vrstva, což by bylo experimentálně obtížně dosažitelné.



Obr. 6.38 Dva tvary vstupního menisku (čárkovaná čára) podle profilu vrstvy na vstupu kontaktu

Předchozí tvrzení bylo ověřeno na snímcích zachycených při experimentech pomocí fluorescenční mikroskopie. Tyto snímky lze vidět na Obr. 6.39. Byly zachyceny dva obrázky a vykresleny profily ve třech místech. Na prvním, označeném na obrázku jako a), byla stopa zhruba uprostřed mezi soudečkem a koulí. U tohoto profilu jde vidět, že je stopa opravdu uniformní, jelikož je soudeček mnohem širší, než koule, okrajové části s větší tloušťkou jsou mimo záběr snímku. Řez b) je veden stále volnou stopou mimo kontakt, nicméně je již podobný řezu c), který je veden přes střed tlakové oblasti. V těsné blízkosti před koulí je již měření ovlivněno i povrchem koule, což dokazuje, že pozorovaný tvar soudečku nemůže odpovídat uniformní vrstvě maziva, ale spíše kombinaci dvou popsaných vrstev.



Obr. 6.39 Profily stopy vykreslené ve třech řezech

6.8. Vliv chyb a jejich analýza

Jako každá experimentální práce, i tato zcela jistě obsahuje chyby. Nejsou zde myšleny chyby metodické, či principiální, takže bude přesnější je označovat za odchylky. Ty mohou nastat na několika různých místech. Zde uvedené byly vybrány a otestovány pouze ty, u kterých se očekával největší vliv již během pozorování při měření.

6.8.1. Metoda optické interferometrie

Tato metoda má udávanou přesnost $\pm 1\text{nm}$. To ovšem platí pro vyhodnocení stejného snímku opakovaně. Zde jsou uvažovány dva základní vlivy, které ovlivní výsledek ještě před zachycením snímku.

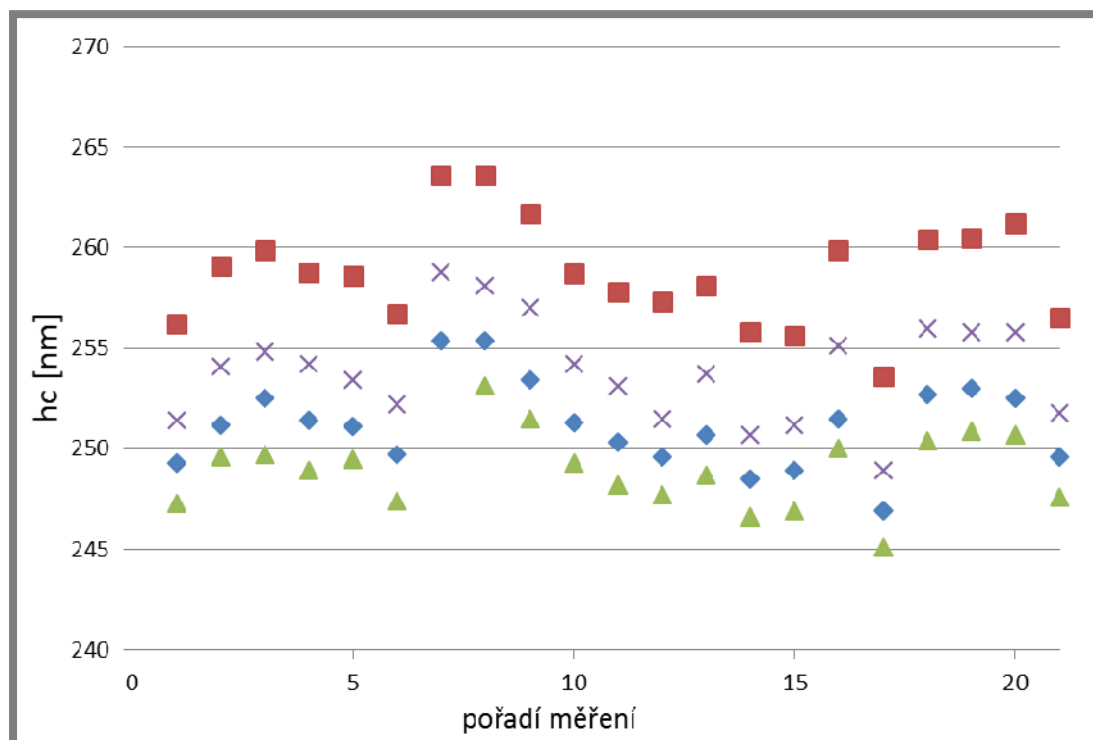
Vliv kalibrace

Prvním je vliv kalibrace. Před samotným měřením probíhá zachycení monochromatického a barevného (osvětleného bílým světlem) snímku, u kterých poté probíhá manuální kalibrace. Tato kalibrace může způsobit odchylku ve vyhodnocování identických snímků. Byla provedena analýza možné chyby pomocí tvorby sady 4 dvojic kalibračních snímků a tvorba kalibračních souborů. Poté byl pomocí těchto kalibrací vyhodnocen identický soubor snímků. Ten se skládal z 21 snímků pro zvolenou rychlost 160 mm/s a dalších 21 snímků pro nižší rychlost 37 mm/s. Průměrné tloušťky byly asi 251 nm, respektive 93 nm. Odchylka byla následně statisticky vyhodnocena pomocí směrodatné odchylky. Ta byla pro vyšší rychlost 3,9 nm a pro nižší rychlost 1,5 nm. Nižší rychlost samozřejmě produkuje nižší tloušťku filmu, takže je pravděpodobně objektivnější normovat odchylky např. na 100 nm. V takovém případě vyjde odchylka pro nižší rychlost 1,56 nm a 1,58 nm pro vyšší rychlost, což je v obou případech zhruba 1,6 %.

Vliv konstrukčních částí simulátoru

Dalším vlivem, kterému byla přikládána větší důležitost je vliv mechanických nepřesností simulátoru. Zde může být několik vlivů zkombinovaných do jednoho, aniž by je bylo možné oddělit. Všechny ovšem způsobí reálnou změnu tloušťky filmu, kterou nelze přisuzovat chybné metodě či vlivu kalibrace. Mezi činitele ovlivňující tloušťku filmu mohou patřit např. mechanické nepřesnosti uložení kontaktních těles, čili jejich házení, dále kolísání rychlosti servomotorů nebo povrchové prvky na povrchu kontaktních těles jako jsou rýhy a vrypy, které při průchodu kontaktem způsobí lokální ovlivnění odrazivosti povrchu a tím změnu světlených podmínek. Vyhodnocení bylo provedeno tak, že bylo za konstantních podmínek zachyceno 21 snímků od dvou rychlostí, čili stejně jako v předchozím případě a tento soubor byl vyhodnocen. Rychlosti byly stejné, jako v předchozím případě. Zde bylo očekáváno, že pro nižší rychlosti bude odchylka vyšší z důvodu vyššího vlivu povrchových nerovností a kolísání otáček motoru. Naměřené hodnoty ukázali hodnotu směrodatné odchylky 2,6 nm pro rychlost 160 mm/s a 4,0 nm pro nižší rychlost 37 mm/s, což je v souladu s očekáváním. Vyjádřeno v procentech je to 1 % pro vyšší tloušťku a 4,3 % pro nižší tloušťku filmu.

Všechny předchozí odchylky byly v přijatelných mezích, nicméně 4,5 % se již dá pokládat za nevhodnou. Z toho důvodu bylo k měřením s nižšími tloušťkami filmu, resp. nižšími rychlostmi přistupováno statisticky, což znamená, že bylo zachyceno zvýšené množství snímků (3-4) a byla vyhodnocena průměrná hodnota. Pokud stejný postup aplikujeme na vzorová data z Obr. 6.40, obdržíme směrodatnou odchylku v průměrné výši 0,8 nm, což vyjádřeno v procentech znamená asi 0,8 %. To je již přijatelná hodnota.



Obr. 6.40 Vyhodnocení měření stejných dat pomocí jinak kalibrovaného softwaru

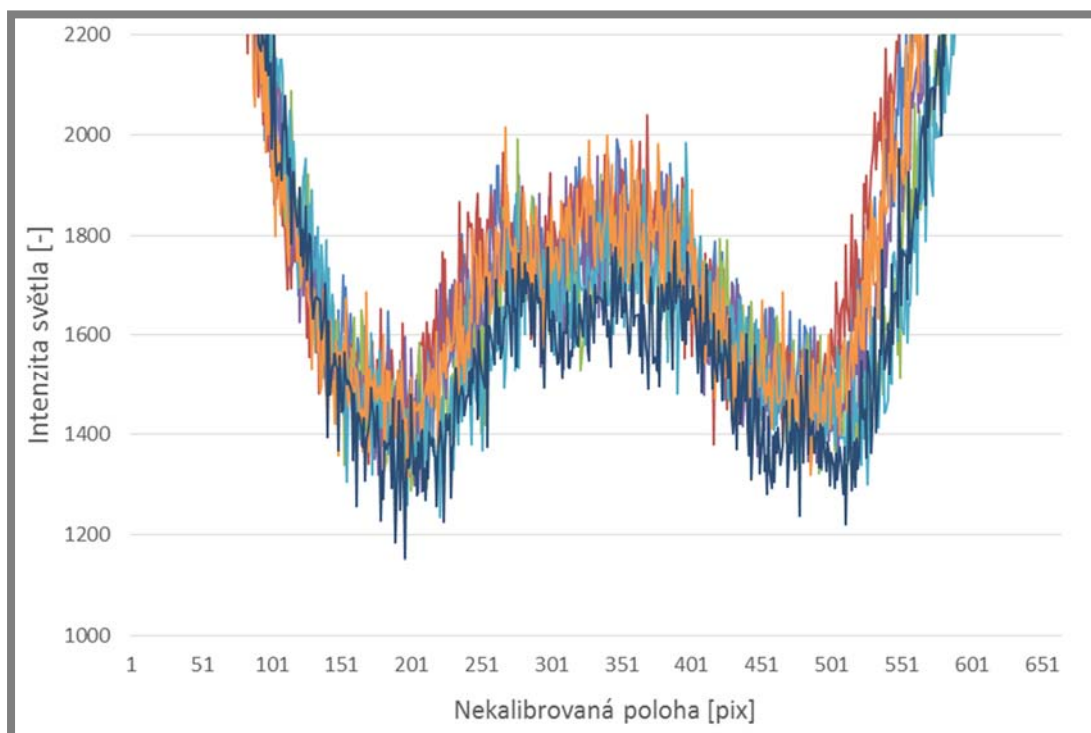
Z grafu na Obr. 6.40 je jasně patrné, že jinak provedená kalibrace může posunout datové body o konstantní hodnotu níže či výše, to lze pozorovat porovnáním obdržných hodnot pro jednotlivé body měření. Při pohled na řadu jednoho typu bodů pak lze vidět rozptýl hodnot způsobených mechanickými nepřesnostmi simulátoru. Všechny datové body nicméně byly měřeny minimálně dvakrát v těsném sledu a byl vždy uvažován jejich průměr. Tento přístup by měl měření zpřesnit ještě pod úroveň diskutovaných odchylek.

6.8.2. Metoda fluorescence

U této metody je situace velmi podobná, nicméně se zde nedělá kalibrace. Čip kamery za konstantních světelných podmínek vrací přímo hodnotu intenzity osvětlení, která byla vyhodnocována. Proto zde byl proveden jen vliv místa měření, které bylo vždy voleno ručně a stejně jako v minulém případě vliv času, kdy je zachycen snímek, tedy způsobený nepřesnostmi aparatury.

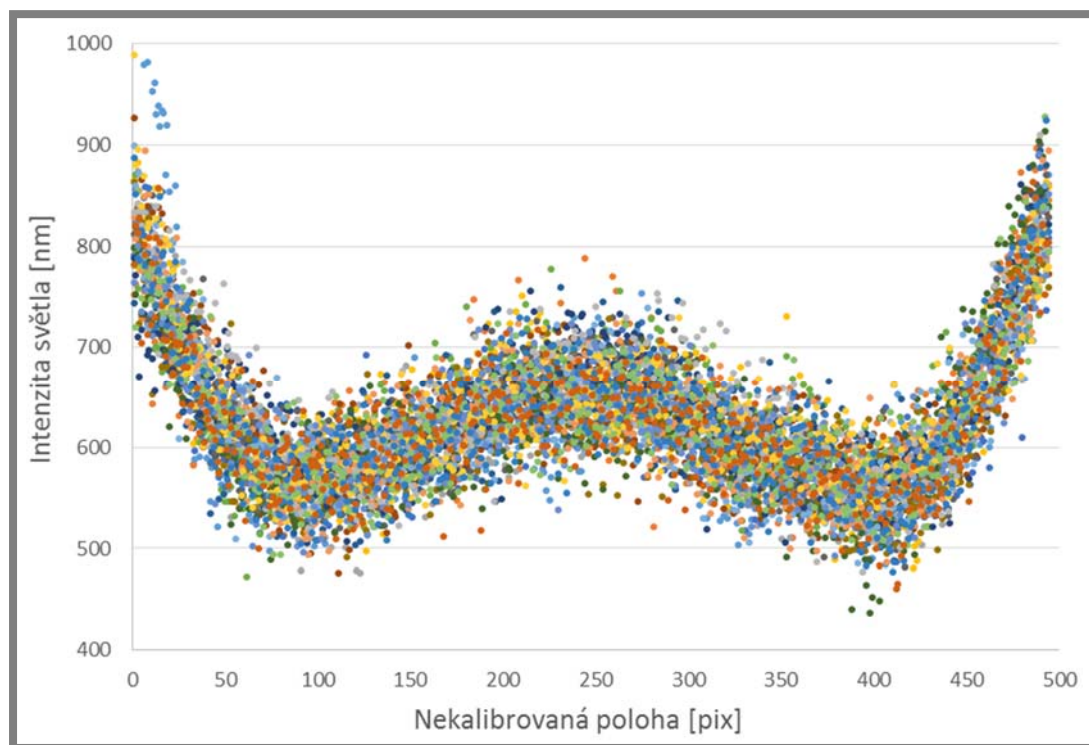
Vliv místa měření:

Z jednoho statického snímku stopy v mazivu bylo vytvořeno, stejným způsobem, jako při všech ostatních vyhodnoceních, 5 profilů stopy filmu (Obr. 6.41). Profily pak byly vykresleny a byly vytvořeny průměrné hodnoty centrálních částí, odpovídajících orientačně souřadnici 300-350 na vodorovné ose v grafu na Obr. 6.41. Z těchto hodnot pak byla vypočítána směrodatná odchylka. Jedná se tedy spíše vliv místa vedení řezu při tvorbě profilů.



Obr. 6.41 Profily vytvořené ze stejného snímku, nicméně jiného místa

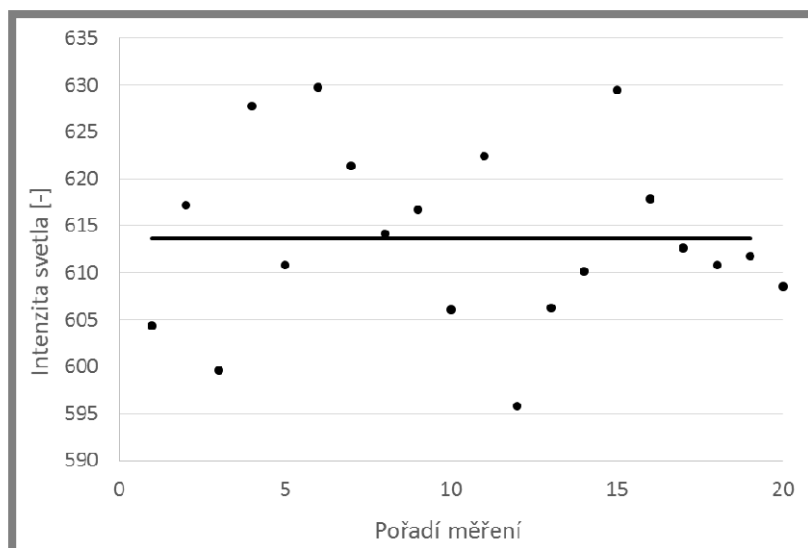
Směrodatná odchylka vyhodnocená z pěti uvedených profilů odpovídá 4,7 jasových hladin. Při měřených intenzitách v průměru kolem hodnoty 1700 se jedná o odchylku ve velikosti 0,28 %, což je zanedbatelné. Z grafu se sice odchylky zdají větší, nicméně již tvorbou aritmetického průměru z části profilu pro vyhodnocení se značně zpřesní výsledek díky redukci šumu, který způsobuje pozorovaný rozptyl.



Obr. 6.42 Profily vytvořené z různých snímků za konstantních podmínek

Vliv konstrukčních částí simulátoru

V tomto případě byl očekáván větší vliv, proto bylo provedeno 20 po sobě jdoucích měření. Zařízení bylo celou dobu v pohybu a po jednosekundových intervalech, nesoudělných s otáčkami, bylo zachyceno 20 snímků, ze kterých byly stejnou metodikou vytvořeny profily stopy. Tyto profily jsou uvedeny na obr. Obr. 6.42. Pokud z těchto snímků provedeme analýzu, jako u předchozího případu, obdržíme směrodatnou odchylku o velikosti 9,1 jasových hladin, což vzhledem k měřeným hodnotám znamená odchylku 1,5 %. Konkrétní hodnoty vyhodnocených aritmetických průměru dvaceti měření uvedených na Obr. 6.42 jsou uvedeny na Obr. 6.43.



Obr. 6.43 Vyhodnocení centrálních tloušťek profilů z Obr. 6.42; plnou čarou je zobrazena střední hodnota

6.8.3. Zhodnocení

U obou zde popisovaných metod byla naměřena maximální odchylka o velikosti 1,6 % z měřených hodnot. To lze považovat za zanedbatelnou hodnotu. Všechna provedená měření jsou tedy validní.

7. SHRNUÍ A ZÁVĚR

Tato disertační práce se zabývá studiem EHD kontaktu při nedostatečném zásobování mazivem a popisem procesů tento děj doprovázející. V první části je shrnut současný stav poznání v oblasti hladovějících EHD kontaktů. Přehledová část je zpracována od první zmínky o hladovění v roce 1966 až po nejnovější poznatky jak z teoretické, tak experimentální oblasti. Specificky jsou vyčleněny práce, které se zabývají studiem pohybu maziva, resp. jeho vtékání zpět do valivé dráhy vytvořené průchodem valivého elementu. Při hladovějících podmínkách se většinou jedná o velmi malé množství maziva, takže jeho ztráty těmito jevy jsou podstatné pro chování mazacího filmu a jeho hlubší pochopení.

Výsledky jsou obdrženy zejména pomocí optické metody - kolorimetrické interferometrie. V některých částech je navíc využita metoda fluorescenční mikroskopie pro studium volné vrstvy maziva mimo kontaktní oblast.

Závěry z této práce lze rozdělit do tří hlavních kapitol. První dvě (7.1 a 7.2) byly studovány zejména pro ověření platnosti některých předpokladů. I tyto studie byly ovšem původní a lze z nich vyvodit nové poznatky. Třetí částí (7.3) jsou pak samotné závěry ohledně chování kontaktu za podmínek hladovění, což bylo hlavním cílem této práce.

7.1. Doplnění maziva

V této části byl studován efekt doplňování maziva do kontaktu. Konkrétněji byla ověřena teoreticky popsaná závislost tloušťky maziva ve středu stopy vytvořené valením elementu mazivem na čas. Tato závislost byla teoreticky popsaná jako velmi nelineární, což bylo experimentálně potvrzeno. Dále bylo zjištěno, že viskozita je parametr maziva, který tok maziva sice ovlivňuje, ale není to hlavní řídicí parametr. Viskóznější maziva mají tendenci zaplavovat vytvořenou stopu pomaleji, nicméně důležitějším parametrem je povrchové napětí, které je hlavním činitelem.

Studie tohoto jevu přinesla, pro tuto práci zásadní informaci o chování stopy v mazivu. Bylo zjištěno, že pro použité oleje je do 3 sekund po průchodu elementu změna profilu stopy téměř zanedbatelná. Díky tomu bylo možné pokročit dále a použít navrženou koncepci měření se dvěma elementy.

Některé výsledky této části byly publikovány jako samostatný článek a prezentovány na mezinárodní konferenci STLE v Detroitu.

7.2. Poměr dělení maziva

Po výstupu z tlakové oblasti kontaktu je mazivo podrobeno extrémnímu poklesu tlaku co do rychlosti i velikosti. Tento pokles tlaku, běžně z jednotek GPa až na atmosférický tlak, odehrávající se v řádech

milisekund je způsoben zejména změnou geometrie. Mazivo procházející kontaktní oblastí je nuceno vyplnit prudce se rozšiřující mezeru na výstupu kontaktu. To samozřejmě z důvodu omezeného množství nelze, takže dochází k jeho roztržení na dvě vrstvy, které ulpívají na kontaktních površích. Pro podmínky čistého valení jsou obě vrstvy maziva stejně tlusté. Pro různé skluzy se již situace lehce komplikuje.

Tato problematika byla teoreticky popsána matematickým modelem, který doposud ovšem nebyl prakticky ověřen, což byl účel této části. Experimenty ukázaly, že teoreticky popsaná závislost, kdy více maziva ulpívá na rychlejším ze dvou povrchů na úkor druhého, je správná, kvantitativně již ovšem příliš nesouhlasí. Teorie popisuje silnější závislost mezi skluzovým poměrem a poměrem tloušťek maziva na kontaktních površích, než byla pozorována experimentálně.

Z hlediska této práce, aneb proč byla tato problematika na prvním místě studována, vyplynulo, že je koncept měření tloušťky maziva na vstupu kontaktu použitelný. Při čistém valení dochází k dělení na dvě stejné poloviny. U drobných prokluzů lze vliv zanedbat, jelikož je příliš malý a u vyšších skluzových poměrů byla pomocí experimentálních dat provedena korekce vztahu pro výpočet h_{oil} .

Výsledky této studie byly prezentovány na mezinárodní konferenci TFC v Chicagu a publikovány jako samostatný článek v časopise s IF.

7.3. Vliv tloušťky maziva na vstupu na úroveň hladovění

Hladovění je defektní stav EHD kontaktu způsobený nedostatkem maziva na vstupu kontaktu. Tento nedostatek může být způsobený mnoha různými vlivy či nevhodnou kombinací provozních parametrů jako viskozita, rychlost povrchů, geometrie kontaktních těles, vzájemná poloha více kontaktů apod. Nedostatek maziva na vstupu způsobí vytvoření hranice mezi mazivem a okolní atmosférou pojmenovanou jako vstupní meniskus. Poloha menisku poté limituje prostor pro nárůst tlaku, který definuje tloušťku mazacího filmu. Nižší výsledný tlak způsobí snížení tloušťky mazacího filmu a tím dochází k riziku poškození povrchů vzájemným kontaktem povrchových nerovností. Poloha vstupního menisku tedy může být parametrem definujícím úroveň hladovění, nicméně je velmi citlivým parametrem, který se nedá využít pro situace, zejména vyšších úrovní hladovění. I proto se v teoretických studiích častěji uvádí jako definující parametr tloušťka maziva na vstupu kontaktu. To je ovšem experimentálně ještě obtížněji zjištěitelný parametr.

V rámci této disertační práce bylo hlavním cílem ověřit teoreticky definovaný vliv vstupní tloušťky maziva na úroveň hladovění. Experimenty bylo potvrzeno, že pro dané provozní parametry chování odpovídá teoretické predikci. Zajímavým faktem, který se povedlo ověřit je množství maziva na vstupu, které kontakt vyžaduje pro provoz v plně zaplaveném

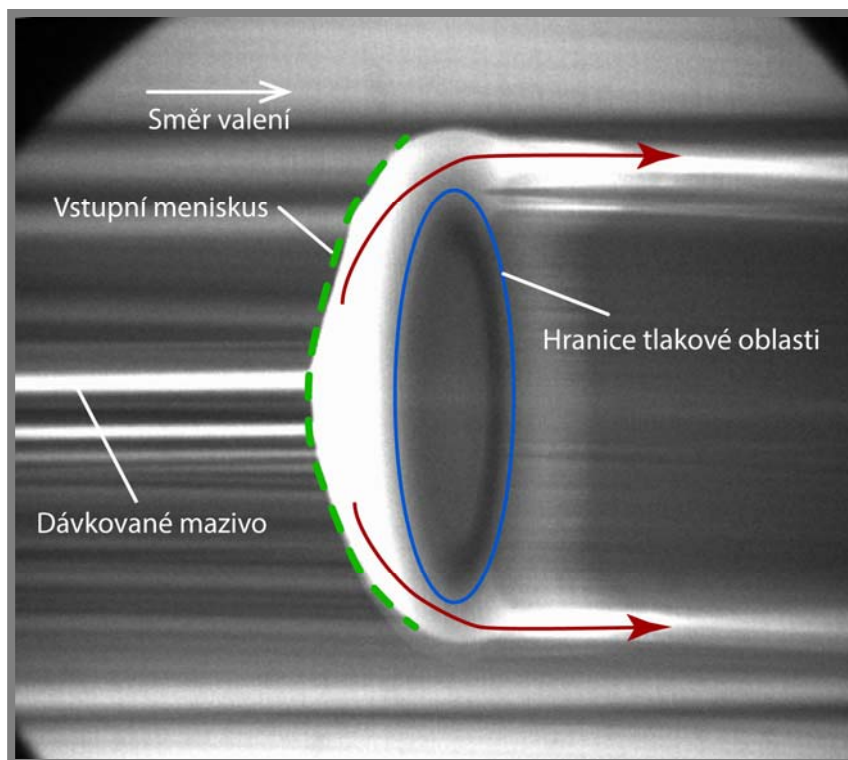
režimu. Pojem plně zaplavený režim je zde na místě, jelikož pro takového podmínky musí být dodávána před kontakt vrstva maziva, která je násobně vyšší, než je tloušťka filmu kontaktu samotného. Závislost je asymptotická, nicméně z praktického hlediska lze říci, že již 95 % tloušťky ekvivalentního plně zaplaveného kontaktu lze považovat za dostačující. V takovém případě musí být před kontaktem zhruba dvojnásobná tloušťka maziva, než je tloušťka filmu v kontaktu. Pokud je před kontaktem k dispozici stejná tloušťka vrstvy, jako by byla tloušťka v plně zaplaveném kontaktu, tak by byla tloušťka filmu v kontaktu nižší o 20 %.

Důvodem pro toto chování je mechanismus toku maziva kolem kontaktu. I přes nedostatek maziva a blízkost menisku dochází u části maziva, které je bezprostředně před kontaktem k jeho toku ve směru kolmém ke směru valení. Tento boční tok je současně i fundamentálním důvodem vzniku a zhoršování úrovně hladovění v kontaktech, které jsou podrobeny opakovaným průchodům, což jsou v praxi téměř všechny. Při každém průchodu valivého elementu místem kontaktu dojde k vytlačení části maziva do strany, a pokud není mazivo před dalším průchodem doplněno zpět, dochází k postupnému snižování tloušťky maziva v kontaktu. Toto snižování se zastaví, či výrazně zpomalí až na úrovni, kdy již před kontaktem neexistuje vstupní meniskus a nárůst tlaku je extrémně rychlý a začíná téměř na hranici kontaktní oblasti. Z výsledků experimentů lze pozorovat, že tato hranice odpovídá úrovni hladovění kolem 30-40% tloušťky plně zaplaveného kontaktu. Obtékání kontaktu lze prokázat při pohledu na Obr. 7.1 kde je tok maziva kolem kontaktu znázorněn červenými šipkami. Důvod pro tento tok je kombinace již probíhající nárůstu tlaku za vstupním meniskem a současně ještě nedostatečná viskozita, která by toku bránila, jako je tomu v kontaktu samotném.

7.3.1. Vliv geometrie kontaktu

Chování popisované v předchozím odstavci poměrně očekávatelně závisí na provozních parametrech jako zatížení, rychlosti, viskozitě maziva apod., zejména ovšem na geometrii kontaktu. Širší kontakt poskytuje větší odpor proti toku maziva do stran. Mazivo se jednoduše nestihne před vstupem do kontaktu dostat tak daleko. Tento parametr je definován v literatuře jako odpor proti bočnímu toku a je označován symbolem γ . Teoreticky je již popsán jeho vliv na úroveň hladovění při známé vstupní tloušťce maziva. Z teorie vyplývá, že viskozita či zatížení příliš hodnotu tohoto parametru nezmění. Nejvýznamnější změna se dá očekávat právě změnou geometrie kontaktu. Vliv geometrie kontaktu byl studován rozšířením některých výsledků i o měření s elementy o různé elipticitě. Byla prokázána teoreticky predikovaná změna chování v tom smyslu, že

kontakty s nižší elipticitou, které jsou náchylnější k bočnímu toku maziva, vyžadují více maziva na vstupu, aby produkovaly stejnou tloušťku jako kontakty s vyšší elipticitou. Tyto poznatky vyplývají z grafu na Obr. 6.37.



Obr. 7.1 Obtékání kontaktu

7.3.2. Pracovní hypotéza

Pracovní hypotéza, uvedená v kapitole 4.2 a v pojednání k této disertační práci, uváděla jako popis závislosti hladovění na vstupní tloušťce maziva tyto parametry v bezrozměrných veličinách. Ukázalo se, že toto vyjádření není vhodné, jelikož se nedá považovat za dostatečně zobecněné. Vzhledem ke změně chování v závislosti na dalších provozních parametrech, jak je uvedeno v Obr. 2.15 je mnohem výhodnější uvádět oba parametry v poměru k adekvátní alternativě v plně zaplaveném režimu (h_{cff}) za stejných provozních podmínek. Z toho důvodu se přistoupilo raději k porovnávání s teoretickým modelem [9].

Lze se ovšem alespoň vyjádřit k popisu jednotlivých částí grafu pracovní hypotézy z Obr. 4.1:

- A) Výsledky pro tuto oblast vůbec nebyly experimenty dosaženy. Jedná se pravděpodobně o vliv atomárních sil, které mají mnohem významnější vliv pro tenké filmy, a logicky nelze experimentálně obdržet z kontaktu, do kterého se dávkuje mazivo, téměř suchý kontakt. Pro tenké filmy o tloušťce několika desítek nm jsou totiž

atomární síly tak významné, že překonají vliv bočního výtoku a dojde k ustálení na nenulové hodnotě tloušťky filmu.

- B) Tato část je částečně přechodem z předchozí oblasti do hladovění. Zde bylo pozorováno, že kontakt je schopen vytvořit téměř stejně tlustý film, jako je tloušťka maziva na vstupu kontaktu. Boční výtok je tedy v této části minimální až nulový.
- C) V této části nebyla pozorována žádná skoková změna, jako spíše odklon od izoviskózní asymptoty popsané jako $h_{oil}/h_{cff} = h_c/h_{cff}$. V praxi to znamená, že při zvyšující se tloušťce maziva dochází ke vzdalování se vstupního menisku od kontaktu a současně ke zvyšování objemu maziva, které kontakt obtéká po stranách. Objem maziva, které kontakt pouze obtéká lze označit za nevyužitelný a tím pádem téměř zbytečný. Lze tedy říci, že se snižuje efektivita kontaktu ve využívání množství maziva na vstupu.
- D) Oblast, kdy by již nebyl pozorován nárůst filmu vzhledem k nárůstu tloušťky maziva na vstupu, nebyla experimentálně pozorována. Ani při dodávce dvojnásobné tloušťky maziva, než odpovídá centrální tloušťce plně zaplaveného kontaktu, se kontakt nedal popsat jako plně zaplavený. Vzhledem k asymptotické povaze teoretického modelu k této hranici se dá očekávat, že takového chování je limitované až pro stav kdy poměr $h_{oil}/h_{cff} \rightarrow \infty$.

Vzhledem k výsledkům a závěrům tedy lze říci, že
pracovní hypotéza byla falzifikována.

V předchozích odstavcích byl shrnut popis a vysvětlení závislosti centrální tloušťky v EHD kontaktu na přesně definované tloušťce maziva na vstupu, čímž je **splněn hlavní cíl této disertační práce**. Dílčí cíle nutné ke splnění hlavního cíle byly také úspěšně řešeny a popsány.

7.4. Trendy budoucího vývoje

V rešeršní části práce bylo uvedeno několik pokusů o vytvoření kompletního numerického modelu pro predikci mechanismu mazání na kompletní geometrii valivého ložiska. Cíle této práce sice není poskytnout takový model, nicméně její výsledky mohou pomoci validovat některé vytvořené modely. Jelikož je dle literatury [72] asi 90% všech valivých ložisek provozovaných na světě mazáno plastickými mazivy, bylo by vhodné ověřit popsané závislosti i pro plastická maziva. Jejich komplexní reologie, jak popisuje např. Lugt [73], [74], dělá popsané experimenty ještě složitějšími. Jelikož se plastické mazivo skládá asi z 90% ze základového oleje a jen z 10% ze ztužovačů, dá se očekávat obdobné chování jako pro základové oleje samotné. Ztužovač by nicméně mohlo pomoci snížit boční výtok maziva a poskytnou lepší provozní parametry. Tyto hypotézy by bylo vhodné taktéž experimentálně ověřit.

Dále by bylo vhodné rozšířit studii ohledně doplňování maziva do kontaktu. Během studia bylo pozorováno několik zajímavých procesů, které nebyly úplně objasněny, jelikož to nebylo cílem této práce. Zajímavé by bylo například empiricky ověřit vzájemný vliv dvou parametrů, viskozity a povrchového napětí, na intenzitu procesu doplňování maziva. Z provedených experimentů totiž nevyplynul jasný závěr z tohoto pohledu.

Stejně tak by bylo vhodné rozšířit výsledky ohledně mechanismů chování maziva na výstupu z kontaktu a poměr dělení maziva mezi kontakty. Zde také nebyl zjištěn žádný dominantní vliv, přestože drobné rozdíly pro některé provozní veličiny měřeny byly.

8. SEZNAM PUBLIKACÍ A DALŠÍCH VÝSTUPŮ AUTORA VYTVOŘENÝCH BĚHEM STUDIA

8.1. Články v odborných periodících

SVOBODA, P.; KOŠTÁL, D.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. *Tribology International*, 2013, roč. 67, č. 1, s. 140-145. ISSN: 0301-679X. (IF: 1,936)

SVOBODA, P.; KOŠTÁL, D.; POPELKA, M.; KŘUPKA, I. The experimental study of transition between fully flooded and starved regime in EHL contact. *Engineering Mechanics*, 2013, roč. 20, č. 1, s. 13-25. ISSN: 1802- 1484. (Recenzované periodikum)

KOŠTÁL, D.; ŠPERKA, P.; HARTL, M. Controlling and measuring starvation severity in EHL contacts. *Engineering Mechanics*, 2014, roč. 2014 (21), č. 5, s. 321-328. ISSN: 1805- 4633. (Recenzované periodikum)

SVOBODA, P.; KOŠTÁL, D.; KUŇÁK, J.; KŘUPKA, I. Study of grease behaviour in a starved Elastohydrodynamically lubricated contact. *MM Science Journal*, 2014, roč. 2014, č. June, s. 464-469. ISSN: 1803- 1269. (Recenzované periodikum)

KOŠTÁL, D.; NEČAS, D.; ŠPERKA, P.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Lubricant Rupture Ratio at Elastohydrodynamically Lubricated Contact Outlet. *Tribology Letters*, 2015, DOI: 10.1007/s11249-015-0565-7 (IF: 2,151)

KOŠTÁL, D.; ŠPERKA, P.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; Experimental observation of elastohydrodynamically lubricated contacts replenishment. *MM Science*, 2015, DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201525 (pozn.: v době publikace této práce probíhá recenzní proces – akceptováno s drobnými změnami)

8.2. Příspěvky na konferencích – konferenční sborníky

SVOBODA, P.; KOŠTÁL, D.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. EXPERIMENTAL STUDY OF LUBRICATION FILM FORMATION IN MULTIPLE CONTACTS DEVICE UNDER STARVED CONDITIONS. In *Proceedings of the ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference*. Denver, CO; United States: American Society of Mechanical Engineers, Tribology Division, TRIB, 2012. s. 233-235. ISBN: 978-0-7918-4508- 0.

KOŠŤÁL, D.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I. Lubrication film starvation on two element device. In *53rd International Conference of Machine Design Departments*. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 137-140. ISBN: 978-80-214-4533- 8.

KOŠŤÁL, D.; ŠPERKA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Surface Roughness Effects in Starved EHL Contacts. In *Proceedings of World Tribology Congres 2013*. Turín: Italian Tribology Association, 2013. s. 1-4. ISBN: 9788890818509.

KOŠŤÁL, D.; ŠPERKA, P.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Influence of rolling elements distance on starvation. In *Society of Tribologists & Lubrication Engineers Annual Meeting & Exhibition 2013 / Proceedings of a meeting held 5-9 May 2013, Detroit, Michigan, USA*. Detroit: Curran Associates, Inc. (Dec 2013), 2013. s. 296-298. ISBN: 978-1-62993-289- 7.

KOŠŤÁL, D.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Including the method of lubricant film thickness measurement with the use of the monochromatic interferometry to the education of tribology. In *55th International conference of Machine design Departments*. 2014. s. 141-146. ISBN: 978-80-01-05542- 7.

KOŠŤÁL, D.; ŠPERKA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Mechanismy mazání valivých ložisek. Konference Mazání v moderním průmyslovém podniku 2015. s 30-32.

SVOBODA, P.; KOŠŤÁL, D.; KŘUPKA, I. Study of Scale Effect in a Starved Elastohydrodynamically Lubricated Contact. In *ENGINEERING MECHANICS 2015, 21st International Conference Engineering Mechanics 2015. Engineering mechanics 2014*. 1. Svratka: Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2015. s. 314-315. ISBN: 978-80-86246-42- 0. ISSN: 1805- 8248.

8.3. Užité vzory

KOŠŤÁL, D.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: *Tribological contact simulator*. 25667, užitečný vzor. (2013)

ŠPERKA, P.; SVOBODA, P.; VRBKA, M.; KOŠŤÁL, D.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: *Tribologický simulátor valivého ložiska*. 25805, užitečný vzor. (2013)

KOŠŤÁL, D.; CAGAŠ, R.; Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně: *Lapovací aparatura pro dokončování povrchu soudečků*. 114360, užitiný vzor. (2015)

8.4. Funkční vzorky

SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; KOŠŤÁL, D.: Simulátor HK; *Systém uložení a zatěžování valivých elementů pro simulátor hladovějícího kontaktu*. místnost A2/ 401, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO. URL: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id= 1608.

KOŠŤÁL, D.; CAGAŠ, R.: Leštící aparatura pro soudečky; *Lapovací aparatura pro dokončování povrchu soudečků*. A2/ 423, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické V Brně, Technická 2/ 2896, 61669 Brno.

KOŠŤÁL, D.: adaptér pro soudečky pro EHL rig; *Mechanismus rychloupínání valivých elementů mezi hroty pro simulátor tribologického kontaktu*. A2/ 421, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2/ 2986 , 61669 Brno.

KOŠŤÁL, D.; NOVOTNÝ, A.; SVOBODA, P.: Adaptivní stírač kapaliny; *Adaptivní stírač kapaliny pro simulátor kontaktu*. A2/ 403.

SMEJKAL, D.; KOŠŤÁL, D.: Zatěžovací mechanismus; *Zatěžovací mechanismus*. Laboratoř dynamiky ÚMTMB B1/ 105, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 Brno. URL: http://pom.uk.fme.vutbr.cz/pdf_projekt.php?id= 287.

KOŠŤÁL, D.: Viskozimetr roto2; *Rotační viskozimetr*. Laboratoř tribologie A2/ 422, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 Brno. URL: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id= 1839.

KOŠŤÁL, D.; SVOBODA, P.: Simulátor; *Systém zajištění osy rotace valivého elementu pro tribologický simulátor*. Místnost A2/ 401, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO. URL: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id= 1854.

KOŠŤÁL, D.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.: Simulátor hladovění; *Simulátor hladovějícího kontaktu (vícenásobný kontakt)*. Laboratoř č. A2/ 423, ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/ 2, 616 69 BRNO, Česká Republika. URL: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id= 1514.

9. LITERATURA

- [1] DAMIENS, B., C.H. VENNER, P.M.E. CANN a A.A. LUBRECHT *Journal of Tribology*. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. 2004, (126): 105-111.
- [2] QUERLIOZ, E., F. VILLE, H. LENON a T. LUBRECHT *Tribology International*. Experimental investigation of the contact fatigue life under starved conditions. 2007, (40).
- [3] IOANNIDES, E. a T. A. HARRIS. *ASME J. Lubr. Technol.* A new fatigue life model for rolling bearings. 1984, (107).
- [4] IOANNIDES, E. *First world tribology congress*. Life prediction in rolling element bearings. First world tribology congress, 1997.
- [5] ZOELLEN, M. *Thin layer flow in rolling element bearings*. University of Twente, Netherlands, 2009. Ph. D. thesis.
- [6] CANN, P. M. E. a A. A. LUBRECHT *LubricatSci*. Analysis of the mechanisms of grease lubrication in rolling element bearings. 1999, 3(11): 227-245.
- [7] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON *Journal of Tribology*. Isothermal EHL point contacts, Part III - Fully flooded results. 1977, (99): 264-276.
- [8] DOWSON, D. a G. R. HIGGINSON *J. Mech. Engi. Sci.* A numerical solution to the Elastohydrodynamic problem. 1959, (1).
- [9] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ *Film Thickness in Starved EHL Point Contacts*. 1998, (120): 126-133.
- [10] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL *Tribology Transactions*. A review of elasto-hydrodynamic lubrication theory. 2011, (54): 470-496.

- [11] VENNER, C. H., G. BERGER a P. M. LUGT *Journal of Tribology*. Waviness Deformation in Starved EHL Circular Contacts. 2004, 2(126): 248-257.
- [12] VENNER, C. H., G. POPOVICI, P. M. LUGT a M. ORGANISCIK *Film Thickness Modulation in Starved Elastohydrodynamically Lubricated Contacts Induced by Time-Varying Lubricant Supply*. Journal of Tribology. 2008, 4(130).
- [13] ZARETSKY, E. *NASA Technical memorandum 102575, ASLE Transactions*. Bearing Elastohydrodynamic lubrication: a complex. 1990.
- [14] ORCUTT, F. K. a H. S. CHENG *Gryo-Spin Axis Hydrodynamic Bearing Symposium*. Lubrication of Rolling Contact Instrument Bearings. 1966, (2).
- [15] NOGI, T. Film Thickness and Rolling Resistance in Starved Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts With Reflow. *Journal of Tribology* [online]. 2015, 137(4): 041502- [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1115/1.4030203. Dostupné z: <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4030203>
- [16] WEVEDEN, L. D., D. EVANS a A. CAMERON *Journal of Tribology*. Optical analysis of ball bearing starvation. 1971, (93): 349-363.
- [17] GRUBIN, A. N. a I. E. VINOGRADOVA *Department of scientific and industrial research, Great Britain*. Investigation of the Contact of Machine Components. 1949, (-235).
- [18] WOLVERIDGE, P. E., K. P. BAGLIN a J. F. ARCHARD *Proc. Instn. Mech. Engrs*. The starved lubrication of cylinder in line contact. 1970, (1858171): 1159-1169.
- [19] B.J. HAMROCK, D.. *Journal of Tribology*. Isothermal EHL point contacts, Part IV, starvation results. 1977, (99): 15-23.
- [20] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON *NASA TN*. Numerical evaluation of the surface deformation of elastic solids subjected to a hertzian contact stress. 1974, : -7774.

- [21] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON *Journal of lubrication technology*. Isothermal EHL point contacts, part I - theoretical formulation. 1976, (98): 223-229.
- [22] LUBRECHT, A. A., C. H. VENNER a F. COLIN Film thickness calculation in elasto-hydrodynamic lubricated line and elliptical contacts: the Dowson, Higginson, Hamrock contribution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2009, 223(3): 511-515 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1243/13506501JET508. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/13506501JET508>
- [23] CANN, P. M. E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT *Tribology International*. Transition between fully flooded and starved regimes in EHL. 2003, (37): 859-864.
- [24] ZOELLEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT *Journal of Engineering Tribology*. Prediction of Film Thickness Decay in Starved Elasto Hydrodynamically Lubricated Contacts Using a Thin-Film Layer Model. 2009, 3(223): 541-552.
- [25] ZOELLEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT *Journal of Tribology*. Free surface thin layer flow on bearing raceways. 2008, 2(130): 021802-1-021802-10.
- [26] ZOELLEN, M., C. VENNER a P. LUGT *Tribology Transactions*. The Prediction of Contact Pressure Induced Film Thickness Decay in Starved Lubricated Rolling Bearings. 2010, 6(53): 831-841.
- [27] VENNER, C. H., M. T. VAN ZOELLEN a P. M. LUGT *Tribology International*. Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. 2012, (47): 175-187.
- [28] CHIU, Y.P. *ASLE Transactions*. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems. 1974, (17): 25-35.
- [29] PEMBERTON, J. a A. CAMERON *Wear*. A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts. 1976, (37): 184-190.

- [30] GUANGTENG, G. a H. A. SPIKES *JMechE*. The role of surface tension and disjoining pressure in starved and perched lubrication. 1996, (210): 113-123.
- [31] GUANGTENG, G., P. M. CANN a H. A. SPIKES *Wear*. A study of parched lubrication. 1992, (153): 91-105.
- [32] KINGSBURY, E. *Trans. ASME. J. lubr. Technol.* Parched elastohydrodynamic lubrication. 1985, (107): 229-233.
- [33] JACOD, B., F. PUBILIER, P. M. E. CANN a A. A. LUBRECHT *Lubrication at the Frontier*. An analysis of track replenishment mechanisms in the starved regime. 1999, (36): 483-492.
- [34] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ *Proceedings of the 21st Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Starved film thickness: A Qualitative Explanation. 1994, : 249-257.
- [35] NOGI, T. An Analysis of Starved EHL Point Contacts with Reflow. *Tribology Online* [online]. 2015, 10(1): 64-75 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.2474/trol.10.64. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/10/1/10_64/_article
- [36] GERSHUNI, L., M. G. LARSON a P. M. LUGT *Tribology Transactions*. Replenishment in Rolling Bearings. 2008, (51): 643-651.
- [37] LIANG, H., D. GUO, L. MA a J. LUO Experimental Investigation of Centrifugal Effects on Lubricant Replenishment in the Starved Regime at High Speeds. *Tribology Letters* [online]. 2015, 59(1): - [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1007/s11249-015-0526-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-015-0526-1>
- [38] WEINSTEIN, S. J. a K. J. RUSCHAK *Annual review of fluid mechanics*. Coating rows. 2004, (36): 29-53.
- [39] SAVAGE, M. *Journal of Fluid Mechanics*. Cavitation in lubrication - 1. on boundary conditions and cavity-fluid interfaces. 1977, 4(80): 743-755.

- [40] RUSCHAK, K. *Journal of Fluid Mechanics*. Boundary conditions at a liquid/air interface in lubrication flow. 1982, (119): 107-120.
- [41] TARONI, M., C. J. W. BREWARD, P. D. HOWELL a J. M. OLIVER *Journal of Fluid Mechanics*. Boundary conditions for free surface inlet and outlet problems. 2012, (708): 100-110.
- [42] COYNE, J. C. a J. R. H. ELROD *ASME*. Conditions for the rupture of a lubricating film - 1. 1969, 3(69).
- [43] COYNE, J. C. a J. R. H. ELROD *J Lubric Technol Trans ASME*. Conditions for the rupture of a lubricating film - 2. 1971, (93): 156-167.
- [44] REYNOLDS, O. *[No source information available]*. On the theory of lubrication and its application to mr. beauchamp tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. 1983, : 135-217.
- [45] HEWSON, R. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. Free surface model derived from the analytical solution of stokes flow in a wedge. 2009, 4(131): 51-55.
- [46] HEWSON, R. W., N. KAPUR a P. H. GASKELL *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. A model for film forming with newtonian and shear-thinning fluids. 2009, 1-3(162): 21-28.
- [47] CHONG, W. W. F., M. TEODORESCU a H. RAHNEJAT *Rupture and reformation of ultra-thin surface films*. In: . Montreal, Quebec, Canada: IDETC/CIE, 2010.
- [48] BRUYERE, V., N. FILLOT, G. E. MORALES-ESPEJEL a P. VERGNE *Journal of Tribology*. A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts. 2012, 4(134).
- [49] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ *Tribology series*. Starvation Phenomena in EHL Point Contacts: Influence of Inlet Flow Distribution. 1996, (31): 213-223.

- [50] KOŠTÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. 2011. Diplomová práce.
- [51] GOHAR, R. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. A Ball-Plate Machine for Measuring Elastohydrodynamic Oil Films. 1967, (182): 43-45.
- [52] KIRK, A. *Nature*. Hydrodynamic Lubrication of Perspex. 1962, (194): 965-966.
- [53] CAMERON, A. a R. GOHAR *Proc. Roy. Soc.* Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contacts. 1966, (291): 520-536.
- [54] SVOBODA, P., D. KOSTAL, I. KRUPKA a M. HARTL *Tribology International*. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. 2013, (67): 140-145.
- [55] SYRINGEPUMP.COM. . *Syringe Pump* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.syringepump.com/download/NE-1000%20Syringe%20Pump%20User%20Manual.pdf>
- [56] NOVOTNÝ, A. *Konstrukce adaptivního stírače kapaliny* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=2135. Bakalářská práce.
- [57] CAGAŠ, R. *Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek* [online]. 2015 [cit. 2015]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=2325. Diplomová práce.
- [58] HARTL, M., I. KŘUPKA a M. LIŠKA *Optical Engineering*. Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of chromatic interference patterns. 1997, 9(36): 2384-2391.
- [59] HARTL, M., I. KŘUPKA, M. LIŠKA, J. MOLIMARD a M. QUERRY *Tribology Transactions*. Thin Film Colorimetric Interferometry. 2001, 2(44): 270-276.

- [60] Manta G146 datasheet. *Allied Vision* [online]. b.r. [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/g-146/action/pdf.html>
- [61] Phantom v710 Datasheet. *Vision Research* [online]. b.r. [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/v710/>
- [62] FORD, R. A. J. a C. A. FOORD *Wear*. Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films. 1978, 2(51): 289-297.
- [63] SMART, A. E. a A. J. FORD *Wear*. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. 1974, (29): 41-47.
- [64] AZUSHIMA, A. *Tribology International*. In situ 3D measurement of oil film thickness at the interface between tool and workpiece in sheet drawing using a fluorescence microscope. 2005, 2(38): 105-112.
- [65] AZUSHIMA, A. *Wear*. In situ 3D measurement of lubrication behavior at interface between tool and workpiece by direct fluorescence observation technique. 2006, 3(260): 243-248.
- [66] REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA *Tribology Letters*. Lubricant Flow in an Elastohydrodynamic Contact Using Fluorescence. 2010, 3(38): 207-215.
- [67] NEČAS, D. *Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=2246. Pojednání k disertační práci.
- [68] KOŠTĚÁL, D, D NEČAS, P ŠPERKA, P SVOBODA, I KŘUPKA a M HARTL. Lubricant Rupture Ratio at Elastohydrodynamically Lubricated Contact Outlet. *Tribology Letters* [online]. 2015, 59(3): - [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1007/s11249-015-0565-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-015-0565-7>

- [69] ANDOR, . Neo 5.5 sCMOS. *Camera Specification* [online]. b.r. [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.andor.com/scientific-cameras/neo-and-zyla-scmos-cameras/neo-55-scmos>
- [70] FENG, R. a K. T. RAMESH *Journal of Tribology*. On the compressibility of elastohydrodynamic lubricants. 1993, 3(115): 557-559.
- [71] VENNER, C. H. a J. BOS *Wear*. Effects of lubricant compressibility on the film thickness in EHL line and circular contacts. 1994, (173): 151-165.
- [72] CEN, H., P. M. LUGT a G. MORALES-ESPEJEL On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds. *Tribology Transactions* [online]. 2014, 57(4): 668-678 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402004.2014.897781. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2014.897781>
- [73] LUGT, P. M., S. VELICKOV a J. H. TRIPP On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2009, 52(5): 581-590 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402000902825713. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000902825713>
- [74] LUGT, P. M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions* [online]. 2009, 52(4): 470-480 [cit. 2015-08-03]. DOI: 10.1080/10402000802687940. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000802687940>

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu [6].....	11
Obr. 2.2 Vlevo – EHD kontakt, vpravo – rané studie zaměřené na EHD mazání/ hladovění [13].	12
Obr. 2.3 Vliv polohy vstupní hranice na minimální tloušťku mazacího filmu [14].....	13
Obr. 2.4 Interferogramy znázorňující pokles tloušťky mazacího filmu v závislosti na přibližující se vstupní hranici [17]	14
Obr. 2.5 Vliv polohy vstupní oblasti (ψ_i) na redukci centrální tloušťky [17].....	15
Obr. 2.6 Bezrozměrná tloušťka filmu ($H = h / R_x$) na ose X pro tři hodnoty polohy vstupní oblasti m. Hodnota Y je konstantní poblíž středu kontaktu [18].	17
Obr. 2.7 Poloha vstupního menisku dopočítaná při definované tloušťce maziva před kontaktem [9].	18
Obr. 2.8 Profily filmu pro různé stupně hladovění [9]	19
Obr. 2.9 Centrální tloušťka mazacího filmu jako závislost tloušťky filmu na vstupu kontaktu [9]	19
Obr. 2.10 Centrální tloušťka mazacího filmu jako závislost tloušťky filmu na vstupu kontaktu dělená relativní hustotou – negace vlivu stlačitelnosti maziva [9]	20
Obr. 2.11 Porovnání teorie a experimentu definující závislost poklesu tloušťky filmu na počtu průchodů kontaktem (Predikce - 40 mm/s - $\gamma=2.9$; 16 mm/s - $\gamma=3.1$) [9]	21
Obr. 2.11 Vliv rychlosti valení na tloušťku mazacího filmu [21].....	22
Obr. 2.12 Vliv množství maziva na tloušťku mazacího filmu [21]	22
Obr. 2.13 Sdružení důležitých provozních parametrů do souhrnného parametru SD [21]	23
Obr. 2.14 Vliv MOES parametrů M a L na hodnotu γ pro různé elipticity [1].....	23
Obr. 2.15 Vliv počtu průchodů kontaktem n na redukci centrální tloušťky mazacího filmu R pro kruhový a eliptický kontakt [1].....	23
Obr. 2.16 Rychlost poklesu tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase pro různá zatížení (22)	24

Obr. 2.17	Výsledky pro soudečkové ložisko – změna distribuce mazacího filmu v kontaktu pro různé časové intervaly (24).....	25
Obr. 2.18	Vliv odstředivého zrychlení na distribuci maziva u soudečkového ložiska a geometrie na kuličkové ložisko (25)	26
Obr. 2.19	Teoretické predikce tloušťky filmu pro různé vstupní podmínky (26).....	27
Obr. 2.20	Schéma filmů vstupujících do kontaktu a formujících meniskus (26).....	27
Obr. 2.21	Schéma toku maziva v okolí hladovějícího EHD kontaktu (27)	29
Obr. 2.22	Výsledky teoretické predikce zahrnující Van der Waalsovy síly a jejich experimentální verifikace (28).....	30
Obr. 2.23	Relativní vliv jednotlivých složek na mazací film (28).....	31
Obr. 2.24	Vliv Van der Waalsových sil na vrstvu maziva v různém čase a pro různé počáteční vrstvy maziva (nalevo $h_c=10\text{nm}$, napravo $h_c=5\text{nm}$) (31)	31
Obr. 2.25	Experimentálně získané tvary hranice mazivo/vzduch na výstupu kontaktu (nalevo) a numericky získané varianty (vpravo) [31]	33
Obr. 2.26	Měření dvou pásů maziva vytvořených po průchodu kontaktem pro tři různé časy [33]	34
Obr. 2.27	Tloušťka mazací vrstvy uprostřed stopy jako funkce času [33]	34
Obr. 2.28	Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor [33]	35
Obr. 2.29	Chování volné vrstvy maziva v případě typickém pro ball-on-disc simulátor s přidaným zrychlením -1 m/s [33]	35
Obr. 2.30	Schéma geometrie zvažované v modelu (kuželíkové ložisko nalevo a kuličkové napravo) [23].....	36
Obr. 2.31	Výsledky efektu odstředivé síly pro různé časy a pro 1000 ot/min. Kuželíkové ložisko nalevo a kuličkové napravo. Plnou čarou jsou znázorněny výsledky modelu. Data z optického profilometru jsou vyneseny přerušovanou čarou. [23]	36
Obr. 2.32	Dělení maziva mezi povrchy v závislosti na SRR - numerický model [44].....	39
Obr. 2.33	Analytický model pro výpočet poměru dělení maziva v závislosti na SRR [44].....	39
Obr. 4.1	Pracovní hypotéza.....	45

Obr. 5.1	Koncept zkušebního zařízení.....	46
Obr. 5.2	Popis metody	47
Obr. 5.3	Celkový pohled na simulátor	48
Obr. 5.4	Schéma standartního zařízení typu ball-on-disc.....	49
Obr. 5.5	Skica experimentálního zařízení	50
Obr. 5.6	Syringe pump NE-1000 použitá pro dávkování maziva.....	51
Obr. 5.7	Tryska pro dávkování maziva	52
Obr. 5.8	Stírač maziva.....	53
Obr. 5.9	Konstrukce stírače [52].....	53
Obr. 5.10	Radiální posuv páky	54
Obr. 5.11	Lapovací zařízení pro soudečky	56
Obr. 5.12	Kontakt neobrobeného soudečku s diskem [53].....	57
Obr. 5.13	Kontakt obrobeného soudečku s diskem [53].....	57
Obr. 5.14	Princip interferometrie.....	59
Obr. 5.15	Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie [63].....	60
Obr. 5.16	Schéma měřící aparatury.....	61
Obr. 5.17	Měření povrchového napětí.....	62
Obr. 5.18	Ukázka měření povrchového napětí	63
Obr. 6.1	Měření polohy vstupního menisku.....	65
Obr. 6.2	Poloha menisku v závislosti na úrovni hladovnění dle par. R.....	67
Obr. 6.3	Doplňování maziva – ilustrace	69
Obr. 6.4	Porovnání šířky stopy před a za kontaktem	70
Obr. 6.5	Schéma konfigurace aparatury pro měření polohy menisku	71
Obr. 6.6	Polohy menisků dvou kontaktů.....	72
Obr. 6.7	Koncept experimentu s jedním elementem.....	73
Obr. 6.8	Změna tloušťky maziva ve středu stopy v závislosti na čase.....	74

Obr. 6.9	Kontakt soudečku a disku ovlivněný tvarem stopy v mazivu.....	75
Obr. 6.10	Profily vrstvy maziva mezi soudečkem a diskem pro různé časové prodlevy.....	76
Obr. 6.11	Profily vrstvy maziva ve stopě v mazivu za koulí	77
Obr. 6.12	Ilustrace procesu zaplavení valivé dráhy	78
Obr. 6.13	Koncept měření poměru vrstev maziva na výstupu	79
Obr. 6.14	Povrch disku	81
Obr. 6.15	Povrch koule	81
Obr. 6.16	Ukázka snímku zachyceného pomocí fluorescence	82
Obr. 6.17	Ukázka profilu stopy v mazivu	83
Obr. 6.18	Profily stop při čistém valení.....	84
Obr. 6.19	Poměr delta pro 3 různé střední rychlosti v závislosti na SRR.....	85
Obr. 6.20	Poměr delta pro 4 různé elipticity v závislosti na SRR.....	86
Obr. 6.21	Poměr delta pro 4 různá maziva v závislosti na SRR.....	87
Obr. 6.22	Poměr delta pro 6 různých kapilárních čísel v závislosti na SRR a porovnání s teorií.....	89
Obr. 6.23	Experimenty s konstantním množstvím maziva - porovnání s teorií	91
Obr. 6.24	Ukázka ovlivnění prvního kontaktu druhým	91
Obr. 6.25	Ukázka profilů filmu v sousledných kontaktech.....	92
Obr. 6.26	Experimenty s kontinuální dodávkou maziva - porovnání s teorií.....	93
Obr. 6.27	Ukázka profilu mazacího filmu soudečku při dávkování minimálního množství maziva	94
Obr. 6.28	Znázornění oblastí s různým experimentálním přístupem.....	96
Obr. 6.29	Závislost mezi tloušťkou maziva na vstupu a centrální tloušťkou	97
Obr. 6.30	Ukázka vlivu SRR na hodnotu hoil	98
Obr. 6.31	Vztah mezi hustotou maziva a tlakem.....	100
Obr. 6.32	Ukázka obou korekcí vůči originálním datům	101

Obr. 6.33 Výsledky zkorigované na dva zmíněné vlivy (SRR a kompresibilita maziva)	102
Obr. 6.34 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=0,44$) ...	104
Obr. 6.35 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=1$)	104
Obr. 6.36 Ukázka interferogramů obou kontaktů (první $k=4$, druhý $k=1,8$)	104
Obr. 6.37 Vliv parametru γ na poměr mezi h_{oil} a h_c	105
Obr. 7.1 Obtékání kontaktu	117

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ρ	[-]	- bezrozměrná hustota
ω	[N]	- vnější zatížení
h^*_{∞}	[nm]	- tloušťka filmu v tlakovém maximu při poloze hranice vstupní oblasti v ∞ .
h^*	[nm]	- tloušťka filmu v tlakovém maximu
$h_{oil\infty}$	[μ l]	- množství maziva v blízkosti kontaktu
h_{cff}	[nm]	- centrální tloušťka kontaktu při plně zaplaveném režimu
h_{oil}	[nm]	- tloušťka maziva na vstupu kontaktu
u_m	[m/s]	- střední valivá rychlost
σ_s	[mN/m]	- povrchové napětí
$H_{c,F}$	[-]	- centrální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{c,S}$	[-]	- centrální tloušťka hladovějícího kontaktu
H_{cff}	[-]	- bezrozměrná centrální tloušťka při plně zaplaveném režimu
$H_{min,F}$	[-]	- minimální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{min,S}$	[-]	- minimální tloušťka hladovějícího kontaktu
H_{oil}	[-]	- bezrozměrná tloušťka maziva na vstupu kontaktu
$R_{x,y}$	[m]	- redukované poloměry křivosti $1/R_x = 1/R_{x1} + 1/R_{x2}$
R_x	[-]	- redukovaný poloměr křivosti kontaktní plochy ($1/R_x = 1/R_{x1} + 1/R_{x2}$)
m^*	[-]	- bezrozměrná vzdálenost (poměr mezi vstupními hranicemi pro plně zaplavený a hladovějící kontakt.
r_0	[-]	- relativní tloušťka mazacího filmu $H_{oil} / H_{cff} / \rho$
$u_{1,2}$	[m/s]	- vstupní rychlosti povrchů (1 – disk, 2 – koule)
x_i	[mm]	- poloha hranice vstupní oblasti
β^*	[-]	- vliv hladovění na centrální tloušťku v oblasti tlakového maxima (h^*/h^*_{∞})

ψ_i	[-]	- bezrozměrná poloha hranice vstupní oblasti
a	[μm]	- polovina Hertzovy kontaktní oblasti (kolmé k valivému směru)
a'	[μm]	- šířka valivé dráhy
Δ	[-]	- poměr tloušťek vrstev maziva na výstupu kontaktu
E'	[-]	- redukovaný modul pružnosti $2/E' = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$
H	[-]	- bezrozměrná tloušťka mazacího filmu
L	[-]	- bezrozměrný parametr materiálu (MOES), $(L=G(2U)^{1/4})$
R	[-]	- redukce centrální tloušťky mazacího filmu (H_c/H_{cff})
Ra	[nm]	- aritmetická drsnost profilu povrchu
SD	[-]	- Stupeň hladovění (Starvation Degree)
SRR	[-]	- poměr kluz-valení (0 – čisté valení) $2 \cdot (u_1 - u_2)/(u_1 + u_2)$
U	[-]	- bezrozměrný parametr rychlosti $(\eta u)/(E'R_x)$
W	[-]	- bezrozměrný parametr zatížení $\omega/(E'R_x^2)$
Wa	[nm]	- vlnitost profilu povrchu
Y	[-] (x/a)	- bezrozměrná souřadnice ve směru kolmém na směr valení
k	[-]	- elipticita kontaktu $(1.0339 \cdot (R_y/R_x)^{0.636})$
m	[-]	- bezrozměrná vzdálenost vstupního menisku
n	[-]	- počet průchodů kontaktem
s	[mm]	- vzájemná vzdálenost kontaktů
t	[s]	- čas
γ	[-]	- odpor proti bočnímu tečení (Pro kruhový EHL se pohybuje mezi 2 a 5)
η	[Pas]	- dynamická viskozita maziva za atmosférického tlaku
$\delta_{1,2}$	[-]	- tloušťka vrstev maziva na kontaktních površích na výstupu
M	[-]	- bezrozměrný parametr zatížení (MOES), $(M=W(2U)^{-3/4})$