



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM HLADOVĚJÍCÍHO
KONTAKTU**

EXPERIMENTAL STUDY OF THE STARVED LUBRICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Antonín Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Antonín Novotný
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. David Košťál, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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

Experimentální studium hladovějícího kontaktu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je experimentální studium chování hladovějícího elastohydrodynamického kontaktu při přesně definované tloušťce maziva na vstupu kontaktu a popis tohoto chování.

Cíle diplomové práce:

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

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

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace

Projekt: Specifický vysokoškolský výzkum

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

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2010). Konstruování strojních součástí. Brno: VUTUM.

Stachowiak, G. W. Batchelor, A. W. Stachowiak, G. B. (2004). Experimental Methods in Tribology. 1st edition. Amsterdam: Elsevier B.V., 354 p. ISBN 0-444-51589-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním studiem elastohydrodynamického kontaktu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Úroveň hladovění tohoto typu kontaktu je možné experimentálně určit podle polohy vstupního menisku, avšak nelze tímto způsobem zjistit všechny jeho úrovně hladovění. Následným vývojem v této oblasti tribologie bylo dosaženo teoretického modelu, který dokáže stanovit všechny úrovně hladovění v závislosti na vstupující tloušťce filmu maziva do kontaktu, ale je poměrně náročné jeho experimentální zjištění. Cílem této práce je experimentální studium a popis chování elastohydrodynamického kontaktu při přesně definované tloušťce filmu maziva na vstupu kontaktu. Přínosem práce je ověření zmíněného teoretického modelu pro základové oleje i plastická maziva z nich vyrobená a vzájemné porovnání jejich chování.

KLÍČOVÁ SLOVA

hladovění, tloušťka filmu maziva, mazání, kontaktní oblast, dráha kontaktů

ABSTRACT

This master's thesis deals with the experimental study of an elastohydrodynamic contact under conditions of insufficient lubricant supply. Starvation level of this type of the contact may be experimentally determined based on the input position of the meniscus, but this way can't determine all its levels of starvation. Consequent development in the field of tribology achieved theoretical model that can determine at all levels of starvation depending on the thickness of the lubricant film entering the contact, but it is relatively difficult for experimental verification. The main goal of this work is an experimental study and describes the behavior of elastohydrodynamic contact at an exactly defined thickness of the lubricant film at the contact input. The benefit of this work is a validation of that mentioned theoretical model for base oils and greases made from them, and mutual comparison of their behavior.

KEYWORDS

starvation, lubricant film thickness, lubrication, contact area, contact track

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, A. *Experimentální studium hladovějícího kontaktu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Košťál, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia a poskytovali mi dobré studijní zázemí.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Experimentální studium hladovějícího kontaktu vypracoval samostatně pod vedením Ing. Davida Košťála, Ph. D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. května 2016

.....
vlastnoruční podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Vlastnosti kapalných a plastických maziv	14
2.1.1 Kapalná maziva	15
2.1.2 Plastická maziva	15
2.2 Typy mazaných kontaktů rozdělených dle tloušťky filmu maziva oddělující třecí povrchy	18
2.2.1 Porovnání plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu	18
2.2.2 Přechod mezi podmínkami plně zaplavenými a hladovějícími pro kontakt mazaný olejem	20
2.2.3 Chování plastických maziv u plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu	25
2.3 Vliv prokluzu třecích povrchů	30
2.4 Pohyb maziva (uvnitř a okolo kontaktu)	32
2.4.1 Efekt doplňování pro oleji mazaný kontakt	32
2.4.2 Efekt doplňování pro kontakt mazaný plastickými mazivy	35
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	37
3.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	37
3.2 Cíl diplomové práce	38
4 MATERIÁL A METODY	39
4.1 Metody použité pro vyhodnocení experimentálních měření	39
4.1.1 Optická interferometrie	39
4.1.2 Fluorescence	40
4.2 Měřicí aparatura (simulátor kontaktu)	41
4.3 Metodika a podmínky měření	42
5 VÝSLEDKY	45
5.1. Přepočet teoretického modelu pro daný typ maziva	45
5.1.1 Odpor proti bočnímu výtoku maziva (γ)	45
5.1.2 Provozní parametry Moes	46
5.1.3 Dynamická viskozita maziv	48
5.1.4 Tlakově-viskózní koeficient (α)	48
5.1.5 Výsledky přepočítaného teoretického modelu	49
5.2 Závislost centrální tloušťky hladovějícího EHD kontaktu na přesně definované tloušťce maziva vstupující do kontaktu	50
5.2.1 Vstupní měření závislosti h_c na h_{oil}	50
5.2.2 Vlivu prokluzu	52
5.2.3 Vliv stlačitelnosti maziva	58
5.2.4 Zjištěné závislosti h_c na h_{oil} všech typů vzorků maziv	60
6 DISKUZE	64
7 ZÁVĚR	69
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	76
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78
11 SEZNAM TABULEK	81
12 SEZNAM PŘÍLOH	82

1 ÚVOD

Tato diplomová práce přispívá k rozšíření informací v odvětví zabývajícím se experimentálním studiem hladovějícího kontaktu. Tato studie spadá do vědní disciplíny tribologie, což je věda zkoumající procesy mazání, tření a opotřebení.

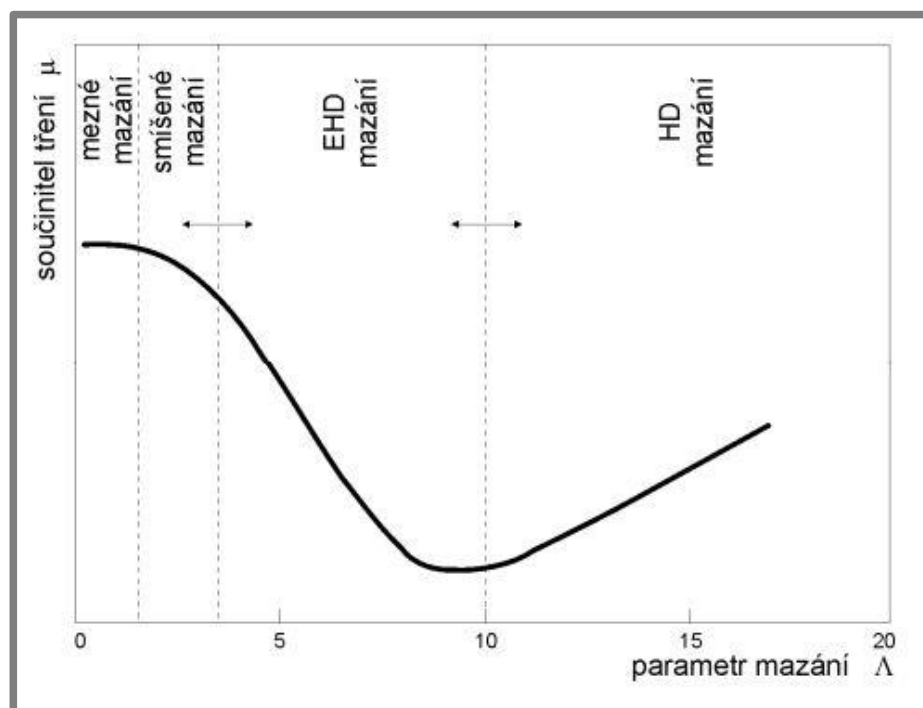
Ve strojírenství nastala doba, kdy se konstruktéři snaží snížit velikost součástí a zároveň umožnit přenášení vyššího zatížení, výkonu a rychlosti. Tuto skutečnost lze pozorovat na valivých ložiscích, jejichž valivé elementy musejí být schopny přenášet vysoká zatížení za zvýšených rychlostí. Při nekonformním styku povrchů mezi ložiskovým elementem a ložiskovým kroužkem dochází k oddělení jejich povrchů tenkou tloušťkou mazacího filmu. Specifickými vlastnostmi uvedeného režimu mazání je působení vysokého tlaku a změna reologie maziva při průchodu kontaktem. Důsledkem zvyšujících se požadavků na valivá ložiska dochází ke snížení tloušťky mazacího filmu nebo k jeho úplnému selhání, což způsobuje nedostatečné zásobování kontaktu mazivem. Tento nedostatečně mazaný kontakt se označuje jako hladovějící.

Samotný EHD kontakt se v reálných aplikacích objevuje pouze zřídka. Ve většině případů se vyskytuje jako vícenásobný. U vícenásobných kontaktů, jako jsou valivá ložiska, je tloušťka filmu maziva vstupující do kontaktu vytvořena předcházejícím kontaktem, z něhož mazivo vystupuje a tak nastává ovlivnění dalšího kontaktu. Závislost centrální tloušťky filmu maziva na změně vstupující tloušťky maziva do kontaktu je v této diplomové práci experimentálně zjištěna pro tři typy základových olejů a plastických maziv, která jsou z nich vyrobená.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

V dnešní době patří mezi často používané mechanické součásti valivá ložiska, ozubená kola a vačky. Nejen u těchto součástí je zapotřebí dodržet jejich správnou funkčnost po období jejich předpovídané životnosti, a proto konstruktér musí správně navrhnout konstrukci a funkci strojní soustavy. Pohyblivé stykové plochy u uvedených součástí jsou oddělovány tenkým filmem maziva, který snižuje tření a zabraňuje poškození povrchů. Kontakt vytvořený tenkým filmem maziva za vysokého tlaku a zvyšující se viskozity mezi nekonformními povrchy, kde elastické deformace mazaných povrchů podstatně ovlivňují tloušťku filmu maziva, se nazývá elastohydrodynamický kontakt (zkratka EHD). Elastohydrodynamické mazání tvoří jeden ze specifických režimů mazání, které mohou být zobrazeny jako závislosti součinitele tření na parametru mazání (obr. 2-1). Tento parametr určuje redukovanou drsnost povrchů, která společně s tloušťkou mazacího filmu stanovuje životnost třecích povrchů. Pro výpočet parametru mazání je zapotřebí znát minimální tloušťku maziva, která je vydělena redukovanou kvadratickou úchylkou třecích povrchů [1, 2].



Obr. 2-1 Závislost součinitele tření na parametru mazání [2]

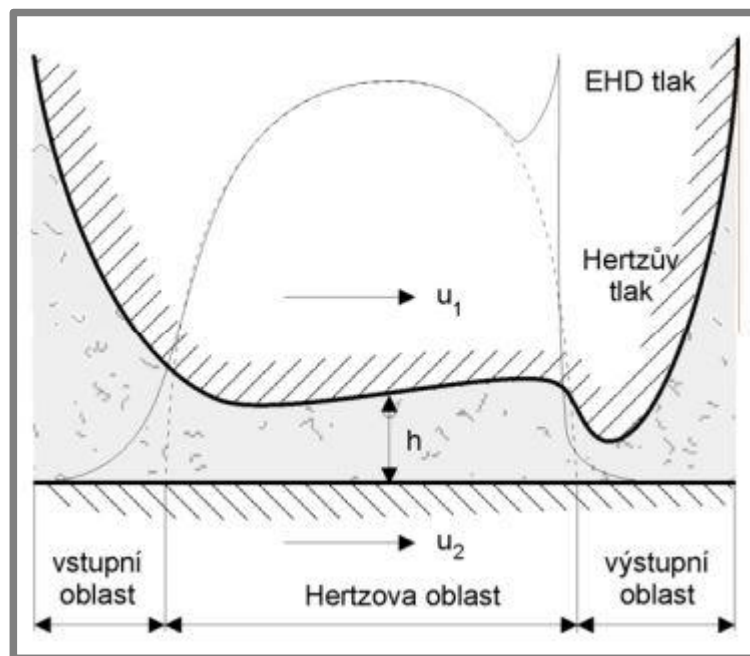
Historie vývoje EHD mazání se traduje již od roku 1886, kdy Reynolds publikoval [3] svoji diferenciální rovnici vysvětlující rozložení tlaku a schopnost filmu maziva přenášet zatížení v parciálních ložiskách, což byla reakce na experimenty provedené B. Towerem [4, 5]. O další důležitý posun ve vývoji mazání se postarali v roce 1916 Martin [6] a Gumbel [7], v roce 1941 Meldahl [8] a v roce 1945 Ertel [9], kteří svým přispěním a postupným vývojem docílili schopnosti předpovídat tloušťku plně zaplaveného kontaktu [1].

Tímto byl započat vývoj EHD filmu a od této doby se již uskutečnilo několik studií teoretických i experimentálních, ale stále zůstávají některá odvětví této problematiky neprozkoumaná a neobjasněná. Příkladem může být řešená problematika v této diplomové práci, která se věnuje kontaktu nedostatečně zásobovaným mazivem.

Mechanismus utváření elastohydrodynamického mazacího filmu (obr. 2-2) mezi dvěma nekonformními povrchy při relativním pohybu je ovlivněn následujícími faktory [10]:

- vytvořením hydrodynamického filmu,
- modifikací geometrie mazacího filmu při působení elastické deformace,
- změnou viskozity a reologie maziva při zvyšujícím se tlaku.

V případě působení těchto tří faktorů současně vzniká EHD film, jehož typická tloušťka odpovídá 0,1 μm až 1 μm . I když je mazací film velmi tenký, dokáže oddělit třecí povrchy, a tím významně snížit opotřebení a tření [10].



Obr. 2-2 Schéma elastohydrodynamického mazaného kontaktu [11]

2.1 Vlastnosti kapalných a plastických maziv

Nauka o mazivech je nedílnou součástí vědního oboru tribologie. Zpravidla jsou maziva výrobkem petrochemie a dnes se používají látky ve všech skupenstvích. Týká se to např. plynů, ropných olejů, syntetických olejů, plastických a tuhých maziv [12].

Maziva, ač v jiných složeních a skupenstvích, mají za úkol snížit tření v místech vzájemného dotyku dvou těles v relativním pohybu, což ale není jediný úkol, který mají splňovat. Mezi další významné úlohy patří snížení opotřebení, odvádění tepla, působení jako těsnící činitel, odstraňování nečistoty z třecích povrchů a jako ochrana kovové plochy před korozí [13].

2.1.1 Kapalná maziva

Kapalná maziva reprezentují největší kategorii používaných maziv v praxi. Rozdělují se do tří skupin podle původu. První skupinou jsou minerální (ropné) oleje, což je dominantní skupina, dále pak syntetické oleje a v menší míře oleje rostlinného (živočišného) původu. Kapalná maziva jsou často tvořena zušlechťujícími látkami, které vylepšují základní vlastnosti oleje získané ze základového oleje. Dále zušlechťující látky vytvářejí nové (doplňující) vlastnosti oleje tak, aby byly splněny pracovní podmínky pro jeho použití. Tato maziva zajišťují široký rozsah použití a to jako samostatně používaná nebo tvoří složku v plastických mazivech a vodních emulzích [12, 13].

Minerální oleje specifických vlastností lze vyrobit pomocí vhodné kombinace ropných surovin a technologií výroby s užitím správné zušlechťující přísady v jejich dobré kombinaci a množství [12].

Jejich základní chemické formy rozdělujeme na [10]:

- parafinické,
- naftenické,
- aromatické.

Ačkoli syntetické oleje v určitých případech zastihují minerální oleje, přesto jsou minerální oleje schopny dobře zabezpečit mazání i jiné činnosti v širokých podmínkách použití. Příkladem využití syntetického oleje vůči minerálnímu oleji může být případ mazání za velmi nízkých nebo vysokých teplot ve značně širokém teplotním rozsahu použití. Dalšími případy jsou prostředí, ve kterých hrozí vystavení účinkům záření nebo samovolné vznícení maziva. Rozsah použití syntetických olejů je relativně malý vzhledem k vyšší ceně a těžší dostupnosti. Uplatnění nacházejí v oblasti leteckého průmyslu, jaderných elektrárnách apod. Mnoho z nich slouží jako zušlechťující přísady do minerálních olejů [12].

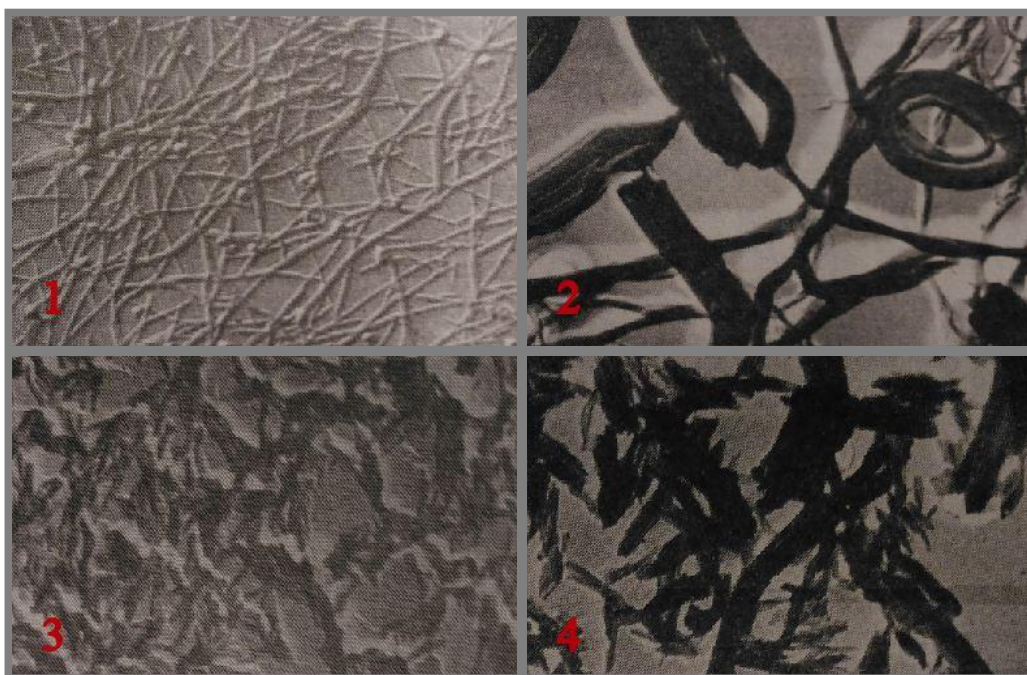
Syntetické oleje se rozdělují podle jejich chemického složení na [12]:

- polymery alkenů,
- alkylaromáty,
- fluórované a chlórované uhlovodíky,
- polyalkylénykoly (polyalkyléry),
- polyfenyléry,
- alkylestery monokarboxylových alifatických kyselin,
- alkylestery dikarboxylových alifatických kyselin,
- alky- nebo arylestery kyseliny fosforečné,
- alky- nebo arylestery kyselin křemičitých,
- polysiloxany.

2.1.2 Plastická maziva

Plastické mazivo má koloidní strukturu (disperze). Jsou to převážně gely nebo vzácněji soli, v nichž obou mazací olej vytváří spojitou (disperzní) fázi a anizotropní tuhá látka (zpevňovadlo) reprezentuje dispergovanou fázi. Gel, vzniklý spojením mazacího oleje a tuhé fáze, která spojitě prostupuje kapalnou fází ve formě souvislé kostry, získává vlastnosti charakteristické pro plastický stav. Z makroskopického hlediska se plastická maziva rozdělují na vláknitá, houbovitá, máslovitá a vzácněji zrnitá [12].

Hlavní rozdíl mezi oleji a plastickými mazivy je v jejich složení. Plastické mazivo je složeno z nejméně dvou složek - mazacího oleje a zpevňovačla. Některá plastická maziva obsahují i další složky, plnidla a zušlechťující přísady. Konzistenci a charakteristiku jednotlivých plastických maziv (obr. 2-3) určuje vnitřní struktura a velikost krystalů zpevňovačla, které jsou obsaženy ve vnitřní struktuře. Více konzistentnější mazivo se reprezentuje větším poměrem délky vlákna k jeho průměru. Čím jsou síly vzájemné přitažlivosti působící mezi olejovou fází a krystaly zpevňovačla větší, tím je celá koloidní soustava stálejší. Velikost této síly závisí na poměru povrchu krystalů k jejich objemu. Tudiž čím je tento poměr větší, tím je větší i již zmíněná vzájemná přitažlivá síla [12].



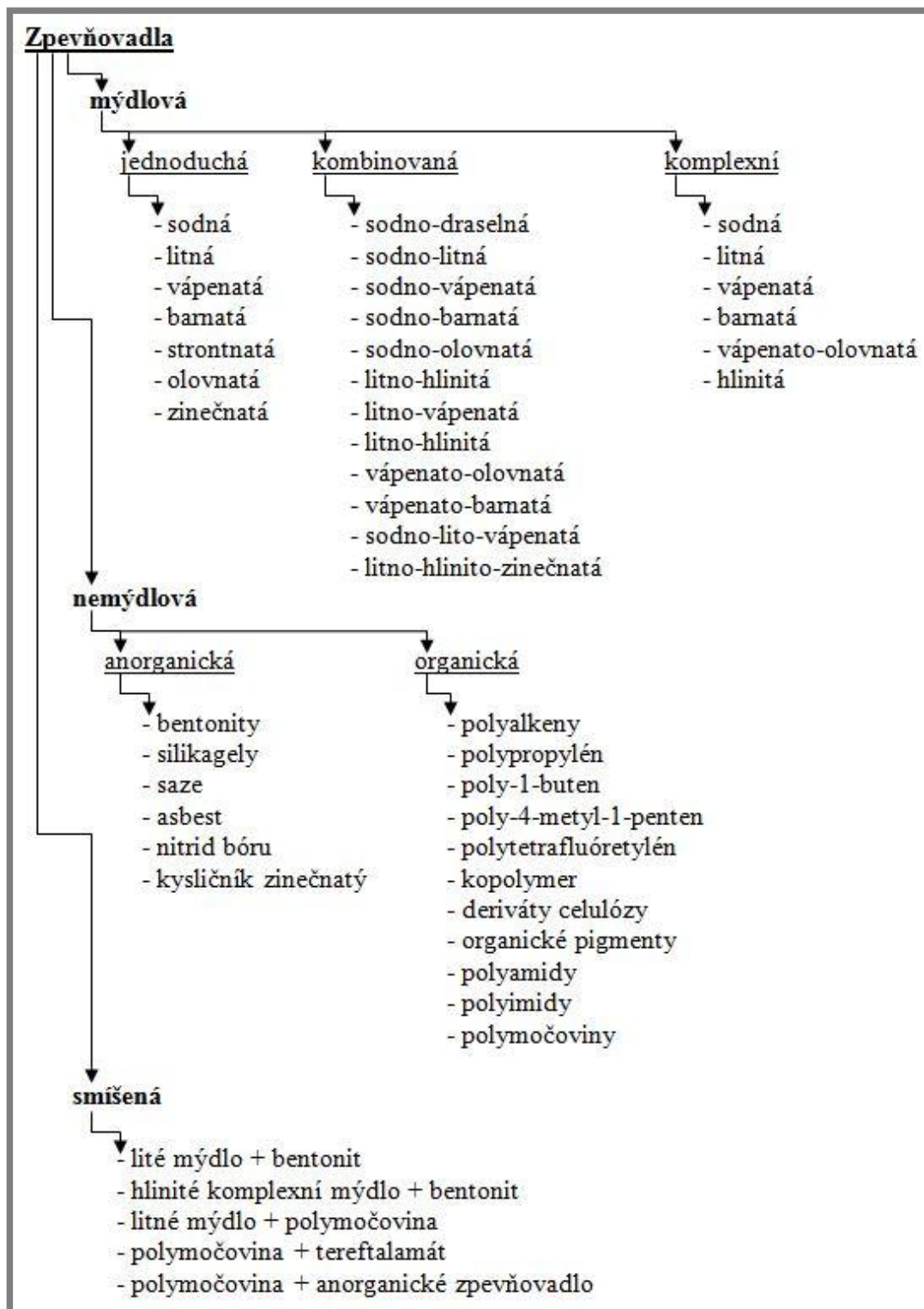
Obr. 2-3 Vnitřní struktura různých zpevňovačel, 1 – Ca-komplexní mýdlo ze syntetických kyselin, 2 – Na-mýdlo z mastných kyselin, 3 – Ca-mazivo s alkalitou 0,18 % NaOH, 4 – Ca-komplexní mýdlo z kyseliny hydroxystearové a octové [12] (upraveno)

Gelová maziva jsou většinou newtonovské kvaziplastické látky. Při velkém smykovém napětí a opakovaném namáhání dochází k rozrušení jejich vnitřní struktury. Výsledkem tohoto působení je zmenšující se viskozita a mezní napětí [12].

Jak již bylo zmíněno, o vlastnostech plastických maziv rozhodují složky - mazacího oleje, zahušťovačla a podmínky výroby. Spolupůsobení obou složek je nutné, jinak vzniká mazivo koloidně nestálé a tudíž nevhodné [12].

Mazací olej, jako jeden z hlavních složek plastického maziva, ovlivňuje svými vlastnostmi řadu důležitých vlastností plastického maziva z něj vyrobeného. Převážně se používají minerální oleje, jejichž cena je podstatně nižší, než u olejů syntetických. Druhou hlavní složkou je zpevňovačlo, které způsobuje přechod kapaliny (mazacího oleje) do tuhého stavu, který se působením síly změní na plastický. Struktura a vlastnosti plastického maziva jsou značně ovlivněny vlastnostmi a množstvím zpevňovačla. Koloidní stálost a konzistence plastického maziva se zvyšuje se vzrůstajícím obsahem zpevňovačla. Jeho obsah je převážně

od 7 % do 30 %, ale určuje se podle vlastností zpevňovadla a požadovaného konzistenčního stupně. Používaná zpevňovadla jsou rozříděna do několika skupin dle schématu uvedeného níže na obr. 2-4. Maziva s mýdlovými zpevňovadly tvoří největší skupinu z vyráběných plastických maziv [12]



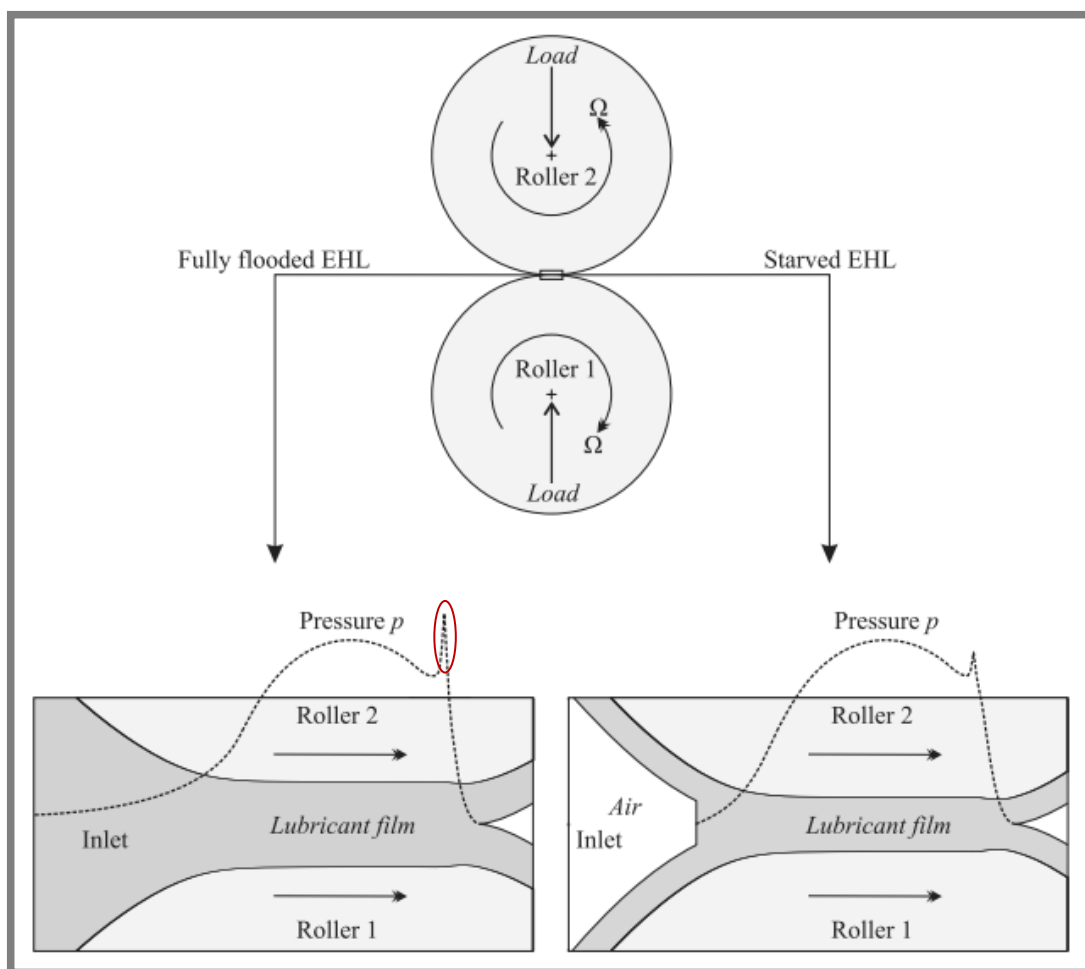
Obr. 2-4 Schéma rozdělení zpevňovadel [12] (upraveno)

2.2 Typy mazaných kontaktů rozdělených dle tloušťky filmu maziva oddělující třecí povrchy

EHD kontakt je nejvíce ovlivněn množstvím dodávaného maziva do kontaktu, reologií maziva a provozními podmínkami. Tyto faktory utvářejí tloušťku mazaného filmu v kontaktu, který je z hlediska charakteru podmínek mazání rozdělen na skupiny kontaktů: plně zaplaveného, přechodového a hladovějícího. Všechny tyto skupiny jsou níže podrobně popsány.

2.2.1 Porovnání plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu

Elastohydrodynamický režim mazání může být v krajních mezích plně zaplavený mazivem, nebo naopak je pouze mazán velmi tenkou vrstvou filmu. Tento režim mazání se rozděluje na dvě odlišné skupiny. Na skupinu mazaných kontaktů za plně zaplavených podmínek a na druhou skupinu, ve které je kontakt nedostatečně zásobován mazivem, neboli hladový.



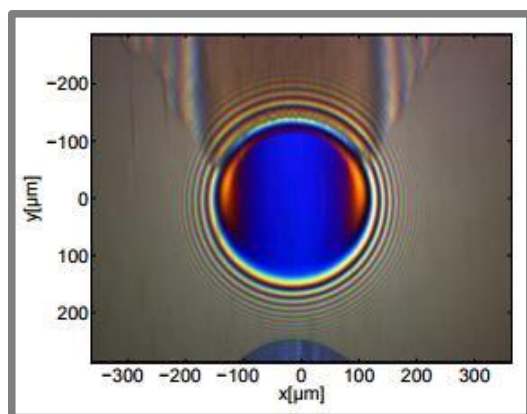
Obr. 2-5 EHL kontakt při plně zaplavených (vlevo) a hladovějících podmínkách (vpravo), zvýrazněná červená oblast reprezentuje nárůst maximálního tlaku [14]

Na obr. 2-5 je znázorněna tloušťka filmu a tlakové rozložení pro EHL kontakt vytvořený mezi dvěma odvalujícími válci za hladovějících (napravo) a plně zaplavených podmínek (nalevo) [15].

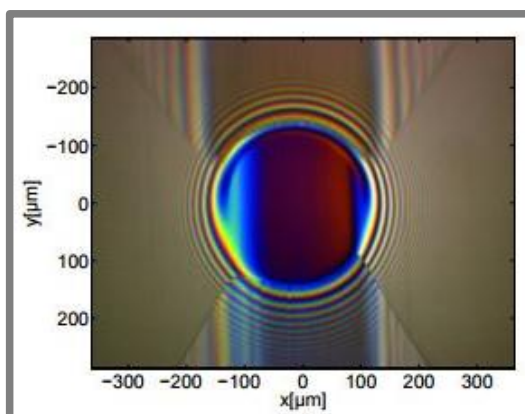
Při plně zaplavených podmínkách je mezera na vstupu kontaktu mezi třecími povrchy plně zaplavená mazivem. Kontaktní tlak v mazivu začíná vznikat daleko od kontaktní oblasti. Blízko před výstupem maziva z Hertzova kontaktu nastává okamžitý nárůst tlaku na maximální hodnotu, což je důsledek elastické konstrikce mezery mezi třecími povrchy pro průchod maziva. Tento maximální tlak lze vidět na obr. 2-5 v červeně zvýrazněné oblasti. Kontaktní plochy jsou odděleny větší tloušťkou mazacího filmu, než u hladovějícího kontaktu [1].

Když je kontakt nedostatečně zásobován mazivem, tak tlak nastává teprve v místech, kde dochází ke spojení maziv zachycených na površích kontaktních těles. Tento opožděný nárůst tlaku je způsoben nedostatkem maziva, které v případě plně zaplaveného kontaktu vyplní vstupní mezeru mezi třecími povrchy. Nedostatek maziva tedy způsobí výskyt menisku (na obr. 2-5 znázorněn v Inlet oblasti), nižší maximální tlak a významné snížení tloušťky maziva oddělující povrchy oproti plně zaplavenému kontaktu [1, 15, 16].

Rozdíl mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem lze pozorovat na dvou snímcích na obr. 2-6 a 2-7, které byly pořízeny za použití metody optické interferometrie při experimentálním měření tloušťky maziva v kontaktu tvořeného ocelovou kuličkou a skleněným diskem. Obě měření proběhla za stejných provozních podmínek až na rozdílné rychlosti valení. Barvy označují tloušťku filmu maziva a tok maziva směřuje ze spodní části snímku (obr. 2-6) přes kontaktní oblast k horní části snímku. Tento způsob toku maziva platí pro obě měření [1, 17].



Obr. 2-6 Rychlost valení 0,308 m/s [17]
(upraveno)



Obr. 2-7 Rychlost valení 1,104 m/s [17]
(upraveno)

Snímek obr. 2-6 byl zachycen poměrně v nízkých rychlostech valení, proto mělo vytlačené mazivo po průchodu kuličky dostatečný čas k vrácení se do dráhy vytvořené kuličkou. Tudíž byla vytvořená dráha od kuličky vždy včas zaplavená před dalším průchodem kuličky. Tento kontakt je tedy téměř plně zaplavený, protože vzniklý meniskus u spodní hrany obrázku je daleko od oblasti (Hertzova) kontaktu a tím nedochází k výraznému ovlivnění jeho tloušťky filmu maziva v kontaktu. Naopak ovlivnění tloušťky maziva v kontaktu nastalo u vyšší rychlosti (obr. 2-7), kde došlo ke spojení mezi meniskem a oblastí (Hertzova) kontaktu, protože se mazivo nestíhalo vracet zpět do valivé dráhy kuličky [1].

2.2.2 Přejchod mezi podmínkami plně zaplavenými a hladovějícími pro kontakt mazaný olejem

Autoři, zabývající se hranicemi přechodu mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem, se snažili jednak vytvořit určitý parametr, který by dokázal striktně stanovit meze a dále vytvořený parametr experimentálně ověřit. Jedna z prvních prací zabývající se touto problematikou byla publikace [18], která teorii převzala z dřívějších prací [19, 20]. V první z těchto publikací [19] byl představen elastický model, ve kterém je kontaktní zóna rozdělena na stejné obdélníkové plochy a na každé z nich je tlak rovnoměrně rozdělen. Druhá práce [20] objasnila celkový přístup k řešení problému EHD bodového kontaktu. Důležitým poznatkem z druhé práce je stanovení minimální tloušťky maziva v kontaktu. Shrnutí předcházejících teorií [19, 20] poskytla práce [21], která stanovila vliv elipticity, bezrozměrné rychlosti, zatížení a materiálových parametrů na tloušťku filmu.

Jak již bylo zmíněno, publikace [18] navázala na předchozí poznatky prací a vytvořila rovnice pro bezrozměrný vstupní parametr m^* určující přechod mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem. V případě, kdy hodnota bezrozměrné vstupní vzdálenosti m , je menší jak m^* (2-1, 2-2), nastává hladovění kontaktu. Autoři uvedli ve článku další dvě rovnice vyjadřující centrální (2-3) a minimální (2-4) tloušťku maziva hladovějícího kontaktu. Skupina čtyř prací uvedených výše poskytuje podklady pro další výzkum hladovějícího i plně zaplaveného kruhového kontaktu.

$$m^* = 1 + 3,06 \cdot \left[\left(\frac{R_x}{b} \right)^2 \cdot H_{c,F} \right]^{0,58} \quad (2-1)$$

$$m^* = 1 + 3,34 \cdot \left[\left(\frac{R_x}{b} \right)^2 \cdot H_{min,F} \right]^{0,56} \quad (2-2)$$

$$H_{c,s} = H_{c,F} \cdot \left(\frac{m - 1}{m^* - 1} \right)^{0,29} \quad (2-3)$$

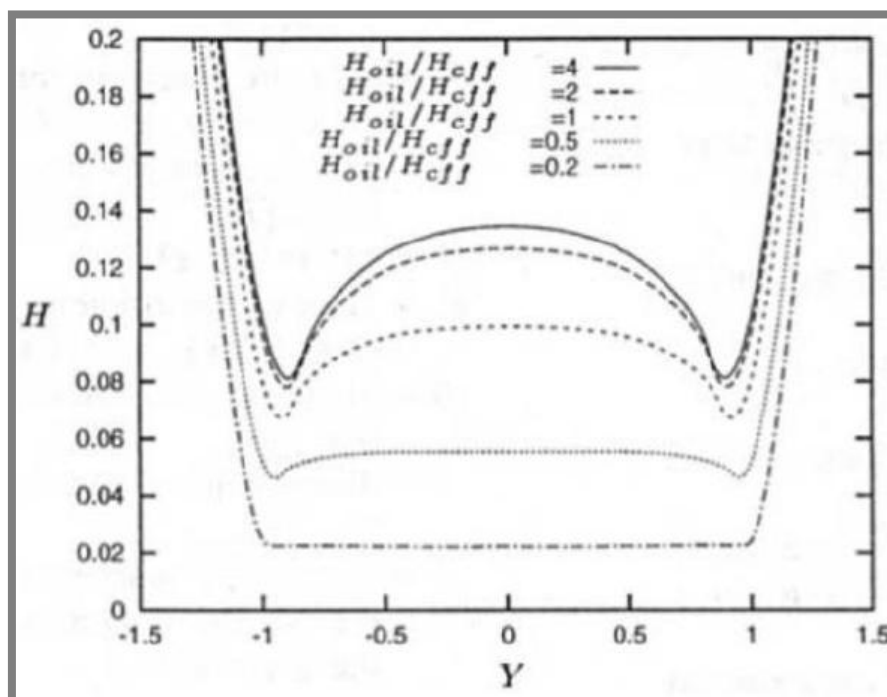
$$H_{min,s} = H_{min,F} \cdot \left(\frac{m - 1}{m^* - 1} \right)^{0,25} \quad (2-4)$$

kde:

b	mm	- malá poloosa Hertzova kontaktu (ve směru valení)
$H_{c,F}$		- centrální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{c,s}$		- centrální tloušťka hladovějícího kontaktu
$H_{min,F}$		- minimální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{min,s}$		- minimální tloušťka hladovějícího kontaktu
m		- bezrozměrná vzdálenost vstupní oblasti
m^*		- bezrozměrná vzdálenost mezi vstupními hranicemi pro plně zaplavený a hladovějící kontakt
R_x	mm	- redukovaný parametr křivosti ve směru osy x

Pozdější vývoj EHD hladovějícího kontaktu odhalil obtížnost měření úrovně hladovění definující se podle parametru vzdálenosti vstupní oblasti (menisku) od hranice tlakové oblasti. Tento způsob měření tloušťky filmu se stává extrémně citlivý se zvyšující se úrovní hladovění a je téměř nemožné tímto způsobem zjišťovat míru

hladovění v reálných aplikacích. V případě zvyšování úrovně hladovění se vstupní meniskus přibližuje k oblasti (Hertzově) kontaktu, až dojde ke sloučení těchto dvou hranic, při čemž se ve skutečnosti tloušťka mazacího filmu stále snižuje, ale dle předchozích rovnic by po spojení těchto hranic nemělo docházet k dalšímu snižování tloušťky filmu maziva v kontaktu. Proto se tato metoda nedá použít k měření extrémní úrovně hladovění, kdy dochází ke spojení vstupního menisku s oblastí kontaktu. Tento fakt vedl k vývoji dalších způsobů měření. V roce 1998 byla publikovaná práce [22] prezentující teoretický model stanovující všechny úrovně hladovění. Pro určení úrovně hladovění je místo parametru vzdálenosti vstupního menisku od hranice tlakové oblasti použit parametr tloušťky maziva nacházející se v blízkosti vstupu do kontaktu (H_{oil}). Pomocí tohoto parametru lze následně získat jak polohu vstupního menisku, tak redukci centrální tloušťky.

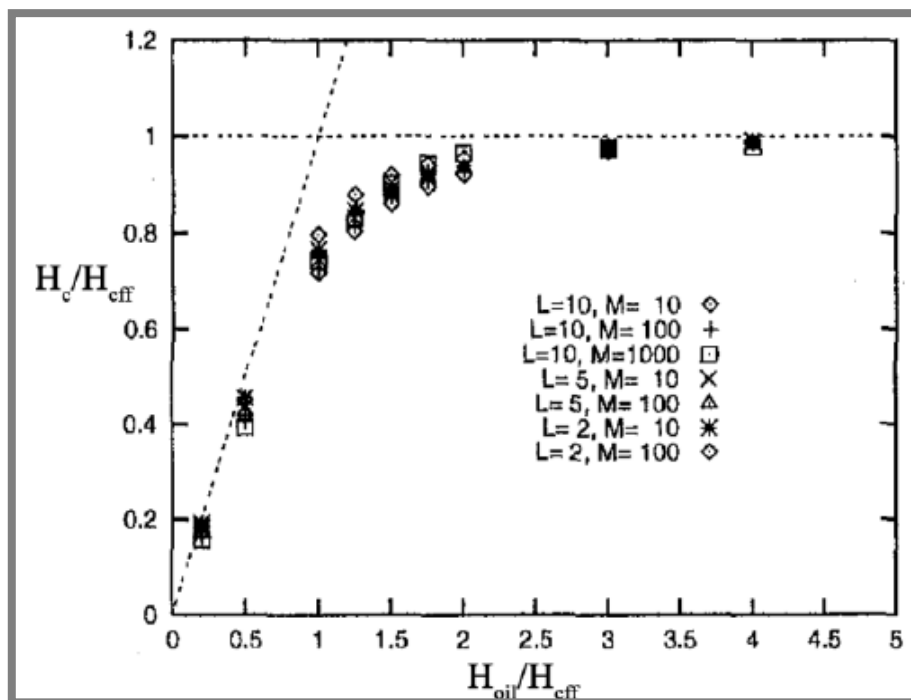


Obr. 2-8 Profil hladovění pro odlišné zásobování [22]

- 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

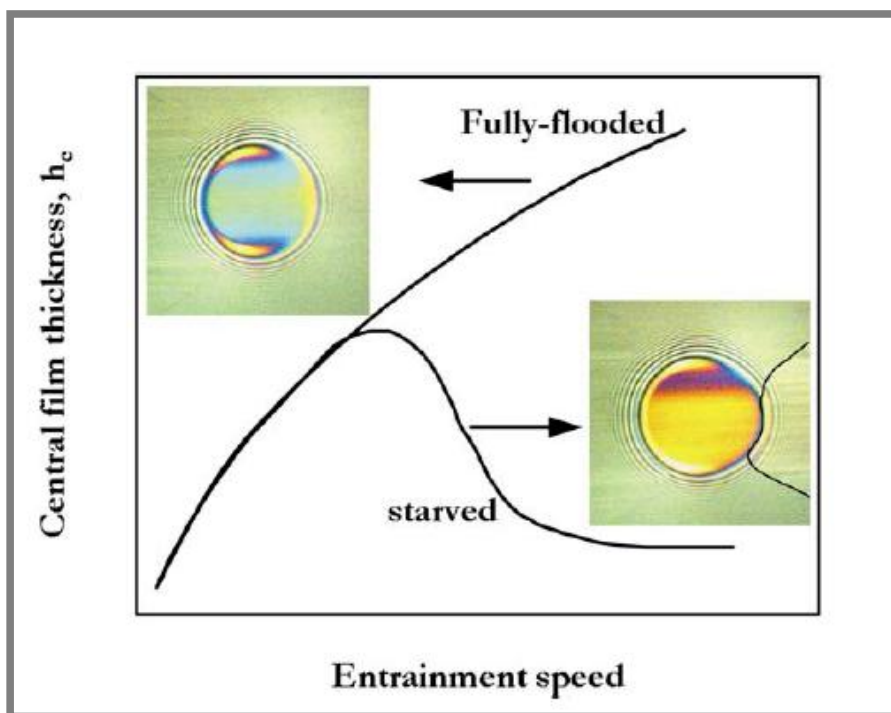
Obr. 2-8 zobrazuje rozložení tloušťky mazacího filmu příčného průřezu pro rozdílné úrovně hladovění. Hlavním parametrem popisujícím míru hladovění na tomto obrázku je poměr H_{oil}/H_{cff} . Lze si všimnout, že při zvyšování úrovně hladovění dochází ke snížení centrální tloušťky rychleji než u minimální tloušťky. V případě, že se H_{oil} stane velmi malým v porovnání s H_{cff} , dojde k rozložení tloušťky maziva, které se přiblíží plochému Hertzovu tvaru.

Na následujícím obr. 2-9 jsou vyneseny relativní hladovějící křivky pro různé provozní podmínky (Moes). Jejich nepatrnou odlišnost způsobuje stlačitelnost maziva.



Obr. 2-9 Závislost centrální tloušťky na vstupující tloušťce maziva do kontaktu [22]

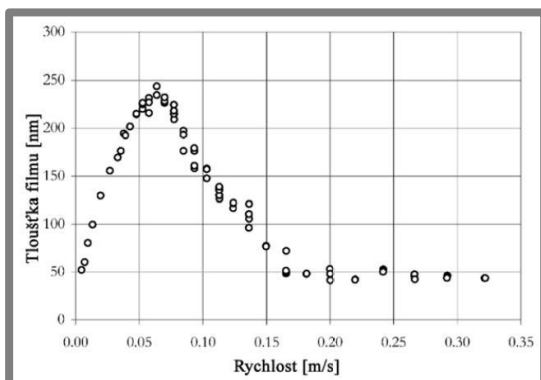
Pro určení životnosti komponentů a k dosažení jejich optimálního výkonu je dobré znát dobu přechodu mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem. Přechod mezi těmito mazanými kontakty nastává v oblasti, která je obtížně popsatelná a velmi citlivá vůči provozním podmínkám. Typický přechod mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem je popsán křivkami (obr. 2-10) určujícími tloušťku maziva v kontaktu při zvyšující se rychlosti valení.



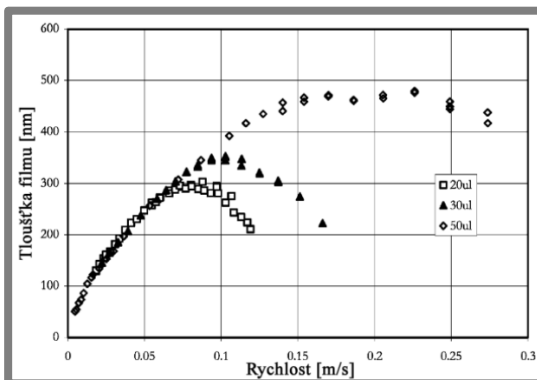
Obr. 2-10 Průběh křivek pro hladovějící a plně zaplavenou EHL tloušťku filmu závislou na rychlosti valení [23] (upraveno)

Křivky společně popisují odlišné chování pro hladovějící a plně zaplavený kontakt. Plně zaplavenému kontaktu, který se charakterizuje zvyšující se tloušťkou filmu maziva při rostoucí rychlosti valení, odpovídá teorie Hamrock-Dowsona [21]. Naopak je tomu u hladovějícího kontaktu, kdy se tloušťka filmu snižuje se zvyšující se rychlostí valení [24]. Přechod mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem tedy nastane v určitých kritických hodnotách rychlosti valení, kde hodnota tloušťky filmu maziva přestane růst a začne klesat, jak lze pozorovat na obr. 2-10. Na tomto obrázku jsou vedle křivek zachyceny dva snímky z optické interferometrie. Oba snímky zobrazují tloušťku filmu maziva v kruhovém kontaktu, do něhož z pravé strany vstupuje mazivo. Jednotlivé barvy odpovídají tloušťkám filmu nacházejícím se v daném místě. Snímek plně zaplaveného kontaktu v levé části obr. 2-10 připomíná tvar podkovy a lze pozorovat konstantní tloušťku centrálního filmu a zúžení na stranách i v zadní části. V případě hladovějícího snímku (na pravé straně obr. 2-10) splývá hodnota centrální tloušťky s minimální tloušťkou filmu maziva [23].

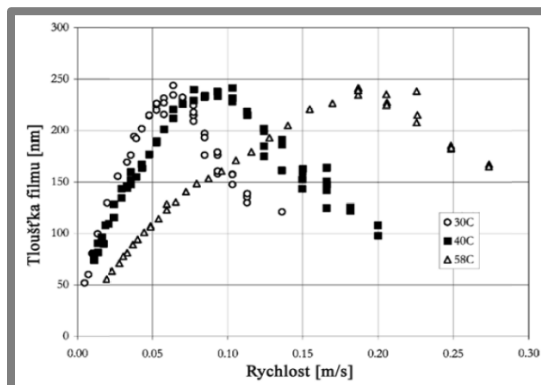
Vlivem provozních podmínek ovlivňujících přechod mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem se podrobně zabývali autoři, kteří publikovali práci [25]. Publikovali vlivy čtyř parametrů ovlivňujících přechod mezi zmíněnými typy kontaktů. Těmito parametry jsou objem maziva, zatížení, viskozita maziva a rychlost. Veškeré experimenty pro ověření vlivů těchto parametrů byly uskutečněny na zařízení ball-on-disk, kde tloušťka filmu maziva byla měřena v kontaktu mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem.



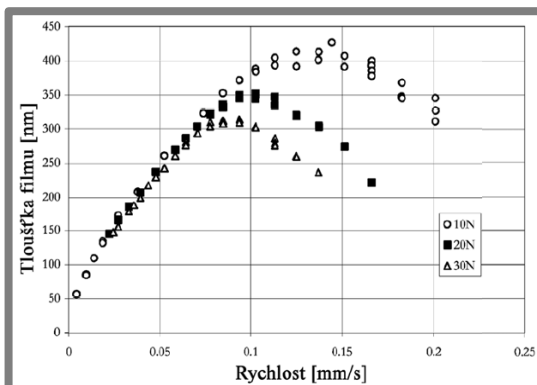
Obr. 2-11 Vliv rychlosti valení na tloušťku mazacího filmu [25] (upraveno)



Obr. 2-12 Vliv množství maziva na tloušťku mazacího filmu [25] (upraveno)



Obr. 2-13 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro tři různé teploty [25] (upraveno)



Obr. 2-14 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro různá zatížení kontaktu [25] (upraveno)

Vliv rychlosti

Průběh měření vlivu rychlosti (obr. 2-11) spočíval ve změně rychlosti, zatímco ostatní parametry jsou udržované po celý experiment na konstantních hodnotách. Pro velmi malé hodnoty rychlosti u se stává kontakt plně zaplavený a odpovídá klasické teorii plně zaplaveného kontaktu [21], což znamená, že tloušťka filmu je přímo úměrná hodnotě $u^{0,67}$. V případě zvyšující se rychlosti u , dochází ke snížení tloušťky filmu maziva. Toto snižování tloušťky způsobuje nedostatečný čas potřebný pro zaplavení dráhy kuličky mazivem před jejím dalším průchodem stejným místem. Nastává stav, kdy kontakt není dostatečně zásobován mazivem, tudíž hladový a tloušťka filmu maziva v kontaktu je přímo úměrná u^{-1} jako u klasické hladovějící křivky závislé na rychlosti. U podmínek zvolených pro tento experiment je patrné, že hladovění začíná okolo rychlosti $u = 0.06$ m/s [25].

Vliv viskozity

Ovlivnění tloušťky filmu vlivem viskozit je zachyceno na obr. 2-13, kde je jeden typ maziva měřen při třech různých teplotách za konstantního objemu maziva. Změna viskozity je tedy docílena změnou teploty maziva i celého měřicího zařízení. Lze pozorovat, že hodnota maximální tloušťky pro všechny druhy viskozit dosáhne podobných hodnot, avšak při různých rychlostech [25].

Vliv zatížení

Tloušťka filmu u plně zaplaveného kontaktu je úměrná hodnotě $w^{-0,07}$, což způsobuje malé snížení tloušťky filmu, v případě dojde-li ke zvýšení zatížení. U hladovějícího režimu má zatížení vliv na doplňování maziva do kontaktu, konkrétně působí na kontaktní radius a a šířku stopy a' . Tudíž tloušťka filmu plně zaplaveného kontaktu je téměř neovlivněná zatížením, zatímco počátek hladovění je úměrný hodnotě $w^{-0,333}$, což lze vidět na obr. 2-14 [25].

Vliv množství maziva

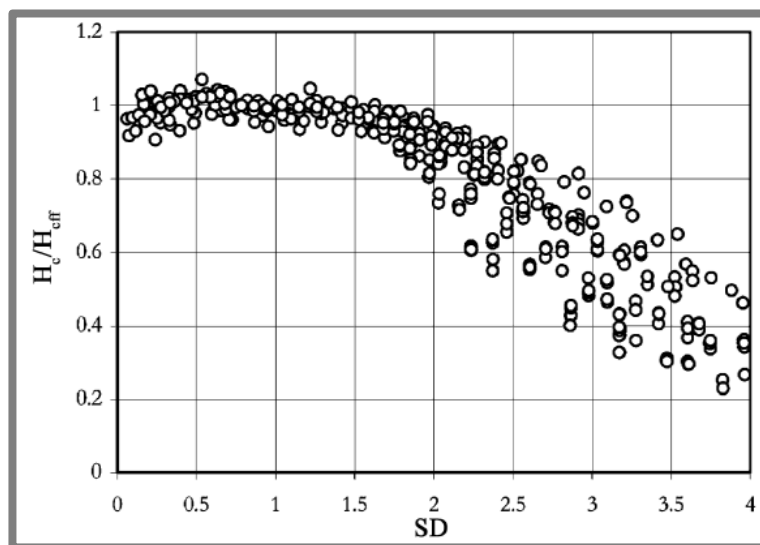
Obr. 2-12 poukazuje na fakt, že objem nehraje žádnou roli u plně zaplaveného kontaktu. Ovšem v místě hladovějícího kontaktu se tloušťka filmu zvyšuje s objemem maziva V .

Nejen, že autoři uvedli dílčí vlivy provozních parametrů, ale ještě v druhé polovině práce [25] stanovili parametr SD , který pomocí jednoho čísla stanovuje úroveň hladovění (Starvation Degree). Tento parametr se skládá z několika vstupních hodnot, které až na hodnotu povrchového napětí, byly experimentálně podloženy a uvedeny v tomto dokumentu.

$$SD = \frac{\eta_0 \cdot u \cdot a'}{h_{oil\infty} \cdot \sigma_s} \quad (2-5)$$

kde:

a'	mm	- šířka valivé dráhy
$h_{oil\infty}$	mm	- množství maziva v blízkosti kontaktu
SD		- stupeň hladovění
u	m.s ⁻¹	- rychlost
η_0	Pa.s	- dynamická viskozita maziva
σ_s	N.m ⁻¹	- povrchové napětí

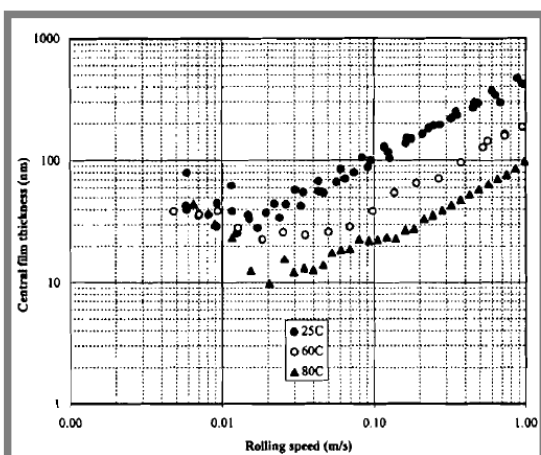
Obr. 2-15 Závislost parametru SD [25]

Pro stanovený parametr SD byla zjištěna hodnota určující přechod mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem. Hodnota SD parametru při přechodu tedy odpovídá hodnotě $SD = 1,5$, kterou lze pozorovat na obr. 2-15. Dalším důležitým zjištěním je určení vztahů mezi tloušťkou mazacího filmu a parametrem SD . Pro $SD < 1,5$ – $h_c/h_{eff} = 1$ a pro $SD > 1,5$ – $h_c/h_{eff} = (1,5/SD)^{1,67}$.

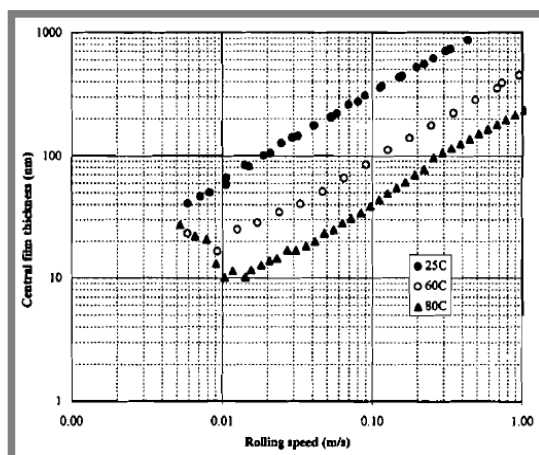
2.2.3 Chování plastických maziv u plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu

Komplexní reologie plastického maziva způsobuje hlavní odlišnost od kapalných maziv, proto bylo vytvořeno několik experimentů určujících chování plastického maziva při různých parametrech, jako jsou parametry plastického maziva a provozní parametry. Stejně jako u kontaktu mazaným olejem se zkoumalo chování za plně zaplaveného a hladovějícího stavu. Publikovaná práce [26] autorkou v roce 1999, udává množství poznatků o chování při těchto obou stavech mazání. Plně zaplaveného kontaktu se dosáhlo pomocí zařízení, které vracelo plastické mazivo zpět do dráhy kontaktu, tudíž kontakt nebyl ovlivněn ztrátou maziva. Pro tento mazaný kontakt byl proveden experiment určující závislost mezi tloušťkou maziva a zvyšující se rychlostí pro tři různé teploty (obr. 2-16, obr. 2-17).

2.2.3



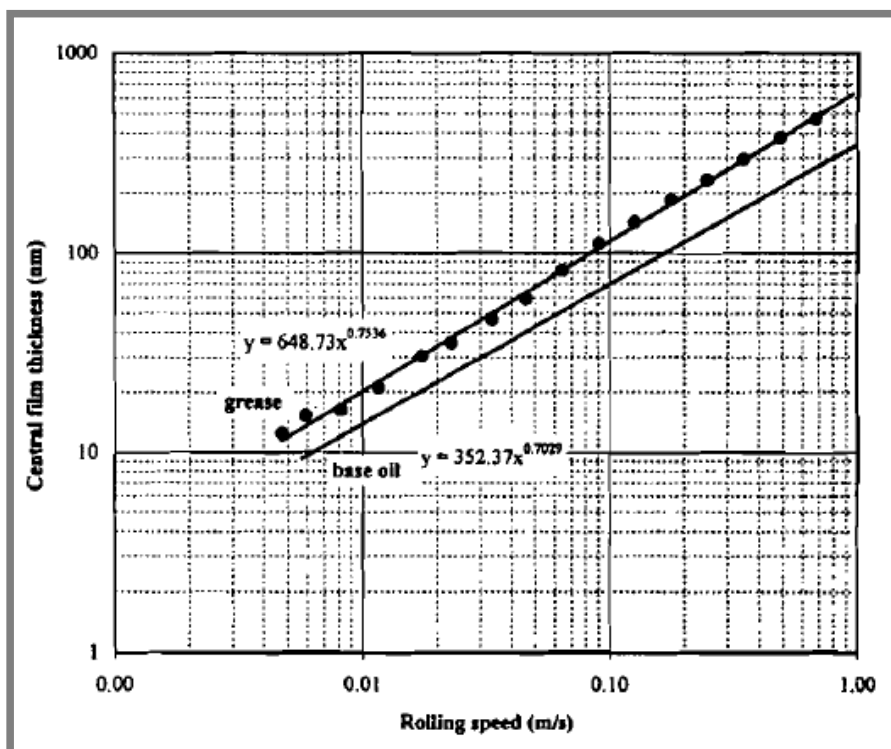
Obr. 2-16 Porovnání plně zaplaveného režimu pro tři teploty plastického maziva s nižší viskozitou [26]



Obr. 2-17 Porovnání plně zaplaveného režimu pro tři teploty plastického maziva s vyšší viskozitou [26]

Tento experiment byl proveden pro dva typy plastického maziva s identickým 5% obsahem zahušťovačů, ale o rozdílné kinematické viskozitě s nižší hodnotou $30 \text{ mm}^2/\text{s}$ (obr. 2-16) a s vyšší viskozitou $200 \text{ mm}^2/\text{s}$ (obr. 2-17). Tloušťka filmu roste se zvyšující se rychlostí valení. Nicméně tloušťka plastického maziva v nižších rychlostech je často větší a následnou zvyšující se rychlostí dochází k jejímu snížení. Toto neobvyklé chování způsobují lupínky (lumps) zahušťovačů procházející skrz kontakt, jenž lze pozorovat na obr. 2-16. Toto platilo i pro plastické mazivo s vyšší viskozitou při teplotě 80°C (obr. 2-17). Výraznější projevení tohoto jevu nastává při větších teplotách. To lze vysvětlit dvěma způsoby dle autorky Canntové. První způsob, kdy smykové napětí je nižší na vstupu do kontaktu ve vyšších teplotách, tedy struktura dlouhých lupínek zahušťovačů je pravděpodobně déle zachována. Druhý způsob, kdy zkrácení tloušťky filmu maziva je mnohem zřejmější u tenčích EHL filmů [26].

Po dosažení minimální tloušťky začíná hodnota tloušťky znovu stoupat při stále zvyšující se rychlosti valení. V této oblasti je standardní odchylka velmi malá a často je menší než 5 nm . Exponent rovnice křivky, která prokládá naměřené body tloušťky závislé na rychlosti, je obvykle v rozmezí hodnot (0,6 až 0,75). Chování je velmi podobné jako pro základový olej a reologie maziva je v podstatě Newtonská v oblasti vstupující do kontaktu. Demonstrace tohoto chování je na obr. 2-18, kde je zobrazeno plastické mazivo (9 % zahušťovačů, kinetická viskozita $200 \text{ mm}^2/\text{s}$, teplota 60°C) společně se základovým olejem. Exponent plastického maziva je 0,75 a základového oleje 0,7, což odpovídá dobré shodě s predikcí Hamrock-Dowsona (exponent = 0,68). Obecně lze říci, že tloušťka filmu maziva roste se zvyšující se viskozitou (viskozita základového oleje a obsahu zahušťovačů) a rychlostí valení [26].

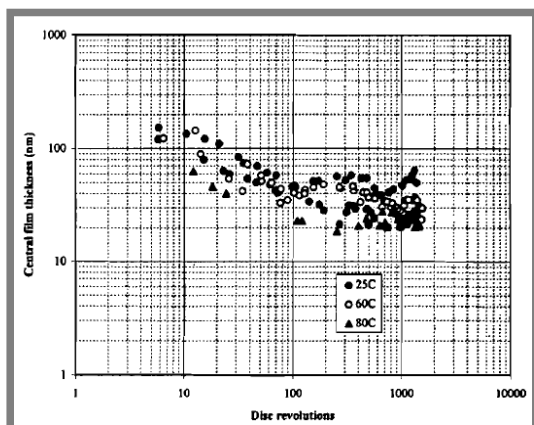


Obr. 2-18 Závislost tloušťky filmu maziva na rychlosti valení pro základový olej a plastické mazivo [26]

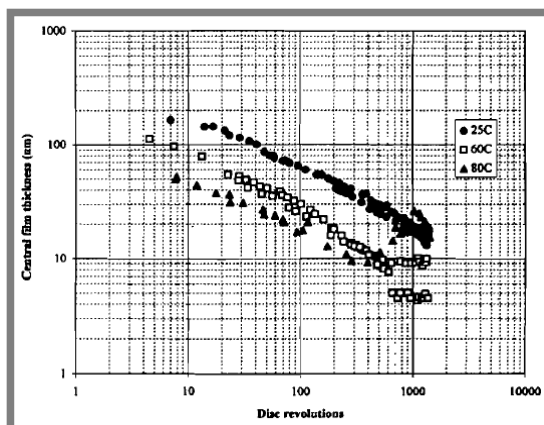
Druhá polovina článku [26] se věnuje hladovějícímu kontaktu, u něhož nastává změna tloušťky filmu maziva v závislosti na čase s konstantní rychlostí valení. Změna času je u těchto experimentů zaznamenána pomocí jednotky otočení disku, tudíž je hodnota tloušťky vždy zaznamenána ve stejném místě na disku. Ovlivnění hladovějícího kontaktu množstvím zahušťovadla, viskozitou základového oleje, teplotou a rychlostí valení bylo experimentálně změřeno a je níže podrobněji popsáno.

Vliv teploty

Vliv teploty je zkoumán s plastickými mazivy o 15% objemu zahušťovadla a se dvěma hodnotami kinetické viskozity 30 a 200 mm²/s, které jsou pozorovány pro tři hodnoty teplot. Plastické mazivo s viskozitou 30 mm²/s (obr. 2-19) má podobný průběh chování pro všechny teploty. Stabilní snižování filmu probíhá až do sta otáček disku a následuje ustálení na rovnovážné poloze okolo 20 až 50 nm. Podobným průběhem snižování filmu se vyznačuje i druhé plastické mazivo s viskozitou 200 mm²/s (obr. 2-20). V tomto případě je zřetelný rozdíl mezi jednotlivými křivkami teplot. Snižování tloušťky filmu pro teplotu 25 °C platí až do ukončení testu a pro 60 °C platí do hodnoty 500 otáček disku. Tloušťka filmu pro 80 °C se snižuje po 400 otáček disku a po překonání této hodnoty se začne zvyšovat, až se ustálí na hodnotě okolo (25 až 30) nm, což je hodnota vyšší, než pro teplotu 25 °C [26].



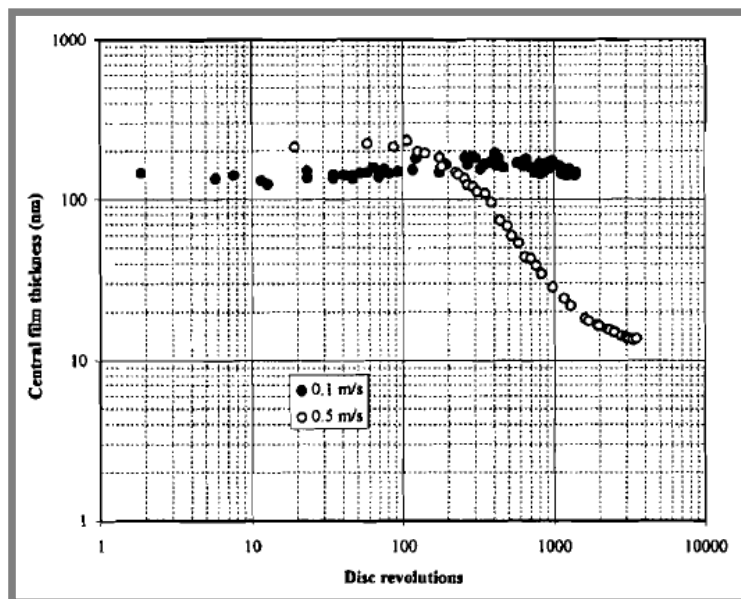
Obr. 2-19 Snižování tloušťky filmu pro plastické mazivo o viskozitě 30 mm²/s [26]



Obr. 2-20 Snižování tloušťky filmu pro plastické mazivo o viskozitě 200 mm²/s [26]

Vliv rychlosti valení

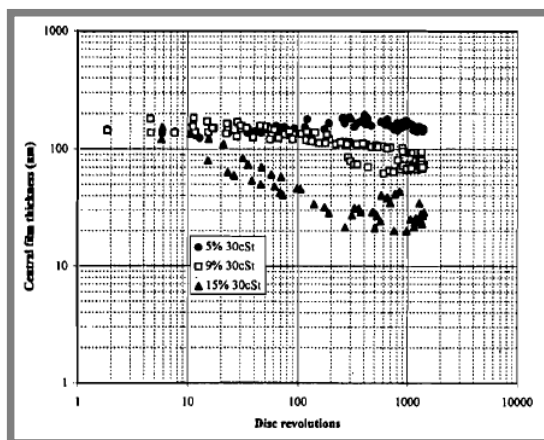
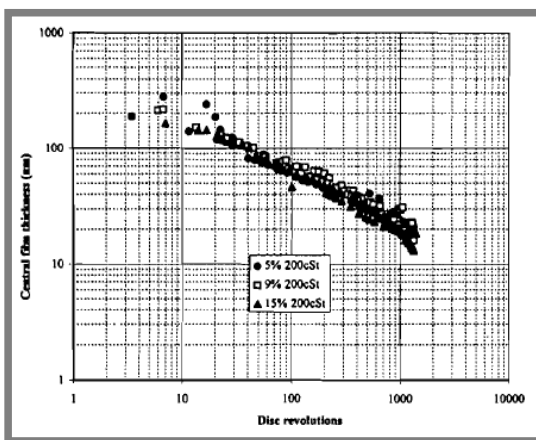
Ovlivnění hladovějící tloušťky filmu rychlostí (0,1 a 0,5 m/s) je ukázáno na obr. 2-21, kde je zobrazen test vlivu plastického maziva o 5% obsahu zahušťovadla, kinetické viskozitě 30 mm²/s a při teplotě 25 °C. Pro rychlost 0,1 m/s je tloušťka maziva velmi blízká plně zaplavené tloušťce. Mazivo se při jednotlivých otáčkách disku stačí zregenerovat a vrátit zpět do dráhy kontaktu. Rychlost 0,5 m/s zobrazená druhou křivkou způsobuje snižování tloušťky při každém dalším otočení disku. Zde se již mazivo nedokáže vrátit do dráhy kontaktu [26].



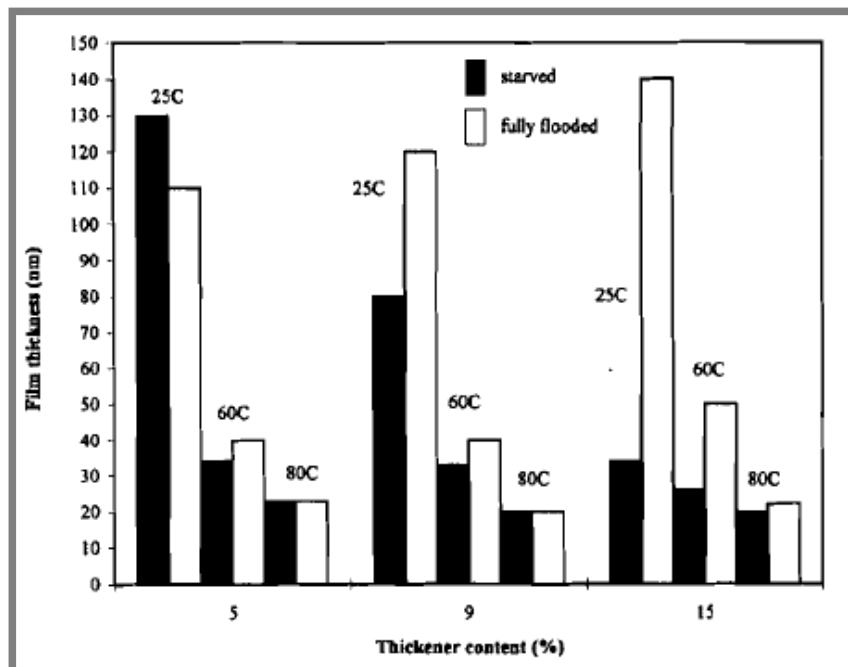
Obr. 2-21 Vliv rychlosti valení na hladovějící tloušťku filmu [26]

Vliv zahušťovadla

Pro zjištění vlivu množství zahušťovadla bylo využito plastických maziv s odlišnou kinetickou viskozitou 30 a 200 mm^2/s , které byly experimentálně změřeny pro různé obsahy zahušťovadla 5%, 9%, 15%. Testy pro všechny typy maziv byly provedeny za valivé rychlosti 0,1 m/s a teplotě 25 °C. Výsledkem pro plastické mazivo s viskozitou 30 mm^2/s (obr. 2-22) je, že při zvyšujícím se obsahu zahušťovadla dochází ke snížení tloušťky filmu maziva. U nízkého (5%) obsahu zahušťovadla je tloušťka filmu maziva blízká hodnotě tloušťky při plně zaplavených podmínkách, jak již bylo zmíněno u testu zjišťujícím vliv rychlosti. Tudíž se mazivo stačí samovolně vrátit zpět do dráhy kontaktu, díky dostatečně nízké viskozitě a rychlosti valení. Jakmile se obsah zahušťovadla zvýší, začíná kontakt více hladovět. Ustálené hodnoty tloušťky filmu jsou pro 9% zahušťovadla okolo (80 až 90) nm a pro 15% zahušťovadla jsou mnohem nižší než u předchozích, což je (20 až 45) nm [26].

Obr. 2-22 Vliv zahušťovadla pro plastické mazivo o viskozitě 30 mm^2/s [26]Obr. 2-23 Vliv zahušťovadla pro plastické mazivo o viskozitě 200 mm^2/s [26]

Na obr. 2-23 jsou uvedené výsledky pro plastické mazivo o viskozitě $200 \text{ mm}^2/\text{s}$. Tyto výsledky jsou velmi podobné pro všechny obsahy zahušťovadel. Tloušťka filmu postupně klesá po celou dobu testu a není zaznamenán ani patrný náznak rovnovážného stavu [26].



Obr. 2-24 Porovnání tloušťky filmu plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu mazaného plastickým mazivem o viskozitě $30 \text{ mm}^2/\text{s}$ pro rychlost $0,1 \text{ m/s}$ [26]

Porovnání tloušťky filmu v kontaktu za hladovějících a plně zaplavených podmínek je zobrazeno na obr. 2-24, kde je tloušťka pro oba typy kontaktů závislá na obsahu zahušťovadla. Porovnání bylo naměřeno za konstantní rychlosti valení ($0,1 \text{ m/s}$) pro plastické mazivo s kinetickou viskozitou $30 \text{ mm}^2/\text{s}$. Hladovějící tloušťka filmu je mnohem nižší než u plně zaplaveného režimu pro 9% a 15% zahušťovadla. Avšak s rostoucí teplotou dochází k přiblížení hladovějící tloušťky filmu k hodnotě plně zaplavené [26].

2.3 Vliv prokluzu třecích povrchů

Elastohydrodynamický mazaný kontakt ve strojních aplikacích bývá zřídka použit jen jako pouze jeden samostatný. Většinou je tvořen vícenásobným kontaktem konající opakující se pohyb, při kterém prochází stejným místem. Typickým příkladem mohou být valivé elementy ložiska. Výkon a životnost nejen valivého elementu ložiska je závislý na jednom z důležitých parametrů, což je tloušťka filmu maziva, tvořena uvnitř EHL nekonformního kontaktu [27].

U zmíněného vícenásobného EHD kontaktu valivého ložiska platí, že předcházející kontakt stanovuje množství dostupného maziva pro následující kontakt [27, 28]. V několika teoretických i experimentálních studiích byla ukázána závislost tloušťky filmu maziva uvnitř kontaktu na tloušťce vrstvy vstupující do tohoto kontaktu [29, 30]. Rozhodující význam na utváření filmu v kontaktu má součet tloušťek filmů maziv dodávaných do kontaktu [28, 31].

V případě, je-li uvažováno čisté valení kontaktu, je předpokládáno rozdělení maziva na výstupu z kontaktu uvažováno jako rovnoměrné. Tedy tloušťka maziva je (za podmínky čistého valení) po průchodu kontaktem rovnoměrně rozložena na třecí povrchy.

Bezrozměrný parametr určující poměr mezi skluzem a valením se nazývá „slide-to-roll ratio“ zkráceně SRR, který popisuje relativní rychlost mezi třecími povrchy (2-6). Tímto parametrem lze popisovat chování EHL kontaktu při různých poměrech skluzu a valení. Z teorie [32] se předpokládá, že pomalejší povrch bude obsahovat tenčí film maziva, než rychleji pohybující se povrch. Parametr SRR se pohybuje v rozmezí $(-\infty; +\infty)$. Hodnota pro čisté valení je $SRR = 0$ a pro čistý skluz $SRR = -2$ nebo 2 , záporná nebo kladná hodnota se odvíjí od rychleji pohybujícího se povrchu.

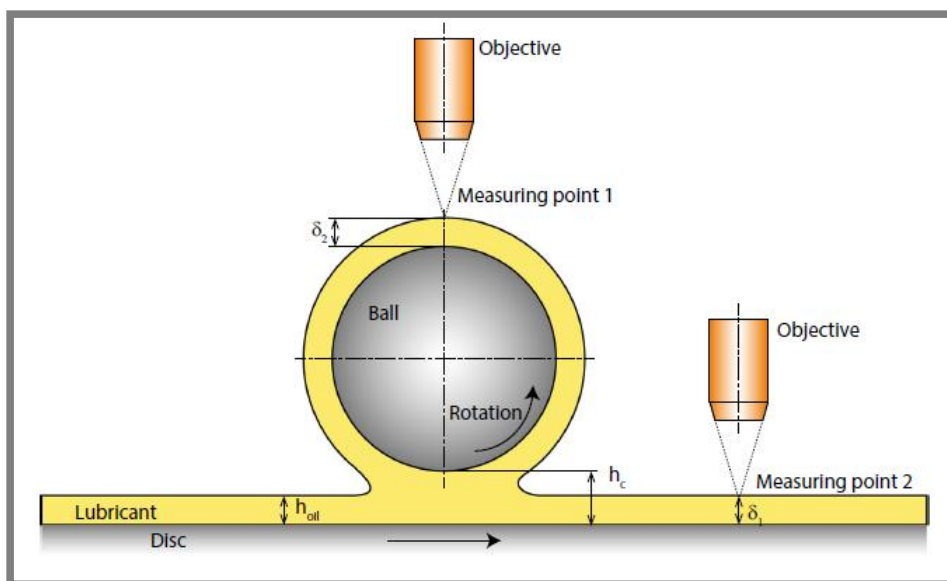
$$SRR = \frac{2 \cdot (u_1 - u_2)}{(u_1 + u_2)} \quad (2-6)$$

kde:

SRR - parametr prokluzu mezi třecími povrchy

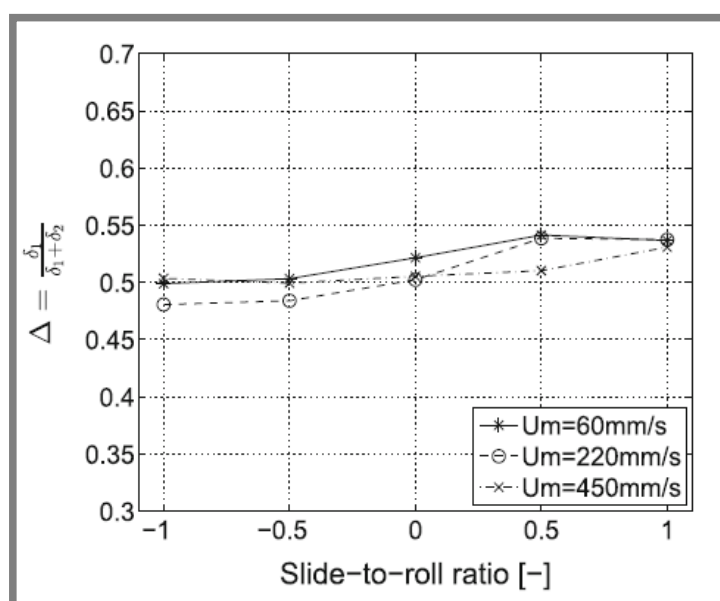
$u_{1,2}$ m.s⁻¹ - rychlost třecích povrchů

Parametr SRR byl použit v práci [27] k popisu roztržení (rupture) tloušťky filmu na výstupu EHL kontaktu. Pro měření tloušťky filmu nebyla využita metoda optické interferometrie jako u většiny prací, ale byla zde použita metoda fluorescence. K popisu tloušťky filmu byl vytvořen parametr - poměr prolomení (rupture ratio), který umožnil spolehlivě zachytit a charakterizovat dělení tloušťky filmu maziva na výstupu z kontaktu bez kalibrace měřicího zařízení. Hodnota poměru prolomení maziva na výstupu z kontaktu byla získána poměrem hodnot intenzit světla měřených ve dráze kontaktu na obou třecích površích, znázorněných na obr. 2-25. Zjišťovaná intenzita světla tloušťky maziva je označena jako δ_1 a δ_2 . Poměr prolomení tloušťky filmu byl měřen za podmínek čistého valení, ale i za prokluzu jednotlivých třecích povrchů. Dále byly zkoumány vlivy jednotlivých parametrů na poměr prolomení. Mezi zkoumané parametry patří vlastnosti maziva, rychlost valení a elipticita valivého elementu.



Obr. 2-25 Schéma měřících míst na aparatuře [27]

Jako příklad je zde uveden vliv střední rychlosti na hodnotu poměru prolomení. Tato hodnota poměru prolomení je funkcí parametru SRR (obr. 2-26). Byly zjištěny tři hodnoty střední rychlosti ($u_m = 60, 220$ a 450 mm/s) pro něž bylo použito stejné mazivo (R834/80). Nepatrnou změnu v poměru prolomení vůči parametru SRR lze vidět na obr. 2-26. Pozorovanou změnu nelze připisovat závislosti střední rychlosti, protože vzniklý sklon je téměř stejný pro všechny střední rychlosti. Stejné chování je definováno v literatuře [32], která vysvětluje, že tenčí tloušťka filmu maziva zůstává na pomaleji pohybujícím se povrchu kontaktní dvojice. Pro $SRR = 0$ se očekávala hodnota $\Delta = 0,5$, avšak pro nízkou rychlost je hodnota vyšší. Naopak při vyšších rychlostech pro negativní SRR je hodnota Δ větší než $0,5$, což se neočekávalo. Tyto odchylky mohou být způsobeny jinými vlivy procesů, které se za odlišných podmínek neprojeví [27].

Obr. 2-26 Výstupní tloušťka filmu poměru prolomení jako funkcí SRR pro tři různé střední rychlosti [27]

Vliv jednotlivých parametrů se nezdál být závislý na střední rychlosti, vlastnosti maziva nebo kontaktní geometrii. Všechny tyto parametry byly zkoumány bez jakékoli projevující se závislosti. Veškeré provedené experimenty ukázaly, že hodnota λ kolísá od 0,43 do 0,55 pro $SRR = <-1,1>$. Tudíž experimentální výsledky potvrzují, že vliv SRR je téměř zanedbatelný v jeho nízkých hodnotách [27].

2.4 Pohyb maziva (uvnitř a okolo kontaktu)

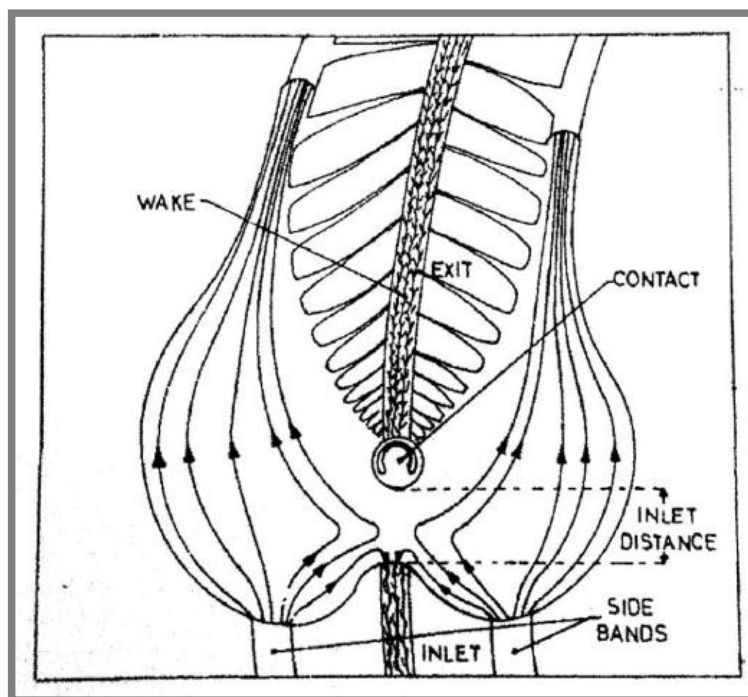
Rovnovážný stav maziva např. uvnitř valivého ložiska končí ve chvíli, kdy kontakt prochází mazivem. Dochází tak k jevu, kde je náhle téměř všechno interagující mazivo vytlačeno pryč z kontaktní oblasti za působení kontaktního tlaku mezi třecími povrchy. Na vstupu do kontaktu je zbylé množství maziva vtaženo do kontaktní oblasti a následně je toto stejné množství maziva vytlačováno po stranách a na výstupu z kontaktní oblasti. Mezi jednotlivými kontakty valivých elementů ložiska nastává děj, který vrací mazivo zpět do dráhy kontaktů. Tento děj se nazývá „doplnění“ (replenishment), jež je tvořeno několika mechanismy, jakými mohou být například gravitační síly, mechanicky indukovaný tok či povrchové napětí. Hlavním úkolem děje doplnění je tedy dodávat dostatečné množství maziva na vstup kontaktu tak, aby byl kontakt dostatečně mazán. Pro oddělení třecích povrchů mazivem je mechanismus doplnění nepostradatelným jevem [33].

Působení tohoto mechanismu doplnění maziva do kontaktu bylo postupně zjišťováno jednotlivými výzkumy, jednak teoretickými a následně experimentálními. Výzkumy byly rozděleny do dvou kategorií dle použitého typu maziva zásobujících kontaktní oblast, což byla kapalná (oleje) nebo plastická maziva. Oba typy těchto výzkumů budou stručně popsány v níže uvedených kapitolách.

2.4.1 Efekt doplňování pro oleji mazaný kontakt

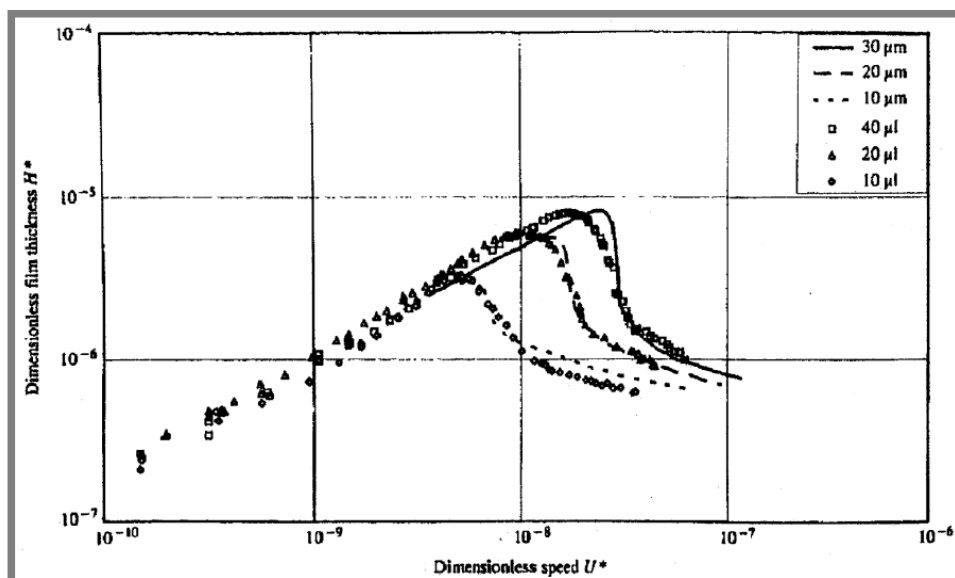
Jedna z prvních prací [34] se zaměřila na tok (pohyb) maziva okolo EHD kruhového kontaktu a na efekt znovudoplnění maziva do valivé dráhy kontaktu. Dle autorů publikujících tuto práci má hlavní roli v znovudoplnění maziva povrchové napětí, jenž společně s daným časovým intervalem, ovlivňuje jev, který má tendenci vytvořit rovnoměrnou vrstvu maziva po průchodu kontaktem. V tomto případě se časovým intervalem rozumí časový úsek, za který kontakt následujícího valivého elementu projde místem předcházejícího kontaktu. Autoři touto prací [34] položili základ pro další výzkumy.

Dalšími autory, zabývajícími se touto problematikou, byli Pemberton a Cameron, kteří v roce 1976 zveřejnili svoji práci [35]. V této práci se zabývali studiem utváření pásů maziva na stranách kontaktu, které vznikají po průchodu maziva kontaktem. Tyto pásy (side bends) fungují jako zásobníky maziva, ze kterých se postupně uvolňuje mazivo zpět do valivé dráhy. Pro sledování pohybu maziva v okolí kontaktu využili poměrně jednoduché metody. Spočívala ve vstřikování vzduchu do maziva. Následující pohyb vzniklých bublin pohybujících se skrz a okolo kontaktu byl zaznamenáván kamerou. Trajektorie jednotlivých vzduchových bublin v okolí kontaktu byly překresleny na základě jejich pohybu a lze je pozorovat na obr. 2-27 [36].



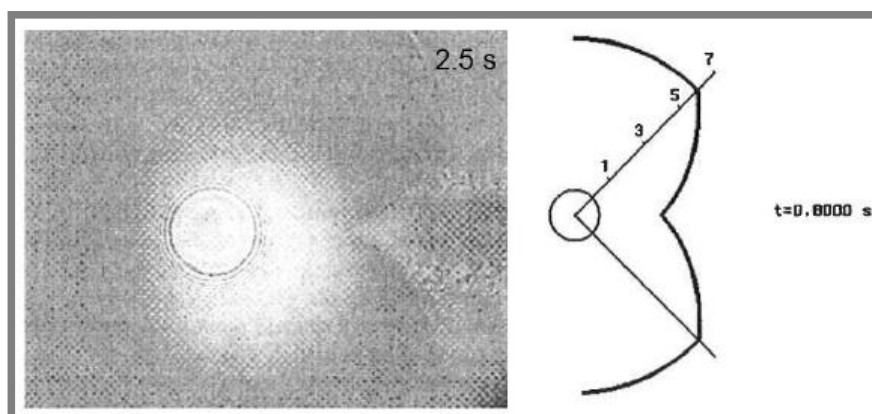
Obr. 2-27 Trajektorie toku maziva okolo EHD kontaktu [35]

Experimentální měření hladovějícího elastohydrodynamického kontaktu v práci [24] přineslo skutečnost, že existují tři stádia hladovění. Veškeré tyto experimenty zjišťující hladovějící tloušťku filmu maziva byly naměřeny pro kontaktní dvojici kulička – disk (ball-on-disc). Bylo zjištěno, že v pomalých rychlostech valení se kontakt chová podobně jako při plně zaplavených podmínkách. Změna nastane ve chvíli, kdy se dosáhne kritické hodnoty rychlosti, na níž začíná být tloušťka filmu závislá. Čím větší rychlost valení, tím nižší tloušťka filmu. Toto pravidlo platí až do hodnoty rychlosti, ve které se tloušťka filmu ustálí nezávisle na zvyšující se rychlosti. Tato hodnota tloušťky filmu se pohybuje v rozmezí hodnot (10 až 20) nm. Na tuto skutečnost reagovali autoři v práci [37], kde uvedli modifikaci existujícího modelu používaného Chiu [34], do kterého zahrnuli Van der Waalovy síly. Předchozí model nebyl schopen vysvětlit právě oblast extrémního hladovění, při kterém nedojde k úplnému selhání kontaktu, nýbrž nastane stabilizace okolo již zmíněné hodnoty (10 až 20) nm [36]. Nynějším modelem kombinujícím oba mechanismy znovudoplnění lze dobře předpovídat závislost tloušťky filmu na rychlosti valení i za přítomnosti extrémního hladovění. Na obr. 2-28 lze pozorovat dobrou schodu mezi experimentem a modifikovaným modelem o oblast nízkých tlouštěk mazacího filmu (extrémní hladovění).



Obr. 2-28 Porovnání hodnot mezi experimentálně naměřenými daty a predikcí podle modifikovaného modelu [37]

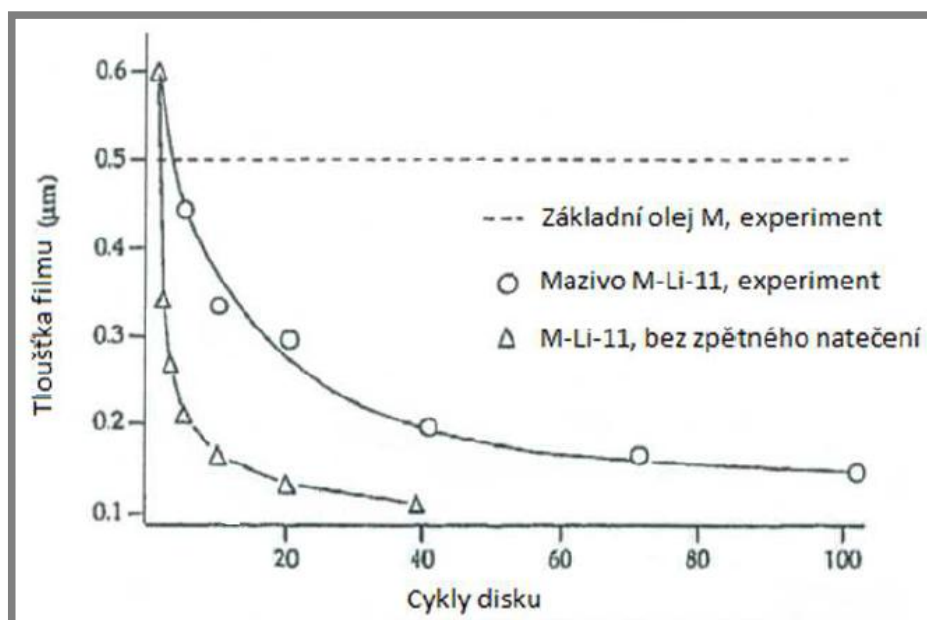
Z předchozích publikací bylo tedy patrné, jestliže nebude uvažován mechanismus znovudoplnění maziva do kontaktu, tak dojde k postupnému snížení tloušťky maziva v kontaktu, až na úroveň, kdy se kontakt stane téměř suchý. Je tedy nutné zahrnout mechanismus znovudoplnění do modelů určujících tloušťku filmu za hladovějících podmínek. Modifikovaný model zveřejněný v publikaci [37] vedl další autory ke zkoumání stavu extrémního hladovění. V roce 1999 byla publikována práce [38] zmiňující dva odlišné mechanismy toku maziva pro extrémně hladovějící kontakt. Nejprve autoři uvedli mechanismus doplňování maziva ve volné mazací vrstvě mimo kontakt („out of contact“). Tento mechanismus je řízen povrchovým napětím a rozdělením tlaků. Autoři však zjistili, že tento mechanismus působící ve volné mazací vrstvě je zanedbatelný pro běžné tloušťky ($h_c > 10$ nm). Druhý mechanismus doplňování maziva se věnoval chování kapilárních sil v blízkosti kontaktu, které podstatně ovlivňují tok maziva a tímto snižují závažnost hladovění. Při vytváření druhého mechanismu byl nejprve pozorován pohyb maziva blízko statického kontaktu (obr. 2-29, levá část) a následně byl vytvořen numerický model, který byl později přeměněn na pohybující se kontakt. Pro tento pohybující se kontakt byly dopočítány tvary hranic mezi mazivem a okolím (obr. 2-29, pravá část).



Obr. 2-29 Experimentálně a numericky získaný tvar hranice mezi mazivem a vzduchem na výstupu z kontaktu [38] (upraveno)

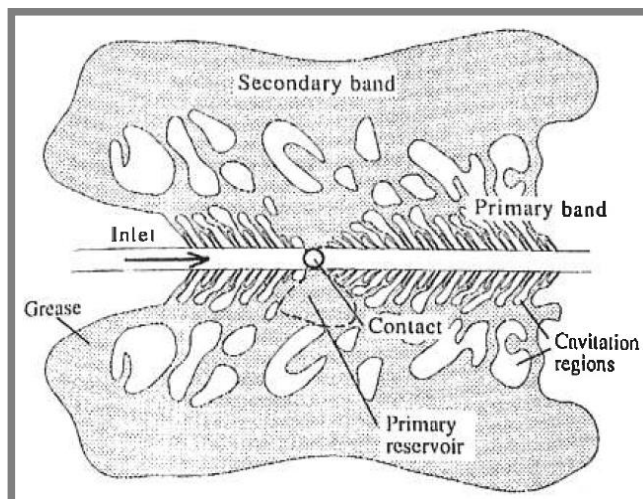
2.4.2 Efekt doplňování pro kontakt mazaný plastickými mazivy

Zkoumání efektu znovudoplnění plastického maziva do kontaktu navázalo na některé studie zabývající se touto problematikou pro kontakt mazaný olejem. Nejčastěji prováděné experimenty byly uskutečněny pro kontaktní dvojici - ocelová kulička a skleněný disk, stejně jako u kontaktů mazaných oleji. Autoři Åström a kol. v roce 1991 v publikaci [39] informovali, že tloušťka plastického maziva v kontaktní dráze po prvním otočení disku opravdu závisí na mechanismu znovudoplnění. Toto tvrzení bylo podloženo experimentem, jehož zjištěné výsledky jsou uvedené na obr. 2-30. Experiment spočíval v nastavení vhodných provozních parametrů, při kterých se základový olej stačí vrátit do kontaktní dráhy před dalším průchodem kuličky. Stejně provozní parametry byly aplikované na plastické mazivo, které se již nestačilo vracet zpět do kontaktní dráhy kuličky, jak lze vidět na obr. 2-30. Pro ukázání důležitosti mechanismu znovudoplnění maziva do kontaktu byla teoreticky vypočítána tloušťka filmu bez mechanismu znovudoplnění.



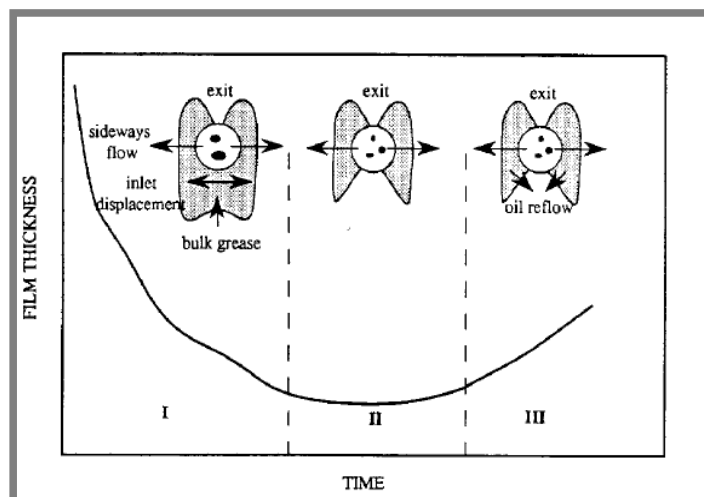
Obr. 2-30 Centrální tloušťka filmu jako funkce pootočení disku [39] (upraveno)

Další práce [33] rozšiřuje znalosti okolo mechanismu znovudoplnění maziva do kontaktu. Přesněji se zabývá pohybem plastického maziva okolo EHD bodového kontaktu a mechanismem, který způsobuje znovudoplnění plastického maziva do kontaktu. Tato práce dospěla k několika závěrům. Autoři nejprve zjistili, že znovudoplnění plastického maziva probíhá stejně jako u kontaktů mazaných olejem ve vstupní oblasti kontaktu. Pro tuto oblast kontaktu mazaného plastickým mazivem s vysokou viskozitou platí, že v nízkých smykových rychlostech je mechanismus znovudoplnění maziva do kontaktu velmi pomalý, proto může dojít k hladovění dokonce i v nízkých rychlostech valení. Dalším závěrem bylo, že za hladovějících podmínek vzniká hlavní zásoba maziva na stranách kontaktu (obr. 2-31). Síly povrchového napětí okolo kontaktu jsou dostatečně velké a tak jsou si schopny přitáhnout z objemu maziva základový olej nebo plastické mazivo s nižším obsahem mýdla do kontaktní oblasti a tím zajistit nepatrné množství maziva pro mazání kontaktu.



Obr. 2-31 Rozložení plastického maziva okolo hladovějícího kontaktu [33]

Pohyb maziva také sledovala autorka Canntová ve článku [40], který popisuje tok maziva okolo hladovějícího kontaktu dvěma hlavními ztrátovými mechanismy. Tyto mechanismy identifikovala jako přesun maziva na vstupu kontaktu a vytlačení maziva z kontaktní oblasti. Znovudoplňující mechanismus pro plastická maziva je velmi komplexní a je závislý na množství uvolněného oleje z plastického maziva nacházejícího se blízko kontaktní oblasti. Tento fakt určuje velkou časovou závislost. Jak je demonstrováno na obr. 2-32, různé fáze toku maziva mohou být závislé v čase na jiných dominantních mechanismech ovlivňující tok maziva. V první fázi (oblast I) je plastické mazivo velmi rychle vytlačováno pryč z kontaktní dráhy, jež vytváří hladovění na vstupu kontaktu. Při několika prvních otočeních disku tedy dochází v dráze kontaktu ke značnému snížení tloušťky maziva, které je složeno ze zahušťovadla a základového oleje. Tato struktura je dalším otáčením disku narušena a základový olej je vytlačen z kontaktu (oblast II). Vytlačení základového oleje je inverzně úměrné viskozitě, která při vyšších teplotách způsobí rychlejší úpadek tloušťky filmu maziva než při nižších teplotách. Vyšší teploty a delší doba provozu způsobí efektivnější rozklad plastického maziva na stranách kontaktu (oblast III) a tím uvolní základový olej nebo objem maziva tekoucí do kontaktu. V této oblasti tedy dochází ke zpětnému toku maziva do kontaktu.



Obr. 2-32 Pohyb plastického maziva v blízkosti kontaktu [40]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1

3.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

Elastohydrodynamický mazaný kontakt ve strojních aplikacích bývá jen zřídka použit jako pouze jeden samostatný. Většinou je tvořen vícenásobným kontaktem, který koná opakující se pohyb, při kterém prochází stejným místem. Typickým příkladem mohou být valivé elementy ložiska [27], jež jsou nejčastěji mazané plastickým mazivem nebo olejem. Komplexní reologie plastického maziva způsobuje hlavní odlišnost od kapalných maziv. Právě kapalná maziva, nejčastěji minerální oleje, tvoří společně se zahušťovadlem a v některých případech i s přísadami, složení plastického maziva. Konzistence a charakteristika jednotlivých plastických maziv je ovlivněna vnitřní strukturou, velikostí a množstvím krystalů zpevňovačů, které jsou obsaženy ve vnitřní struktuře.

Množství dodávaného maziva do kontaktu, reologie maziva a provozní podmínky jsou faktory, které utvářejí tloušťku mazaného filmu v kontaktu. Charakter mazaného kontaktní oblasti je rozdělen vlivy těchto faktorů na skupiny mazaných kontaktů, a to na plně zaplavený, přechodový a hladovějící kontakt. Nízkou hodnotou tloušťky filmu maziva uvnitř kontaktu se vyznačuje hladovějící kontakt, který je nedostatečně zásobován mazivem. Naopak je tomu u plně zaplaveného stavu, ve kterém je kontakt dostatečně zásobován mazivem. Oba typy mazaných kontaktů a vzájemný přechod mezi nimi ovlivňují nejen různé provozní parametry, ale i vlastnosti maziva. Vliv jednotlivých provozních parametrů a vlastností maziva na tloušťku filmu v kontaktu je podrobněji rozebrán v této práci.

Množství experimentálních a teoretických studií bylo rozděleno na dvě skupiny podle typu maziva použitého při výzkumu. Z rešeršní části věnující se kontaktu mazaného oleji byly získány informace ohledně přechodů mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem. Autoři [18, 22, 23, 25] zabývající se touto problematikou se snažili najít určitý sjednocující parametr na základě provozních podmínek, jenž by dokázal striktně určit meze přechodu mezi těmito typy kontaktů a dále vytvořený parametr experimentálně ověřit. Jak již bylo zmíněno, byly uvedeny jednotlivé provozní parametry (rychlost, viskozita, zatížení, množství maziva) ovlivňující tloušťku filmu maziva v kontaktu. Mezi tyto parametry ovlivňující tloušťku filmu patří i *SRR* parametr, který určuje poměr rychlosti mezi třecími povrchy.

V neposlední řadě je tloušťka filmu maziva v kontaktní oblasti ovlivněna tokem maziva okolo kontaktu. Mazivo vytlačené mimo kontaktní dráhu po průchodu kontaktu je znovu vráceno do dráhy kontaktu. Tento děj vracející mazivo zpět do dráhy se nazývá „doplnění“ (replenishment) a je tvořen několika mechanismy. Z výzkumů uvedených v této práci je patrné, že pro oddělení třecích povrchů mazivem je mechanismus doplnění nepostradatelný.

Chování plastických maziv se v některých situacích podobá olejům. Avšak ze článků věnujících se plně zaplavenému a hladovějícímu kontaktu není vidět jednoznačná oblast přechodu mezi nimi. U plně zaplaveného kontaktu je patrné, že tloušťka filmu maziva roste s rychlostí valení podobně jako u olejů. Tato podobnost mezi oleji a plastickými mazivy neplatí u hladovějícího kontaktu. Proto byly pro hladovějící kontakt mazaný plastickým mazivem zjišťovány vlivy jednotlivých parametrů ovlivňující jeho chování. Vlivy jednotlivých parametrů byly zaznamenány jako závislost centrální tloušťky filmu maziva na čase za konstantní rychlosti valení.

Byly zkoumány vlivy, jako jsou teplota pro různé viskozity maziv, rychlost valení a množství zahušťovadla. Jednou z největších odlišností mezi oleji a plastickými mazivy je rozložení maziva v blízkosti kontaktu. Rozložení maziva pro oleje připomíná tvar motýlích křídel (obr. 2-27), která vznikají při průchodu maziva kontaktem. Tato oblast motýlích křídel je zásobována mazivem z tzv. bočních pásů a společně fungují jako zásobárny maziva, které postupně vrací mazivo zpět do valivé dráhy kontaktu. U plastických maziv je hlavní zásobárna maziva (obr. 2-31), ze které je základový olej nebo plastické mazivo s nižším obsahem mýdla vtaženo do kontaktní oblasti, vytvořená na stranách kontaktu, a tím se zajistí množství maziva pro mazání kontaktu. Tento jev je připisován povrchovému napětí.

V dřívějších pracích zkoumajících utváření EHD filmu za hladovějících podmínek byla experimentálně změřena tloušťka mazacího filmu, ale pouze v závislosti na poloze vstupního menisku od oblasti (Hertzova) kontaktu. Bohužel tato použitá metoda pro výpočet tloušťky za hladovějících podmínek neumožňuje popis všech úrovní hladovění. Tloušťku filmu maziva v závislosti na poloze vstupního menisku nešlo zjistit od okamžiku, kdy se vstupní meniskus spojil s oblastí (Hertzova) kontaktu. V okamžiku spojení těchto oblastí mělo dojít dle metody měření ke stabilizaci tloušťky filmu maziva, avšak ve skutečnosti stále docházelo k poklesu tloušťky filmu maziva uvnitř kontaktu. Tato příčina vedla autory Chevalier, Lubrecht a kol. k vytvoření teoretického modelu, který je zahrnut ve článku [22], jenž definuje tloušťku filmu maziva v kontaktu jako závislost na vstupující tloušťce maziva.

3.2 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je popis chování hladovějícího elastohydrodynamického kontaktu při přesně definované tloušťce maziva na vstupu kontaktu pro základový olej a plastické mazivo z něho vyrobené.

Dílčí úkoly:

- Získání vzorků základového oleje a plastického maziva z něho vyrobených
- Popis závislosti centrální tloušťky filmu maziva na rychlosti valení pro základové oleje a plastická maziva
- Studium dělení maziva na výstupu z EHL kontaktu za použití prokluzu pro základové oleje a plastická maziva

Výstupem této diplomové práce je připravený článek, který bude publikován v impaktovaném časopise spadajícím do kategorie definované pro základní výzkum v souladu s platnou metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje [41].

- Jimp – recenzovaný odborný článek

4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 Metody použité pro vyhodnocení experimentálních měření

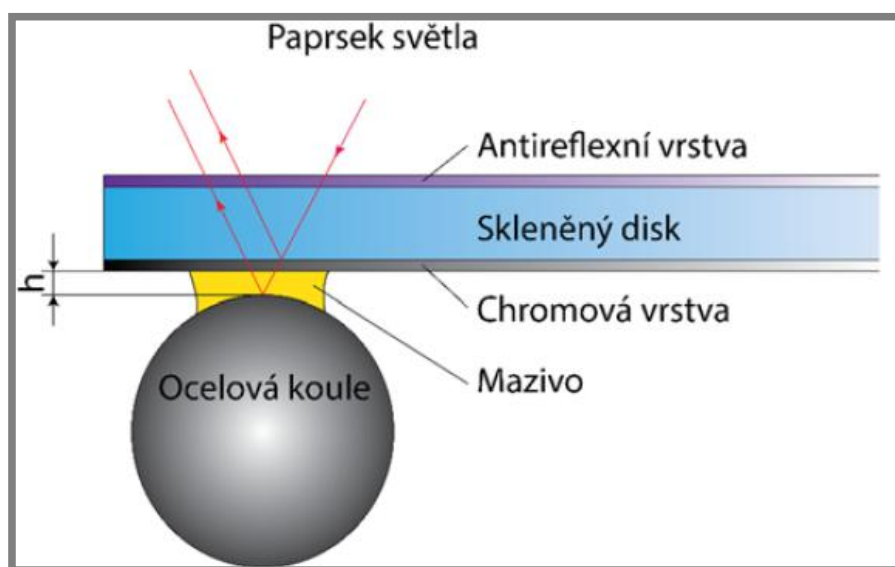
4.1

Při řešení této diplomové práce byly využity dvě měřicí metody. Nejvíce používanou metodou pro měření tloušťky filmu maziva v kontaktu byla optická interferometrie. Pomocí druhé metody, což byla fluorescence, byl zjištěn pouze parametr poměru dělení maziva na výstupu z EHL kontaktu. Obě dvě metody jsou níže popsány.

4.1.1 Optická interferometrie

4.1.1

V současnosti je optická interferenční metoda nejrozšířenější metodou používanou k měření tloušťky velmi tenkých mazacích filmů. Metoda využívá odrazivého povrchu valivého elementu a skleněného disku, který je potažen ze spodní strany polopropustnou chromovou vrstvou a z horní strany antireflexní vrstvou. Tato metoda je zobrazena na obr. 4-1 [42, 43].



Obr. 4-1 Princip optické interferometrie [44]

Kontakt mezi skleněným diskem a valivým elementem je osvětlen bílým světlem. Část svazku světla dopadající do místa kontaktu se odrazí od chromové vrstvy. Zbylá část svazku světla dále prostupuje skrz mazivo až k leštěnému povrchu valivého elementu, kde se následně odrazí. Oba svazky světla po odrazu směřují do objektivu. Jelikož každý ze dvou svazků světla urazil jinou optickou vzdálenost, došlo k vzájemnému posunutí jejich fází. Posunutím fáze dochází ke změně intenzity a barvy světla obrazu, což je označováno jako interference. Po kalibraci pro konkrétní provozní podmínky je každému odstínu barvy přiřazena tloušťka vrstvy maziva [43, 44].

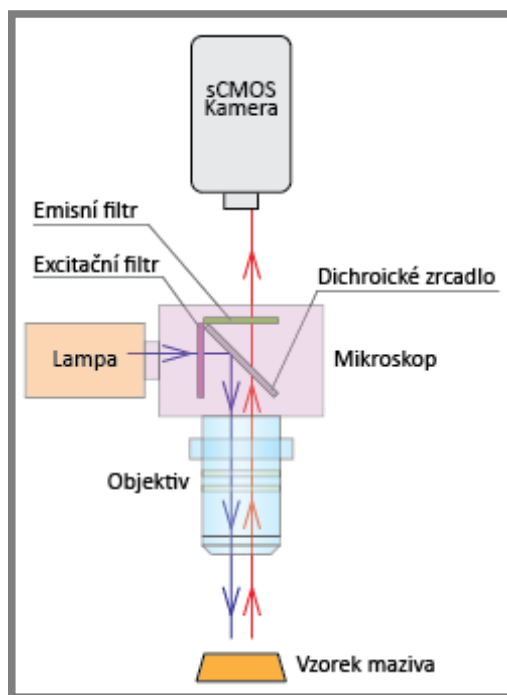
4.1.2 Fluorescence

Metoda fluorescence byla poprvé představena autory Smart a Ford [45], kteří pozorovali tloušťku filmu maziva na rotačním válci. Pozdějším vývojem se ukázalo, že za použití rtuťové lampy lze měřit metodou fluorescence tloušťku maziva až do 30 nm [27, 46]. Touto metodou lze získat hodnotu intenzity světla i v případech, kdy nelze zajistit odrazivý povrch pod mazacím filmem, jako tomu je u metody optické interferometrie. Princip celé metody fluorescence je založen na intenzitě fluorescenční emise [27]. Následující popis fluorescenční metody a obr. 4-2 jsou převzaty z prací Nečase [47, 48].

Fluorescenční mikroskopie je schematicky znázorněná na obr. 4-2. Definici fluorescenčního jevu poskytl mimo jiné Haugland a kol. [49] jako jev rozdělený na tři fáze:

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

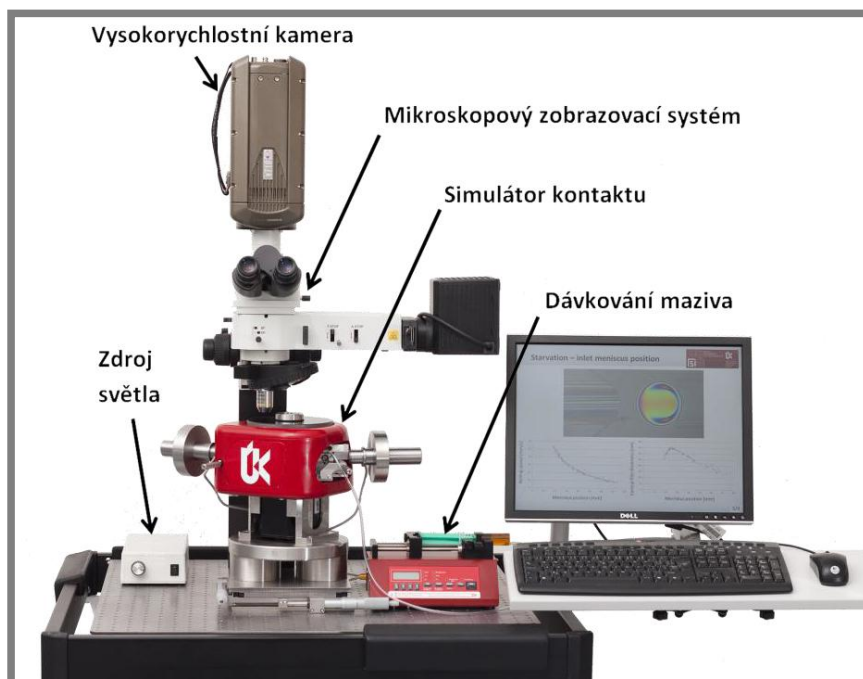
Při experimentálním měření touto metodou je důležité snímat kamerou pouze emisi světla maziva nebo přidaného barviva v mazivu. K oddělení složek jednotlivých svazků světla (emisní a excitační) slouží filtry, které lze vidět na obr. 4-2 [44].



Obr. 4-2 Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie [48] (upraveno)

4.2 Měřicí aparatura (simulátor kontaktu)

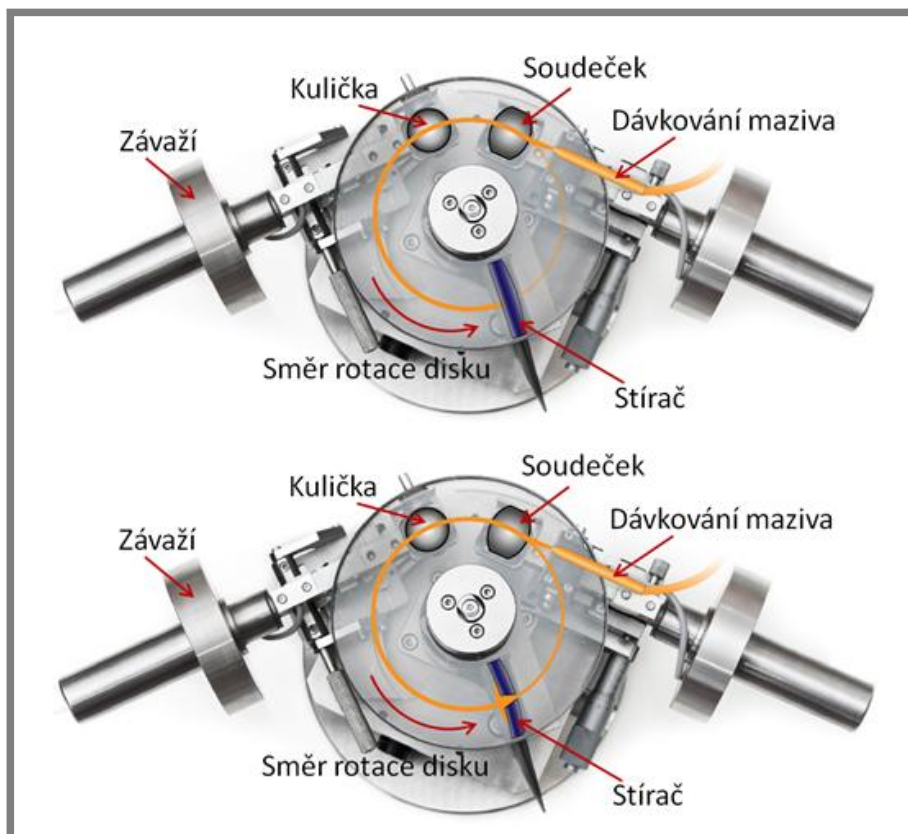
V prostorách Ústavu konstruování v Brně bylo postupně vytvářeno a upravováno zařízení (obr. 4-3), které umožňuje experimentální zjištění závislosti centrální tloušťky filmu maziva na tloušťce maziva na vstupu kontaktu.



Obr. 4-3 Celkový pohled na tribometr sloužící pro měření tloušťky filmu maziva v kontaktu [36]

Měřicí aparatura vytváří současně dvě kontaktní oblasti, které jsou tvořeny mezi rotujícím skleněným diskem a valivými elementy, v tomto případě ocelovou kuličkou a soudečkem. Osy rotace obou valivých elementů jsou kolmé k ose rotujícího disku, který je poháněn servomotorem. Možnost řízení rychlosti otáčení disku je umožněno pomocí programovatelného měniče frekvence. Přitlačení valivých elementů ke spodní straně skleněného disku je zajištěno pákami, které jsou na sobě vzájemně nezávislé. Páky jsou zkonstruovány tak, aby bylo možné přidat respektive odebrat závaží, a tak dosáhnout požadovaného kontaktního tlaku. Tloušťka filmu maziva je měřena metodou optické interferometrie, která vyžaduje, aby byl skleněný disk pokryt ze spodní strany (tvořící kontaktní dvojici) chromovou vrstvou a horní strana disku protiodrazovou vrstvou. Oblasti kontaktu jsou snímány kamerou typu Manta G146C. Simulátor kontaktu lze natáčet okolo své osy, aby se snadněji a rychleji nastavila kontaktní oblast do místa snímaného kamerou. Po prvních experimentech bylo zjištěno, že pro dosažení nižší popřípadě vyšší vstupující tloušťky maziva do kontaktu je zapotřebí u prvního kontaktu zajistit nezávislého pohybu třecích povrchů. Pro nezávislý pohyb soudečku byl využit elektromotor (obr. 5-6), jehož krouticí moment je přenášén přes řemenice a ozubený řemen. Umístění tohoto elektromotoru bylo zvoleno na část páky soudečku, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích sil působících na kontaktní oblast, více v kapitole 5.2.1. Posledním dílem tvořícím měřicí aparaturu je adaptivní stírač, který byl navrhnout a vyroben v bakalářské práci [50].

Adaptivní stírač kapaliny slouží k setření maziva, které je během experimentu kontinuálně nanášeno dávkovačem maziva přes mikropipetu, nebo je jednoduše ručně nanášeno na disk. Ručního nanášení maziva se nejvíce využívá při měření s plastickými mazivy. V případě plastických maziv stírač nestírá mazivo za kontaktními oblastmi z povrchu disku, ale usměrňuje vytlačené mazivo zpět do dráhy kontaktů. Schéma měřící aparatury je zobrazeno na obr. 4-4.

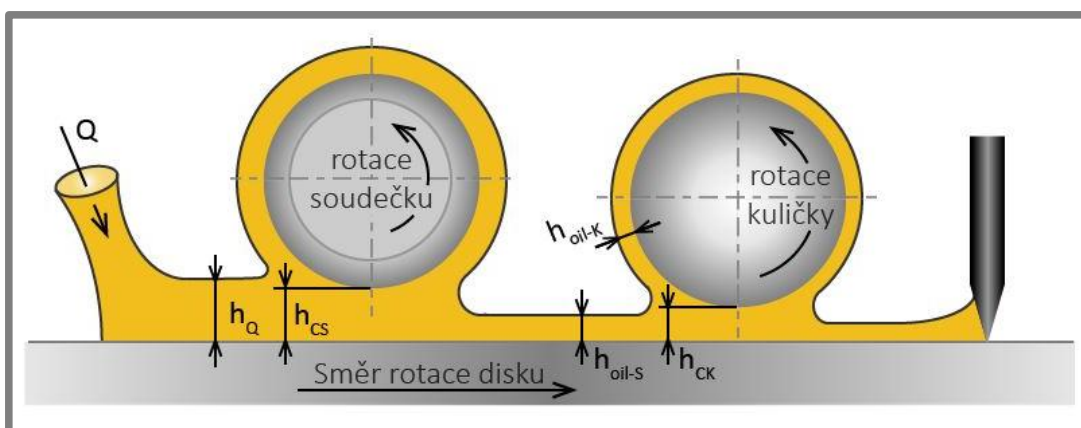


Obr. 4-4 Schéma měřících aparatur, horní schéma měřící aparatury obsahuje stírač pro téměř úplné setření filmu maziva z povrchu disku, spodní aparatura je zobrazena se stíračem vracejícím mazivo zpět do dráhy kontaktů

4.3 Metodika a podmínky měření

Metodika měření závislosti centrální tloušťky filmu maziva na vstupující tloušťce maziva spočívá v použití dvou kontaktních dvojic (obr. 4-5) kulička – disk (kruhový kontakt) a soudeček – disk (eliptický kontakt). Valivé elementy jsou nastaveny ve stejné vzdálenosti od středu disku tak, aby jejich dráha valení byla vůči sobě totožná. Nanesené mazivo na disku vstupuje nejprve do prvního kontaktu mezi soudečkem a diskem. Po průchodu tímto kontaktem dojde k jeho distribuci. Za podmínek čistého valení je mazivo rozděleno rovnoměrně na třetí povrchy. Tedy polovina centrální tloušťky maziva prvního kontaktu zůstává na valivém elementu (soudečku) a zbylá polovina centrální tloušťky maziva ulpívá na povrchu disku. Následně je zbylé mazivo na disku nesené do druhého kontaktu (kulička - disk), který hladoví. Tyto kontakty sledujeme a měříme jejich centrální tloušťku filmu maziva. Pro dosažení větších rozsahů hodnot byl první kontakt (soudeček - disk) nezávisle poháněn, čímž se docílilo nerovnoměrné distribuce maziva na třecích

povrchů. Mazivo může být aplikováno dávkovačem maziva nebo manuálně. Při použití dávkovače, pro nepřetržité nanášení nového maziva v průběhu testu, je nezbytné zbylé mazivo po průchodu kontaktem odstranit stíračem z povrchu disku. Manuální nanášení maziva na disk probíhá pouze před začátkem testu. V průběhu testu je mazivo vytlačováno kontaktním tlakem mimo kontaktní oblast a díky stírači je znovu před každým dalším průchodem skrz kontakt mazivo usměrněno zpět do dráhy kontaktů.



Obr. 4-5 Popis experimentální metody

Pro experimenty byly použity tři základové oleje a plastická maziva z nich vyrobená, která jsou běžně dostupná. Jejich popis a vlastnosti jsou uvedené v tab. 4-1 a tab. 4-2. Před každým měřením byl simulátor kontaktu řádně vyčištěn a odmaštěn acetonem od nečistot. Po nanesení množství maziva bylo nejprve zařízení spuštěno bez zaznamenávání výsledků tak dlouho, aby se docílilo rovnoměrného rozložení maziva a podmínky pro dvojici kontaktů byly neměnné.

Tab. 4-1 Specifikace vzorků plastických maziv [51, 52, 53]

Označení (Mogul)	Kinematická viskozita základového oleje při 40 °C ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Základový olej	Zpevňovadlo
LV 2-3	50	Minerální olej	Li mýdlo
LA 2	130	Minerální olej	Li mýdlo
LVT 2 EP	200	Minerální olej	Li mýdlo

Tab. 4-2 Index lomu použitých typů maziv

	Označení (Mogul)	Index lomu
Základový olej	LV 2-3	1,477
	LA 2	1,497
	LVT2-EP	1,49
Plastické mazivo	LV 2-3	1,481
	LA 2	1,496
	LVT2-EP	1,492

Stručný popis jednotlivých plastických maziv (uveden níže) je téměř doslovně převzat z technických informací výrobců. Podrobnější popis je uveden v technické dokumentaci maziv v příloze č. 1.

MOGUL LV 2-3 je plastické mazivo vyrobené z ropných základových olejů, které je zpevněné lithným mýdlem. Obsahuje zušlechťující přísady proti oxidaci a proti rezivění. Je poloměkké až střední konzistence, má krátkovláknitou strukturu a žlutou až světle hnědou barvu [51].

MOGUL LA 2 je plastické mazivo vyrobené z ropných základových olejů, které je zpevněné lithným mýdlem. Obsahuje zušlechťující inhibitory oxidace, koroze a vysokotlakou přísadou (EP). Je poloměkké až střední konzistence, má krátkovláknitou strukturu a zelenohnědou barvu [52].

MOGUL LVT 2 EP je plastické mazivo vyrobené z ropných základových olejů, které je zpevněné lithným mýdlem. Obsahuje zušlechťující přísady proti oxidaci, proti rezivění a vysokotlakou přísadou (EP). Je poloměkké až střední konzistence, má krátkovláknitou strukturu a žlutavou až světle hnědou barvu [53].

5 VÝSLEDKY

5

V této kapitole jsou kromě samotných výsledků závislosti h_c na h_{oil} podrobně uvedeny také výpočty a experimentálně zjištěné hodnoty parametrů potřebných ke zpřesnění hodnot zmíněné závislosti. Autoři Chevalier, Lubrecht a kol. [22] představili teoretický model popisující závislost mezi H_c/H_{cff} a H_{oil}/H_{cff} (obr. 2-9). Přepočítání tohoto teoretického modelu dle použitého typu základového oleje je podrobně popsáno v následující kapitole 5.1. Následně je tento přepočítaný teoretický model porovnán s výslednými hodnotami závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo z něj vyrobené.

5.1. Přepočet teoretického modelu pro daný typ maziva

5.1

Studie centrální tloušťky H_c jako funkce množství oleje vstupujícího do kontaktu H_{oil} uvádí oba tyto parametry v poměru s plně zaplavenou tloušťkou filmu maziva H_{cff} . U teoretického modelu se výsledky přibližují dvou asymptotám: $H_c/H_{cff} = H_{oil}/H_{cff}$ a $H_c/H_{cff} = 1$. V případě, že kontakt hladový, tak jeho centrální tloušťka filmu nemůže překročit tloušťku filmu vstupující do daného kontaktu ($H_c/H_{cff} = H_{oil}/H_{cff}$) a za druhé není možné, aby centrální tloušťka filmu hladovějšího kontaktu překročila tloušťku filmu plně zaplaveného kontaktu ($H_c/H_{cff} = 1$) [22].

Predikce průběhu H_c jako funkce H_{oil} je založena na rovnici (5-1), která byla inspirována prací Kingsbury v roce 1973. Zmíněná rovnice určuje relativní snížení centrální tloušťky filmu maziva v kontaktu $R = H_c/H_{cff}$ k poměru $r = H_{oil}/H_{cff}$.

$$R = \frac{r}{\sqrt[\gamma]{1 + r^\gamma}} \quad (5-1)$$

kde:

- r - relativní tloušťka filmu maziva
- R - redukce centrální tloušťky filmu maziva
- γ - odpor proti bočnímu výtoku maziva

Pro výpočet potřebných hodnot z rovnice (5-1) je tedy nutné určit vstupní hodnoty parametrů r a γ . Pro parametr r jsou zvoleny hodnoty v rozmezí $<0,3>$ po kroku 0,1. Druhý ze vstupních parametrů (γ) musí být dopočítán, tento parametr je popsán v následující kapitole 5.1.1.

5.1.1 Odpor proti bočnímu výtoku maziva (γ)

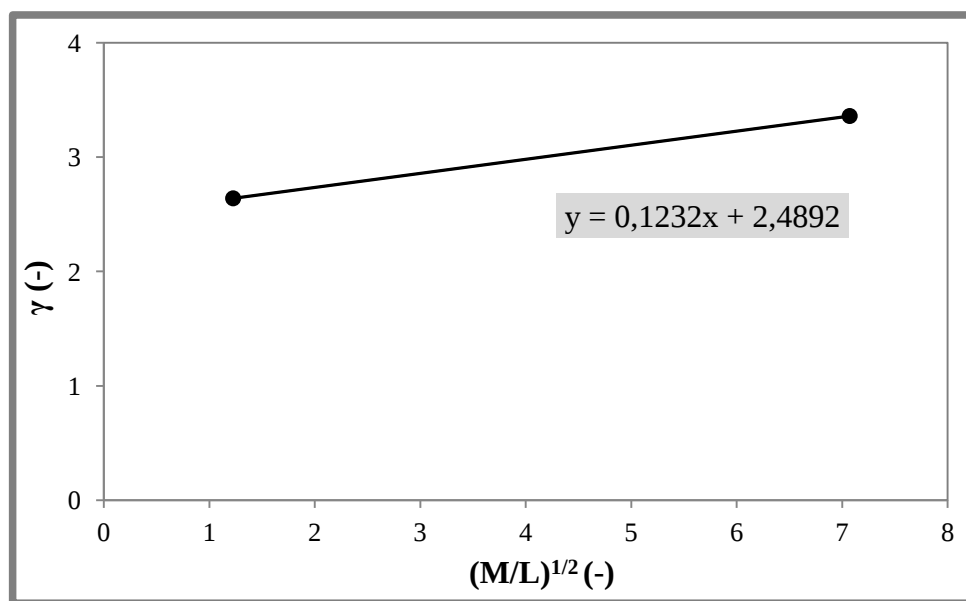
5.1.1

Veškeré informace pro výpočet parametru γ jsou brány ze článku [16], který určuje tento parametr v závislosti na parametrech zvaných jako Moes ($\gamma = f(\sqrt{M/L})$). Jestliže by parametr γ teoreticky dosáhl hodnoty nekonečna, tak by to znamenalo, že neexistuje boční výtok maziva. Z uvedeného článku [16] je známo, že hodnota parametru γ roste lineárně se zvyšujícími se parametry Moes a pohybuje se mezi hodnotami 2 až 5 pro kruhový kontakt. Autoři zjišťovali také vliv elipticity. Zjistili, že se zvyšující elipticitou roste hodnota parametru γ . Pro tuto práci je zapotřebí znát pouze závislost parametru γ na $\sqrt{M/L}$ pro elipticitu $\kappa = 1$, tj. pro kuličku.

Díky autorům zmíněného článku [16], kteří uvedli tabulku (tab. 5-1) lze z hodnot vytvořit vlastní graf (obr. 5-1), z něhož je přes zjištěnou rovnici přímky určena hodnota parametru gama pro dané provozní podmínky, jež jsou popsány parametry Moes.

Tab. 5-1 Parametr gama pro různé provozní podmínky [16] (upraveno)

	M	L	$(M/L)^{1/2}$	$\gamma (0,5 \leq r \leq 1,5)$
k= 1	30	20	1,22	2,64
k= 1	1000	20	7,07	3,36



Obr. 5-1 Parametr gama jako funkcí $\sqrt{M/L}$ pro kruhový kontakt

5.1.2 Provozní parametry Moes

Mezi zjišťované Moes veličiny patří bezrozměrný parametr zatížení $M = f(W, U)$ a bezrozměrný materiálový parametr $L = f(G, U)$. Níže jsou uvedeny vzorce pro jejich výpočet.

$$M = W \cdot (2 \cdot U)^{-\frac{3}{4}} \quad (5-2)$$

$$L = G \cdot (2 \cdot U)^{\frac{1}{4}} \quad (5-3)$$

$$W = \frac{w}{E' \cdot R_x^2} \quad (5-4)$$

$$U = \frac{\eta_0 \cdot u_m}{E' \cdot R_x} \quad (5-5)$$

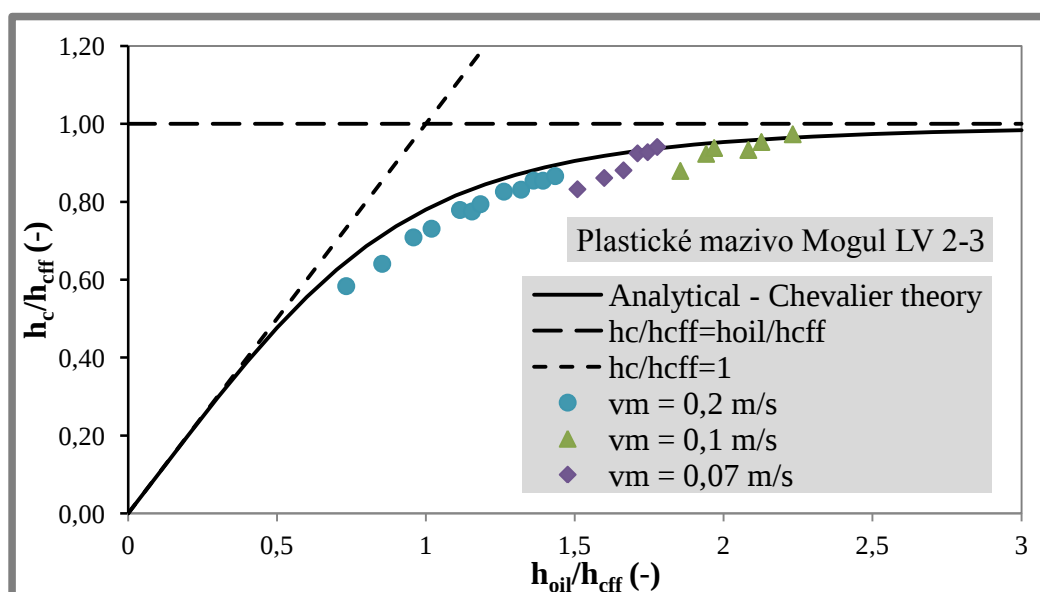
$$G = \alpha \cdot E' \quad (5-6)$$

kde:

E'	Pa	- redukovaný modul pružnosti
G		- materiálový parametr
L		- bezrozměrný materiálový parametr (Moes)
M		- bezrozměrný parametr zatížení (Moes)
R_x	mm	- redukovaný parametr křivosti
u_m	m.s ⁻¹	- střední rychlost ve směru x
U		- bezrozměrný parametr rychlosti
w	N	- externí zatížení (kontaktu)
W		- bezrozměrný parametr zatížení
α	Pa ⁻¹	- tlakově-viskózní koeficient
η_o	Pa·s	- dynamická viskozita v okolí kontaktu

Redukovaný modul pružnosti a redukovaný rádius křivky ve směru osy x je vypočítán z geometrických a materiálových vlastností kontaktních dvojic, tj. pro použitou měřicí aparaturu - ocelová kulička a skleněný disk. Pro veškeré experimenty byla kulička zatěžována stejným typem závaží přes pákový mechanismus měřicí aparatury. Zjištění hodnoty externího zatížení vedlo přes Hertzovu teorii, výpočet je podrobněji popsán v kapitole 5.2.3.

Další vstupní veličinou je střední rychlost ve směru x (tj. střední rychlost mezi kuličkou a diskem). Rychlost valení kuličky je závislá na rychlosti otáčení disku v místě kontaktu (kulička nemá nezávislý pohon). V současné koncepci měření se uvažuje čisté valení mezi kuličkou a diskem, tudíž rychlost disku v místě kontaktu je stejná jako rychlost valení kuličky. Hodnota střední rychlosti je převzata z měření závislosti centrální tloušťky na vstupující tloušťce filmu maziva. Při měření této závislosti jednoho typu maziva je experimentální měření rozděleno na více měřených částí s odlišnou střední rychlostí (obr. 5-2). Pro tento teoretický model se použila střední rychlost odpovídající největšímu počtu získaných bodů, které popisují největší měřenou oblast křivky (např. pro plastické mazivo Mogul LV 2-3 znázorněné na obr. 5-2 byla použita střední hodnota rychlosti 0,2 m/s). Zbylým dvěma vstupním veličinám (η_o , α) se věnují následující kapitoly 5.1.3 a 5.1.4.



Obr. 5-2 Závislost h_c na h_{oil} pro hodnoty různých středních rychlostí

5.1.3 Dynamická viskozita maziv

Viskozita jednotlivých základových olejů byla zjištěna na profesionálním reometru Haake RotoVisco 1 pouze pro jednu konkrétní teplotu. Při měření viskozity bylo snahou teplotu, co nejvíce přiblížit k hodnotě teploty experimentálního měření. Viskozita základových olejů při konkrétní teplotě je uvedena v tab. 5-2.

Tab. 5-2 Viskozita základových olejů

Označení (Mogul)	Teplota (°C)	η (Pa.s)
LV 2-3	23,9	0,121
LA 2	24,6	0,333
LVT2-EP	24,7	0,415

5.1.4 Tlakově-viskózní koeficient (α)

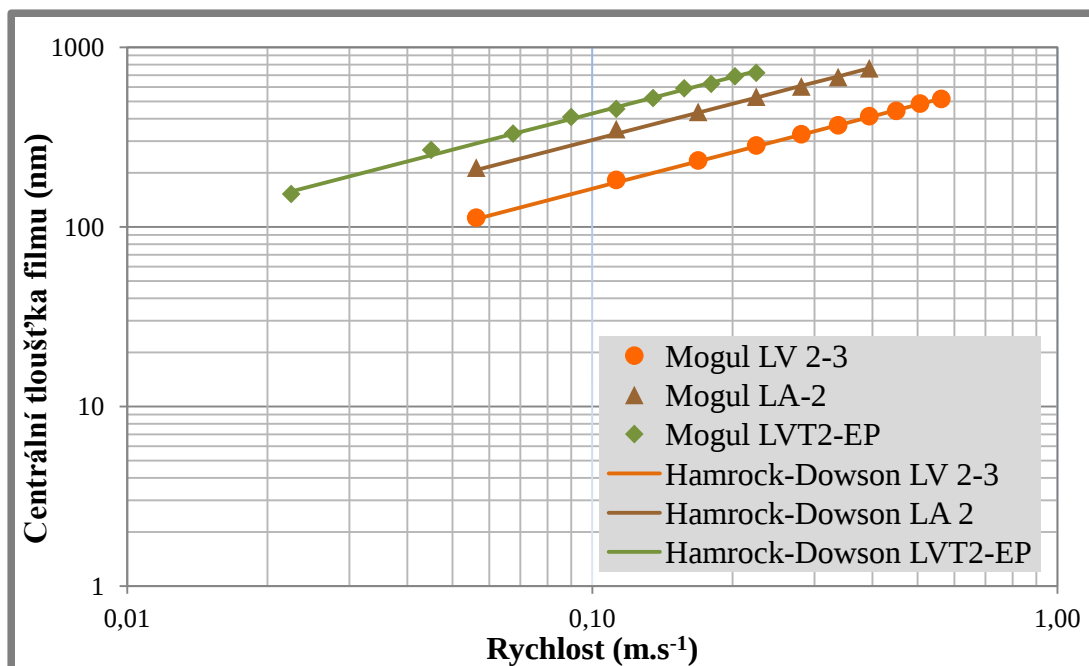
Parametr tlakově-viskózního koeficientu vystupuje také ve výpočtu predikce centrální tloušťky filmu maziva podle Hamrock-Dowsona [21]. Z této predikce centrální tloušťky filmu maziva lze získat parametr alfa na základě experimentálně naměřené závislosti centrální tloušťky na rychlosti. Vyjádření parametru alfa z predikce Hamrock-Dowsona a dosazením vstupních veličin do tohoto vzorce se získá zjišťovaný parametr alfa pro konkrétní typ základového oleje.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{h_c}{2,69 \cdot R' \cdot \left(\frac{u_m \cdot \eta_0}{E' \cdot R'} \right)^{0,67} \cdot \left(\frac{w}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,067} \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k_k})} \right)^{\frac{1}{0,53}}}{E'} \quad (5-7)$$

kde:

E'	Pa	- redukovaný modul pružnosti
h_c	mm	- centrální tloušťka filmu maziva
k_k		- elipticita kuličky
R'	mm	- redukovaný poloměr křivky
u_m	m.s ⁻¹	- střední rychlost ve směru x
w	N	- extérní zatížení (kontaktu)
α	Pa ⁻¹	- tlakově-viskózní koeficient
η_0	Pa.s	- dynamická viskozita maziva

Z uvedené rovnice (5-7) lze dopočítat koeficient alfa pro jednu konkrétní naměřenou hodnotu h_c a u_m . Experiment zjišťující závislost centrální tloušťky maziva na rychlosti za plně zaplavených podmínek byl proveden nejen pouze pro jednu konkrétní hodnotu, ale z důvodu snížení nepřesnosti měření byly naměřeny hodnoty h_c pro větší rozsah rychlostí. Tyto hodnoty byly zjišťovány pomocí stejné aparatury jako závislost h_c na h_{oil} a byly použity identické nástroje pro tvorbu EHD kontaktu tj. např. stejná ocelová kulička, stejné závaží, apod. Přesnějšímu získání parametru alfa bylo nejlépe docíleno proložením naměřených hodnot závislosti h_c na u_m (obr. 5-3) predikcí Hamrock-Dowson [21]. Postupným měněním parametru alfa se docílilo, co možná nejpresnějšího proložení těchto naměřených bodů (obr. 5-3). V tabulce 5-3 jsou uvedeny konkrétní vyhodnocené výsledky parametru alfa pro základové oleje.



Obr. 5-3 Predikce a experimentální závislost centrální tloušťky na rychlosti

Tab. 5-3 Tlakově-viskózní koeficient základových olejů

Označení (Mogul)	α (GPa)
LV 2-3	53
LA 2	48
LVT2-EP	69

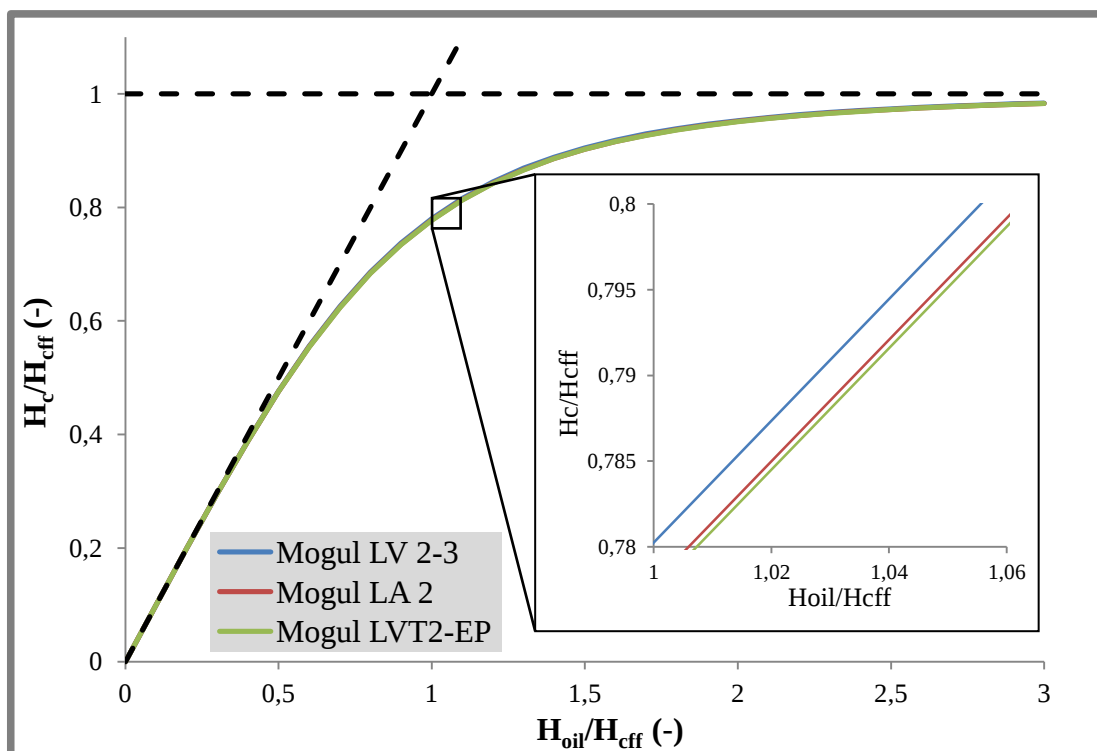
5.1.5 Výsledky přepočítaného teoretického modelu

5.1.5

Dosažením jednotlivých vstupních parametrů do teoretického modelu a jeho následným dopočítáním se zjistilo velmi malých odlišností mezi jednotlivými typy maziv. Je patrné, již z malé odlišnosti vypočítaných parametrů gama jednotlivých základových olejů, že křivky přepočítaných teoretických modelů budou mít téměř stejný průběh pro všechny typy olejů (obr. 5-4). Detail těchto křivek je uveden v dolní pravé části obr. 5-4. Všechny hodnoty vstupních veličin jsou shrnuty v tab. 5-4. Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, jednotlivé přepočítané teoretické modely základových olejů budou porovnány s experimentálně naměřenými hodnotami uvedenými v následující kapitole.

Tab. 5-4 Vstupující parametry

Označení (Mogul)	α (GPa)	η (Pa.s)	w (N)	u_m (N)	M	L	$(M/L)^{1/2}$	γ
LV 2-3	53	0,121	27,56	0,224	97,05	15,93	2,47	2,79
LA 2	48	0,333	27,56	0,113	75,65	15,68	2,20	2,76
LVT2 - EP	69	0,415	27,56	0,067	95,55	20,85	2,14	2,75



Obr. 5-4 Teoretické predikce základových olejů

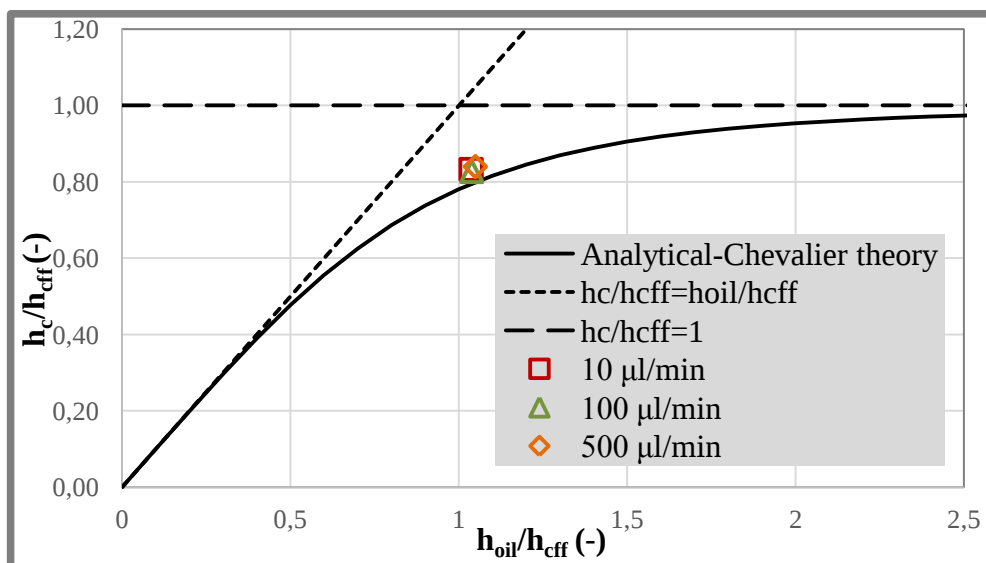
5.2 Závislost centrální tloušťky hladovějícího EHD kontaktu na přesně definované tloušťce maziva vstupující do kontaktu

V této podkapitole je popsán postup, jak se docílilo získání centrální tloušťky filmu maziva v závislosti na přesně definované tloušťce filmu maziva vstupující do kontaktu. Nejprve je zde uvedeno první zkušební měření a následné další kroky potřebné pro rozšíření a zpřesnění experimentálně získaných dat.

5.2.1 Vstupní měření závislosti h_c na h_{oil}

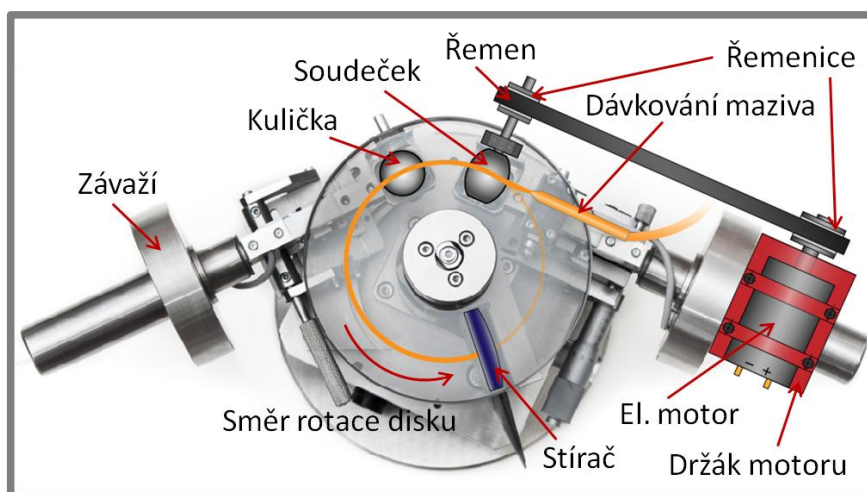
Prvotní měření závislosti h_c na h_{oil} probíhalo při měření oleje R834/80 za podmínek čistého valení u obou valivých elementů, tj. u soudečku R106 o průměru 25,4 mm (R106 znamená, že soudeček má poloměr křivosti 106 mm v kolmém směru na směr valení) a kuličky. Vstupující tloušťka filmu maziva do hladovějícího EHD kontaktu za podmínky čistého valení obou kontaktů je dopočítána z rovnice (5-8), do které vstupují parametry centrální tloušťky filmu maziva obou kontaktů. Teplota, rychlost a použité závaží zůstávalo po celou dobu experimentů konstantní. Aparatura je vidět na obr. 4-4. Kontinuální dávkování maziva bylo zajištěno dávkovačem maziva, jenž zajišťoval přívod konstantního objemu nového maziva vstupujícího do prvního kontaktu (soudeček-disk) během celé doby experimentu. Byly provedeny tři typy měření se stejnými provozními podmínkami, až na objem maziva zásobující první kontakt. Dávkovaný objem maziva byl specifický pro každý experiment, a to 10, 100 a 500 $\mu\text{l}/\text{min}$. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 5-5 a z naměřených hodnot je zřejmé, že změnou množství dávkovaného maziva nelze dosáhnout popisu větší oblasti křivky. Proto je nutné upravit koncepci rozložení filmu maziva prvního elementu.

$$h_{oil} = \frac{h_{CS}}{2} + \frac{h_{CK}}{2} \quad (5-8)$$



Obr. 5-5 Experimentální měření se změnou množství dávkovaného maziva

Dosažení nehomogenního rozložení tloušťky filmu maziva na třecích površích prvního kontaktu (soudeček-disk) lze dosáhnout nezávislým pohonem soudečku, tudíž vzniku prokluzu mezi třecími povrchy. Prokluz je popsán rovnicí (2-6), do které vstupují rychlosti jak soudečku, tak i disku. Z teorie je známo, že rychleji se pohybující povrch bude obsahovat větší tloušťku filmu maziva, než pomaleji se pohybující povrch. Řešením bylo upravení měřicí aparatury, která nyní umožní nezávislý pohon prvního elementu (obr. 5-6). Soudeček je poháněn elektromotorem, jehož krouticí moment se přenáší přes řemenice a ozubený řemen. Ozubený řemen je zvolen z důvodu zajištění konstantního převodového poměru. Umístění tohoto elektromotoru bylo zvoleno na část páky soudečku, jenž je uchycen držákem vyrobeným na 3D tiskárně UP Mini, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích sil působících na kontaktní oblast.

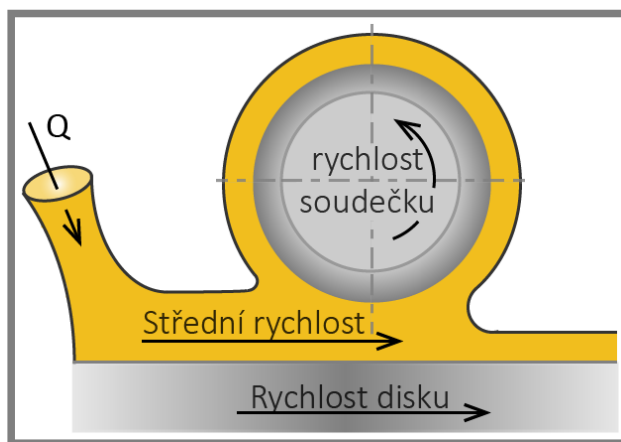


Obr. 5-6 Nezávislý pohon prvního valivého elementu

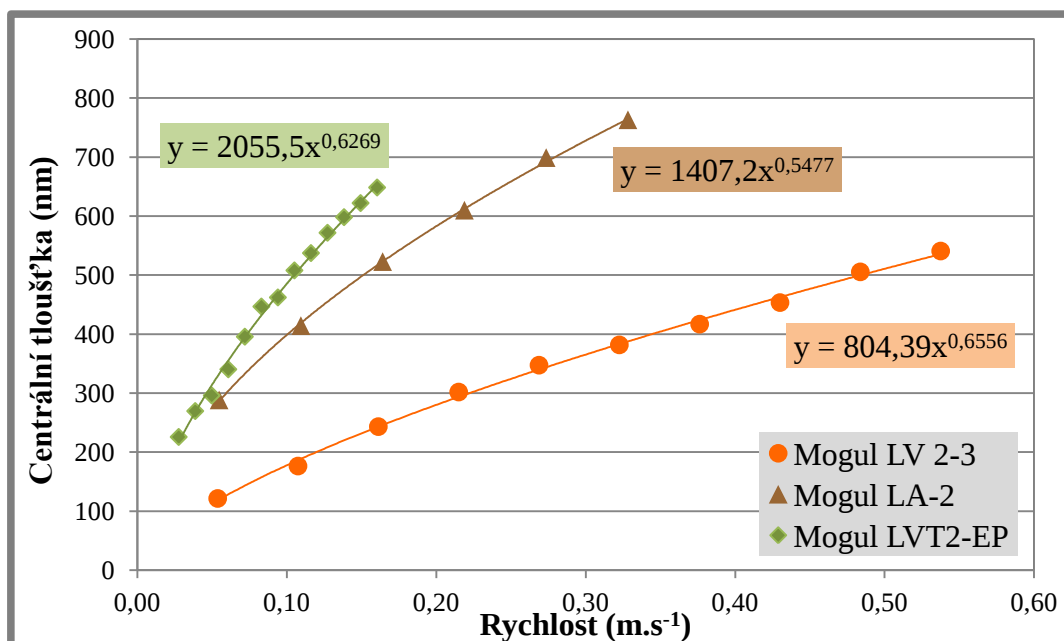
5.2.2 Vlivu prokluzu

Zavedením prokluzu prvního elementu se získá navýšení, popřípadě snížení tloušťky mazacího filmu. Vzorec pro výpočet h_{oil} je v případě zavedení prokluzu ovlivněn, ale ostatní hodnoty zůstávají nezměněny. Změnou výpočtu h_{oil} jsou naměřená data posunuta blíže nebo dále od teoretického modelu ve vodorovném směru. Úprava výpočtu spočívá ve stanovení parametru SRR a jeho dosazení do rovnice poměru dělení maziva, jenž určuje skutečný poměr dělení tloušťky filmu maziva vystupující z kontaktu, tj. tloušťku filmu maziva vstupující do druhého kontaktu.

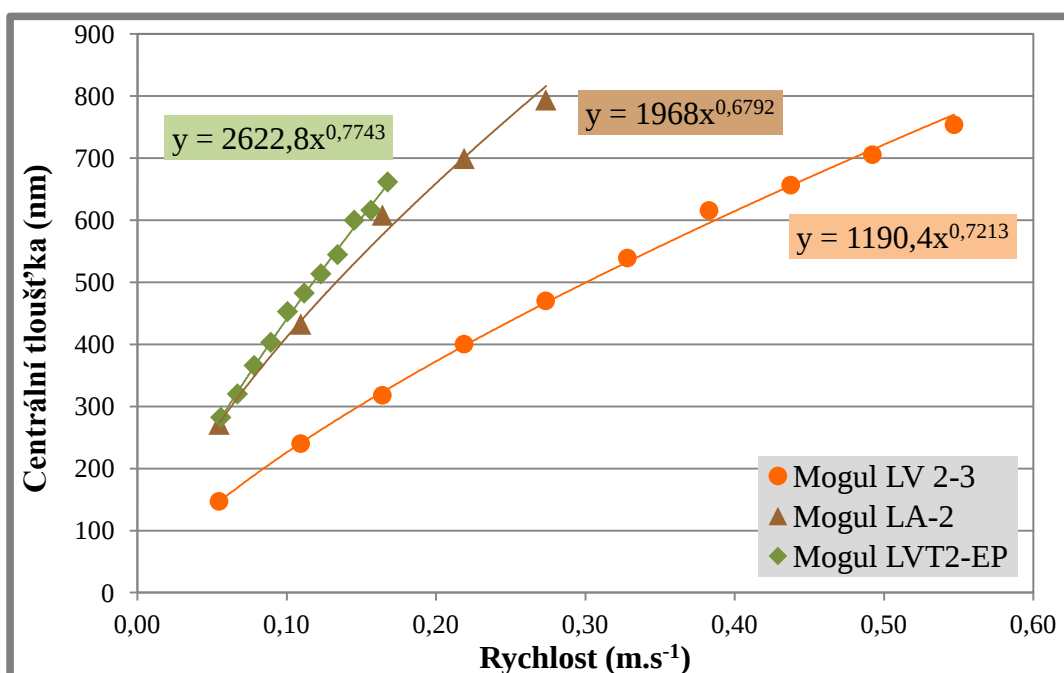
Pro úpravu výpočtu h_{oil} je zapotřebí v první části zjistit hodnotu parametru SRR z rovnice (2-6). Známé hodnoty jsou pouze rychlost disku a centrální tloušťka filmu maziva soudečku. Rychlost soudečku je neznámá, protože byl pro jeho pohon použit pouze elektromotor bez snímače otáček, tudíž se musí dopočítat rychlost soudečku. Rychlost soudečku je zjištěna z jeho předem naměřených hodnot, závislosti centrální tloušťky plně zaplaveného kontaktu při známých středních rychlostech a za stejných provozních podmínek (obr. 5-8, 5-9). Jelikož tloušťku filmu maziva určuje střední rychlost (obr. 5-7), tak z rovnice přímky jednotlivých maziv (obr. 5-8, 5-9) lze získat střední rychlost každé experimentálně získané tloušťky filmu maziva prvního kontaktu. Rychlost soudečku je tedy možné za podmínky známé střední rychlosti a rychlosti disku dopočítat. Následně stačí dosadit do zmíněné rovnice SRR (2-6) a tak zjistit hodnotu parametru SRR pro každou naměřenou centrální tloušťku filmu maziva prvního kontaktu.



Obr. 5-7 Schéma rychlostí kontaktu



Obr. 5-8 Centrální tloušťka základových olejů jako funkcí rychlosti

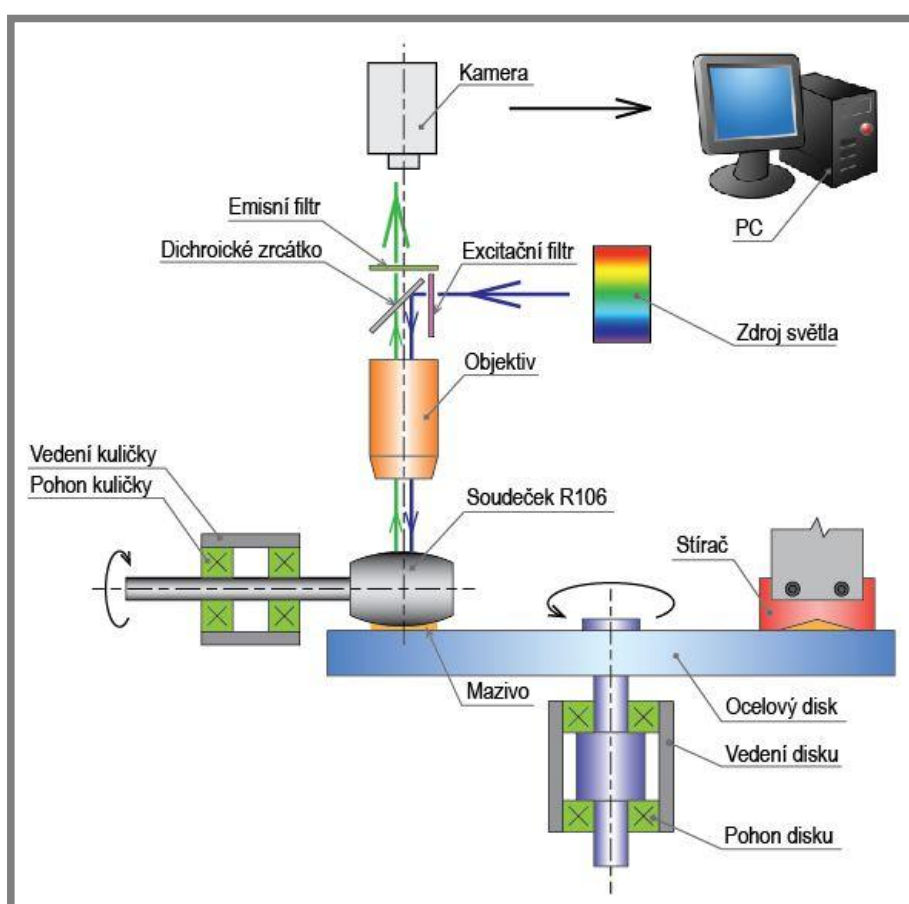


Obr. 5-9 Centrální tloušťka plastických maziv jako funkcí rychlosti

Jak již bylo zmíněno, samotný parametr slide-to-roll ratio neurčuje velikost vlivu prokluzu mezi třecími povrchy, ale je vstupní veličinou pro rovnici určující poměr dělení maziva.

Metoda fluorescence, kterou je možné zjistit poměr dělení maziva pro různé hodnoty prokluzů, byla představena ve článku [27]. Zde bude popis aparatury a princip měření pouze jednoduše nastíněn. Stávající aparatura (obr. 4-4) používající k měření tloušťky filmu maziva optickou interferometrii nemůže být použita pro měření poměru dělení maziva. Důvodem je absence polo-odrazivého rozhraní

mezi diskem, mazivem a valivým elementem. Schéma měřících míst tloušťky filmu maziva (obr. 2-25) na aparatuře (obr. 5-10), která umožňuje zjistit poměr dělení maziva ulpívajícího na třecích površích po průchodu kontaktem, je uvedeno v kapitole 2.3 a postup měření je uveden níže v dalším odstavci. U této aparatury (obr. 5-10) nemůže tedy dojít k rozdělení svazků světla a následnému posunutí jeho fází, jako je tomu u měření tloušťky filmu maziva v kontaktu interferometrickou metodou, protože je zjišťována pouze volná vrstva maziva na povrchu valivého elementu a disku. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda fluorescence, která nevyžaduje dělení svazku světla. Princip fluorescenční metody spočívá v zachycení velikosti intenzity fluorescence, jež produkuje pozorovaná látka (mazivo). Intenzita fluorescence se lineárně zvyšuje s tloušťkou vrstvy látky (maziva). Podrobněji je tato metoda a její princip popsán v kapitole 4.1.2.

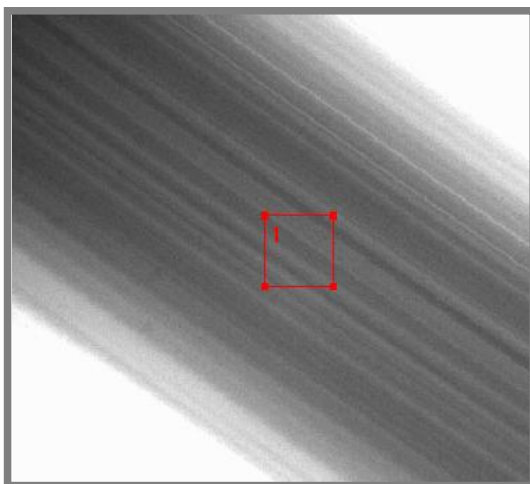


Obr. 5-10 Měřící aparatura využívající jevu fluorescence pro měření poměru dělení maziva [27] (upraveno)

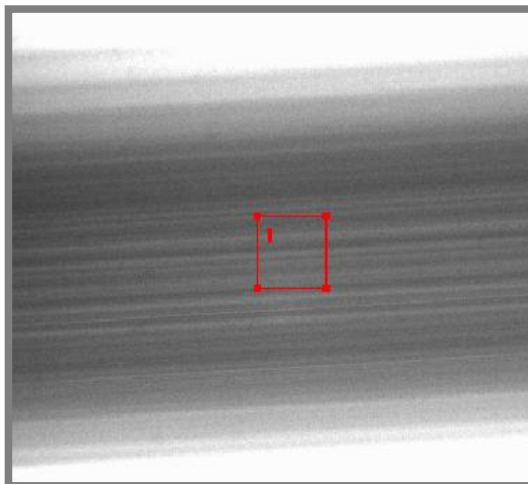
Aparatura (obr. 5-10) se skládá ze stejného ocelového soudečku R106, používaného pro distribuci maziva při měření závislosti h_c na h_{oil} a ocelového disku. Tato kontaktní dvojice je vyrobena ze stejného materiálu tak, aby byla zajištěna co možná nejmenší odlišnost intenzity záření světla obou povrchů. Před testem byl disk i soudeček pečlivě vyleštěn diamantovou pastou, aby se odstranila vrstva oxidů, která vznikla i přesto, že povrchy kontaktních dvojic byly zakonzervovány. Soudeček je oproti aparatuře ball-on-disk umístěn na horní straně disku a je nezávisle poháněn.

Valivá rychlost soudečku je řízena stejně jako u disku měničem frekvence, což přináší značné výhody. Lze tedy jednoduše nastavit otáčky soudečku a disku, tudíž lze určit přesnou hodnotu parametru *SRR*, pro nějž bude zjišťován poměr dělení maziva. Samotný experiment poměru dělení maziva spočívá v měření tloušťky vrstvy maziva na nejvyšším bodě soudečku (δ_1) a ve valivé dráze soudečku za kontaktem na disku (δ_2). Metoda je zobrazena na obr. 2-25. Místo kuličky je zde použit soudeček R106. Kontakt mezi soudečkem a diskem byl během testu neustále zásobován mazivem za využití stírače, který vytlačené mazivo mimo kontaktní dráhu po průchodu kontaktem usměrňoval zpět do kontaktní dráhy, tudíž byl kontakt neustále plně zaplaven. Tvrzení, že kontakt je plně zaplaven, nebylo možné ověřit jinak, než pouze pohledem, že do kontaktu směřuje velké množství maziva. Stírač použitý pro toto konkrétní měření dělení maziva byl dočasně zkonstruován z části dílů stírače navrženého v práci [50]. Bylo zjišťováno sedm konkrétních hodnot poměru dělení maziva pro parametry *SRR* (-1,7; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,7) a střední rychlost 200 mm/s. Nejprve byly zachyceny snímky soudečku pro všechny hodnoty *SRR* a následně disku také pro všechny hodnoty *SRR*. Tento postup měření se ještě jednou zopakoval, ale pouze s výjimkou otočeného pořadí disk-soudeček. Při jedné sérii měření intenzity světla (např. soudečku) všech parametrů *SRR* nebylo s aparaturou manipulováno, z důvodu zachování stejné snímané oblasti.

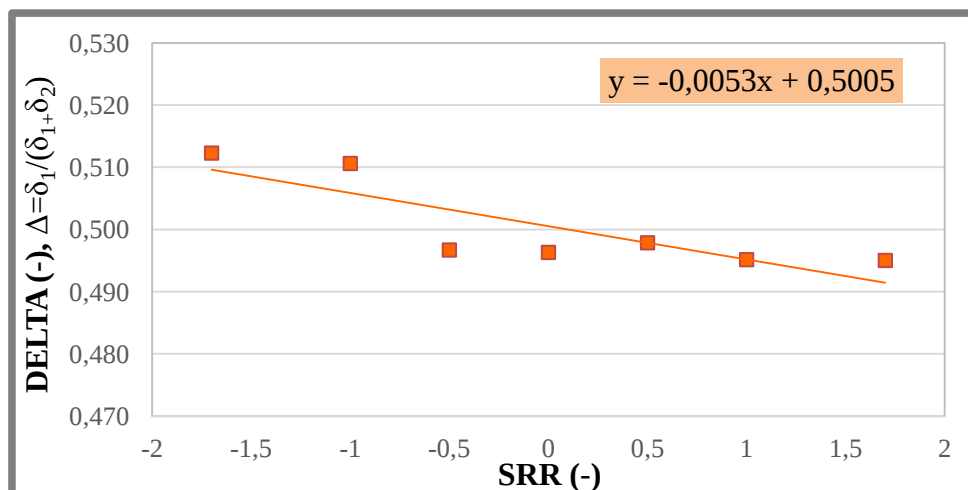
Samotné vyhodnocení spočívalo v určení oblasti na zachycených snímcích, u kterých byly hodnoty bitů jednotlivých pixelů v zobrazované oblasti zprůměrovány (obr. 5-11, 5-12). Vyhodnocovací oblast byla zvolena v centrálním místě dráhy vytvořené kontaktní oblastí. Při experimentech byla udržována konstantní teplota. Hodnoty dvou stejných měření pro jeden parametr *SRR* byly zprůměrovány a následně vyneseny do grafu. Na následujících grafech (obr. 5-13 až 5-18) jsou zachyceny jednotlivé průběhy poměru dělení maziva pro všechny typy použitých maziv v této práci.



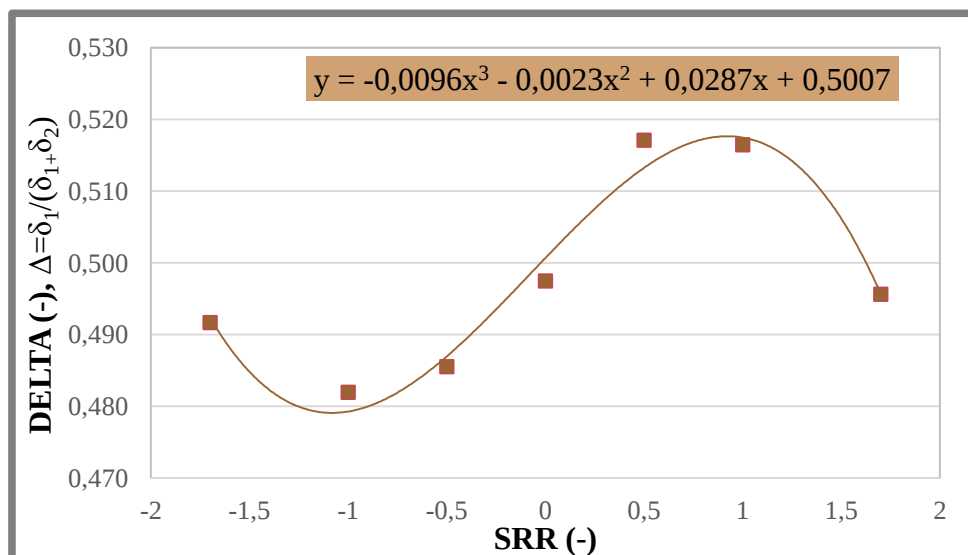
Obr. 5-11 Fluorescenční snímek dráhy soudečku za kontaktem na disku



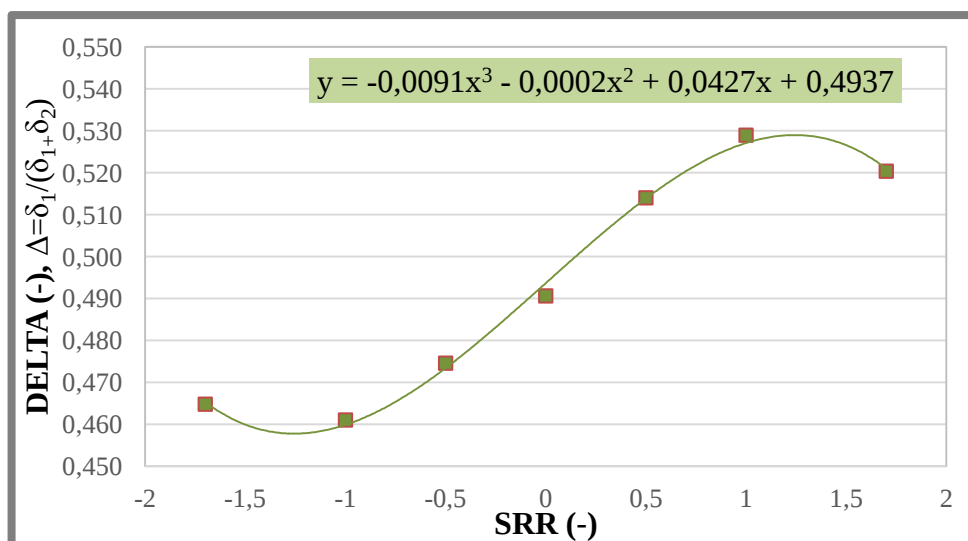
Obr. 5-12 Fluorescenční snímek soudečku



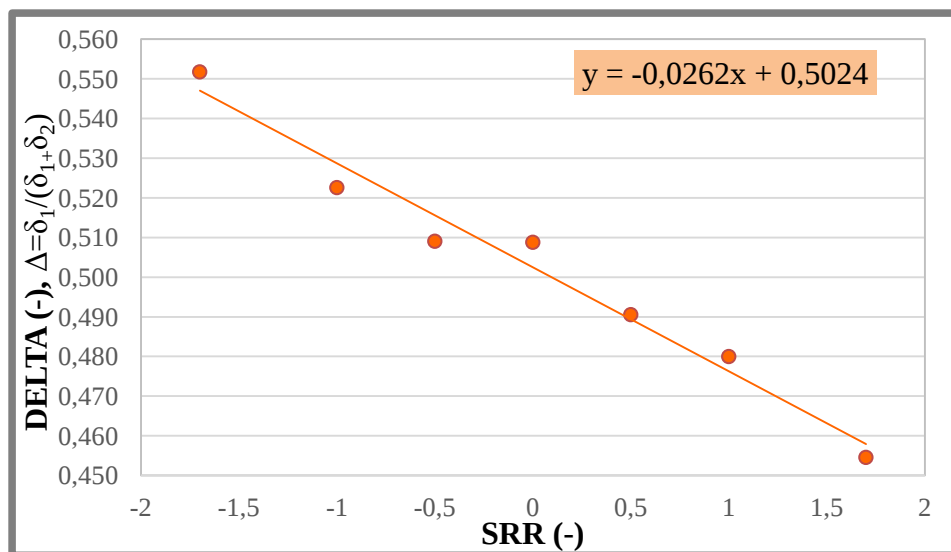
Obr. 5-13 Poměr dělení základového oleje Mogulu LV 2-3



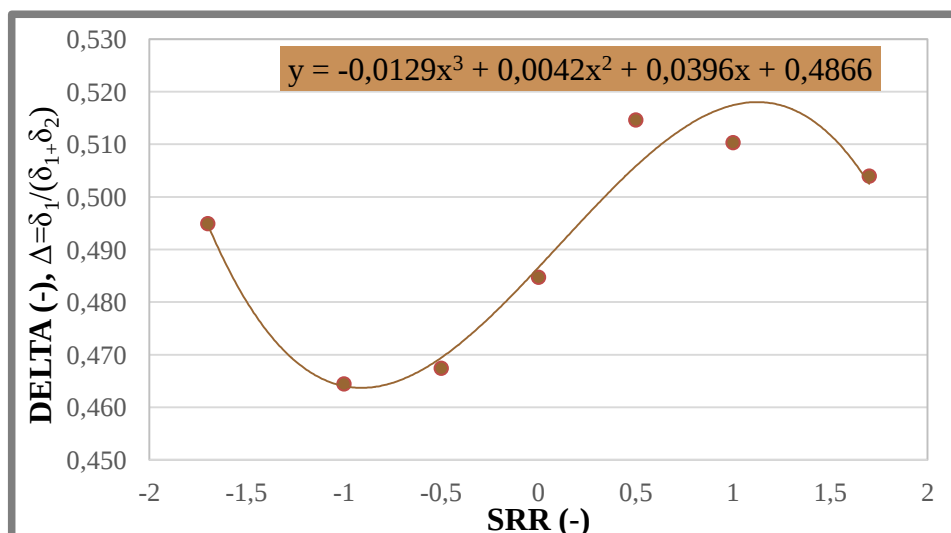
Obr. 5-14 Poměr dělení základového oleje Mogulu LA 2



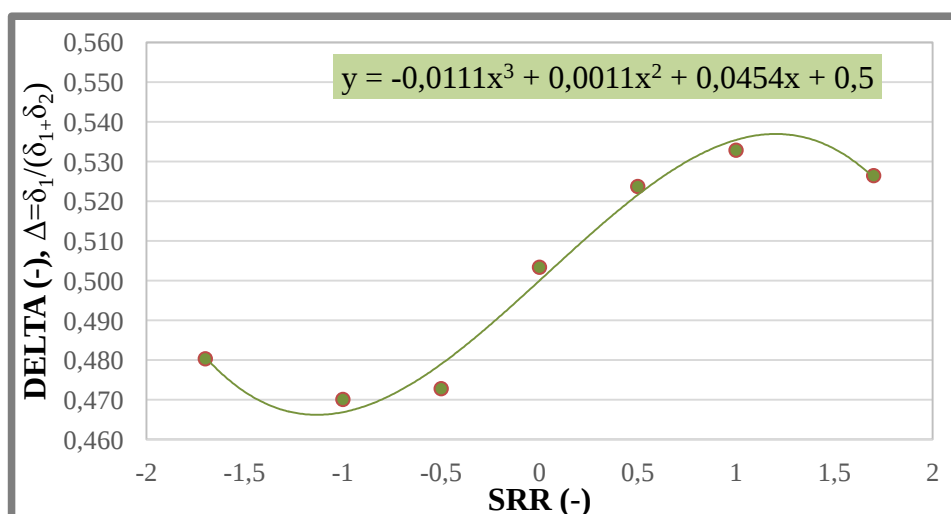
Obr. 5-15 Poměr dělení základového oleje Mogulu LVT2-EP



Obr. 5-16 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LV 2-3



Obr. 5-17 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LA 2



Obr. 5-18 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LVT2-EP

Ze získaných rovnic popisující průběh poměru dělení maziva se určí pro každou experimentálně naměřenou hodnotu prokluzu odpovídající parametr dělení maziva, jenž zahrnuje kompenzaci prokluzu při distribuci maziva u prvního kontaktu.

5.2.3 Vliv stlačitelnosti maziva

Vliv stlačitelnosti maziva je potřeba zahrnout do výpočtu h_{oil} , jestliže budou výsledky porovnávány s teoretickým modelem, ve kterém je zahrnuta hodnota h_{oil} za atmosférického tlaku. S ohledem, že k porovnání experimentálně získaných dat s teoretickým modelem dojde, tak je zapotřebí kompenzovat tento vliv pro experimentálně naměřená data ovlivněná velikostí kontaktního tlaku způsobující stlačení maziva v kontaktu. Druhý významnější důvod k zahrnutí vlivu stlačitelnosti maziva do výpočtu je použití odlišných valivých elementů (kulička, soudeček) a závaží při experimentu. Různé valivé elementy a závaží způsobují rozdíl v kontaktním tlaku, a tím dochází ke změně hustoty maziva. V této kapitole je zjištěn vliv stlačitelnosti pro jednotlivé kontakty a jejich provozní podmínky.

Pro výpočet stlačitelnosti maziva byl použit vztah podle Dowson-Higginsona (5-9). Tento vztah určuje změnu hustoty minerálních olejů v závislosti na tlaku. Maziva použitá v této práci jsou minerálního původu - minerální základové oleje a z nich vyrobená plastická maziva.

$$\bar{\rho}(P) = \frac{0,59 \cdot 10^9 + 1,34 \cdot Pp_h}{0,59 \cdot 10^9 + Pp_h} \quad (5-9)$$

kde:

Pp_h Pa - maximální Hertzův tlak
 $\bar{\rho}(P)$ - bezrozměrná hustota v závislosti na tlaku

Neznámou hodnotou ve vztahu stlačitelnosti maziva (5-9) je maximální Hertzův tlak. Hertzův tlak je dopočítán přes vzorec (5-10), ve kterém je zapotřebí znát velikost zatížení kontaktu. Pro určení velikosti síly zatěžující kontakt je využito rozměrů Hertzovy kontaktní oblasti při daných provozních podmínkách a přes vztah (5-11) je dopočítána síla zatěžující kuličku. Pro sílu zatěžující soudeček je použit vztah (5-12 nebo 5-13). Jejich použití je podrobněji vysvětleno níže. Po zpětném dosazení do rovnice (5-9) je dopočítán vliv stlačitelnosti pro jednotlivé specifické provozní podmínky kontaktů použitých při experimentálním měření závislosti h_c na h_{oil} . Tabulka 5-5 shrnující informace vlivu stlačitelnosti pro specifické provozní podmínky jednotlivých kontaktů je uvedena níže.

$$Pp_h = \frac{(3 \cdot w)}{(2 \cdot \pi \cdot a \cdot b)} \quad (5-10)$$

kde:

a mm - velká poloosa Hertzova kontaktu (kolmá na směr valení)
 b mm - malá poloosa Hertzova kontaktu (ve směru valení)
 Pp_h Pa - maximální Hertzův tlak
 w N - externí zatížení kontaktu

$$w_k = \frac{a_k^3 \cdot 8 \cdot \frac{1}{d_k}}{3 \cdot \left[\frac{(1 - \mu_k^2)}{E_k} + \frac{(1 - \mu_d^2)}{E_d} \right]} \quad (5-11)$$

$$w_s = \frac{a_s^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (\rho_{xs} + \rho_{xd} + \rho_{ys} + \rho_{yd}) \cdot k_s^2}{3 \cdot E^x \cdot \left[\frac{4 \cdot (1 - \mu_s^2)}{E_s} + \frac{4 \cdot (1 - \mu_d^2)}{E_d} \right]} \quad (5-12)$$

$$w_s = \frac{b_s^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (\rho_{xs} + \rho_{xd} + \rho_{ys} + \rho_{yd})}{3 \cdot E^x \cdot \left[\frac{4 \cdot (1 - \mu_s^2)}{E_s} + \frac{4 \cdot (1 - \mu_d^2)}{E_d} \right] \cdot k_s^2} \quad (5-13)$$

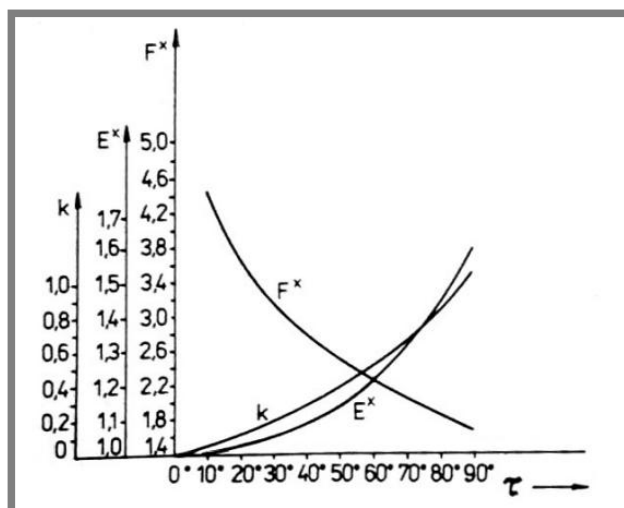
kde:

a_k	mm	- poloosa Hertzova kontaktu kuličky
a_s	mm	- velká poloosa Hertzova kontaktu soudečku (kolmá na směr valení)
b_s	mm	- malá poloosa Hertzova kontaktu soudečku (ve směru valení)
d_k	mm	- průměr kuličky
E_d	Pa	- modul pružnosti disku
E_k	Pa	- modul pružnosti kuličky
E_s	Pa	- modul pružnosti soudečku
E^x		- eliptický integrál soudečku
k_s		- elipticita soudečku ($k_s = b_s/a_s$)
w_k	N	- externí zatížení kontaktu kuličky
w_s	N	- externí zatížení kontaktu soudečku
μ_d		- poissonovo číslo pro disk
μ_k		- poissonovo číslo pro kuličku
μ_s		- poissonovo číslo pro soudeček
ρ_{xd}	mm ⁻¹	- křivost disku v ose x
ρ_{xs}	mm ⁻¹	- křivost soudečku v ose x
ρ_{yd}	mm ⁻¹	- křivost disku v ose y
ρ_{ys}	mm ⁻¹	- křivost soudečku v ose y

Výpočet velikosti zatížení kontaktu soudečku je uveden ve dvou rovnicích (5-12 a 5-13), jejichž výsledky se musí shodovat. Hlavní odlišností mezi těmito rovnicemi je použití velké nebo malé poloosy Hertzovy kontaktní oblasti soudečku pro výpočet zatížení. Hodnota eliptického integrálu soudečku je odečtena z grafu na obr. 5-19, který byl převzat z [54].

Tab. 5-5 Vliv stlačitelnosti maziva pro jednotlivé provozní podmínky

	Zatížení (N)	Velká poloosa kontaktní (mm)	Malá poloosa kontaktní (mm)	Maximální Hertzův tlak (MPa)	$\bar{p}(P)$
Kulička	27,555	0,162	0,162	502,4	1,156
Soudeček	43,65	0,482	0,130	332,3	1,122
Soudeček	71,736	0,584	0,152	386,9	1,135

Obr. 5-19 Závislost F^x , k , E^x na parametru τ [54]

5.2.4 Zjištěné závislosti h_c na h_{oil} všech typů vzorků maziv

V této podkapitole je v první části ukázáno ovlivnění experimentálně naměřených hodnot dílčími parametry obsaženými ve výpočtu tloušťky filmu maziva vstupující do kontaktu (h_{oil}). Druhá část se věnuje dosaženým výsledkům závislosti h_c na h_{oil} pro všechny typy vzorků.

Zavedením nezávislého pohonu prvního elementu došlo ke změně výpočtu vstupující tloušťky filmu maziva do kontaktu (h_{oil}). Tato tloušťka, ve stávající koncepci, již není pouze součtem polovin centrálních tloušťek soudečku a kuličky, ale výpočet je ovlivněn parametrem dělení maziva v závislosti na parametru SRR . Na obr. 4-5 je ukázán mechanismus utváření tloušťek filmů při experimentu závislosti h_c na h_{oil} . Pro tento mechanismus platí výpočtová koncepce zjišťující parametr h_{oil} , která je zobrazena na obr. 5-20. Vstupující tloušťka filmu maziva do kontaktu (h_{oil}) je tvořena součtem zbylé tloušťky maziva na disku (h_{oil-S}) směřující z prvního kontaktu (soudeček-disk) do druhého a tloušťky maziva ulpívající na povrchu kuličky po průchodu kontaktem (h_{oil-K}). Obě tyto tloušťky se nacházejí ve valivé dráze kontaktů a k jejich spojení dojde těsně před kontaktní oblastí, a tím vytvoří vstupní tloušťku h_{oil} . Zakroužkované parametry (obr. 5-20), potřebné pro výpočet h_{oil} , závisejí na hodnotách, na které poukazuje jejich šipka.

$$h_{oil} = h_{oil-S} + h_{oil-K}$$

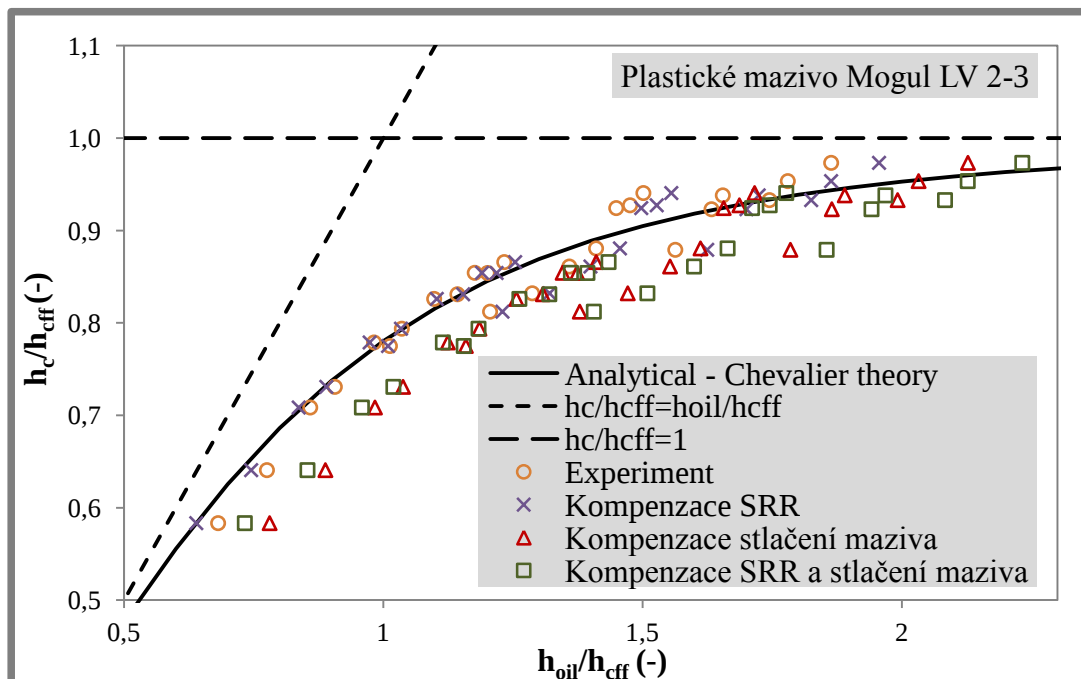
$$h_{oil-S} = h_{cs} \cdot \Delta$$

$$h_{oil-K} = \frac{h_{CK}}{2}$$

$$SRR = \frac{2 \cdot (u_D - u_s)}{u_D + u_s}$$

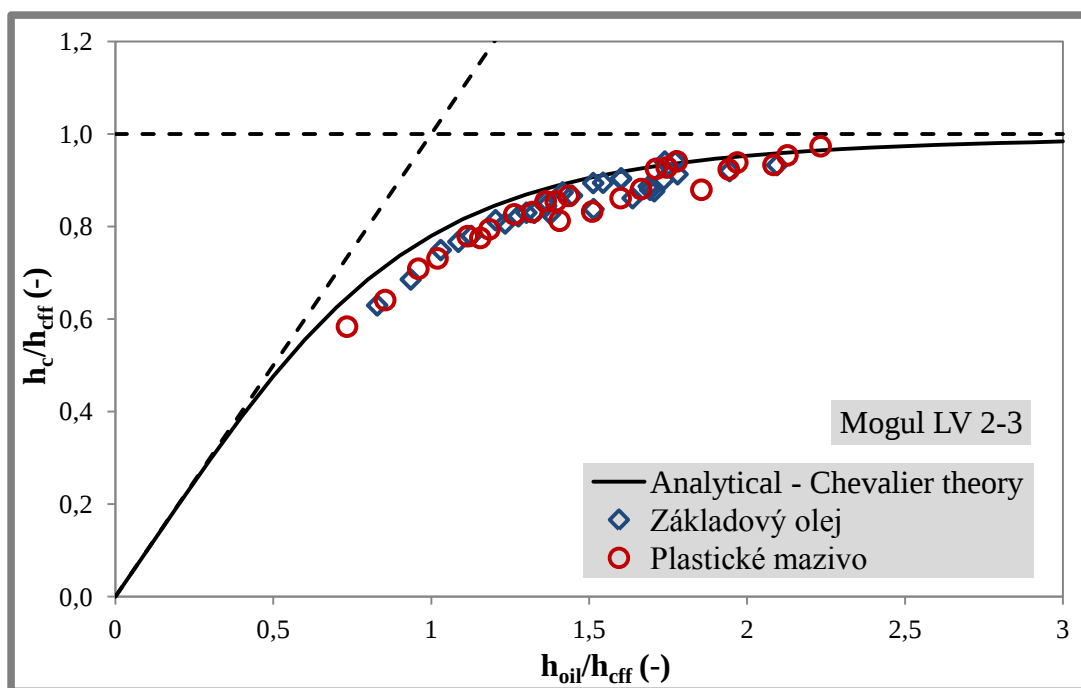
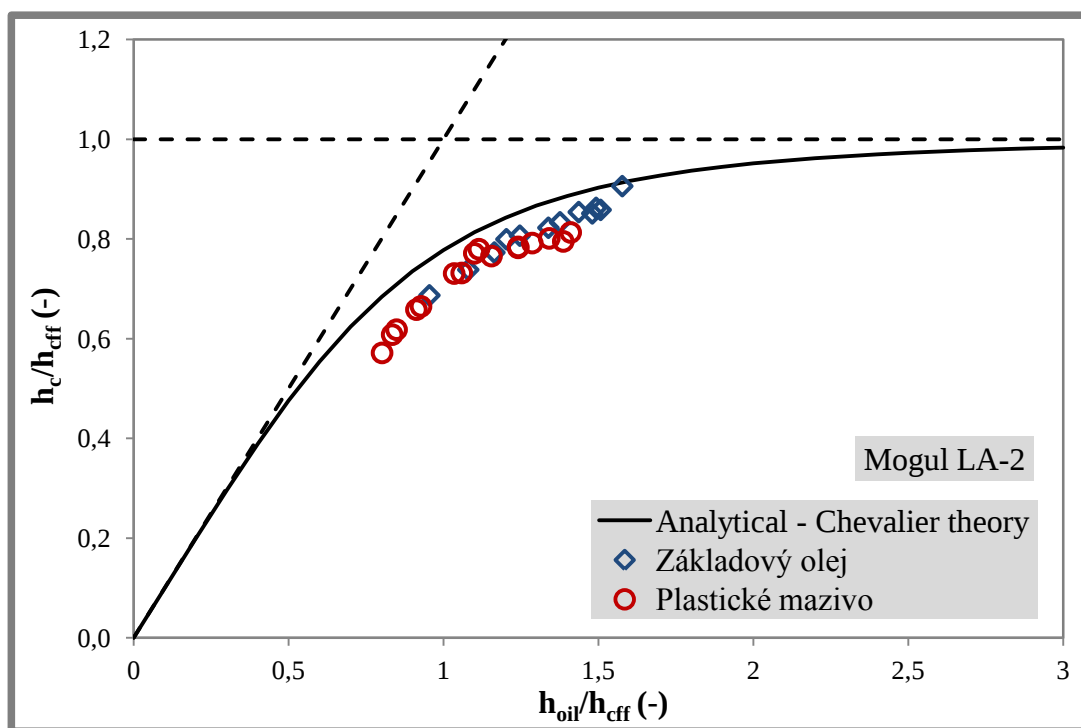
Obr. 5-20 Koncepce výpočtu h_{oil}

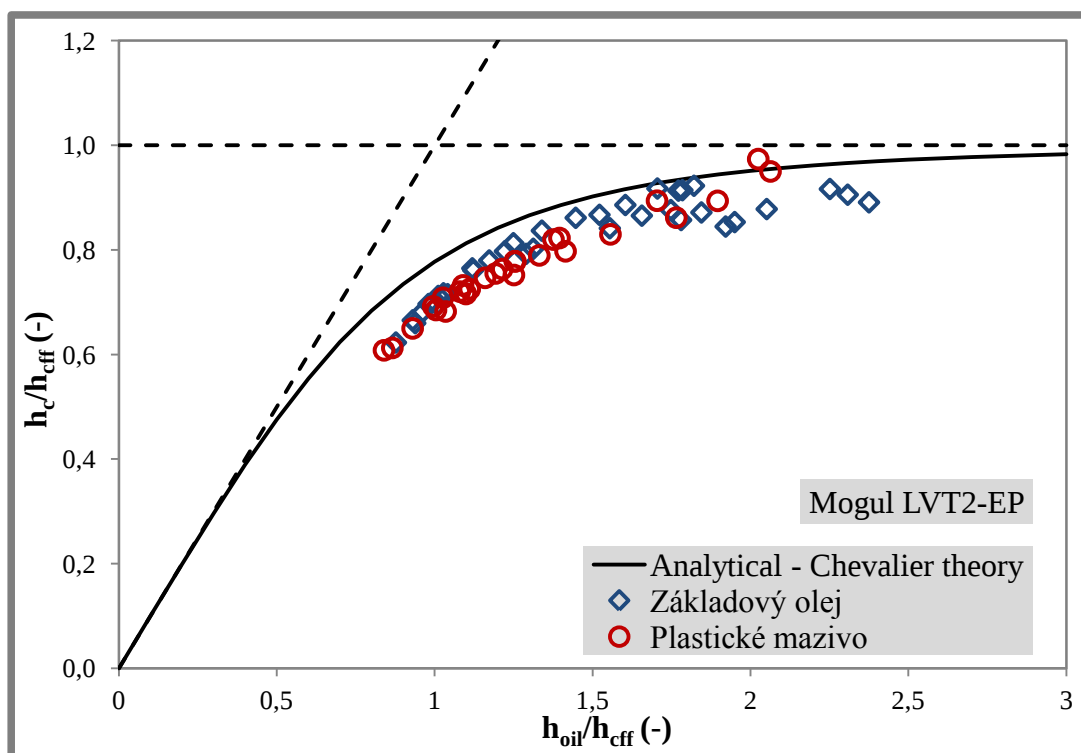
Vlivy prokluzu a stlačení maziva byly v předchozích kapitolách vysvětleny a v této části jsou pouze ukázány jednotlivé vlivy na experimentálně získaných datech. Pro lepší viditelnost rozdílů mezi daty je obr. 5-21 v přiblíženém pohledu a níže pod tímto obrázkem jsou jednotlivé vlivy vysvětleny.



Obr. 5-21 Vliv jednotlivých jevů na výsledky

Vliv prokluzu (SRR parametru) a stlačení maziva (kontaktního tlaku) ovlivní pouze parametr h_{oil} , proto jsou získaná data posunuta ve vodorovném směru. Kompenzací SRR pro nižší centrální tloušťky (tj. když se soudeček pohybuje pomaleji vůči rychlosti disku) jsou získaná data experimentálním měřením posunuta do nižších hodnot h_{oil} vůči datům, která jsou počítána pouze jednoduchým vzorcem (5-8). Postupným zvyšováním rychlosti soudečku nastává přiblížení k získaným datům, až do doby, kdy je rychlost soudečku větší, než rychlost disku. V tomto případě je parametr h_{oil} větší, než u původních dat bez kompenzace SRR, a tak se data přibližují k vyšším hodnotám. Zjišťovaná tloušťka filmu maziva v kontaktu, ze které je odvozena tloušťka h_{oil} je vždy nižší, než při atmosférickém tlaku, a proto bylo do výpočtu zahrnuto stlačení maziva. Korekcí vlivu stlačení maziva je docíleno zvýšení tloušťky filmu maziva vstupující do kontaktu (h_{oil}), jenž je vidět na obr. 5-21, kde jsou všechna data posunuta k vyšším hodnotám. Jako posledními vykreslenými daty na tomto obr. 5-21 jsou experimentální data kompenzována současně oběma vlivy a následující grafy jsou uváděny pouze s kompenzovanými daty.

Obr. 5-22 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LV 2-3Obr. 5-23 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LA-2



Obr. 5-24 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LVT2-EP

Na obr. 5-22 až 5-24 jsou uvedena získaná data s kompenzací stlačení a prokluzu vždy pro základový olej daného typu a plastického maziva z něho vyrobeného. Tyto obrázky grafů reprezentují hlavní cíl této diplomové práce, ve které došlo ke zjištění závislosti centrální tloušťky maziva na tloušťce filmu maziva vstupující do hladovějícího EHD kontaktu. Získaná data jsou porovnávána s teoretickým modelem, který byl přepočítán v předchozí kapitole 5.1 pro vzorky základových olejů použitých pro měření v této práci. Teoretická křivka popisující průběh zjišťované závislosti h_c na h_{oil} je téměř ve všech případech v celém jejím průběhu nad experimentálně získanými hodnotami. Postupným zvyšováním hodnoty h_{oil} se naměřená data přibližují k teoretické křivce. Nejvyšší odlišnost mezi teoretickou křivkou a experimentálními daty jsou v místě nejnižší hodnoty parametru h_{oil} .

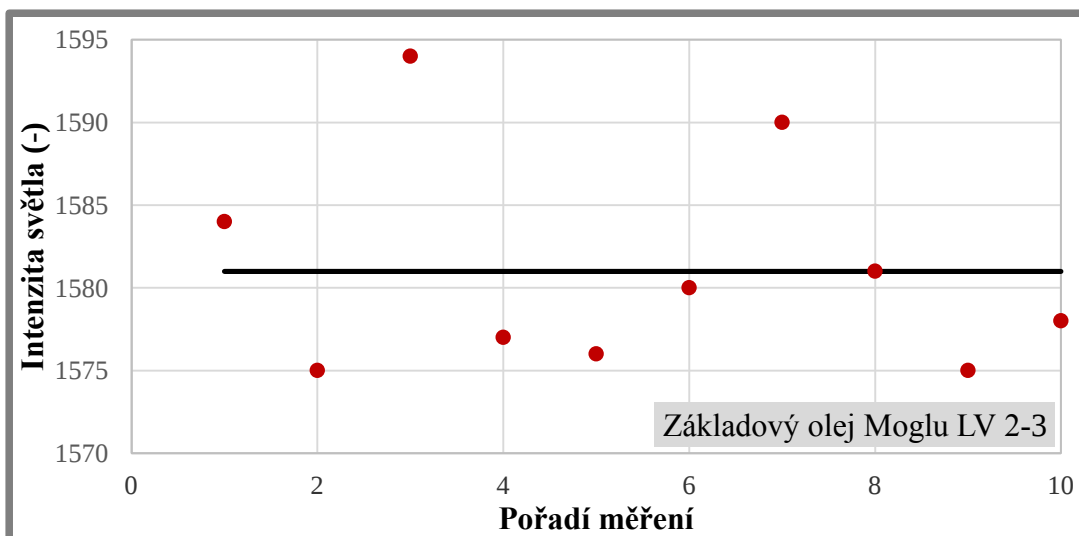
Na těchto výsledných obrázcích jsou osy grafů určeny malými písmeny h . Malá písmena h znamenají konkrétní hodnotu tloušťek filmu maziva, avšak teoretický model je většinou uváděn s velkým písmenem, které znázorňuje bezrozměrné hodnoty tloušťek. Převod na bezrozměrnou hodnotu nemusí být prováděn, protože na obou osách jsou tloušťky v poměru h_c/h_{cff} a h_{oil}/h_{cff} . Tudíž v případě převodu dojde ke zkrácení redukovaného parametru křivosti, kterým by musely být zjištěné tloušťky filmu vyděleny.

6 DISKUZE

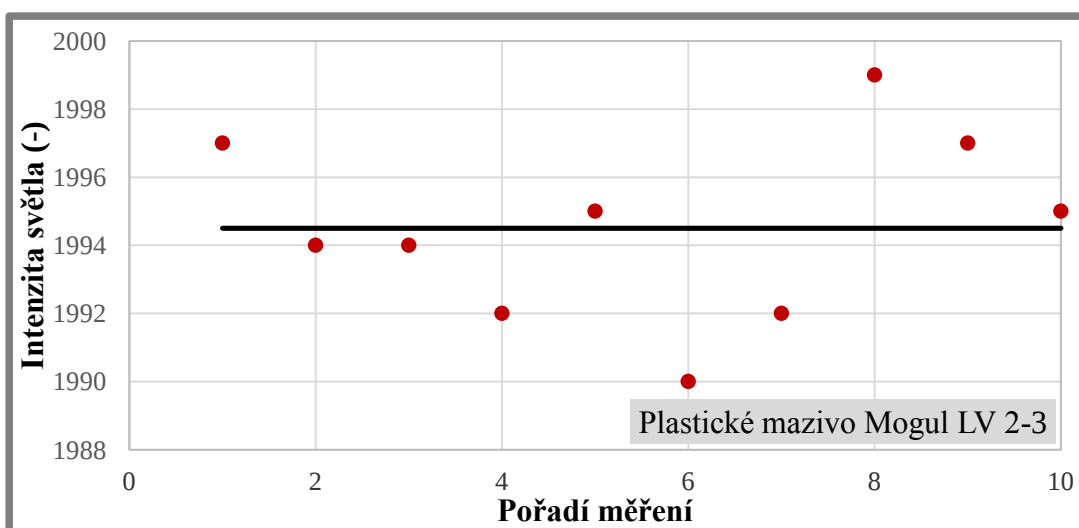
V této diplomové práci byla pro zjišťování závislosti centrální tloušťky filmu maziva na tloušťce filmu vstupující do hladovějícího EHD kontaktu a dílčích parametrů vstupujících do výpočtu zmíněné závislosti použita metoda optické interferometrie. Pouze parametr dělení maziva byl zjišťován na jiné aparatuře za použití metody fluorescence. Optická interferometrie je nejen na Ústavu konstruování v Brně velmi používanou metodou pro měření tloušťky filmu maziva v kontaktu, ale je celosvětově rozšířenou metodou. Jak je uvedeno v práci [55], metoda optické interferometrie je dostatečně přesná pro měření tloušťky filmu maziva s rozlišením, které odpovídá velikosti 1 nm. V této práci tedy není zapotřebí ověřovat správnou funkci této samotné měřicí metody. Avšak druhá použitá měřicí metoda fluorescence není v současnosti ještě dobře verifikovanou metodou jako optická interferometrie. Proto byla ověřována korektnost způsobu měření pomocí fluorescence tak, aby bylo možné prokázat validaci výsledků. Níže v této kapitole budou tyto experimenty, zajišťující správnost měření, uvedeny a okomentovány. Tato práce je rozdělena na dvě části. První se věnuje přepočítání teoretického modelu pro použité základové oleje a druhá část experimentálně zjišťuje závislost h_c na h_{oil} pro všechny typy vzorků maziv.

Prvním zjišťovaným parametrem na měřicí aparatuře obr. 4-4, která používá k zjišťování tloušťky filmu maziva optickou interferometrii, byla závislost centrální tloušťky filmu maziva na rychlosti pro plně zaplavený kontakt. Obecně lze říci, že měřením na této aparatuře obr. 4-4 je možné ovlivnit výslednou tloušťku jednak vlivem konstrukčních částí zařízení, kalibrací nebo chybami samotné měřicí metody. Ovlivněním výsledků kalibrací a konstrukcí této samotné měřicí aparatury se zabýval Košťál v práci [44]. Mezi hlavní konstrukční činitele ovlivňující výsledky patří házení valivých elementů, což je způsobeno jejich nepřesným uložením. Dalšími činiteli jsou nestálý chod servomotoru a povrchové nerovnosti, jako jsou rýhy na valivých elementech. Snahou je, všechny tyto nepřesnosti co možná nejvíce eliminovat a výsledky tak co nejméně ovlivnit. Pro zjišťované závislosti, jako např. na obr. 5-8, ze kterých je zapotřebí získat rovnici popisující průběh dané závislosti, platí, že je zjištěno nejméně pět hodnot, které jsou proloženy vhodnou křivkou. Její rovnice je dále použita pro potřebný výpočet. Čím větší počet bodů je proložen křivkou, tím je křivka popisující trend závislosti přesnější.

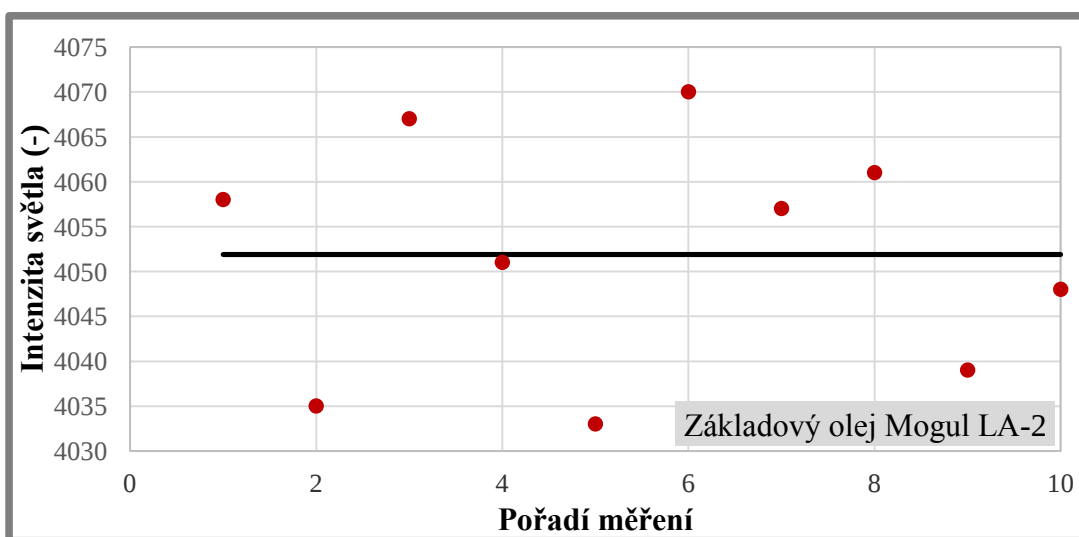
Zjišťovaný parametr dělení maziva pro jednotlivé typy vzorků je pomocí metody fluorescence také ovlivněn stejnými činiteli jako u metody interferometrie zjišťující tloušťku filmu maziva v kontaktu. Tyto měřicí metody využívají odlišných aparatur, ale stále největší vliv na výsledky má samotná konstrukce zařízení. Navíc je metoda fluorescence velice náchylná na intenzitu odrazivosti povrchů, proto při měření byly použity stejné typy materiálů pro disk a soudeček, na jejichž površích byla zjišťována intenzita světla. Opakovatelnost měření parametru dělení jednotlivých maziv je zobrazeno na následujících obr. 6-1 až 6-6.



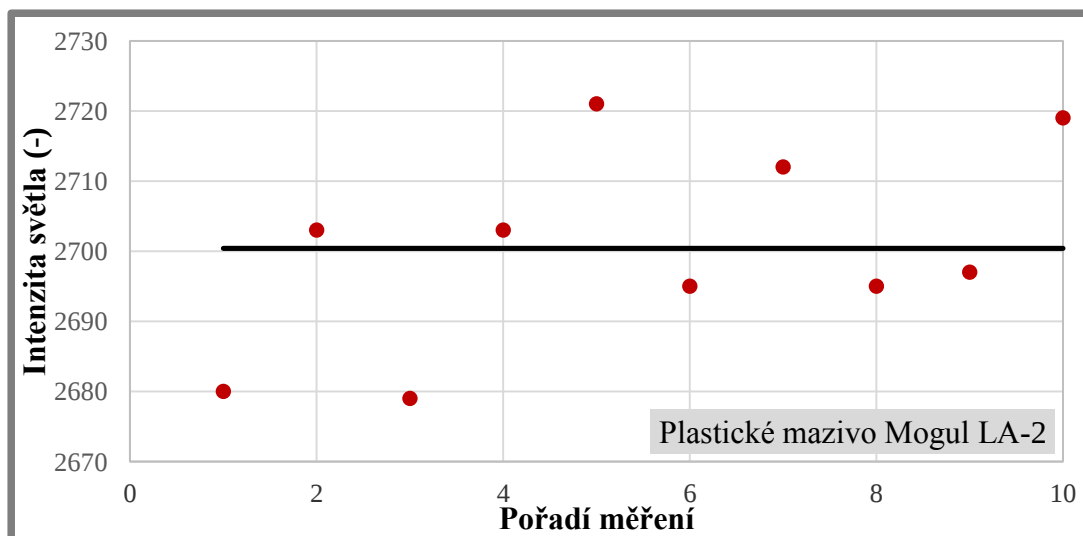
Obr. 6-1 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro základový olej Mogul LV 2-3



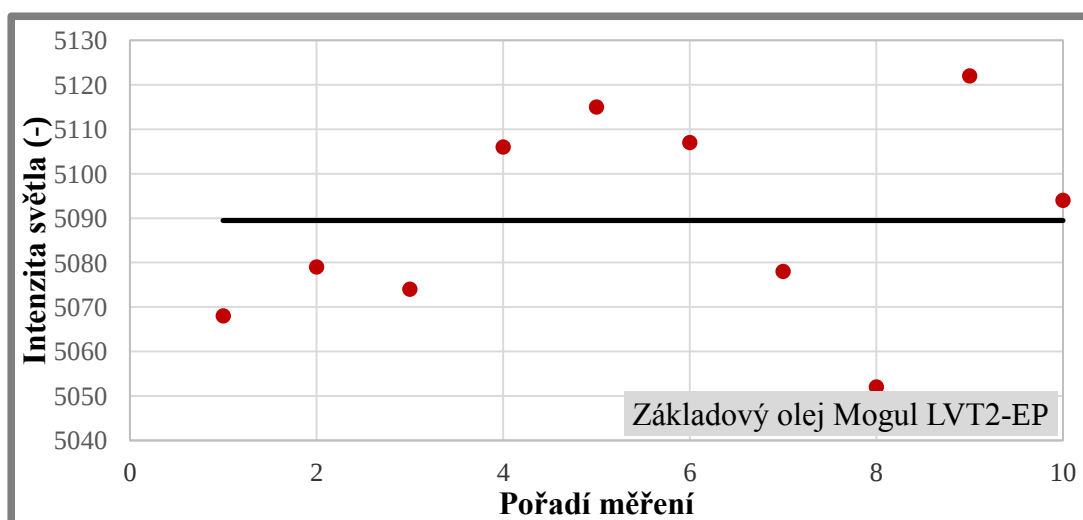
Obr. 6-2 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LV 2-3



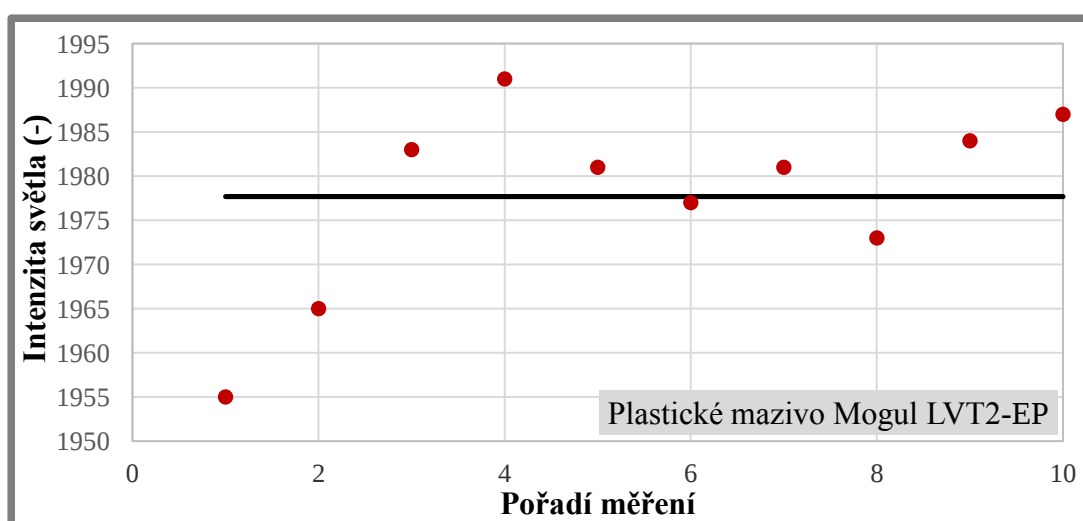
Obr. 6-3 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro základový olej Mogul LA-2



Obr. 6-4 Opakovatelnost měřicí metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LA-2



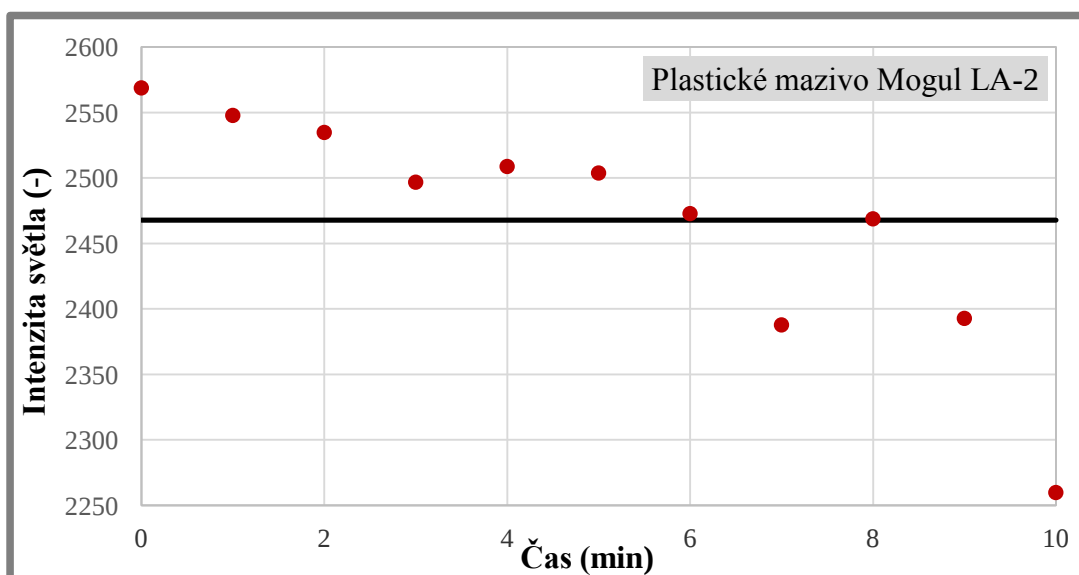
Obr. 6-5 Opakovatelnost měřicí metody fluorescence pro základový olej Mogul LVT2-EP



Obr. 6-6 Opakovatelnost měřicí metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LVT2-EP

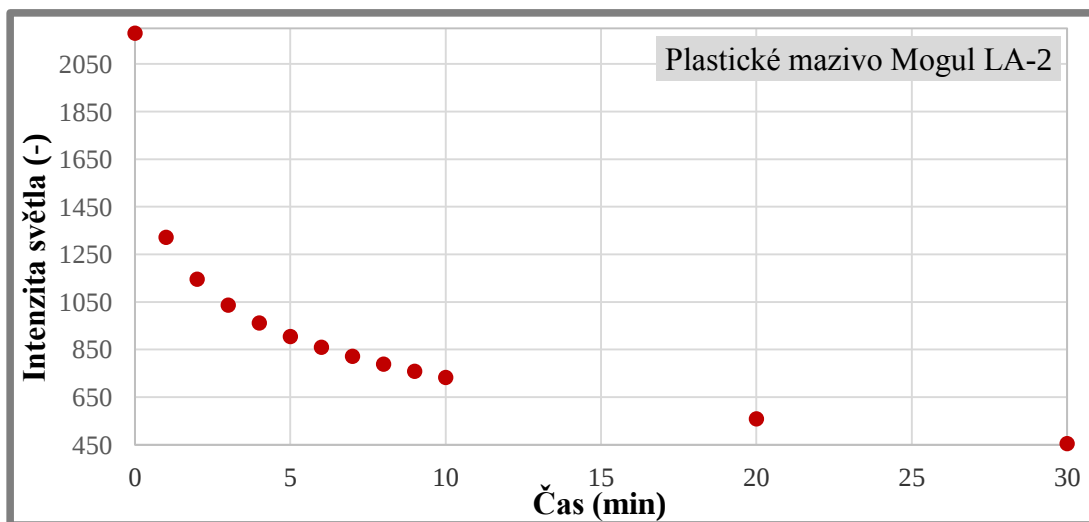
Plná černá čára na uvedených obrázcích představuje střední hodnotu experimentálně získaných dat. Experiment byl proveden za stejných provozních podmínek, pro které byl zjišťován parametr dělení maziva. Intenzita světla maziva byla měřena na disku ve dráze vytvořenou předchozí kontaktní dvojicí (soudeček -disk) jako tomu je u daného experimentu dělení filmu maziva. Jednotlivé hodnoty jsou získané ze snímků po sobě náhodně pořízených. Způsob vyhodnocení je také přes vyhodnocovací oblast (obr. 5-11) pro zachování co největší přesnosti. Základový olej Mogul LVT2-EP má největší obdrženou směrodatnou odchylku o velikosti 21,6 jasových hladin ze všech typů vzorků. Vzhledem k naměřeným hodnotám je odchylka 0,5 %. U základových olejů platí, že s rostoucí viskozitou roste i směrodatná odchylka. Stejně tvrzení u plastických maziv neplatí. Maximální odchylka ze všech vzorků maziv byla tedy pouze o velikosti 0,5 %, což je zanedbatelná hodnota.

Další test provedený pro aparaturu zjišťující poměr dělení maziva ověřuje stálost intenzity světla plastického maziva ve vzniklé dráze na disku za kontaktem pro konstantní provozní podmínky. Plastické mazivo Mogul LA-2 pro tento typ testu bylo zvoleno z důvodu největší směrodatné odchylky z plastických maziv a také proto, že se plastické mazivo vytlačené mimo kontaktní dráhu hůř vracelo zpět do dráhy kontaktu pomocí stírače. Zjišťovaná hodnota intenzity světla maziva byla zaznamenávána po minutových intervalech (obr. 6-7). Je vidět z obr. 6-7, že dochází k postupnému snižování intenzity světla maziva. Směrodatná odchylka pro desetiminutový test odpovídá hodnotě 3,5 %, ale veškeré pořízené testy na této aparatuře trvaly maximálně 4 minuty. Navíc vždy před nadcházejícím pokračováním dalšího úseku měření bylo mazivo znovu ručně nanášeno do dráhy kontaktů tak, aby se kompenzovala ztráta vytlačeného maziva, které se pomocí stírače nevracelo zpět do dráhy kontaktů. Směrodatná odchylka naměřených hodnot (obr. 6-7) pro čtyři minuty odpovídá jen 1 %, proto se tento způsob ovlivnění výsledných hodnot považuje za zanedbatelný.



Obr. 6-7 Ověření stálosti distribuce tloušťky filmu maziva na aparatuře zjišťující dělení filmu maziva

Závěrečný test byl zaměřen na kvantifikaci vysvěcování maziva na povrchu disku v závislosti na čase. V průběhu třiceti minut byl v určitých časových intervalech pořízen snímek pozorované oblasti a za předpokladu neměnného konstantního objemu maziva tak bylo možné definovat pokles intenzity fluorescence při kontinuální excitaci. Při předpokládané konstantní tloušťce maziva dochází v důsledku působení excitačního zdroje k postupnému poklesu emitované intenzity. Výsledky této závislosti jsou zobrazeny na obr. 6-8. Při samotném měření by nikdy nemělo dojít k velkému ovlivnění výsledků vysvěcováním maziva, protože nasvícený úsek maziva ve dráze kontaktů, z něhož je snímána intenzita světla, je nepatrně velký oproti celkové délce dráhy, po které se odvaluje soudeček a na níž je mazivo během testu neustále unášeno přes pozorovanou oblast. Navíc je mazivo po průchodu skrz stírač mícháno s neexcitovaným mazivem. Objem maziva procházející skrz pozorovanou oblast je zanedbatelný vůči celkovému objemu maziva použitého při testu, a tak je tento vliv vysvěcování maziva při krátkodobém testu zanedbatelný. Toto tvrzení potvrzuje obr. 6-7, který zahrnuje jednak vliv vysvěcování maziva a vliv neustálého zásobování kontaktu (soudeček - disk) mazivem, jenž ovlivní v prvních čtyřech minutách testu získané výsledky o 1 %.



Obr. 6-8 Závislost intenzity světla na čase pro staticky snímanou oblast

Lze říci, že všechna měření provedená pomocí fluorescenční metody jsou validní z hlediska opakovatelnosti měření intenzity světla, protože jejich celkové ovlivnění získaných výsledků může být při součtu nepřesností přibližně 1,5 %, což lze považovat za zanedbatelnou hodnotu.

Dosažené výsledky závislosti centrální tloušťky na vstupující tloušťce filmu maziva pomocí optické interferometrie jsou ukázány na obr. 5-22 až 5-24. Získané výsledky jsou velmi překvapující, protože základový olej a plastické mazivo se vůči sobě vyznačují pouze nepatrnými odlišnostmi, které se objevují pouze u více viskóznějších maziv ve vyšších hodnotách parametru h_{oil} . Lze si povšimnout, že výsledné hodnoty pro základový olej a plastické mazivo Mogulu LV 2-3 se navzájem nejvíce shodují. Jev, který způsobuje tuto nepatrnou odlišnost ve vyšších hodnotách parametru h_{oil} by mohl být takový, že více viskózní mazivo není tak dobře vraceno stíračem zpět do kontaktní dráhy, jako tomu je u základového oleje a u méně viskóznějšího plastického maziva.

7 ZÁVĚR

Myšlenka, rozšířit vědní disciplínu tribologie o další užitečné informace elastohydrodynamického hladovějícího kontaktu, vedla k určení problematiky a jejímu následnému vyřešení v podobě této diplomové práce. Cílem práce bylo zjistit chování hladovějícího elastohydrodynamického kontaktu při přesně definované tloušťce maziva na vstupu kontaktu pro základový olej a pro plastické mazivo z něho vyrobené. Dosažené výsledky jednoho ze tří typů základových olejů a plastického maziva z něj vyrobeného jsou porovnány jednak mezi sebou, ale také s teoretickým modelem. Postup řešení je rozdělen do dvou hlavních kapitol, kde se jedna věnuje přepočtu teoretického modelu pro daný základový olej a druhá představuje postup, jak bylo dosaženo hlavního cíle, tj. závislosti h_c na h_{oil} .

Jedním z prvních provedených kroků vedoucím k dosažení hlavního cíle této práce bylo sehnání vzorků maziv pro experimentální měření. Byly opatřeny tři typy minerálních základových olejů o různých viskozitách a z nich vyrobená plastická maziva zpevněná lithným mýdlem. Zmínění tohoto zdánlivě jednoduchého úkolu je z důvodu, že základové oleje použité pro výrobu plastického maziva nejsou komerčně dostupné, proto bylo značně obtížné jejich získání.

Provedené prvotní experimentální měření závislosti h_c na h_{oil} poskytlo informaci, že je zapotřebí upravit měřicí aparaturu, a tím dosáhnout rozšíření oblasti získaných hodnot. Modifikace aparatury spočívala v možnosti nezávisle pohánět první valivý element (soudeček), a tím zvyšovat popřípadě snižovat valivou rychlost vůči rychlosti disku.

Samotné zjištění hodnoty závislosti h_c na h_{oil} pro hladovějící EHD kontakt nelze prezentovat jako výsledné, protože v nich nejsou automaticky zahrnuty vlivy stlačení maziva a prokluzu prvního valivého elementu. Pro zpřesnění výsledků je tedy nutné zahrnutí těchto vlivů. Kompenzace stlačitelnosti maziva byla určena vztahem podle Dowson-Higginsona a Hertzovou teorií. V případě prokluzu bylo zapotřebí zjistit závislost centrální tloušťky filmu maziva na rychlosti a poměr dělení maziva na výstupu z kontaktu. Pro zpřesnění experimentálně zjištěných hodnot byla data vždy jednoho typu základového oleje a plastického maziva z něj vyrobeného vůči sobě porovnána a zhodnocena. Výsledné hodnoty jsou také porovnány s teoretickým modelem, který představili autoři Chevalier, Lubrecht a kol. [22]. Tento původní teoretický model je vždy přepočítán pro daný typ základového oleje.

Získané výsledky jsou velmi překvapující, protože hodnoty pro základový olej a plastické mazivo se od sebe pouze nepatrně odlišují, a tím lze považovat zjištěné hodnoty základového oleje a plastického maziva jako shodné. Na základový olej i plastické mazivo působí kontaktní tlak (obr. 2-5) v oblasti těsně před hladovějícím EHD kontaktem. Tím je vytvořeno smykové napětí v mazivu, které způsobuje stejný pohyb plastického maziva okolo hladovějícího kontaktu, jako v případě pohybu samotného základového oleje. Zahušťovadlo tvořící složku plastického maziva je jedinou odlišností od základových olejů použitých v této práci. Je tedy zřejmé, že nezpůsobuje žádné rozdíly v toku maziva, a tím nevzniká odlišnost mezi experimentálně naměřenými hodnotami plastických maziv a základových olejů.

Z výsledků této práce vyplynulo, že plastické mazivo se v těsné blízkosti kontaktu chová stejně jako samostatný základový olej a boční tok maziva způsobuje hladovění ve stejné míře. Důležitý poznatek je, že k popisu vícenásobného kontaktu (např. valivé ložisko), u kterého dochází k hladovění, kdy jeden kontakt definuje

tloušťku maziva, která je k dispozici pro kontakt následující, lze přistupovat stejně, ať už se jedná o mazání olejem či plastickým mazivem.

V případě dalších studií by bylo vhodné zaměřit se na porovnání stejné závislosti jako v této diplomové práci, ale s tím rozdílem, že by mazivo bylo temperováno na vyšší teploty, nebo by bylo použito mazivo s nižší, popřípadě vyšší viskozitou. Bylo by také velice zajímavé porovnat mezi sebou závislost h_c na h_{oil} základového oleje a plastického maziva s jiným typem zahušťovadla, než bylo použito v této práci.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LUGT, P. M., MORALES-ESPEJEL, G. E. A review of elastohydrodynamiclubrication theory. *Tribology Transactions*, 2011, roč. 54, č. 3, s. 470-496. DOI 10.1080/10402004.2010.551804.
- [2] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Tření, mazání, opotřebení* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2015-02-04]. Dostupné z <<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>>
- [3] REYNOLDS, O. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including Experimetal Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 1886, roč. 177, s. 157-234.
- [4] TOWER, B. First Report on Friction Experiments (Friction on Lubricated Bearings). *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, 1883, s. 632-659.
- [5] TOWER, B. Second Report on Friction Experiments (Experiments on the Oil Pressure in a Bearing). *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*, 1885, s. 58-70.
- [6] MARTIN, H. M. Lubrication of Gear Teeth. *Engineering*, 1916, roč. 102, s. 119-121.
- [7] GÜMBEL, L. Über Geschmierte Arbeitsräder. *Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen*, 1916, roč. 24, s. 245-248.
- [8] MELDAHL, A. Contribution to Theory of Lubrication of Gears and of Stressing of Lubricated Flanks of Gear Teeth. *Brown Boveri Review*, 1941, roč. 28, č. 11, s. 374-382.
- [9] ERTEL-MOHRENSTEIN, A. Die Berechnung der Hydrodynamischen Schmierung Gekrümmter Oberflächen unter Hoher Belastung und Relativbewegung. *Fortschrittsberichte VDI*, 1949, roč. 115, č. 1
- [10] STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A. *Engineering tribology*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 801 s. xxiv. ISBN 07-506-7836-4.
- [11] POLIŠČUK, R. *Aplikace barevného vidění při studiu elastohydrodynamického mazání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav fyzikálního inženýrství, 2004. 63 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

- [12] ŠTĚPINA, V., VESELÝ, V. *Maziva a speciální oleje: (základy tribotechniky)*. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1980. 688 s.
- [13] *Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu* [online]. 2012, [cit. 2015-04-11]. Dostupné z <<http://www.cappo.cz/ropne-vyrobkky/maziva/>>
- [14] HAMROCK, B. J., DOWSON, D. Isothermal EHL point contacts, Part III – Fully flooded results. *Journal of Tribology*, 1977, roč. 99, s. 264-276.
- [15] ZOELLEN, M. T. *Thin layer flow in rolling element bearings*. University of Twente, 2009. 150 s. Ph. D. thesis.
- [16] DAMIENS, B., et al. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. *Journal of Tribology*, 2004, roč. 126, č. 1, s. 105-111. DOI 10.1115/1.1631020.
- [17] POPOVICI, G. *Effects of lubricant starvation on performance of elasto-hydrodynamically lubricated contacts*. University of Twente, 2005. 134 s. Ph. D. thesis.
- [18] HAMROCK, B. J., DOWSON D. Isothermal EHL point contacts, Part IV – Starvation results. *Journal of Tribology*, 1977, roč. 99, č. 1, s. 15-23. DOI 10.1115/1.3452973.
- [19] HAMROCK, B. J., DOWSON, D. Numerical evaluation of the surface deformation of elastic solids subjected to a hertzian contact stress. *A S L E Transactions*, 1976, roč. 19, č. 4, s. 279-286. DOI 10.1080/05698197608982804.
- [20] HAMROCK, B. J., DOWSON, D. Isothermal EHL point contacts, Part I – Theoretical formulation. *Journal of lubrication technology*, 1976, roč. 98, č. 2, s. 223-228. DOI 10.1115/1.3452801.
- [21] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal EHL point contacts, Part III – Fully flooded results. *Journal of Lubrication Technology*, 1977, roč. 99, č. 2, s. 264-275. DOI 10.1115/1.3453074.
- [22] CHEVALIER, F., et al. Film Thickness in Starved EHL Point Contacts. *Journal of Tribology*, 1998, roč. 120, č. 1, s. 126-133. DOI 10.1115/1.2834175.
- [23] LUBRECHT, T., MAZUYER, D., CANN, P. Starved elastohydrodynamic lubrication theory: application to emulsions and greases. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IV-Physics*, 2001, roč. 2, č. 5, s. 717-728.
- [24] GUANGTENG, G., CANN, P. M., SPIKES, H. A. A study of parched lubrication. *Wear*, 1992, roč. 153, č. 1, s. 91-105. DOI 10.1016/0043-1648(92)90263-8.

- [25] CANN, P. M. E., DAMIENS, B., LUBRECHT, A. A. Transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology International*, 2004, roč. 37, č. 10, s. 859-864. DOI 10.1016/j.triboint.2004.05.005.
- [26] CANN, P. M. Starved grease lubrication of rolling contacts. *Tribology Transactions*, 1999, roč. 42, č. 4, s. 867-873. DOI 10.1080/10402009908982294
- [27] KOŠŤÁL, D., et al. Lubricant Rupture Ratio at Elastohydrodynamically Lubricated Contact Outlet. *Tribology Letters*, 2015, roč. 59, č. 3, s. 1-9. DOI 10.1007/s11249-015-0565-7.
- [28] SVOBODA, P., et al. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. *Tribology International*, 2013, roč. 67, s. 140–145. DOI 10.1016/j.triboint.2013.07.019
- [29] LEE-PRUDHOE, I., et al. Experimental and theoretical approaches to thin film lubrication problems. *IUTAM Symposium on Elastohydrodynamics and Micro-elastohydrodynamics*, 2006, roč. 134, s. 241–255. DOI 10.1007/01-4020-4533-6_17
- [30] CHEVALIER, F., et al. Starvation Phenomena in EHL Point Contacts: Influence of Inlet Flow Distribution. *Tribology Series*, 1996, roč. 31, s. 213-223. DOI 10.1016/S0167-8922(08)70785-5
- [31] VAN ZOELLEN, M. T., VENNER, C. H., LUGT, P. M. Free surface thin layer flow on bearing raceways. *Journal of Tribology*, 2008, roč. 130, č. 2, s. 1–10. DOI 10.1115/1.2805433
- [32] BRUYERE, V., et al. A two-phase flow approach for the outlet of lubricated line contacts. *Journal of Tribology*, 2012, roč. 134, č. 4, s. 1-10. DOI 10.1115/1.4006277
- [33] ÅSTRÖM, H., ÖSTENSEN, J. O., HÖGLUND, E. Lubricating Grease Replenishment in an Elastohydrodynamic Point Contact. *Journal of Tribology*, 1993, roč. 115, č. 3, s. 501-506. DOI 10.1115/1.2921666
- [34] CHIU, Y. P. An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems. *ASLE Transactions*, 1974, roč. 17, č. 1, s. 25-35. DOI 10.1080/05698197408981435
- [35] PEMBERTON, J., CAMERON, A. A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts. *Wear*, 1976, roč. 37, č. 1, s. 185-190. DOI 10.1016/0043-1648(76)90190-3

- [36] KOŠTÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2013. 47 s. Vedoucí pojednání ke státní doktorské zkoušce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [37] GUANGTENG, G.; SPIKES, H. A. The role of surface tension and disjoining pressure in starved and parched lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1996, roč. 210, č. 2, s. 113-124. DOI 10.1243/PIME_PROC_1996_210_487_02
- [38] JACOD, B., et al. An analysis of track replenishment mechanisms in the starved regime. *Tribology Series*, 1999, roč. 36, s. 483-492. DOI 10.1016/S0167-8922(99)80069-8
- [39] ÅSTRÖM, H., ISAKSSON, O., HÖGLUND, E. Video recordings of an EHD point contact lubricated with grease. *Tribology International*, 1991, roč. 24, č. 3, s. 179-184. DOI 10.1016/0301-679X(91)90024-4
- [40] CANN, P. M. Starvation and reflow in grease-lubricated elastohydrodynamic contact. *Tribology Transactions*, 1996, roč. 39, č. 3, s. 698-704. DOI 10.1080/10402009608983585
- [41] RADA PRO VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE. Definice druhů výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací. [online]. Praha: Rada pro výzkum, vývoj a inovace, © 2015 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z <<http://www.vyzkum.cz/FrontClanek.aspx?idsekce=29415>>.
- [42] HARTL, Martin. *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2002. 104 s. Habilitační práce.
- [43] CANN, P. M., SPIKES, H. A. Film thickness measurements of lubricating greases under normally starved conditions. *NLGI spokesman*, 1992, roč. 56, č. 2, s. 21-27.
- [44] KOŠTÁL, D. *Experimentální studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2015. 137 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [45] SMART, A. E., FORD, R. A. J. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*, 1974, roč. 29, č. 1, s. 41-47. DOI 10.1016/0043-1648(74)90132-X
- [46] SUGIMURA, J., HASHIMOTO, M., YAMAMOTO, Y. Study of elastohydrodynamic contacts with fluorescence microscope. *Tribology Series*, 2000, roč. 38, s. 609-617. DOI 10.1016/S0167-8922(00)80165-0

- [47] NEČAS, D. *Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2014. 73 s. Vedoucí pojednání ke státní doktorské zkoušce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [48] NEČAS, D., et al. Lubrication within hip replacements – Implication for ceramic-on-hard bearing couples. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, roč. 61, s. 371-383. DOI 10.1016/j.jmbbm.2016.04.003
- [49] HAUGLAND, R. P., SPENCE, M. T., JOHNSON, I. D. *Handbook of fluorescent probes and research chemicals*. 6th ed. Eugene, OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402): Molecular Probes, c1996, xii, 680 s. ISBN 09-652-2400-7.
- [50] NOVOTNÝ, A. *Konstrukce adaptivního stírače kapaliny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Košťál.
- [51] Technické informace - MOGUL LV 2-3. *MOGUL* [online]. 2014 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z <https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_mogul_lv2_3_z2.pdf>.
- [52] Technické informace - MOGUL LA 2. *MOGUL* [online]. 2014 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z <https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_mogul_la2_z1.pdf>.
- [53] Technická informace - MOGUL LVT 2 EP. *MOGUL* [online]. 2014 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z <https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_MOGUL_LVT2EP_z2.pdf>.
- [54] BOHÁČEK, F., a kol. *Části a mechanismy strojů I*. Skriptum FS VUT, Brno, 1984.
- [55] HARTL, M., et al. Thin film colorimetric interferometry. *Tribology Transactions*, 2001, roč. 44, č. 2, s. 270-276. DOI 10.1080/10402000108982458

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam použitých zkratk

EHD	- elastohydrodynamický
EHL	- elastohydrodynamicky mazáný
SRR	- poměr skluzu-valení

Seznam použitých symbolů

a	mm	- velká poloosa Hertzova kontaktu (kolmá na směr valení)
a'	mm	- šířka valivé dráhy
a_k	mm	- poloosa Hertzova kontaktu kuličky
a_s	mm	- velká poloosa Hertzova kontaktu soudečku (kolmá na směr valení)
b	mm	- malá poloosa Hertzova kontaktu (ve směru valení)
b_s	mm	- malá poloosa Hertzova kontaktu soudečku (ve směru valení)
d_k	mm	- průměr kuličky
E'	Pa	- redukovaný modul pružnosti
E_d	Pa	- Modul pružnosti disku
E_k	Pa	- Modul pružnosti kuličky
E_s	Pa	- Modul pružnosti soudečku
E^x		- eliptický integrál soudečku
F^x		- eliptický integrál soudečku
G		- materiálový parametr
h_c	mm	- centrální tloušťka filmu maziva
h_{CK}	mm	- centrální tloušťka filmu maziva kuličky
h_{CS}	mm	- centrální tloušťka filmu maziva soudečku
h_{oil-K}	mm	- tloušťka filmu maziva ulpívající na povrchu kuličky po průchodu kontaktem
h_{oil-S}	mm	- tloušťka filmu maziva na disku vstupující do druhého kontaktu
$h_{oli\infty}$	mm	- množství maziva v blízkosti kontaktu
h_Q	mm	- tloušťka filmu maziva na disku před prvním kontaktem
H		- bezrozměrná tloušťka mazacího filmu
H^*		- bezrozměrná tloušťka filmu maziva
H_c		- centrální tloušťka filmu maziva
$H_{c,ff}$		- centrální tloušťka při plně zaplaveném kontaktu
$H_{c,F}$		- centrální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{c,s}$		- centrální tloušťka hladovějícího kontaktu
$H_{min,F}$		- minimální tloušťka plně zaplaveného kontaktu
$H_{min,s}$		- minimální tloušťka hladovějícího kontaktu
H_{oil}		- tloušťka maziva na vstupu kontaktu
k		- parametr elipticity
k_k		- elipticita kuličky
k_s		- elipticita soudečku ($k_s = b_s/a_s$)
L		- bezrozměrný materiálový parametr (Moes)
m		- bezrozměrná vzdálenost vstupní oblasti
m^*		- bezrozměrná vzdálenost mezi vstupními hranicemi pro plně zaplavený a hladovějící kontakt
M		- bezrozměrný parametr zatížení (Moes)
Pp_h	Pa	- maximální Hertzův tlak

Q	$\mu\text{l.min}^{-1}$	- množství dávkovaného maziva
r		- relativní tloušťka filmu maziva
$\mathcal{R}$		- redukce centrální tloušťky filmu maziva
R'	mm	- redukovaný poloměr křivky
R_x	mm	- redukovaný parametr křivosti
SD		- stupeň hladovění
SRR		- parametr prokluzu mezi třecími povrchy
u	m.s^{-1}	- rychlost
$u_{1,2}$	m.s^{-1}	- rychlost třecích povrchů
u_D	m.s^{-1}	- rychlost disku
u_m	m.s^{-1}	- střední rychlost ve směru x
u_S	m.s^{-1}	- rychlost soudečku
U		- bezrozměrný parametr rychlosti
U^*		- bezrozměrná rychlost
Um	mm.s^{-1}	- střední rychlost
W		- bezrozměrný parametr zatížení
w	N	- externí zatížení kontaktu
w_k	N	- externí zatížení kontaktu kuličky
w_s	N	- externí zatížení kontaktu soudečku
Y		- bezrozměrná souřadnice ve směru kolmém na směr valení
α	Pa^{-1}	- tlakově-viskózní koeficient
γ		- odpor proti bočnímu výtoku maziva
δ_1	mm	- tloušťka filmu maziva v nejvyšším bodě soudečku
δ_2	mm	- tloušťka filmu maziva ve dráze soudečku za kontaktem na disku
Δ		- parametr dělení maziva na výstupu z kontaktu
η_0	Pa.s	- dynamická viskozita maziva
Λ		- parametr mazání
μ		- součinitel tření
μ_d		- poissonovo číslo pro disk
μ_k		- poissonovo číslo pro kuličku
μ_s		- poissonovo číslo pro soudeček
ρ_{xd}	mm^{-1}	- křivost disku v ose x
ρ_{xs}	mm^{-1}	- křivost soudečku v ose x
ρ_{yd}	mm^{-1}	- křivost disku v ose y
ρ_{ys}	mm^{-1}	- křivost soudečku v ose y
$\bar{\rho}(P)$		- bezrozměrná hustota v závislosti na tlaku
σ_s	N.m^{-1}	- povrchové napětí
τ	$^\circ$	- pomocný úhel

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Závislost součinitele tření na parametru mazání [2]	13
Obr. 2-2 Schéma elastohydrodynamického mazaného kontaktu [11]	14
Obr. 2-3 Vnitřní struktura různých zpevňovadel, 1 – Ca-komplexní mýdlo ze syntetických kyselin, 2 – Na-mýdlo z mastných kyselin, 3 – Ca-mazivo s alkalitou 0,18 % NaOH, 4 – Ca-komplexní mýdlo z kyseliny hydroxystearové a octové [12]	16
Obr. 2-4 Schéma rozdělení zpevňovadel [12] (upraveno)	17
Obr. 2-5 EHL kontakt při plně zaplavených (vlevo) a hladovějících podmínkách (vpravo), zvýrazněná červená oblast reprezentuje nárůst maximálního tlaku [14]	18
Obr. 2-6 Rychlost valení 0,308 m/s [17] (upraveno)	19
Obr. 2-7 Rychlost valení 1,104 m/s [17] (upraveno)	19
Obr. 2-8 Profil hladovění pro odlišné zásobování [22]	21
Obr. 2-9 Závislost centrální tl. na vstupující tloušťce maziva do kontaktu [22]	22
Obr. 2-10 Průběh křivek pro hladovějící a plně zaplavenou EHL tloušťku filmu závislou na rychlosti valení [23] (upraveno)	22
Obr. 2-11 Vliv rychlosti valení na tloušťku mazacího filmu [25] (upraveno)	23
Obr. 2-12 Vliv množství maziva na tloušťku mazacího filmu [25] (upraveno)	23
Obr. 2-13 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro tři různé teploty [25] (upraveno)	23
Obr. 2-14 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro různá zatížení kontaktu [25] (upraveno)	23
Obr. 2-15 Závislost parametru SD [25]	25
Obr. 2-16 Porovnání plně zaplaveného režimu pro tři teploty plastického maziva s nižší viskozitou [26]	25
Obr. 2-17 Porovnání plně zaplaveného režimu pro tři teploty plastického maziva s vyšší viskozitou [26]	25
Obr. 2-18 Závislost tloušťky filmu maziva na rychlosti valení pro základový olej a plastické mazivo [26]	26
Obr. 2-19 Snižování tl. filmu pro plastické mazivo o viskozitě 30 mm ² /s [26]	27
Obr. 2-20 Snižování tl. filmu pro plastické mazivo o viskozitě 200 mm ² /s [26]	27
Obr. 2-21 Vliv rychlosti valení na hladovějící tloušťku filmu [26]	28
Obr. 2-22 Vliv zahušťovadla pro plastické mazivo o viskozitě 30 mm ² /s [26]	28
Obr. 2-23 Vliv zahušťovadla pro plastické mazivo o viskozitě 200 mm ² /s [26]	28
Obr. 2-24 Porovnání tloušťky filmu plně zaplaveného a hladovějícího kontaktu mazaného plastickým mazivem o viskozitě 30 mm ² /s pro rychlost 0,1 m/s [26]	29
Obr. 2-25 Schéma měřících míst na aparatuře [27]	31
Obr. 2-26 Výstupní tloušťka filmu poměru prolomení jako funkcí SRR pro tři různé střední rychlosti [27]	31
Obr. 2-27 Trajektorie toku maziva okolo EHD kontaktu [35]	33
Obr. 2-28 Porovnání hodnot mezi experimentálně naměřenými daty a predikcí podle modifikovaného modelu [37]	34
Obr. 2-29 Experimentálně a numericky získaný tvar hranice mezi mazivem a vzduchem na výstupu z kontaktu [38] (upraveno)	34
Obr. 2-30 Centrální tloušťka filmu jako funkcí pootočení disku [39] (upraveno)	35
Obr. 2-31 Rozložení plastického maziva okolo hladovějícího kontaktu [33]	36
Obr. 2-32 Pohyb plastického maziva v blízkosti kontaktu [40]	36
Obr. 4-1 Princip optické interferometrie [44]	39

Obr. 4-2 Schéma metody založené na principu fluorescenční mikroskopie [48] (upraveno)	40
Obr. 4-3 Celkový pohled na tribometr sloužící pro měření tloušťky filmu maziva v kontaktu [36]	41
Obr. 4-4 Schéma měřících aparatur, horní schéma měřící aparatury obsahuje stírač pro téměř úplné setření filmu maziva z povrchu disku, spodní aparatura je zobrazena se stíračem vracející mazivo zpět do dráhy kontaktů	42
Obr. 4-5 Popis experimentální metody	43
Obr. 5-1 Parametr gama jako funkcí M/L pro kruhový kontakt	46
Obr. 5-2 Závislost h_c na h_{oil} pro hodnoty různých středních rychlostí	47
Obr. 5-3 Predikce a experimentální závislost centrální tloušťky na rychlosti	49
Obr. 5-4 Teoretické predikce základových olejů	50
Obr. 5-5 Experimentální měření se změnou množství dávkovaného maziva	51
Obr. 5-6 Nezávislý pohon prvního valivého elementu	51
Obr. 5-7 Schéma rychlostí kontaktu	52
Obr. 5-8 Centrální tloušťka základových olejů jako funkcí rychlosti	53
Obr. 5-9 Centrální tloušťka plastických maziv jako funkcí rychlosti	53
Obr. 5-10 Měřící aparatura využívající jevu fluorescence pro měření poměru dělení maziva [27] (upraveno)	54
Obr. 5-11 Fluorescenční snímek dráhy soudečku za kontaktem na disku	55
Obr. 5-12 Fluorescenční snímek soudečku	55
Obr. 5-13 Poměr dělení základového oleje Mogulu LV 2-3	56
Obr. 5-14 Poměr dělení základového oleje Mogulu LA 2	56
Obr. 5-15 Poměr dělení základového oleje Mogulu LVT2-EP	56
Obr. 5-16 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LV 2-3	57
Obr. 5-17 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LA 2	57
Obr. 5-18 Poměr dělení plastického maziva Mogulu LVT2-EP	57
Obr. 5-19 Závislost F^x , k , E^x na parametru τ [54]	60
Obr. 5-20 Koncepce výpočtu h_{oil}	60
Obr. 5-21 Vliv jednotlivých jevů na výsledky	61
Obr. 5-22 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LV 2-3	62
Obr. 5-23 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LA-2	62
Obr. 5-24 Porovnání závislosti h_c na h_{oil} pro základový olej a plastické mazivo Mogul LVT2-EP	63
Obr. 6-1 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro základový olej Mogul LV 2-3	65
Obr. 6-2 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LV 2-3	65
Obr. 6-3 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro základový olej Mogul LA-2	65
Obr. 6-4 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LA-2	66
Obr. 6-5 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro základový olej Mogul LVT2-EP	66
Obr. 6-6 Opakovatelnost měřící metody fluorescence pro plastické mazivo Mogul LVT2-EP	66

Obr. 6-7 Ověření stálosti distribuce tloušťky filmu maziva na aparatuře zjišťující dělení filmu maziva	67
Obr. 6-8 Závislost intenzity světla na čase pro staticky snímanou oblast	68

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 4-1 Specifikace vzorků plastických maziv [51, 52, 53]	43
Tab. 4-2 Index lomu použitých typů maziv	43
Tab. 5-1 Parametr gama pro různé provozní podmínky [16] (upraveno)	46
Tab. 5-2 Viskozita základových olejů	48
Tab. 5-3 Tlakově-viskózní koeficient základových olejů	49
Tab. 5-4 Vstupující parametry	49
Tab. 5-5 Vliv stlačitelnosti maziva pro jednotlivé provozní podmínky	59

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Technická dokumentace maziv

Příloha č. 2: Článek: *Experimental comparison of the behavior between base oil and grease starvation based on inlet film thickness*