



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 POZOROVÁNÍ MIGRACE PLASTICKÉHO MAZIVA V SIMULÁTORU VALIVÉHO LOŽISKA

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF GREASE MIGRATION IN A ROLLING BEARING SIMULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Palán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Miroslav Palán**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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 bakalářské práce:

Experimentální pozorování migrace plastického maziva v simulátoru valivého ložiska

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plastické mazivo se skládá ze dvou základních složek – základového oleje a zpevňovačů. Složky se v ložisku po určité době začínají chovat nezávisle, přičemž se zpevňovač shromažďuje jinde, než kapalná složka. Obě složky je nicméně možné díky využití fluorescenční mikroskopie sledovat nezávisle a zjistit tak jejich význam při mazacím procesu.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je realizace experimentů za účelem zjištění možností využití metody.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popis aktuálního stavu možností fluorescenční mikroskopie,
- realizace experimentů s různými barvami pro jednotlivé složky maziva, porovnání výsledků a vyhodnocení výsledků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

LUGT, Piet M. Grease lubrication in rolling bearings. 1. Chichester: John Wiley, 2013. Tribology series. ISBN 978-1-118-35391-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce využívá možnost fluorescenční mikroskopie k separátnímu pozorování složek plastického maziva v simulátoru valivého ložiska. Simulátor ložiska je v konfiguraci ball-on-disk, kde se místo disku použil tvrzený skleněný vnější kroužek. Ten v tomto provedení umožňuje nahlédnutí do jinak nepřístupných míst ocelového ložiska. Pozorováním jednotlivých složek plastického maziva, pomocí speciálních umělých fluorescenčních barviv přidaných do struktury, se docílilo poznání, že lze touto metodou fluorescenční mikroskopie pozorovat plastická maziva, kde toto tvrzení zkoumané vzorky prokázaly.

KLÍČOVÁ SLOVA

Plastické mazivo, mazání, fluorescenční mikroskopie, valivé ložisko

ABSTRACT

This thesis is using fluorescence microscopy to separately observe components of grease lubricate in simulator of ball rolling bearing. Simulator is in the configuration ball-on-disk when the disk was replaced by the outside ring made by tempered glass. This ring allows light passing to normally unseeable places of steel bearing. By the separate study of greases particles, coloured with special fluorescent dye, was found that method of fluorescence microscopy can be used to gain information about grease lubricated process in bearing.

KEYWORDS

Grease, lubrication, fluorescent microscopy, rolling bearing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALÁN, Miroslav. *Experimentální pozorování migrace plastického maziva v simulátoru valivého ložiska*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139443>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Davidovi Košťálovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky ke zpracování této bakalářské práce a za velkorysou pomoc při provádění experimentu a jeho následném vyhodnocování.

Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mě již od mala silně podporuje ve všech mých zálibách a vzdělávání, a i při studiu na vysoké škole byla celou dobu po mém boku a poskytovala mi silnou oporu.

V neposlední řadě bych chtěl touto formou poděkovat všem blízkým přátelům, kteří při mně stáli v dobách dobrých i zlých, a též bych rád poděkoval Mgr. Ludmile Andrlové za její stylistické rady a poznámky.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Fluorescence	14
2.1.1	Princip fluorescenční mikroskopie	14
2.1.2	Historie fluorescence	17
2.1.3	Využití fluorescence	17
2.1.4	Umělá fluorescenční barviva	18
2.2	Plastické mazivo	23
2.2.1	Složky plastického maziva	25
2.2.2	Historie vývoje teorie plastického maziva a lubrikačního filmu	26
2.2.3	Experimentální způsoby měření tloušťky filmu	27
2.2.4	Tvorba tloušťky filmu	28
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
3.1	Analýza problému	30
3.2	Cíl práce	30
4	MATERIÁL A METODY	31
4.1	Příprava maziv	31
4.2	Použité experimentální zařízení	31
4.2.1	Kamera	32
4.2.2	Světelné zdroje	32
4.2.3	Dichroická kostka	32
4.2.4	Simulátor valivého ložiska	33
4.3	Provedení experimentu	34
4.3.1	Parametry experimentu	34
4.3.2	Průběh experimentu	36
5	VÝSLEDKY	37
5.1	Opakovatelnost a základní princip měření	37
5.2	Naměřené hodnoty	38
5.3	Vliv zahušťovadla	39
6	DISKUZE	42

6.1	Vnější vlivy	42
6.2	Vliv maziv	43
7	ZÁVĚR	44
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	50
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
11	SEZNAM TABULEK	52
12	SEZNAM PŘÍLOH	53

1 ÚVOD

Uvolňování základového oleje ze struktury zahušťovadla v plastickém mazivu je v procesu mazání obvyklým jevem, kterému nelze nijak zabránit. Mazivo nacházející se uvnitř valivého ložiska se vlivem kontaktního tlaku rozdělí, přičemž se ze struktury maziva uvolní základový olej, který vytváří mazací vrstvu zvanou film. V případě nedostačující tloušťky filmu začínají ložiska hladovět, což může vést ke stádiu možného zadření a poškození celého mechanismu.

Po určité době mazivo degraduje vlivem oxidace a pohlcování otěrových částic uvnitř ložiska. V době, kdy se základový olej a zahušťovadlo opět spojí, vzniká struktura ochuzená o určitý hmotnostní podíl oleje, který během mazacího procesu výhradně odtéká z kontaktu pryč a částečně vlivem proudění vzduchu a teploty evaporuje do okolí. Z toho vyplývá nutnost maziva v pravidelných intervalech doplňovat. Provozní údaje a životnosti maziv vždy uvádí jejich výrobce na obalu.

Pro zkoumání plastického maziva a tloušťky mazacího filmu se běžně užívá optické interferometrie, která na základě odrazu světla určuje vzdálenosti, a tedy tloušťky mazacích filmů [4]. Tato bakalářská práce se zaměří především na zjištění možností využití fluorescenční mikroskopie pro zadanou problematiku maziva, přičemž fluorescenční mikroskop přímo udává množství maziva a jeho složení v kontaktu [4]. Hlavní kritérium této metody spočívá v potřebě průhledného média, kterému celokovové valivé kuličkové ložisko nevyhovuje. Tento problém lze vyřešit výměnou vnějšího kroužku ložiska za průhledně optický skleněný kroužek se shodnou geometrií, drsností a přesností. Toto borosilikátové sklo s názvem BK7-optical glass má velmi dobré pevnostní vlastnosti, výhradně modul pružnosti, pohybující se okolo 82 GPa, [38] což značí malou míru možnosti se deformovat při zatěžování.

Pro úspěšné provedení experimentu se objevuje nutnost jednotlivé složky maziva obarvit látkou, která vydává, tedy emituje fluorescenční záření. Pro měření užíváme nejlépe základové aromatické minerální hydrokarbonové oleje, které emitují fluorescenční záření bez přidání doplňujících barviv [3]. Pro užití jiných základových olejů je nutné do daného oleje přimíchat odpovídající množství fluorescenčního barviva. Podobný postup se provede při přípravě zahušťovadla, které již v žádných formách neemituje fluorescenční záření bez přidaných barviv. Takto obarvené struktury lze díky emitaci světla za určitých vlnových délek sledovat nezávisle na sobě, a tím docílit dalšího poznání.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Fluorescence

2.1.1 Princip fluorescenční mikroskopie

Fluorescenční mikroskopie je pojem známý již několik desítek let. Jedná se o proces, který umožňuje sledování objektů v dané měřené oblasti, přičemž přilehlé okolí nevykazuje schopnosti fluorescenčního záření o stejné vlnové délce, a tedy zůstává na snímkách černé.

Základní a nutnou podmínkou pro využití této mikroskopie je schopnost vzorku pohlcovat a vyzařovat světlo pomocí organických, či anorganických sloučenin, tedy vyzařovat luminiscenci (vlastní záření). Tuto schopnost umožňuje molekula s názvem fluorofor, která dokáže pohltit dodávané světlo fotonem a tuto energii opět vyzářit. Nejvyššími vzorky v rámci emise světla jsou látky obsahující tuto molekulu ve svém přírodním složení, např. buňky. V případech měření vzorku neobsahujícího fluorofor dochází k nezbytnosti tento vzorek laboratorně obarvit látkou tyto molekuly obsahující, v technické praxi např. Pyrenem či Kumarinem. V mikroskopech jsou běžně viditelné i samotné molekuly fluoroforu. Proto docházíme k problémům při excitaci neboli pohlcování záření v případech uměle obarvených velmi malých vzorků, které se příliš neliší od pozadí. To vyvolává problém v případech, kdy se vzorek nachází v autofluorescenčním prostoru.[5]

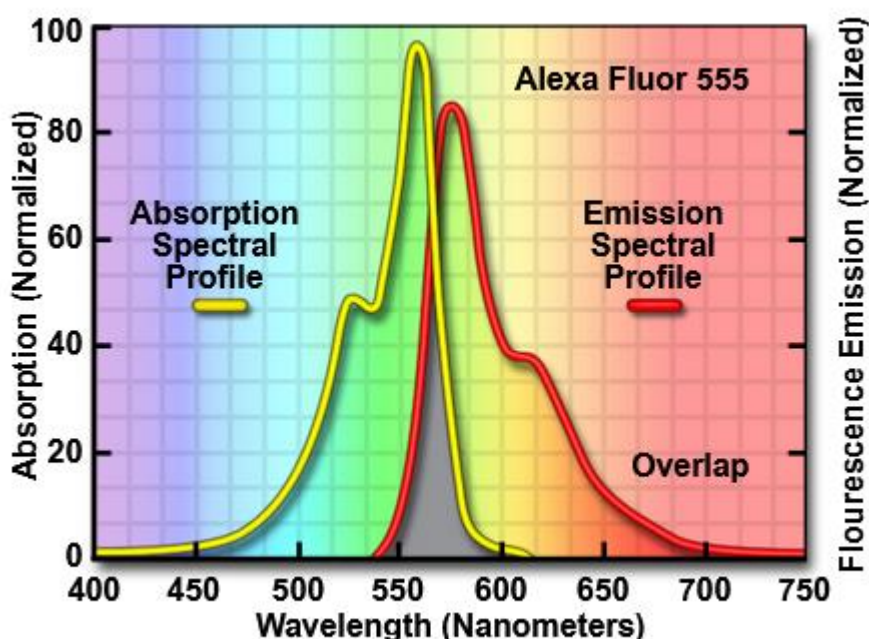
Základní průběh fluorescence se rozděluje do tří hlavních částí. [4]

- Excitace světla: Stav, při kterém fluorofor pohlcuje záření z externího zdroje světla např. UV lampa, či laser. [4] Tímto přísunem energie fotonů nejčastěji o krátké vlnové délce se stává z běžného stavu stav nabuzený, a to vede až k přesunu elektronu fluoroforu na vyšší orbitalovou dráhu.
- Životnost nabuzeného stavu: Jedná se o krátký stav trvající jednotky nanosekund, obvykle 1-10 ns, ve kterém se molekula snaží dostat zpět na svoji původní energetickou hodnotu. [4] Tento čas se prodlužuje, pokud se v blízkosti nacházejí další takto nabitě částice. Jedná se o rezonanční přenosy fluorescenční energie, kdy fluorofor nabitý zářením o vlnové délce tuto energii emituje, a tím opět nabijí fluorofor o stejné vlnové délce poblíž. [5] To je způsobeno relaxací a emitací části své energie do okolí za účelem dostat se do svého původního neutrálního stavu. Touto disipací energie se dostane do stavu, ze kterého se emituje fluorescenční záření.

- Emitace záření: Aby se elektron fluoroforu dostal opět na svoji původní orbitalovou dráhu, je zapotřebí vyzáření dostatečného množství energie. Elektron vyemituje foton, čímž se vrací do neutrálního stavu. Vyemitovaný foton bude o větší vlnové délce než foton excitační, neboť část energie se ztratila při relaxaci. Tento proces obvykle trvá méně než pár μs . [12]

V některých případech se nachází možnost setkat se s názvem fosforescence, jedná se o zvláštní případ luminiscence. Přičemž tento jev vykazuje velmi podobné vlastnosti jako fluorescence, kde hlavním rozdílem bývají emitační časy záření, kdy fluorescence, jak bylo uvedeno výše, trvá méně než pár ms. Fosforescence přetrvá mnohem delší dobu, přičemž k emitaci záření dochází velmi pozvolna. [12]

Kritickou vlastností možnosti využití fluorescenční mikroskopie jsou Stokesovy vlny, též Stokesův zákon. Jedná se o rozdíl mezi excitační a emitační vlnovou délkou, což umožní sledování stejných vzorků při různých vlnových délkách pouze při změně excitačního zdroje, či při změně filtru mikroskopu.



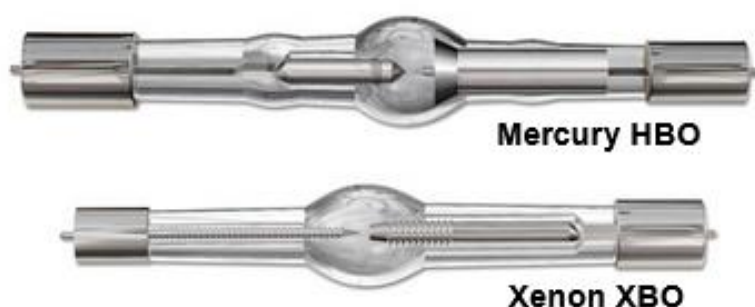
Obr. 2-1 Absorpce a emise barviva Alexa Fluor 555 [12]

V praxi viditelný Stokesův zákon pro barvivo Alexa Fluor 555 ukazuje obr. 2-1, kde žlutá absorpční křivka pohybující se v modro zelenožlutém spektru vždy dosahuje vyšších rozměrů a menších vlnových délek než červená emisní křivka ve žlutočerveném spektru dosahující větších vlnových délek. Zpravidla platí, že absorpční křivka se zrcadlí s křivkou emisní. Pro dosažení maximální intenzity fluorescenčního záření dochází k nutnosti provádět excitaci světla v okolí extrémů absorpční křivky, pro vzorek s barvivem Alexa tato hodnota nabývá zhruba 550 nm. Následné pozorování emitace světla se může provádět v celém emitačním spektru za užití speciálních filtrů umístěných na čočku mikroskopu propouštějících pouze určité emitované světlo o dané vlnové délce.

Jako reakci na světelnou absorpci fotonů běžně užívanými světelnými zdroji, viz. kapitola Světelné zdroje níže, mnoho fluorescenčních materiálů vyzařuje modré či zelené světlo ve vlnových délkách od 450 do 550 nm ve viditelném spektru. [10]

Světelné zdroje

Při sběru dat optickými fluorescenčními mikroskopy se potýkáme s problémem malé emisivity vzorků a malého počtu fotonů zachycených kamerou. [12] Řešení těchto problémů nastává, pokud se vygeneruje maximální možná intenzita záření za pomoci výkonných světelných zdrojů v podobě vysokoenergetických výbojek. [12] Do těchto světelných zdrojů se řadí především rtuťové a xenonové výbojky, lasery a UV lampy. Za pomoci rtuťové lampy poskytneme vzorku světlo o vlnové délce v oblasti okolo 365 nm. [10] U laserového zdroje vyemitovaná vlnová délka přímo závisí na druhu média laseru. UV lampa umožňuje vyzařovat světlo o vlnové délce v rozmezí od 300 do 400 nm.



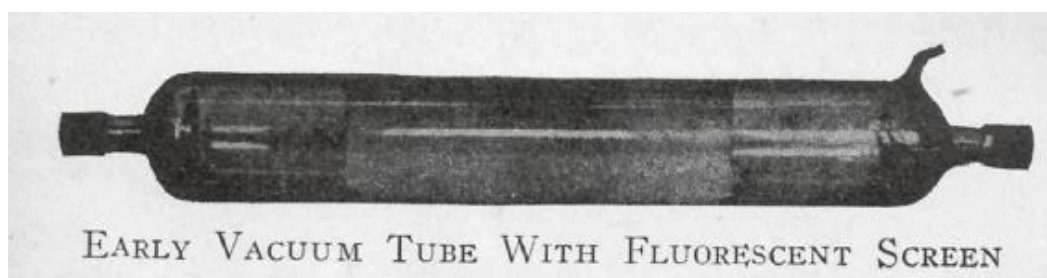
Obr. 2-2 Rtuťová výbojka (horní), xenonová výbojka (dolní) [12]

2.1.2 Historie fluorescence

První hypotéza o principu fluorescence je datována k roku 1845, kdy sir Frederik William Herschel vypořádal chování dokonale průhledného kyselého roztoku při vystavení podmínkám ultrafialového záření ze Slunce. [18] Roztok po čase začal emitovat modrou barvu [7] a tento jev Herschel nazval epipolická disperze. [8] Roku 1852 sir George Stokes na tuto studii navázal a toto chování více specifikoval. Po měření několika vzorků došel k fenoménu, který pojmenoval disperzní reflexe, později Stokesův zákon (znázorněno na obr. 2-1). [19] Jak již bylo řečeno výše, jedná se o rozdíl vlnových délek mezi excitovaným a emitovaným světlem, přičemž emitované světlo je vždy o delší vlnové délce než světlo excitované vzorkem. [8] Stokes rovněž dále popsal chování vyzařovaného světla ze vzorku v odměrném válci, které z kapaliny vychází všemi různými směry tak, že se kapalina zdá být samo svítící. Tento teorém zprvu popsal disperzní reflexí [19], ve své následující studii však tento název popsaného jevu změnil na termín fluorescence. [21]

2.1.3 Využití fluorescence

Jednou z nejstarších aplikací pro fluorescenci byla fluorescenční zářivka, kdy roku 1857 Edmond Becquerel potáhl elektrodu zářivky fluorescenčním materiálem, přičemž konstrukce zářivky se extrémně neliší od těch používaných v dnešní době. [8]



Obr. 2-3 Fluorescenční zářivka v roce 1857 [8]

Po roce 1852 se pomocí fluorescence kontrolovala koncentrace a složení různých chemických látek v roztocích. [19]

Na počátku 20. století byl představen světu první fluorescenční mikroskop, ve kterém byly použity fluorofory v oblasti biologického a biomedicínského výzkumu k obarvení tkání a bakterií. [6] Přičemž se jedná o nejrozšířenější oblast využití fluorescence v dnešní době.

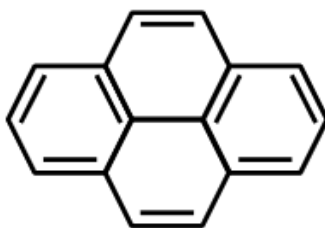
Další praktické využití fluorescence se nachází v oboru tribologie, kde slouží ke zkoumání zásadních vlastností maziva, jako např. závislosti viskozity maziva na teplotě, tlaku a zkoumání jeho celkového chování apod. K prvnímu využití metody k tomuto účelu došlo roku 1970 [21] [22], kdy byla za pomoci rtuťové lampy studována tloušťka olejového filmu v rotujícím váleci.

2.1.4 Umělá fluorescenční barviva

V případě, kdy materiál nevykazuje známky autofluorescence, se zde objevuje nutnost přimíchání doplňujících barviv s touto schopností, mezi nejrozšířenější skupinu barviv patří Pyreny a Kumariny. Jedná se o velmi rozsáhlé skupiny organických materiálů zaručujících svým chemickým složením proces fluorescence.

Pyren

Aromatický uhlovodík pod názvem Pyren, jehož chemickou strukturu znázorňuje obr. 2-4, nejčastěji absorbuje světlo o vlnové délce 336 nm. [9]

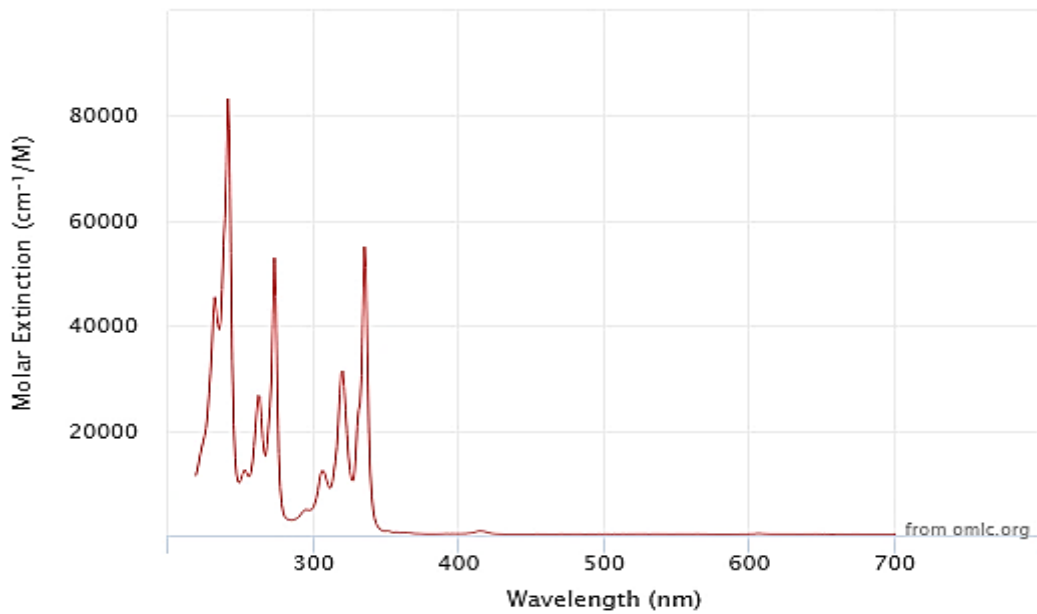


Obr. 2-4 Chemická struktura Pyrenu [9]

Tento uhlovodík rozpuštěný v cyklohexanu vykazuje proces fluorescence ve viditelném světle v oblasti fialového barevného spektra. Zde se objevuje nutnost podotknout, že při vmísení barviva do jiné látky, než čistého cyklohexanu může Pyren dosahovat i vyšších emisních hodnot viditelného spektra, tedy delších vlnových délek.

Z grafu na obr. 2-5 lze vidět různé vlnové délky absorbovaného světla na ose x (wavelength) za různých hodnot molární absorpce v grafu na ose y (Molar Extinction). Tato hodnota molární absorpce udává množství pohlceného světla v závislosti na druhu látky, kterou toto záření prochází. Hodnoty uvedené v grafu platí pro Pyren rozpuštěný v cyklohexanovém uhlovodíku (rozpouštědle).

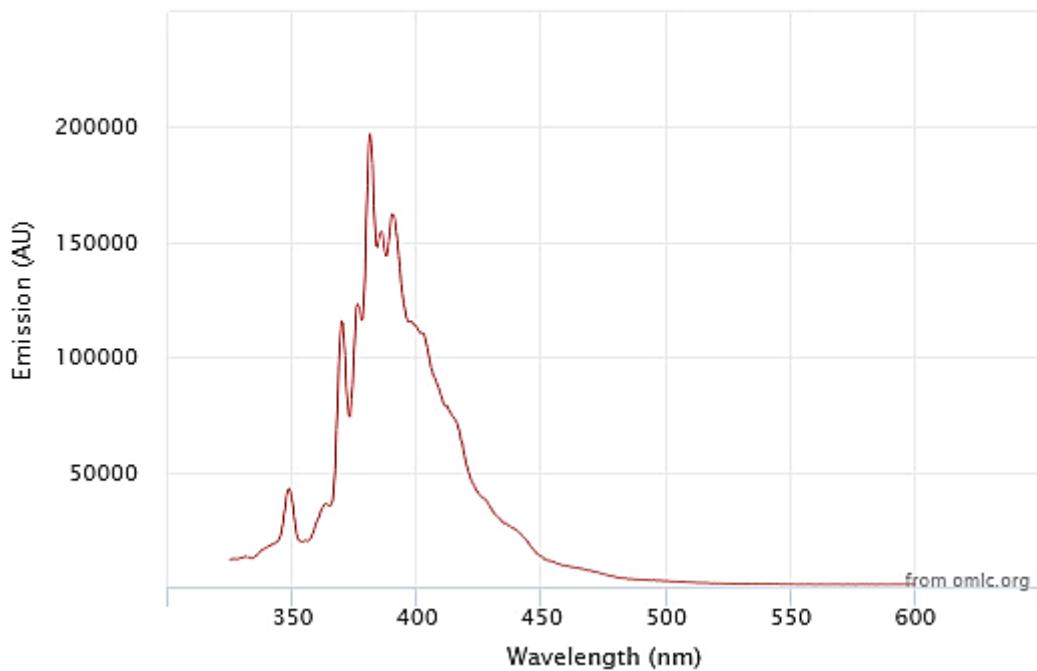
Pyrene in cyclohexane



Obr. 2-5 Graf absorpčních vlnových délek Pyrenu rozpuštěného v cyklohexanu [15]

Při návratu nabuzených elektronů excitačním světlem o vlnové délce 317 nm na své původní energetické hodnoty Pyren vyemituje světlo (viz. obr. 2-6) při své maximální emisní hodnotě (osa y) o vlnové délce 380 nm (na obrázku osa x).

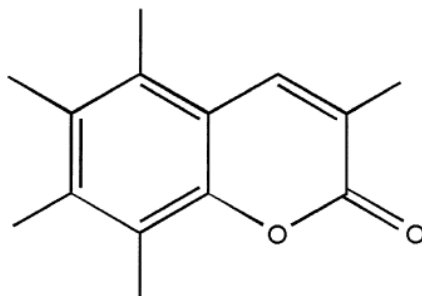
Pyrene in cyclohexane



Obr. 2-6 Graf emitačních vlnových délek Pyrenu rozpuštěného v cyklohexanu [15]

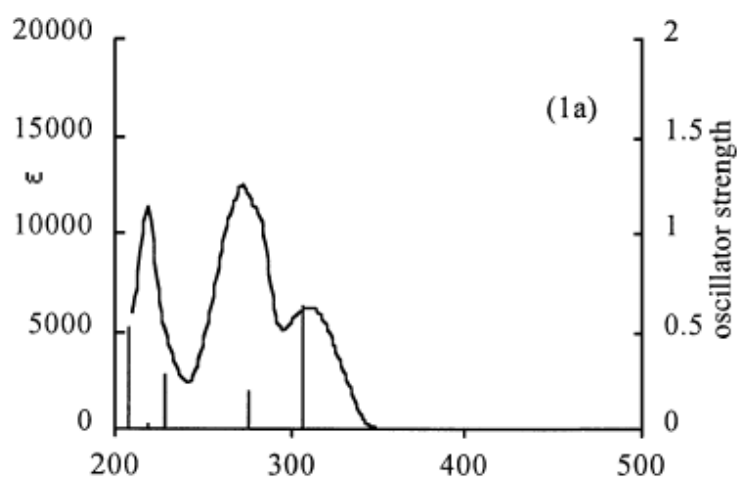
Kumarin

Mezi komerčně nejrozšířenější a nejobjemnější skupinu umělých barviv se řadí Kumariny. Fungují na principu Kumarinového strukturovaného kruhu obsahujícího molekulu kyslíku (obr. 2-5) v chemickém složení, tento kruh látce umožňuje mnoho chemických variant a rozmanitostí v oblasti rozsáhlých škál absorbovaného a emitovaného světla.



Obr. 2-7 Chemická struktura Kumarinu (převzato a upraveno z [11])

Především se jedná o velmi efektivní sloučeninu z pohledu emise záření. Kumariny vykazují stabilní rezonanci a snadnou absorpci světla ve třech vlnových picích v hodnotách nad 210 nm. Tato hodnota závisí na daném chemickém složení. Kumarin na sebe dokáže navázat až pět atomů vodíku, oxidu dusičitého apod. Např. Pokud Kumarin naváže na všechny své volné pozice v chemické struktuře pouze molekuly vodíku, dojde ke vzniku umělého fluorescenčního barviva, které je schopno absorbovat světlo ve své maximální možné míře až ve třech absorpčních extrémech o hodnotách okolo 210, 272 a 311 nm [11], což znázorňuje obr. 2-8.



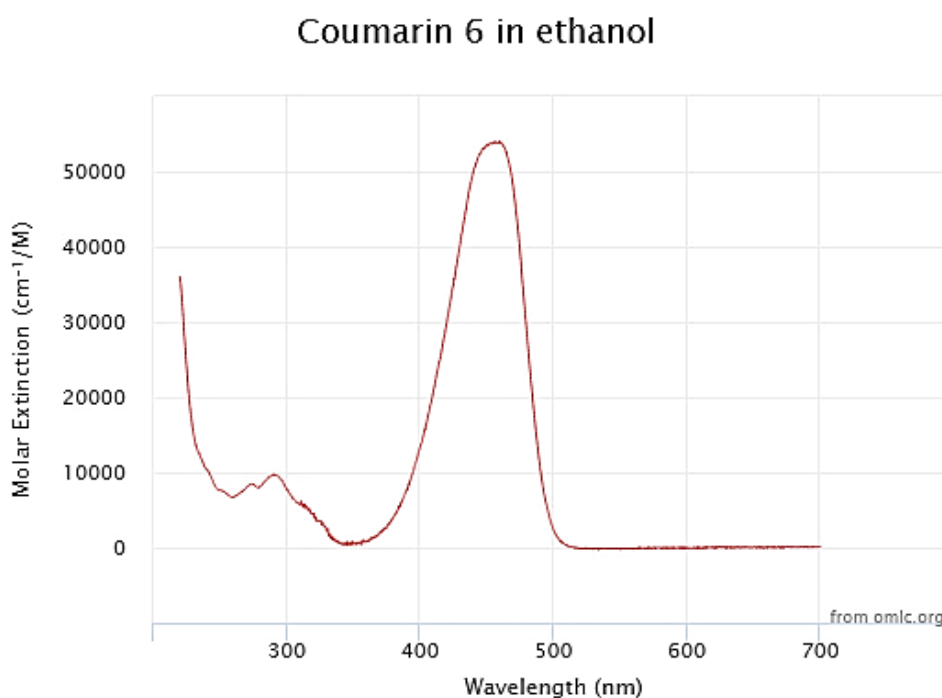
Obr. 2-8 Absorpce excitačního záření Kumarinu obsahujícího 5 atomů vodíku [11]
Osa x: vlnová délka v nm

Z této studie [11] vyplývá možnost využití různých světelných zdrojů dosahujících alespoň jednoho z uvedených extrémů pro získání kvalitních měření, kdy se většina elektronů nabíjí a přechází na vyšší orbital do nabuzeného stavu.

Nejčastěji používané Kumariny ve fluorescenční mikroskopii emitují v modrém barevném spektru (vlnová délka cca 470 nm), či žlutě obarvené Kumariny vyzařují v zeleném barevném spektru (vlnová délka cca 520 nm).

Nadcházející obr. 2-9 a 2-10 blíže specifikují barvivo pod označením Kumarin 6, které v aktuální době laboratoře Vysokého učení technického na Ústavu konstruování používají pro své výzkumy.

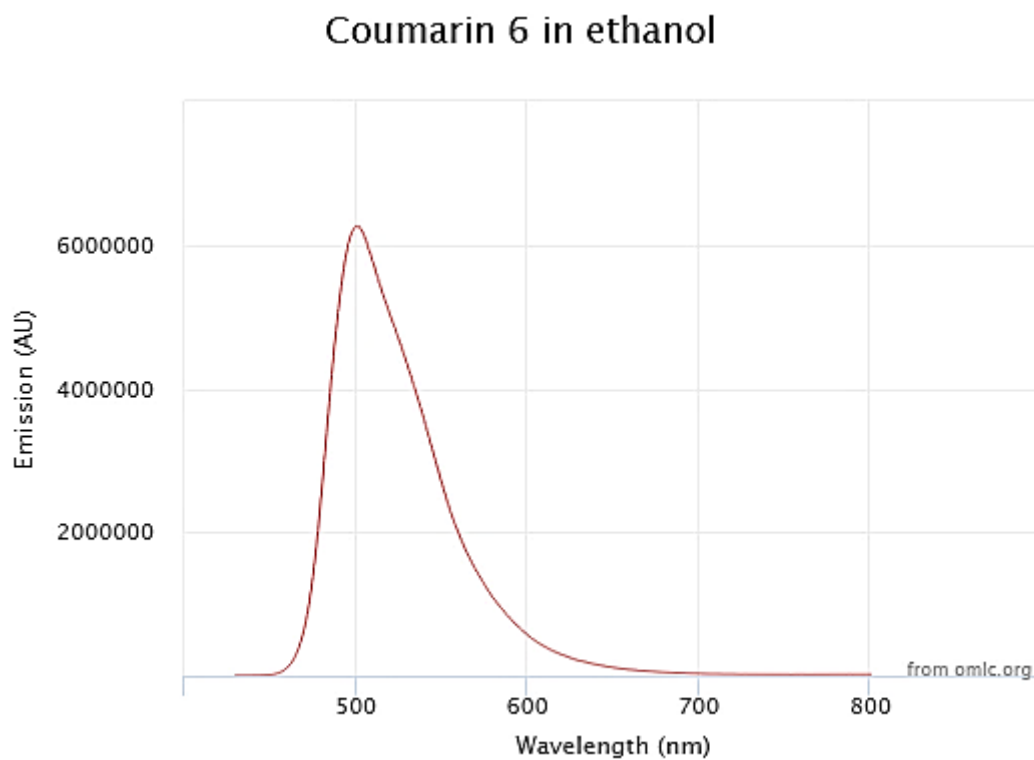
Opět zde dochází k nutnosti podotknout, že grafy platí pouze pro Kumarin 6 rozpuštěný v etanolu, při rozpuštění v jiných roztocích a látkách může Kumarin 6 dosahovat jiných absorpčních a emisních extrémních hodnot.



Obr. 2-9 Graf absorpčních vlnových délek Kumarinu 6 rozpuštěného v etanolu [15]

Odečtením z grafu (obr. 2-9) vyplývá nutnost k dosažení maximální absorpce fotonů v Kumarinu vzorek excitovat světlem o vlnové délce 459,2 nm.

Po nabuzení fluoroforů excitačním světlem o vlnové délce 420 nm a po ukončení nabuzení se elektrony vrací do své neutrální energetické polohy. Při tomto návratu se nejvíce emitují záření pohybující se v modrém viditelném spektru o vlnové délce okolo 500 nm. Znázorněno na obr. 2-10.



Obr. 2-10 Graf emitačních vlnových délek Kumarinu 6 rozpuštěného v ethanolu [15]

2.2 Plastické mazivo

Plastickým mazivem se obecně označuje mazací prostředek s vyšší viskozitou než má samotný mazací olej, který je spolu s mýdly (zahušťovadly) nedílnou součástí těchto maziv. V praxi lze dále přidat přísadové prvky neboli aditiva zlepšující jeho vlastnosti, jako výkon, trvanlivost a provozní teplotu. [29] Příčinou soudržnosti těchto plastických maziv pohromadě jsou Van der Waalsovy a kapilární síly působící na jednotlivé jeho složky. [26] Hlavní výhodou užití těchto maziv vůči mazání oleji spočívá v jednoduchosti aplikace maziva, kde mazivo lze rovnoměrně rozložit po celém obvodu ložiska a konstrukci výrobku, kdy není potřeba žádného externího přídavného zařízení pro vhánění a výměnu oleje, jako např. čerpadla, vtoky a výtoky. Zásadní nevýhodou v užití těchto maziv se stává omezená doba životnosti, kterou zásadně ovlivňuje provozní hodnota teploty, při které valivé ložisko pracuje. Doba, za kterou nastává nutnost výměny maziva, se definovala jako L01 životnosti maziva, a je doporučena výrobcem. Koeficient L01 značí predikci času, při kterém 1 % všech vyráběných ložisek dojde do chvíle, kdy se poškodí a tím dochází k nefunkčnímu stavu s možností poškození celé soustavy. [13]

Jedná se o nejrozšířenější druh maziva v oblasti použití u valivých ložisek (okolo roku 2009 více než 80–90 % všech valivých ložisek bylo mazáno pomocí plastických maziv a tento počet se nadále zvyšuje) [1, 16] pro jeho specifickou konzistenci a viskozitu, která napomáhá zabránit mazivu unikat z místa mazacího procesu ven a zároveň kontakt chrání před vnějšími vlivy a korozí. Plastické mazivo ve valivém ložisku především hraje funkci zásobárny a efektivního „dávkovače“ mazacího základového oleje v tomto mazivu obsaženém. [17] Důvodem proč vkládat plastické mazivo do valivého ložiska se stalo oddělení kontaktů mezi valivými elementy a kroužky, a tedy docílení optimálního stavu, kdy se ložisko při chodu stroje bude co nejméně opotřebovávat vlivem odporu a tepla a bude dosahovat kvalitních výkonů a dlouhých životností.

Ke zkoumání těchto specifických vlastností nám pomáhá vědní obor s názvem Tribologie, která zkoumá třecí síly v kontaktech dvou na sebe doléhajících těles, tedy těles v přímém kontaktu. V případech, kdy se mezi kontakty dvou těles vkládá nějaké médium (typu mazivo či kapalina) zabránějí tělesům se dotýkat, snižují se maximální dosahované třecí síly a tím i vznikající teplota a opotřebení, dochází však i k nutnosti zkoumání reologických vlastností daných maziv. Tyto reologické vlastnosti ovlivňují tok maziva kontaktem a jeho konzistenci, což zásadně ovlivňuje i tloušťku mazacího filmu. K měření uvedených vlastností slouží zařízení reometr, které zkoumá chování a proudění kapalin za různých tlaků a rychlostí, přičemž zkoumá jejich viskozitu. [14]

Vliv teploty

Z důvodu tření působícího v kontaktu začíná docházet ke zvyšování teplot i v přilehlých oblastech. Přičemž největších teplotních výkyvů dosahuje ložisko při prvních 2 až 5 hodinách činnosti [16], kdy k nárustu teplot dochází při nedostatečné tloušťce filmu a tím způsobenému zadrhávání kontaktů v ložisku, což tento nárůst teploty zapříčiňuje. Po uplynutí této doby, po kterou se ložisko „zabíhá“, se teplota ustálí na téměř statických hodnotách. Bohužel z těchto hodnot může teplota v určitých časových intervalech nezávisle stoupnout a po určité době se opět vrací do původních hodnot. [16]

Pohyb maziva v ložisku

Po uvedení ložiska do chodu se mazivo nacházející se uvnitř začíná dostávat do kontaktu s jednotlivými valivými tělisky, které ho pomocí valivého odporu při rotaci vytlačují z ložiska pryč, a nadále se již tato vytlačená část mazacího procesu nijak neúčastní. Při vytlačovacím procesu plastického maziva z místa styku se mazivo usazuje v přilehlých dostupných prostorách geometrie ložiska, případně krytu a největší jeho část se zachytí pomocí geometrie klece. Především toto mazivo zachycené klecí dále slouží jako hlavní distributor oleje. Právě tyto aspekty, jako geometrie a tvar ložiska s klecí spolu s volbou vhodného maziva, se stávají při navrhování ložiska klíčovými aspekty pro tvorbu lubrikačního filmu.

Elasto-hydrodynamické mazání

Nejoptimálnější druh mazání, při kterém obě kontaktní tělesa odděluje dostatečná vrstva maziva. Jedná se o proces, kterého lze dosáhnout při působení elastických vlivů deformací povrchů při tvorbě mazacího filmu. Při tomto mazání dochází k pružným deformacím, které zapříčiňují navýšení působících tlaků v kontaktu a též přispívají ke zvýšení viskozity maziva. [2] Tato viskozita především stoupá pomocí zvýšení působícího tlaku v kontaktu v řádech stovek MPa [9], či zvýšením teploty. Při takovémto zatížení mazací vrstvy poté obvykle dosahují hodnot pár mikrometrů [9], přičemž maziva mohou přecházet z kapalného do pevného skupenství (viskoelastická či elasto-plastická pevná látka). [9]

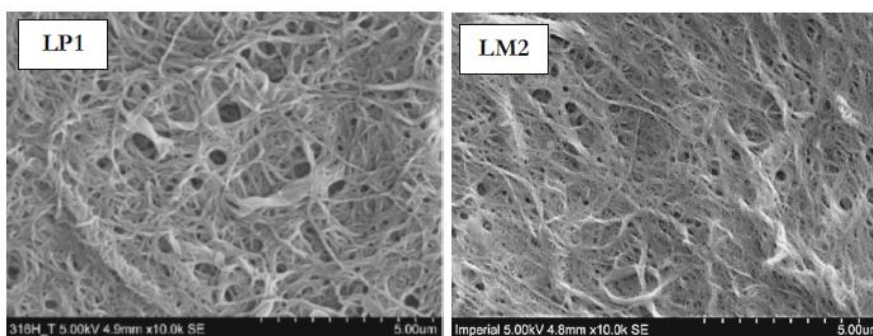
Typickými prvky, kde se lze s tímto druhem mazání setkat, jsou valivá ložiska, ozubená kola, vačky atd. [2]

2.2.1 Složky plastického maziva

Zahušťovadla / kovová mýdla

Zahušťovadla v plastických mazivech slouží především jako rezervoárové prvky základových olejů, kterým dávají jejich specifické polotuhé až plastické vlastnosti. [29] Jejich příspěvek v procesu mazání silně ovlivňuje především sílu mazacího filmu v oblasti nízkých otáček, kdy plastická maziva tvoří mnohem silnější vrstvy než samotný základový olej při plně zaplavených podmínkách. [29]

Na trhu se mýdla pohybují v mnoha variantách a složeních, přičemž nejčastěji se vyskytují na bázi močoviny, lithia, sodíku či vápence. Nejrozšířenější využití v praxi se nachází u mýdel lithiových či lithiových komplexů, a to až u 75 % všech plastických maziv, neboť lithium mazivu dodává při nízkých otáčkách úplnou nezávislost základového oleje na tvorbě filmu. [29] Lithiová zahušťovadla se vyznačují specificky náhodně zapletenou mikrostrukturou tvořenou válcovými vlákny, načež maziva na bázi lithiového komplexu toto zapletení nevykazují, přestože jsou od sebe více vzdálena. [30] Polyuretická maziva obsahují tato vlákna ve formě destiček různých tvarů a velikostí. [30]



Obr. 2-11 Mikrostruktura lithného mýdla s PAO základovým olejem (vlevo LP1) a s minerálním olejem (vpravo LM2) [34]

Základové oleje

Oleje v plastických mazivech se především používají k tvorbě mazacího filmu, a tedy k oddělování kontaktu dvou těles. V technické praxi se užívá především minerálních olejů oproti olejům syntetickým kvůli jejich drahé výrobě. [33] Většina vyrobených plastických maziv obsahuje z 80–90 % základový olej a zbytek prostoru zabírají aditiva a pojiva. [1]

Mezi rozšířené oleje se řadí Poly-alfa-olefinový olej (PAO), parafinový olej, naftenový a polyesterový olej. Přičemž PAO olej při dané viskozitě maziva vykazuje nejnižší hodnoty tření oproti ostatním druhům olejů. [34] Naopak pro mazání velmi tichých ložisek se nabízí jako nejlepší volba základový olej naftenový. [33]

Aditiva

Jedná se o látky používané k obohacování plastických maziv za účelem zlepšení jejich vlastností, např. zvýšení životnosti, možnost pracovat za vyšších teplot apod. Dodávají se nejčastěji do kontaktů, které pracují s vysokými tlaky, či při potřebě zaručit dlouhou životnost maziva. [1]

Aditiva se po určitém čase v mazivu spotřebují, či vyprchají a dojde k potřebě relubrikovat ložisko. Dle studie [32] bylo zjištěno, že tato hranice výměny se pohybuje v okolí 50 % životnosti běžného maziva.

2.2.2 Historie vývoje teorie plastického maziva a lubrikačního filmu

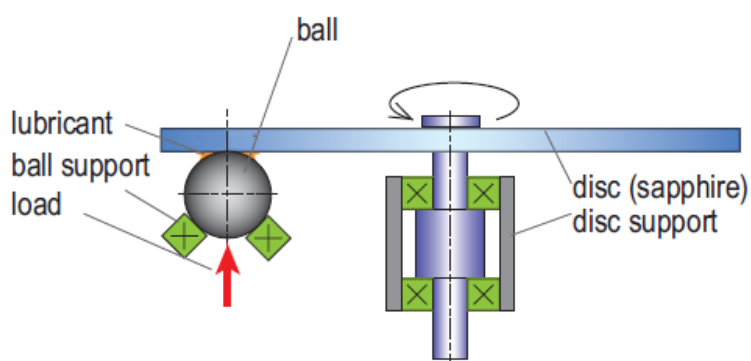
Roku 1953 byla publikována práce napsaná Booserem a Wilcockem, jež považuje plastické mazivo za plnohodnotnou zásobárnu mazacího oleje určeného k formování filmu v kontaktu s jeho postupným uvolňováním. [23] Toto tvrzení se stalo nejrozšířenější definicí plastických maziv, ale neplatí pro všechny druhy ložisek a za všech provozních podmínek. [16] K prokázání možnosti dosáhnout 2 krát větší tloušťky filmu pomocí plastického maziva, než pouhého základového oleje došlo Wilsonem roku 1979. [24] Podobně zaměřený článek vypovídající o závislosti počáteční tloušťky filmu na koncentraci zahušťovacího mýdla byl publikován roku 1987 Dalmazem a Nantuanem. [25]

2.2.3 Experimentální způsoby měření tloušťky filmu

Dosažení co největší životnosti ložisek lze docílit zajištěním adekvátního přísunu maziva do procesu tření, a tím přispět k tvorbě dostatečného lubrikačního filmu. Za účelem měření lubrikační vrstvy mezi dvěma kontaktními tělesy se v průběhu času vyvinula řada měřidel a měřících postupů, jež využívají různé metody a parametry, které budou dále v této kapitole probírány.

K výpočtu tloušťky mazacího filmu existuje řada analytických modelů využívajících především vztahů pro výpočet viskozity základových olejů při plně zaplavených podmínkách. [27] Tyto modely dosahují v dnešní době značné přesnosti, avšak pro silné nelineární chování plastického maziva v elasto-hydrodynamických podmínkách pozbývá nutnosti tyto predikce tloušťky filmu považovat za plnohodnotné, ale pouze jen jako orientační hodnoty. Z tohoto plyne nutnost provádět mnoho experimentálních měření pro přesně dané plastické mazivo za předem stanovených hodnot teploty, koncentrace atd., neboť i nepatrně malá změna jedné z uvedených vlastností může ovlivnit výsledný mazačí proces a tím i tloušťku lubrikačního filmu. Bohužel veškerá tato měření jsou jak časově, tak finančně velmi zdouhavá a náročná, proto se řada firem distribuujících plastická maziva spokojí s konzervativnějším přístupem analytických modelů s ohledem na jejich nepřesnosti před reálným modelem konkrétního maziva.

K většině možnostem měření tloušťky mazacího filmu, které jsou v této práci zmíněny, není potřeba kompletně celého ložiska. K měření plnohodnotně postačuje prostá, zjednodušená aplikace, kdy se ložisko nahradí za jedno valivé tělísko, nejčastěji kuličku a dráhu, po které se kulička pohybuje, tedy konfigurace ball-on-disk. Do většiny experimentů lze dodat i část distribuční klece pro nasimulování přesnějšího chování uvnitř součásti. [16]



Obr. 2-12 Konfigurace ball-on-disk (převzato a upraveno z [3])

Elektrická kapacita

Měření pomocí elektrické kapacity dává možnost měření tloušťky filmu v kompletních ložiscích, není zde potřeba změna na konfiguraci ball-on-disk, díky čemuž lze dosáhnout přesnějších výsledků. Mezi hlavní výhodu tohoto měření se řadí využití celé škály rychlosti otáčení, a tím docílení reálnějších podmínek, což si u většiny metod dovolit nelze. [27, 28] Použití metody však velmi komplikují výstupní data, která udávají celkovou průměrnou tloušťku filmu, nelze tedy získat hodnoty mezi tělísky a vnějším kroužkem a tělísky s vnitřním kroužkem, či tloušťky filmů pro jednotlivá tělíska. [27, 28] Z výsledků měření v [27] lze považovat chování maziva za nízkých otáček zcela jiné než při otáčkách vysokých, zde tedy nabývá důležitost metody, byť udává pouze orientační hodnoty. [27]

Optické metody

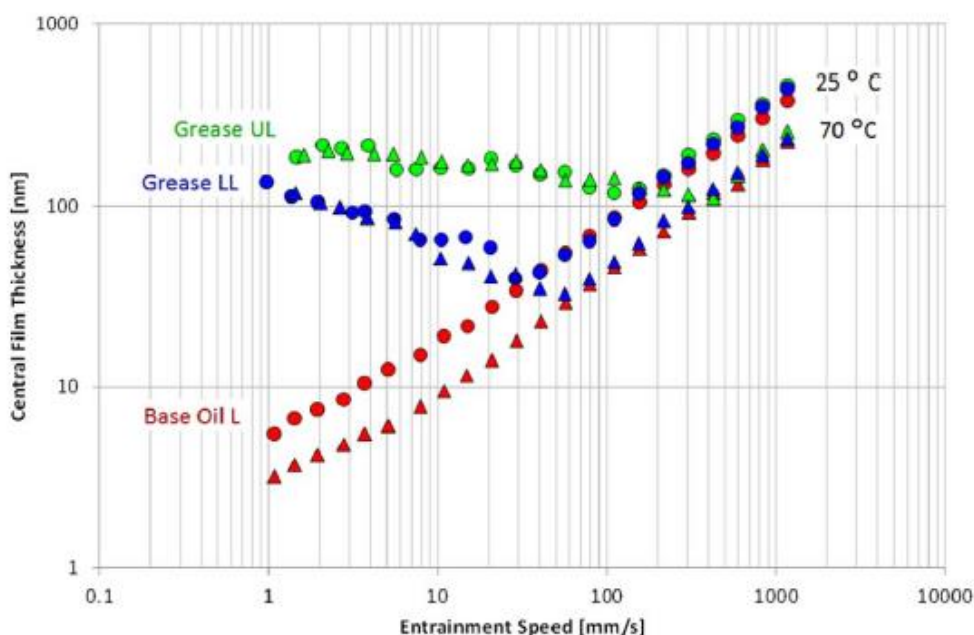
V těchto metodách lze měření zjednodušit na měření jednobodového doteku ball-on-disk a nijak zásadně neovlivnit výsledky experimentů. První použití tohoto zjednodušení bylo u olejových kontaktů [27], přičemž nyní se využívá především pro EHL kontakty s plastickým mazivem. Nutnou podmínkou těchto měření je průhledné, či zčásti světlo propouštějící médium, skrze které lze tloušťku filmu pozorovat pomocí mikroskopu. Optické metody lze rozdělit do několika specializací, které se liší především v užití různých mikroskopů, či světelných zdrojů, zde uvedeno pár příkladů:

- Fluorescence
- Infračervené záření
- Fotometrie, Fotoelasticimetrie
- Elektronová mikroskopie
- Interferometrie

2.2.4 Tvorba tloušťky filmu

V případech užití samotného základového oleje se tloušťka mazacího filmu s rostoucí rychlostí zvětšuje. V teorii EHD se však plastická maziva od této křivky pro základové oleje odchylojí a při nízkých otáčkách vytvářejí silnější mazací vrstvy než za otáček vysokých. Při vysokých otáčkách bude platit rovnost tloušťky filmu jak pro plastická maziva, tak pro základové oleje bez ohledu na složení zahušťovadla, teploty či druhu použitého oleje. [29] Tato odchylka se projeví jako charakteristická křivka tvaru „V“ (viz. obr. 2-13), u které v průběhu zvyšování rychlosti tloušťka filmu klesá do bodu zlomu, kde se stane na malou chvíli konstantní a poté svoji hodnotu opět zvedá. Polohu tohoto bodu zlomu silně ovlivňuje zahušťovací látka. [29]

Za nízkých rychlostí mazivo vypovídá silnou závislost pro tvorbu filmu na typu zahušťovacího mýdla, [29] přičemž zásadním parametrem při plně zaplavených podmínkách se stává jeho dominantní mikrostruktura. [31] Naopak pro vysoké rychlosti tato závislost přechází k základovému oleji, který hlavně ovlivňuje jeho viskozita, a tedy i provozní teplota. [29] Z tohoto vyplývá, že za vysokých otáček jeden základový olej s různými mýdly dojde pokaždé ke stejným hodnotám filmů. Toto chování se děje v důsledku usazování malých zahušťovacích vláken s charakteristickými rozměry do geometrie kontaktních ploch, a tím ovlivňování síly mazacích filmů. Při vysokých otáčkách se vlivem smykového tření a rychlosti otáčení vlákna ničí, a tak začne převládat čistě olejová struktura. [29]



Obr. 2-13 Graf závislosti rychlosti otáčení na tloušťce filmu [29]

Na obr. 2-13 se nachází průběhy změn tlouštěk filmů v závislosti na rychlostech, kterých konfigurace ball-on-disk dosahuje. Zelená barva (Grease UL) značí mazivo na bázi oleje a urey, naopak modré mazivo (Grease LL) oleje a lithia. Z grafu jsou patrné „V“ zlomy, které se při zvyšující se teplotě posouvají do vyšších rychlostí. Ke znázornění hypotézy, že při vysokých rychlostech se tloušťka filmu odvíjí přímo od základového oleje [29], byly do grafu zaneseny jeho červené hodnoty (Base Oil L).

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Při otáčení valivého kuličkového ložiska by nemělo docházet k přímému kontaktu mezi vnějším/vnitřním kroužkem a valivými tělisky (velké tření, teplo, opotřebení), proto dochází k nutnosti tyto dvě součásti od sebe oddělovat mazací vrstvou dostatečné tloušťky shodné nejméně s výškou nerovností povrchu součástí. V průběhu mazacího procesu by se mazivo mělo chovat při vyšších rychlostech, za předpokladu elasto-hydrodynamického mazání při plně zaplavených podmínkách, podobně jako samotný základový olej, tedy se zvyšující se rychlostí by měla růst tloušťka mazacího filmu. Toto „lineární“ stoupání tloušťky filmu však platí až od určitého bodu zlomu, do kterého se mazivo chová velmi odlišně od samotného základového oleje. V tomto popsaném prostoru, za nízké rychlosti, se tloušťka filmu zmenšuje se zvyšující se rychlostí, přičemž nelze pozorovat, co tento pokles při mazacím procesu zapříčiňuje. Specifická oblast, kde dochází k překlopení závislosti popsaného chování, se liší pro každé mazivo a odvíjí se od struktury a typu zahušťovadla. Jeden z hlavních problémů nastává při zjištění vnitřních pochodů maziva, kdy dochází ke změně jeho reologických vlastností.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je zjištění vhodnosti užití fluorescenční metody ke zkoumání složek plastického maziva, a to přesněji základového oleje a zahušťovadla především při nízkých rychlostech.

Separátním sledováním oleje a zahušťovadla v plastickém mazivu pomocí fluorescenčních barviv ukázat příčinu snižování tloušťky mazacího filmu při zvyšující se rychlosti v oblasti nízkých otáček.

Pomocí umělých fluorescenčních barviv zjistit, v jakém poměru složek základového oleje a zahušťovadla se vyskytují plastická maziva ve valivém ložisku v procesu lubrikace při EHD kontaktu za různé rychlosti otáčení.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Příprava maziv

Pro tento výzkum byla stěžejní maziva, která se vyrobila v různých složeních.

Jedná se o tři vzorky maziv obsahující Poly-alfa-olefinový olej s označením PAO8 a různá zahušťovadla.

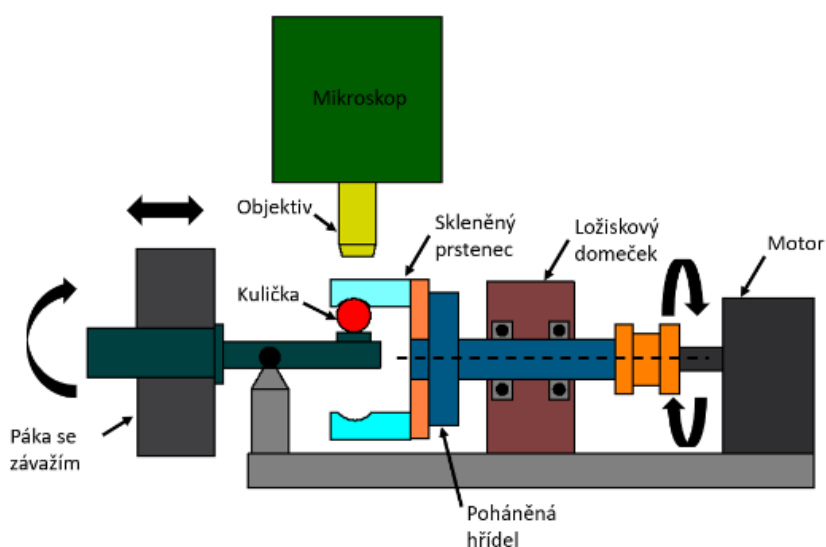
Maziva byla označena následovně:

- Li-1CP obsahující lithiové zahušťovadlo
- Urea-1CP obsahující ureu v hrubém provedení
- Urea-2CP obsahující ureu ve velmi jemném provedení

Výroba maziv spočívala v principu, kdy se za zvýšené teploty do PAO8 vmíchalo fluorescenční barvivo Pyren a Kumarin. Barvivo Pyren se váže na strukturu olejové složky maziva a po přidání složek zahušťovadla, které vzniká přímo až mícháním v oleji se barvivo Kumarin naváže na jeho mikrostrukturu. Suroviny zahušťovadla se do oleje přidávají tak, aby se docílilo poměru složek 80 % základového oleje a 20 % zahušťovadla.

4.2 Použité experimentální zařízení

Ke správnému provedení experimentu je zapotřebí odpovídajícího vybavení, které v této kapitole bude dále popsáno. Sestavení aparatury lze vidět níže na celkovém schématu.



4.2.1 Kamera

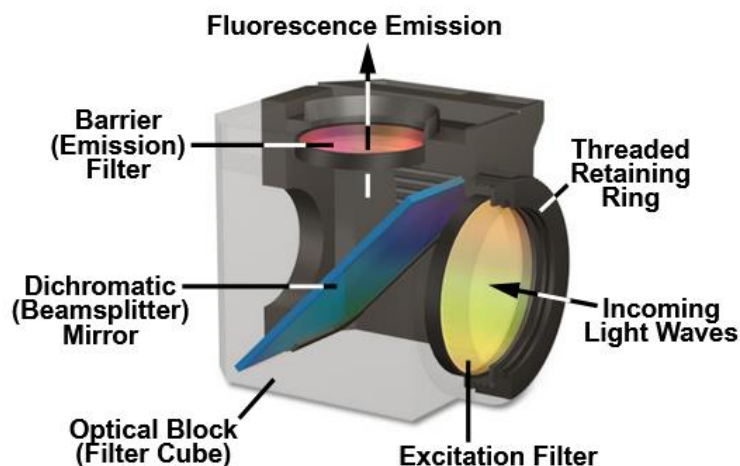
V experimentu byla užita digitální fluorescenční kamera Neo 5.5 sCMOS. [35] Jedná se o kameru hojně používanou pro zaznamenávání velmi tmavých ruchů, toto umožňuje její vysoká citlivost na tmavé podněty. [35] Kamera pořizuje snímky v chromatickém spektru. Pro zobrazování barev je potřeba užít speciálních softwarů dodávaných spolu s kamerou. Chlazení takto výkonné kamery se provedlo speciálním chladičem, který umožní snížit teplotu na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, provozní teplota kamery, za které bylo pořizováno měření, byla $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velikost jednoho pixelu kamery je $6,5\text{ }\mu\text{m}$ s tím, že kamera pořizuje snímky v 16 bitovém režimu.

4.2.2 Světelné zdroje

V experimentu byly použity kvůli dvěma různým fluorescenčním barvivům i dva odlišné světelné zdroje. V případě měření Kumarinu se užilo ultrafialové led diody, jež se skládala z kolimačního adaptéru s označením COP5-A a zdroje světelného paprsku s označením M415L4 od firmy Thorlabs [36] o nominální emitované vlnové délce 415 nm . [36] V případě měření Pyrenu se muselo užít rtuťové lampy od společnosti Nikon model LH-M100C-1, která mimo jiné dodává vzorku světlo o vlnové délce okolo 365 nm . [10]

4.2.3 Dichroická kostka

Dichroická kostka je speciální druh použití filtrů propouštějících světlo, jež dokážou světlo o určité vlnové délce propouštět skrze filtr v jednom směru a světlo o jiné vlnové délce odrazit do směrů jiných. [37] Tento princip se nejčastěji užívá u fluorescenčních mikroskopů, kde světlo prochází přes excitační filtr do optické kostky, ve které se odrazí o dichroické zrcátko tak, aby dopadalo na vzorek. Následně vyemitované světlo, které je díky Stokesovu zákonu o delší vlnové délce, projde daným emisním filtrem do kostky a přes dichroické zrcátko bez odražení dále do kamery mikroskopu. Tímto způsobem lze sledovat pouze světlo, které odpovídá emisnímu světlu vzorku. Účinnost těchto zrcátek se pohybuje kolem 90% , to znamená, že 90% světla, které zrcátko reflektuje, se odrazí a zbylých 10% zrcátkem projde skrz a naopak. [37]

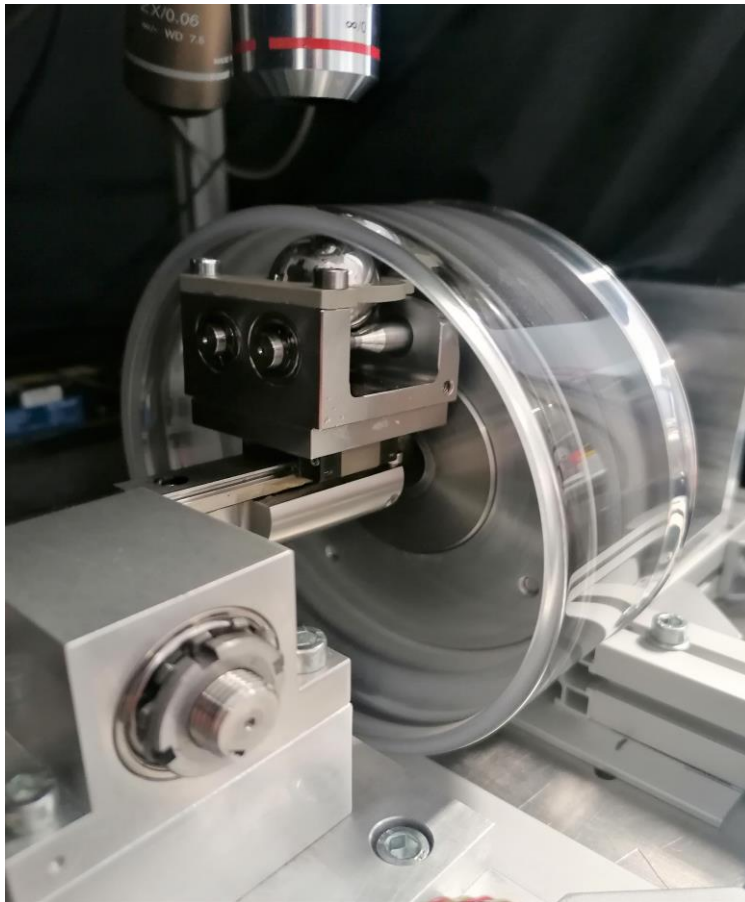


Obr. 4-2 Schéma dichroického zrcátka [12]

4.2.4 Simulátor valivého ložiska

V experimentu se užilo konfigurace ball-on-disk, kde se disk zaměnil za skleněný kroužek se shodnou geometrií reálného ložiska. Skleněný kroužek byl vyroben ze skla s označením BK-7 glass, jehož vlastnosti jsou pro provedení experimentů plně dostačující, např. modul pružnosti v tahu nabývá hodnoty 82 GPa. Vnitřní poloměr ložiska je 67,7 mm, přičemž drážka, ve které se hýbe kulička, má poloměr 13,2 mm. Po těchto poloměrech se odvaluje kalená ocelová palcová kulička, průměr kuličky 25,4 mm, jejíž ukotvení se provedlo pomocí dvou rotačně uložených hřídelek, jež je patrné z obrázku 4-3. Pro navození realističtějších podmínek se kulička opatřila plastovou klecí, která zajišťuje pravidelný přísun a distribuci maziva do kontaktu.

Samotná rotace celého experimentu se zakládá na otáčení vnějšího skleněného kroužku, který je nalisován na hřídel spojenou s elektromotorem o převodovém stupni 5. Pohyb kuličky se způsobí následným odvalováním po již rotujícím kroužku s tím, že kulička se přes závaží na páce přitlačuje do kontaktu, a tím vyvozuje tlak na skleněný kroužek.



Obr. 4-3 Vnější kroužek valivého ložiska v kontaktu s kuličkou

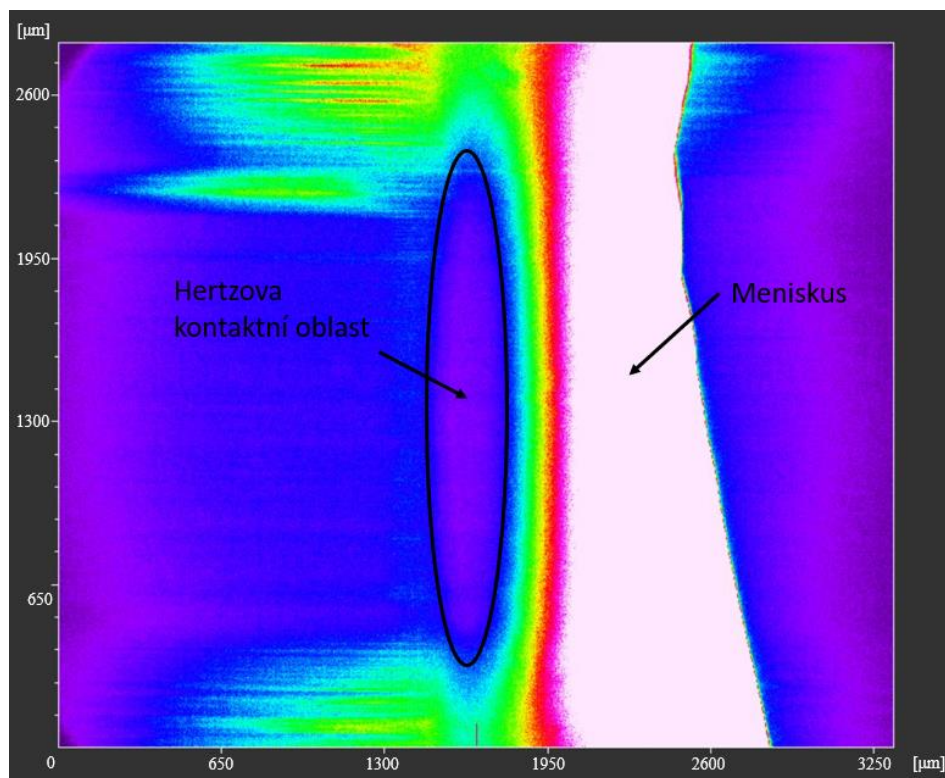
4.3 Provedení experimentu

4.3.1 Parametry experimentu

Důležitou součástí experimentu se stává volba parametrů a jejich dodržování od počátku provádění měření až do úplného konce. Tato kapitola shrne a popíše všechny parametry, které byly v průběhu experimentu sledovány a striktně dodržovány.

- Teplota – Při experimentu se teplota udržovala v rozmezí 24–25 °C, nastávalo častých výkyvů, kdy pod měřicím stanem docházelo k jejímu zvyšování v důsledku vyzařování tepla od měřicí aparatury, např. rtuťové lampy. Zde vznikla dočasná nutnost stan otevřít s přerušením experimentu a vyvětrat místnost, aby teplota nebyla překročena, neboť při překročení teploty, byť jen o půl stupně, může dojít k podstatné změně viskozity maziva a k ovlivnění celého experimentu.

- Zátěžná síla – Hodnota síly působící v kontaktu byla během celého experimentu nastavena konstantně díky závaží uloženému na pákovém rameni, které vyvozovalo sílu v kontaktu o hodnotě přibližně 100 N, tato síla odpovídá zhruba tlaku 0,5 GPa. [39]
- Hladovění – Experiment se prováděl výhradně při plně zaplavených podmínkách a hladovění kontaktu, tedy nedostatek maziva se nesměl dopustit. Projevení hladu se zabráňovalo postupným dodáváním nového plastického maziva, popř. přemístěním již vytlačeného maziva, které valivý element přesunul do okolí ložiska zpět do kontaktu. Projev mezního hladovění lze pozorovat na nadcházejícím obrázku, kdy meniskus dosahuje cca jednonásobku vodorovné velikosti Hertzovy kontaktní oblasti, tomuto jevu se snažíme zásadně vyhnout a udržovat tuto hodnotu menisku dvojnásobně nebo výše.



Obr. 4-4 Hladovějící kontakt

4.3.2 Průběh experimentu

Při provádění experimentu se na valivou kuličku a do jejího blízkého okolí (klec) aplikovalo přiměřené množství testovaného vzorku plastického maziva, které se v průběhu experimentu postupně doplňovalo. Po zasunutí kuličky do simulátoru se kulička nechala krátkou dobu při středních otáčkách odvalovat, aby se její pojezdová dráha plně a kontinuálně zaplavila mazivem. Po provedení této operace následovalo odkrytí světelného paprsku, který se přes dichroické zrcátko odráží na vzorek. Kvůli postupné ztrátě emitačního záření se průchod paprsku otevíral pouze při pořizování snímků, v ostatních případech se stalo nutností průchod paprsku uzavírat, aby nedocházelo k permanentnímu ozařování a předešlo se vysvěcování vzorků. Při měření Pyrenového barviva navíc docházelo k nutnosti tento vzorek po krátkou dobu, cca 5 min, ozařovat UV světlem pro stabilizování jeho emisivity, která s časem ozařování chvíli roste a poté se stává konstantní.

Po otevření průchodu se musí ložisko roztočit na zadanou rychlost. Experiment byl zaměřen především do oblasti nižších rychlostí, kde se provedlo více měřených kontrolních bodů než při rychlostech vyšších.

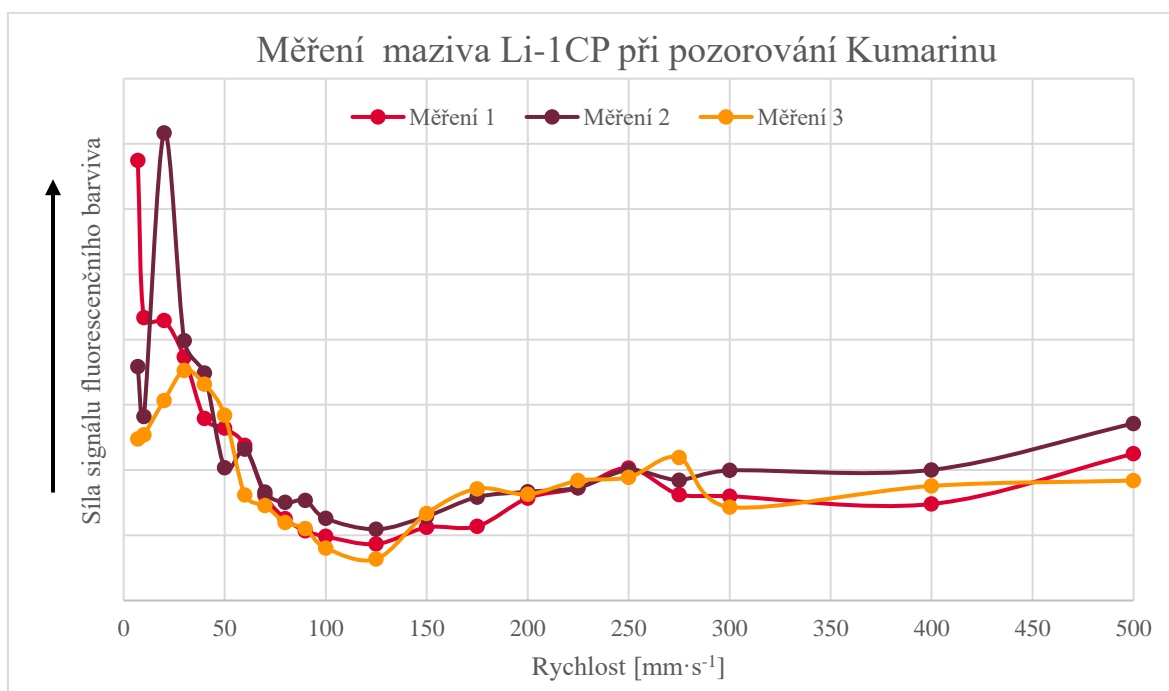
Díky Stokesovu posunu světlo, které vyzáří vzorek, dosáhne jiné vlnové délky než světlo od zdroje záření, dichroické zrcátko tedy umožní tomuto světlu projít až do kamery, aniž by se odrazilo. K pořizování snímků a jejich následnému vyhodnocování se využilo programu Andor solis, jenž umožní z čistě černobílého čipu v kameře interpretovat data v barevných spektrech na monitoru. Na kameře se nastavilo kinematické pořizování snímků s počtem snímků 100 a dobou expozice 0,00999707 s. Dobou expozice se rozumí doba, při které kamera otevře čočku pro sběr dat. Posléze doba jejich následného vyhodnocování (readout), tento čas zůstává zhruba konstantní pro různé počty snímků. Součet času expozice a readoutu se nazývá framerate. Tento čas především ovlivňuje nastavená doba expozice, čím bude menší, tím větší podíl zabere readout z čehož plyne mnohem méně dat. Expozice se nastavovala tak, aby signál získaného světla nabýval hodnot 1000 a více. Tuto hodnotu signálu lze dále regulovat biníngem, jehož vedlejší účinek způsobí snížení rozlišení. V experimentu se biníng nastavil na 2x2, kdy software zprůměruje hodnoty signálu v oblasti 2x2 pixelů, což vede ke zlepšení signálu, ale zhoršení kvality. Tímto způsobem lze i zmírnit šum pozadí, který je nutno na konci provedení experimentu od naměřených hodnot odečíst k získání čistých dat nezatížených chybou pozadí, ve kterém byly měřeny.

Ze získaných 100 snímků daného měření se vybrala charakteristická oblast pro všechny rychlosti shodná, a to oblast Hertzova kontaktu. Z ní se dostalo 100 reprezentativních hodnot, které se následně zprůměrovaly a zanesly do odpovídajících grafů. Na konci měření se všechna použítá měřící aparatura očistila a vyleštila pomocí isopropylalkoholu, který rozpouští tuky.

5 VÝSLEDKY

5.1 Opakovatelnost a základní princip měření

Pro každé barvivo v odpovídajícím mazivu se provedla tři na sobě nezávislá měření, kdy se mazivo mezi těmito měřeními vždy z ložiska očistilo a nanasla se dávka nová. Shodným způsobem se postupovalo při měření jiného barviva ve stejném mazivu, přičemž se nejen mezi měřeními vyměnil světelný zdroj, ale i mazivo v ložisku samotném.

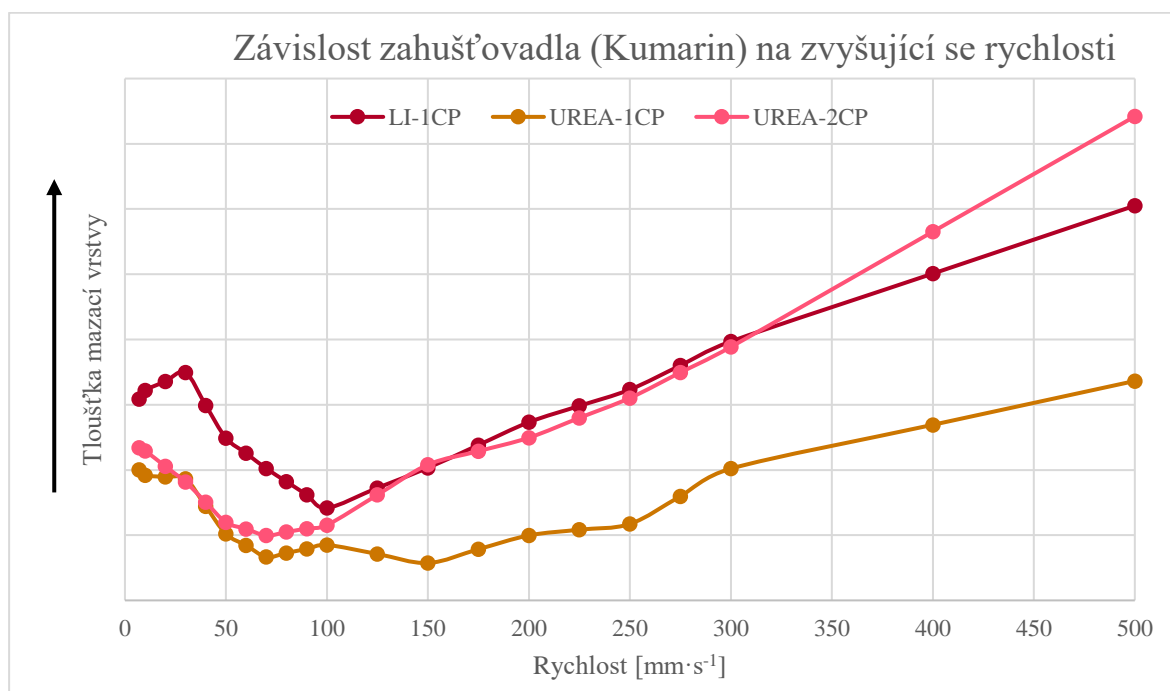


Obr. 5-1 Graf plastického maziva Li-1CP při pozorování fluorescenčního barviva Kumarin –změřené hodnoty

V grafu na obr. 5-1 jsou zaneseny tři na sobě nezávislá pozorování složky zahušťovadla pomocí barviva Kumarin pro plastické mazivo na lithné bázi. Díky charakteristickým rysům průběhu všech tří měření lze dedukovat, že za stejných měřicích podmínek se bude dosahovat vždy převážně podobných křivek chování. Pouze v oblasti nízké rychlosti hodnoty signálu závratně kolísají. Tento jev je způsobován pomalou rychlostí, ve které každá větší částice zahušťovadla dostávající se do kontaktu skokově zvýší celkově obdržovaný signál. Díky pomalé rychlosti se na snímku tato částice zobrazí mnohem delší čas než za rychlostí vyšších, kde kontaktem projde vícenásobně rychleji a výsledný signál na sto snímkách měření do takové míry neovlivní.

5.2 Naměřené hodnoty

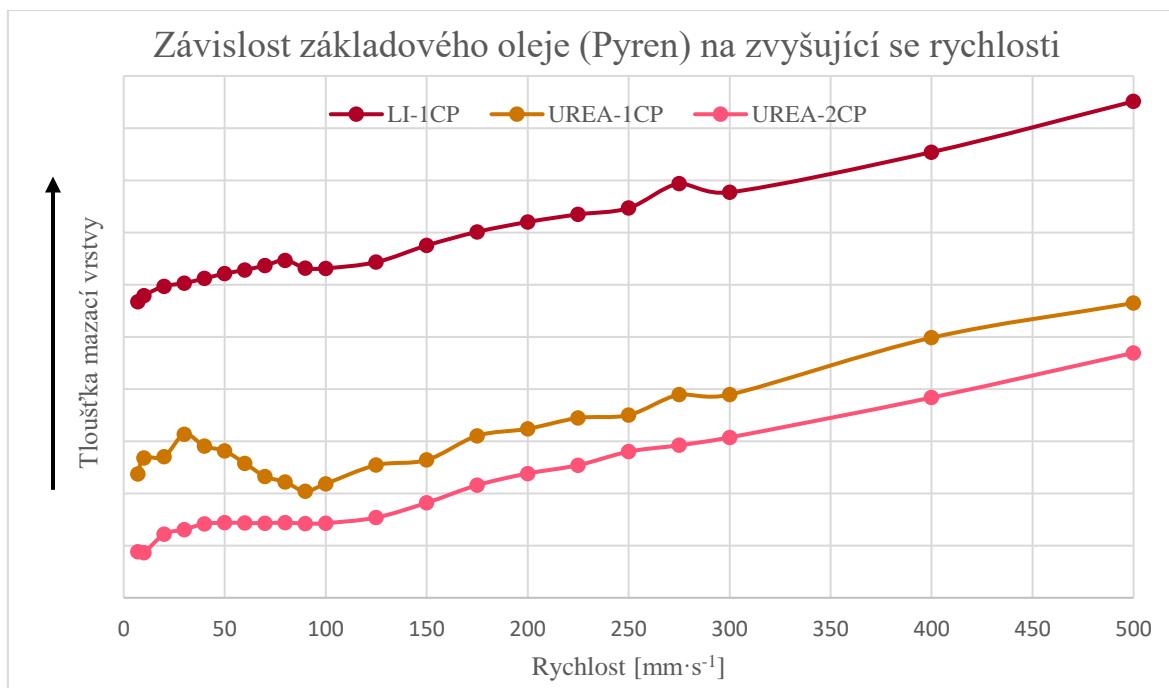
Celkově se provedlo 18 na sobě nezávislých měření, tedy 6 pro každé mazivo, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, a tyto hodnoty se následně zprůměrovaly. V grafu na obr. 5-2 lze pozorovat zprůměrovaná měření složky zahušťovadla (Kumarin) pro všechny typy maziv za různých rychlostí pozorování, od kterých se odečetla referenční hodnota pozadí.



Obr. 5-2 Graf zprůměrovaných dat zahušťovací složky plastického maziva (Kumarin) v závislosti na rychlosti

Z grafu lze do jisté míry vyčíst, že do bodu zlomu „V“ mazací tloušťka filmu klesá při pozorování v závislosti na zahušťovadle. Tento zlom se nachází pro každé mazivo za odlišné rychlosti, např. pro mazivo na bázi lithia se „V“ zlom nachází v rychlosti $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Při pozorování maziva Urea-1CP tento ostrý přechod není vůbec zřejmý a mazivo se pohybuje po určitou dobu kolem „stálé“ hodnoty mazací tloušťky filmu, než při rychlosti $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ začne opět směrodatně růst.

Z grafu na obr. 5-3 lze naopak pozorovat závislost základové složky oleje v procesu mazání, kdy se pozoruje fluorescenční barvivo Pyren. V průběhu zvyšující se rychlosti z grafu vyplývá, že základový olej zvětšuje mazací tloušťku filmu kontinuálně stoupající křivkou v průběhu celého procesu, kde se nejvíce jeho přínos na tvorbu vrstvy projeví za vyšších rychlostí. Data v grafu byla opět zprůměrována a byla od nich odečtena referenční hodnota okolí, aby se dostalo čistých dat nezatížených chybou světla z pozadí.



Obr. 5-3 Graf zprůměrovaných dat základového oleje plastického maziva (Pyren) v závislosti na rychlosti

5.3 Vliv zahušťovadla

Aby se zjistilo, do jaké míry se zahušťovadlo účastní procesu mazání, zvolil se předpoklad, že se za vyšších rychlostí mazivo chová podobně jako za normálního atmosférického tlaku. Jeho účast v procesu mazání se rozdělí stejně jako jeho složení, tedy 80 % základového oleje a 20 % zahušťovací složky. Tento předpoklad se stanovil zhruba od rychlosti 150 mm·s⁻¹.

Poččetně se tento předpoklad provedl tak, že se vzala nejmenší hodnota signálu barviva Pyren daného maziva a touto velikostí se vydělily všechny hodnoty Pyrenu. Tímto krokem se dostalo koeficientu, který udává, kolikrát se musí zvětšit nejmenší hodnota tak, aby se dostalo hodnot naměřených.

$$k_i = \frac{P_i}{\min(P_i)} \quad (1)$$

k_i – koeficient násobku

P_i – hodnota signálu barviva Pyren, např. P_{150} – hodnota signálu pro rychlost 150 mm·s⁻¹

$\min(P_i)$ – minimální hodnota ze všech měřených signálů barviva Pyren

i – číslo odpovídající rychlosti měření, nabývá hodnot 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 400 a 500

Tímto koeficientem se následně podělily naměřené hodnoty barviva Kumarinu.

$$C_{ki} = \frac{C_i}{k_i} \quad (2)$$

C_{ki} – teoretické hodnoty Kumarinu

C_i – naměřené hodnoty signálu barviva Kumarinu

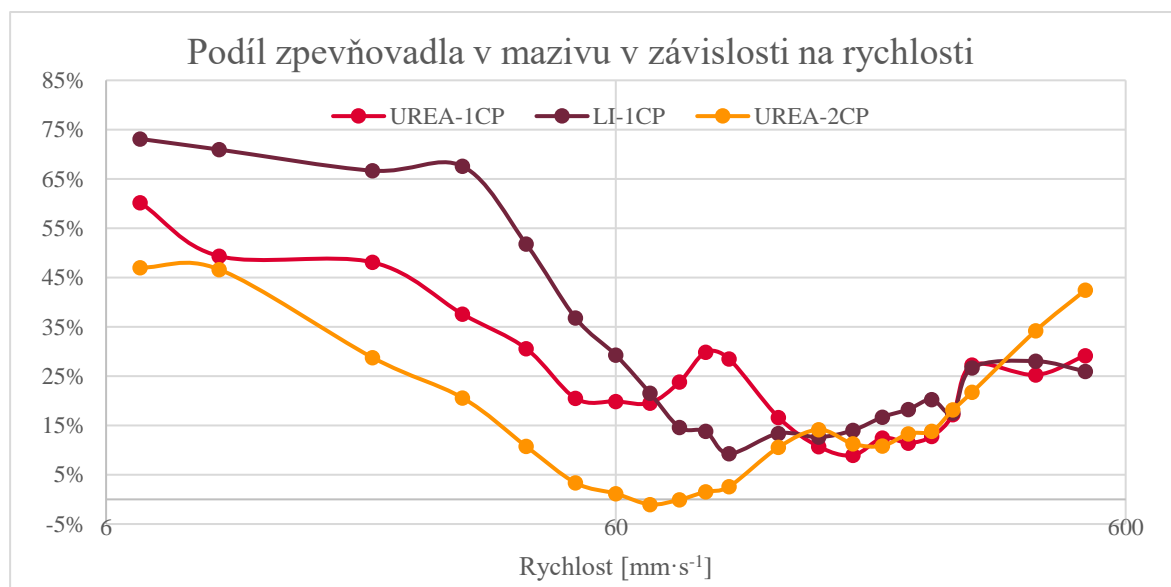
Tyto získané hodnoty Kumarinu zmenšené koeficientem, se následně vydělí aritmetickým průměrem těchto hodnot v oblasti vyšších rychlostí, tedy v rozmezí od 150 do 500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, a následně se od nich odečte hodnota 0,8, tedy předpoklad složení.

$$Z = \frac{C_{ki}}{\overline{C_{k150-k500}}} - 0.8 \quad (3)$$

Z – procentuální podíl zpevňovadla v mazivu [%]

$\overline{C_{k150-k500}}$ – aritmetický průměr hodnot Kumarinu mezi rychlostmi 150 až 500 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Tímto způsobem se získalo procentuálního podílu zahušťovadla v procesu mazání v této práci. Tento postup se provede separátně pro hodnoty každého maziva.



Obr. 5-4 Graf průběhu podílu zpevňovadla v mazivu v závislosti na rychlosti

Na grafu lze pozorovat tři procentuální průběhy zahušťovadel za různých rychlostí, jež se zkoumaly v této bakalářské práci. Křivky vypovídají silnou závislost zahušťovadla za nízké rychlosti na tvorbě tloušťky filmu oproti oblasti za rychlosti vyšší.

Následně se nachází popis jednotlivých křivek:

- Mazivo Li-1CP, tedy mazivo o základu lithného zahušťovadla, se chovalo dle předpokladu, který plyne z rešeršní části práce. Pozoruje se silná závislost zahušťovadla v oblasti nízké rychlosti, kdy tato závislost prudce klesá do rychlosti cca $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, kde dochází k bodu zvratu „V“, od kterého již procentuální podíl zahušťovadla nemá tak strmou směrnici jako v oblasti nízké rychlosti.
- Mazivo Urea-1CP, tedy mazivo o základu zahušťovadla Urea, jež se vyznačuje velmi hrubou mikrostrukturou, se opět chovalo dle předpokladů o chování plastického maziva. Pozoruje se silná postupně klesající závislost zahušťovadla na tvorbě mazacího filmu do oblasti v rozmezí 60 až $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, kde tato hodnota lehce kolísá a po překročení hranice $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ tato závislost začíná opět stoupat se směrnici menší než při nízkých rychlostech.
- Mazivo Urea-2CP, tedy mazivo o základu zahušťovadla Urea, jež se vyznačuje velmi jemnou mikrostrukturou, se nechovalo podle očekávání. Přestože se pozoruje silná závislost zahušťovadla na tvorbě mazací vrstvy za nízké rychlosti, mazivo dle zvolené teorie výpočtu vykazuje bod zlomu „V“ v okolí -1% , což je ve skutečnosti nereálné. Celkově mnoho hodnot v okolí „V“ zlomu dosáhne hodnoty 5% , což již vypovídá o špatných hodnotách či chování. Stejně zvláštní chování platí pro chování maziva po bodu zlomu, kdy mazivo stoupá skoro ekvivalentní směrnici, jako klesá.

6 DISKUZE

6.1 Vnější vlivy

Tato podkapitola primárně řeší zanesení vnějších vlivů do provedeného experimentu, ke kterým mohlo dojít z důvodu nepozornosti, či nedokonalého měřícího zařízení a měnicích se podmínkách v průběhu měření.

Teplota

Jak již jednou bylo v této práci zmíněno, zásadní vliv na chování viskozity maziva má teplota, při které se experiment provádí. Se zvyšující se teplotou se mazivo začíná chovat viskózněji a odlišně ze své mikrostruktury vylučuje základový olej. Experiment byl prováděn v rozmezí teplot 24 až 25 °C, přičemž i takto malý rozptyl teplot způsobí možné výkyvy v jednotlivých bodech měření maziva. Tento rozptyl teplot, pokud je zanedbáno vznikající teplo přímo z kontaktu, byl způsoben okolní měřící technikou a pomocnou aparaturou, která se společně s měřícím vzorkem nachází pod plachtou měřícího stanu, a tak vyzářené teplo nemůže odcházet do okolí a zůstává přímo v měřeném prostoru. Největší teplotní změny se projevovaly při měření barviva Pyren, kde rtuťový světelný zdroj vykazoval zásadní ovlivnění teploty ve stanu. Zde docházelo k nutnosti stan na pár chvil odkrýt a přerušit experiment, aby se teplota stabilizovala s klimatizovanou teplotou v laboratoři. I toto chvilkové přerušení též může do výsledných měření zanést určité chyby.

Světelné pozadí

Dalším možným jevem, který ovlivnil experiment, se stala míra zatažení krycího stanu, přičemž tato míra znamenala množství světla propuštěného z laboratoře. Toto světlo silně ovlivní hodnotu pozadí měřeného snímku, tedy jeho „referenční nulu“ použitou při výpočtech. Stan nemohl zůstat celou dobu nedotknutelně uzavřen, ať už kvůli vypínání průchodu světelného zdroje přímo na mikroskopu, větrání teploty, či dodatečné aplikaci maziva kvůli hladovění. Obsluha po každém otevření stan pečlivě uzavřela, i přesto se tato hodnota pozadí může nepatrně změnit a zanést chyby do měření. Prevencí proti těmto chybám se stává pořizování snímků čistého pozadí po každém otevření a uzavření stanu a následný odečet těchto hodnot pozadí od měřených dat barviva. Pro bakalářskou práci byly tyto světelné ztráty zanedbány a odečetla se pouze referenční nula změřená na počátku experimentu.

Délka experimentu

Parametrem ovlivňujícím hodnoty se stala i délka provádění experimentu, přičemž čím déle se experiment prováděl tím nižší hodnoty signálu byly získány. Tuto ztrátu dat především ovlivňovalo vysvěcování vzorku od světelného paprsku a doba, po kterou se nechalo ložisko rotovat za dané rychlosti, čímž začalo hladovět. Při provádění experimentu bylo zřejmé, že při pořizování více měření sériově za sebou při ekvivalentní rychlosti otáčení vykazovaly hodnoty signálu za nízké rychlosti minimální kolísání hodnot oproti rychlostem vyšším, kdy po krátké době začalo rychle docházet k projevu hladovění a nárůstu signálu. Těmto ztrátám se zabráňovalo rychlým vypnutím motoru po pořízení měřících snímků a uzavřením clony světelného paprsku. Za vyšších rychlostí se navíc po provedení měření pro danou rychlost dodalo nové mazivo, aby se předešlo rychlému hladovění.

6.2 Vliv maziv

- Mazivo Li-1CP se, jak již bylo řečeno, chová dle očekávání. Ze směrnice poklesu lze pozorovat lehký výstup z řady klesajících hodnot u rychlosti $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento vzestup může být způsobený dodáním nového plastického maziva, popř. jedním z důvodů zmíněných výše. Po bodu zlomu směrnice již tolik nestoupá a lze tedy konstatovat, že od rychlosti $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ má zásadní podíl na tvorbu mazacího filmu základový olej, jehož vliv byl do této rychlosti téměř zanedbatelný.
- Mazivo Urea-1CP se opět chová dle očekávání pozorovatele. Ze směrnice poklesu z grafu (obr. 5-4) zásadně vyčnívá bod v rozmezí hodnot 80 až $120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, který byl způsoben aplikací dodatečného malého množství maziva do kontaktu v procesu jednoho z měření, kdy se touto aplikací zabránilo hladovění kontaktu, které se při rychlosti $80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ silně projevilo u jednoho z konkrétních měření. Kvůli průměrování dat pouhých tří měření tento jednorázový výkyv silně ovlivnil výslednou zprůměrovanou křivku. Lze konstatovat, že tento náhlý skok je jednorázová událost, u které se zná příčina, a proto se tento pík dá zanedbat a říci, že mazivo se v této oblasti chová se stejnou směrnicí jako jeho okolí, což vyplývá z dalších dvou měření. Po překročení rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ se opět pozoruje méně strmá směrnice podílu zahušťovadla v procesu mazání, a lze tedy tvrdit, že větší podíl za vysokých rychlostí přebírá olej.
- Mazivo Urea-2CP vykazuje zvláštní chování, jak již bylo popsáno ve výsledcích, kde příčinou tohoto specifického chování by se mohla stát skutečnost, že zahušťovadlo přimíchané do maziva obsahuje tak velmi jemnou mikrostrukturu, že se při spojení jedná skoro o čistý olej (kapalinu), a proto dochází k takto nízkým hodnotám. Nebo naopak mohlo dojít k silnému ovlivnění vnějšími vlivy. Cílem bakalářské práce však není zkoumat důvody tohoto specifického chování, ale zjistit využití fluorescenční metody.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo zjištění, zda lze pozorovat složky plastického maziva v simulátoru valivého ložiska pomocí metody fluorescenční mikroskopie při elasto-hydrodynamických mazacích podmínkách.

Pomocí experimentů s využitím fluorescenční mikroskopie bylo prokázáno, že lze separovaně pozorovat zahušťovadlo a základový olej ve struktuře plastického maziva. Experimenty s využitím fluorescence u dvou ze tří vzorků prokázali charakteristickou „V” křivku, kde se v nízkých rychlostech zvyšuje podíl zahušťovadla. U třetího vzorku toto chování pozorováno nebylo. Nicméně vzorek vykazuje velmi specifické chování a problém tak může být spíše v mazivu než v metodě. Celkově lze tedy konstatovat, že fluorescenční metodu se dá využívat pro pozorování složek plastického maziva v simulátoru valivého ložiska a tuto metodu je možné používat pro další výzkumy chování plastických maziv.

Dále by se na tuto práci dalo navázat bližším zkoumáním chování těchto maziv za různých teplot, tlaků, zátěže, či změně typu mazání, např. na hladovění. Popřípadě zjištěním, proč se mazivo Urea-2CP chová odlišně.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LUGT, Piet M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology transactions*. PHILADELPHIA: Taylor & Francis Group, 2009, vol. 52, issue 4, s. 470-480. ISSN 1547-397X.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402000802687940>
2. LUGT, P. M a G. E MORALES-ESPEJEL. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. *Tribology transactions*. PHILADELPHIA: Taylor & Francis Group, 2011, vol. 54, issue 3, s. 470-496. ISSN 1547-397X.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402004.2010.551804>
3. KOSTAL, David, Shugo ONITSUKA, Hiroyoshi TANAKA, Joichi SUGIMURA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Use of Pyrene for Quantitative Fluorescence Observation of Li-Grease around EHL Contacts. *Tribology online* [online]. Tokyo: Japanese Society of Tribologists, 2020, vol. 15, no. 3, s. 117-125 [cit. 2021-10-15]. ISSN 1881-2198.
Dostupné z: <https://doi.org/10.2474/trol.15.117>
4. NECAS, David, Petr Sperka, Martin Vrbka, Ivan Krupka, Martin Hartl. Film thickness mapping in lubricated Contacts using fluorescence. *MM Science Journal* [online]. 2015, vol. 2015, Issue December, s. 821-824 [cit. 2021-10-25]. ISSN 18031269.
Dostupné z: http://doi.org/10.17973/MMSJ.2015_12_201524
5. LICHTMAN, Jeff W a José-angel CONCHELLO. Fluorescence microscopy. *Nature methods*. BERLIN: NATURE PORTFOLIO, 2005, vol. 2, no. 12, s. 910-919. ISSN 1548-7091. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nmeth817>
6. MCKENZIE, Samuel. The history of fluorescence microscopy. In: AzoNetwork. *News-Medical.net* [online]. Nov 21, 2018. [cit. 2022-01-16].
Dostupné z: <https://www.news-medical.net/life-sciences/The-History-of-Fluorescence-Microscopy.aspx>
7. RENZ, Malte. Fluorescence microscopy—A historical and technical perspective. *Cytometry. Part A*. HOBOKEN: WILEY, 2013, vol. 83, Issue 9, s. 767-779. ISSN 1552-4922. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cyto.a.22295>
8. VALEUR, Bernard a Mário N BERBERAN-SANTOS. A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the Emergence of Quantum Theory. *Journal of chemical education*. WASHINGTON: American Chemical Society and Division of Chemical Education, 2011, vol. 88, Issue 6, s. 731-738. ISSN 0021-9584. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1021/ed100182h>

9. OTSU, Takefumi a Keiji IMADO. Study on Changes in the Rheologic Properties of EHL Film Using Fluorescence Measurements. *Tribology letters*. New York: Springer US, 2018, Vol. 66, Issue 1, s. 1-10. ISSN 1023-8883.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11249-018-0983-4>
10. SMART, A.E a R.A.J FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*. Elsevier B.V, 1974, vol. 29, Issue 1, s. 41-47. ISSN 0043-1648.
Dostupné z: [https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648\(74\)90132-X](https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648(74)90132-X)
11. CHRISTIE, Robert M a Chih-hung LUI. Studies of fluorescent dyes: part 1. An investigation of the electronic spectral properties of substituted coumarins. *Dyes and pigments*. OXFORD: Elsevier, 1999, vol. 42, Issue 1, s. 85-93. ISSN 01437208.
Dostupné z: [https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/S0143-7208\(99\)00012-1](https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/S0143-7208(99)00012-1)
12. SPRING, Kenneth R. a Michael W. Davidson. Introduction to fluorescence microscopy. In: Nikon. *Microscopyu* [online]. Nikon Instruments, © 2021 [cit. 2022-01-22].
Dostupné z: <https://www.microscopyu.com/techniques/fluorescence/introduction-to-fluorescence-microscopy>
13. LUGT, Piet M. A review on grease lubrication in rolling bearings. *Tribology & lubrication technology*. PARK RIDGE: SOC TRIBOLOGISTS & LUBRICATION ENGINEERS, 2010, Vol. 66, Issue 7, s. 44-56. ISSN 1545-858X.
Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/728629219?pq-origsite=primo>
14. PETROVA, Dina. *Fluorescence Nanoscopy: Applications in tribology*. Amsterdam, 2019, 162.
Dostupné z: <https://hdl.handle.net/11245.1/8a44cf9a-7d36-4c89-9605-4ebccde6e3ce>.
Disertační práce. Univerzity of Amsterdam. Vedoucí práce A.M. Brouwer
15. Scott Prahla a Steve Jacques. *OMLC* [online]. Portland, Oregon medical laser center, 2018 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://omlc.org/index.html>
16. LUGT, PIET M, Slavco VELICKOV a JOHN H TRIPP. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology transactions*. PHILADELPHIA: Taylor & Francis Group, 2009-09-08, Vol. 52, Issue 5, s. 581-590. ISSN 1040-2004.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10402000902825713>
17. CANN, P M, B P WILLIAMSON, R C COY a H A SPIKES. The behaviour of greases in elastohydrodynamic contacts. *Journal of physics. D, Applied physics*. Bristol: IOP Publishing, 1992-01-14, Vol. 25, Issue 1, s. A124-A132. ISSN 0022-3727.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/1A/020>

18. FREDERICK WILLIAM HERSCHEL, John. "Amorphota" [Greek], No. "I." - On a Case of Superficial Colour presented by a homogeneous liquid internally colourless. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. London: Royal Society of London, 1845, Vol. 135, Issue 1, s. 143. ISSN 0261-0523. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/108266>
19. STOKES, G. G. On the Change of Refrangibility of Light. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. London: The Royal Society, 1852, Vol. 142, Issue 2, s. 463-562. ISSN 0261-0523. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1852.0022>
20. STOKES, G. G. On the Change of Refrangibility of Light. No. II. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. London: The Royal Society, 1853, Vol. 143, Issue 3, s. 385-396. ISSN 0261-0523. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/108570>
21. SMART, A.E a R.A.J FORD. Measurement of thin liquid films by a fluorescence technique. *Wear*. Elsevier B.V, 1974, Vol. 29, Issue 1, s. 41-47. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648\(74\)90132-X](https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648(74)90132-X)
22. FORD, R.A.J a C.A FOORD. Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films. *Wear*. Elsevier B.V, 1978, Vol. 51, Issue 2, s. 289-297. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648\(78\)90267-3](https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/0043-1648(78)90267-3)
23. BOOSER, E.R a D.F WILCOCK. Minimum oil requirements of ball bearings. *Lubrication Engineering*. Thomson laboratory of GE, 1953, Vol. 9, Issue 3, s. 140-143 a 156-158. Dostupné z: https://archive.org/details/sim_tribology-lubrication-technology_1953-06_9_3/page/142/mode/2up
24. WILSON, A.R. Relative thickness of grease and oil films in rolling bearings. *Proceedings – Institution of Mechanical Engineers*. 1979, Vol. 193, Issue 1, s. 185-192. ISSN 0020-3483. Dostupné z: https://doi.org/10.1243%2FPIME_PROC_1979_193_019_02
25. DALMAZ, Gerard a Rene NANTUA. Evaluation of grease behavior in rolling bearings contacts. *Lubrication Engineering*. 1987, Vol. 43, Issue 12, s. 905-915. ISSN 0024-7154. Dostupné z: www.scopus.cz
26. WALTHER, H. Bauer, Alfred P. FINKELSTEIN and Stephen E. WIBERLEY. ASLE Trans. Flow properties of lithium stearate-oil model greases as functions of soap concentration and temperature. *Wear*. Elsevier B.V, 1961 Vol. 4, s. 322-323. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [doi:10.1016/0043-1648\(61\)90190-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90190-9)
27. CEN, Hui a Piet M LUGT. Film thickness in a grease lubricated ball bearing. *Tribology international*. OXFORD: Elsevier, 2019, Vol .134, s. 26-35. ISSN 0301-679X. Dostupné z: [doi:10.1016/j.triboint.2019.01.032](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.032)

28. ZHANG, Xingnan a Romeo GLOVNEA. Grease film thickness Measurement in rolling bearing contacts. *Journal of Engineering Tribology* [online]. 2021, Vol. 235, Issue 7, s. 1430-1439 [cit. 2022-02-19]. ISSN 1350-6501.
Dostupné z: doi:10.1177/1350650120961278
29. KANAZAWA, Yuta, Richard S SAYLES a Amir KADIRIC. Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts. *Tribology international*. OXFORD: Elsevier, 2017, Vol. 109, s. 505-518. ISSN 0301-679X.
Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2017.01.026
30. CYRIAC, F, P.M LUGT, R BOSMAN, C.J PADBERG a C.H VENNER. Effect of Thickener Particle Geometry and Concentration on the Grease EHL Film Thickness at Medium Speeds. *Tribology letters*. New York: Springer US, 2016, Vol. 61, Issue 2, s. 1-13. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-015-0633-z
31. KANETA, M., T. OGATA, Y. TAKUBO a M. NAKA. Effects of a thickener structure on grease elastohydrodynamic lubrication films. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part J-journal of Engineering Tribology*. 2000, Vol. 214, Issue 4, s. 327-336. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1243%2F1350650001543214
32. VAN DEN KOMMEN, A. a J. AMEYE. Prediction of Remaining Grease Life — a New Approach and Method by Linear Sweep Voltammetry. *Proceedings Esslingen Conference*. 2001, Vol. 2001, Issue 1, s. 891-896.
33. ZHANG, Enhui, Weimin LI, Gaiqing ZHAO, Zhe WANG a Xiaobo WANG. A Study on Microstructure, Friction and Rheology of Four Lithium Greases Formulated with Four Different Base Oils. *Tribology letters*. New York: Springer US, 2021, Vol. 69, Issue 3. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-021-01469-z
34. DE LAURENTIS, N, P CANN, P. M LUGT a A. KADIRIC. The Influence of Base Oil Properties on the Friction Behaviour of Lithium Greases in Rolling/Sliding Concentrated Contacts. *Tribology letters*. New York: Springer US, 2017, Vol. 65, Issue 4, s. 1-16. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-017-0908-7
35. Miramar Communications Ltd. *Andor Oxford Instruments*. Oxford Instruments [online]. ©2022 [cit. 2022-04.01].
Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/products/scmos-camera-series/neo-5-5-scmos#product-information-tabs>
36. THORLABS. *Thorlabs.com* [online]. © 1999-2022 [cit. 2022-04-01].
Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=COP5-A>
37. Greendot. *Optixs.cz* [online]. Praha, © 2022 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/slovník-17/dichroicka-zrcadla-79s>

38. Präzisions Glass & Optik GmbH [online]. © 1994–2022 [cit. 2022-04-03].
Dostupné z: <https://www.pgo-online.com/intl/BK7.html>
39. OKÁL, Michal. *Konstrukce testovacího zařízení pro pozorování distribuce maziva ve valivém ložisku*. Brno, 2020, 89 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. David Košťál, Ph.D.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

<i>EHD</i>	Elasto-hydrodynamické mazání	
<i>Li-1CP</i>	Mazivo na bázi lithného zahušťovadla	
<i>Urea-1CP</i>	Mazivo na bázi zahušťovadla Urea s hrubou strukturou	
<i>Urea-2CP</i>	Mazivo na bázi zahušťovadla Urea s jemnou strukturou	
<i>MPa</i>	megapascal	
<i>GPa</i>	gigapascal	
<i>nm</i>	nanometr	
<i>ns</i>	nanosekunda	
<i>μm</i>	mikrometr	
<i>μs</i>	mikrosekunda	
<i>°C</i>	stupeň Celsia	
<i>g</i>	gram	
<i>k_i</i>	koeficient násobku barviva Pyren	[1]
<i>P_i</i>	hodnota signálu barviva Pyren	[1]
<i>min (P_i)</i>	minimální hodnota ze všech signálu Pyrenu	[1]
<i>i</i>	číslo odpovídající rychlosti měření	[1]
<i>C_{ki}</i>	hodnoty Kumarinu po podělení konstantou <i>k_i</i>	[1]
<i>C_i</i>	naměřené hodnoty signálu barviva Kumarinu	[1]
<i>Z</i>	procentuální podíl zpevňovadla v mazivu	[%]
$\overline{C_{k150-k500}}$	průměr <i>C_{ki}</i> mezi rychlostmi 150 až 500 mm·s ⁻¹	[1]

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Absorpce a emise barviva Alexa Fluor 555 [12]	15
Obr. 2-2	Rtuťová výbojka (horní), xenonová výbojka (dolní) [12].....	16
Obr. 2-3	Fluorescenční zářivka v roce 1857 [8]	17
Obr. 2-4	Chemická struktura Pyrenu [9]	18
Obr. 2-5	Graf absorpčních vlnových délek Pyrenu rozpuštěného v cyklohexanu [15]	19
Obr. 2-6	Graf emitačních vlnových délek Pyrenu rozpuštěného v cyklohexanu [15]	19
Obr. 2-7	Chemická struktura Kumarinu (převzato a upraveno z [11]).....	20
Obr. 2-8	Absorpce excitačního záření Kumarinu obsahujícího 5 atomů vodíku [11] Osa x: vlnová délka v nm.....	20
Obr. 2-9	Graf absorpčních vlnových délek Kumarinu 6 rozpuštěného v ethanolu [15]	21
Obr. 2-10	Graf emitačních vlnových délek Kumarinu 6 rozpuštěného v ethanolu [15]	22
Obr. 2-11	Mikrostruktura lithného mýdla s PAO základovým olejem (vlevo LP1) a s minerálním olejem (vpravo LM2) [34]	25
Obr. 2-12	Konfigurace ball-on-disk (převzato a upraveno z [3]).....	27
Obr. 2-13	Graf závislosti rychlosti otáčení na tloušťce filmu [29].....	29
Obr. 4-1	Schéma měřícího zařízení [39].....	31
Obr. 4-2	Schéma dichroického zrcátka [12].....	33
Obr. 4-3	Vnější kroužek valivého ložiska v kontaktu s kuličkou	34
Obr. 4-4	Hladovějící kontakt	35
Obr. 5-1	Graf plastického maziva Li-1CP při pozorování fluorescenčního barviva Kumarin –změřené hodnoty	37
Obr. 5-2	Graf zprůměrovaných dat zahušťovací složky plastického maziva (Kumarin) v závislosti na rychlosti	38
Obr. 5-3	Graf zprůměrovaných dat základového oleje plastického maziva (Pyren) v závislosti na rychlosti	39
Obr. 5-4	Graf průběhu podílu zpevňovačla v mazivu v závislosti na rychlosti.....	40

11 SEZNAM TABULEK

12 SEZNAM PŘÍLOH