Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

# VÝVOJ LOŽISEK S AUTOCIRKULACÍ PLASTICKÉHO MAZIVA

**Ing. Michal Okál**

Pojednání ke státní doktorské zkoušce

Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2022

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

# VÝVOJ LOŽISEK S AUTOCIRKULACÍ PLASTICKÉHO MAZIVA

## DEVELOPMENT OF THE BEARINGS WITH ENHANCED GREASE REPLENISHMENT

**Ing. Michal Okál**
Autor práce
Author

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

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2022

# OBSAH


**1 ÚVOD 6**

**2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 8**

**3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 12**

3.1 Mazací procesy v ložisku 12

3.2 Hladovění 18

3.3 Vliv nízkých rychlostí na mazání plastickými mazivy 21

3.4 Nejnovější publikace 24

**4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE 33**

**5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ 37**

5.1 Zaměření disertační práce 37

5.2 Cíl disertační práce 37

5.3 Způsob řešení a použité metody 40

5.3.1 Experimentální zařízení 41

5.3.2 Princip fluorescentní mikroskopie 43

5.3.3 Vzorky pro experimenty 44

5.3.4 Vyhodnocení výsledků měření 45

5.3.5 Plán publikací 45

**6 SOUČASNÝ STAV A ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE 50**

6.1 Zprovoznění testovacího zařízení a odlazení optické metody 50

**7 ZÁVĚR 55**

**8 BIBLIOGRAFIE 56**

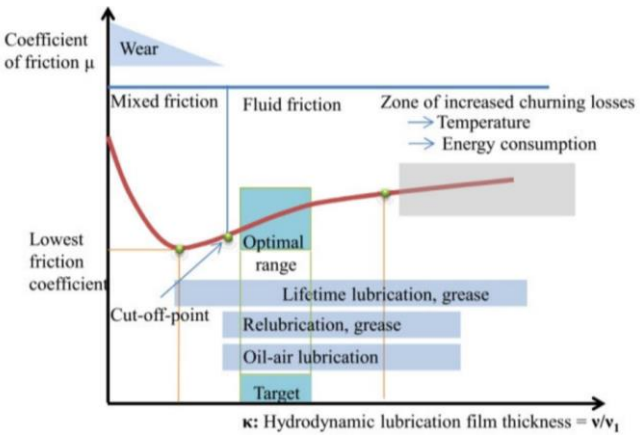
**9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 60**

**10 SEZNAM TABULEK 62**

# 1 ÚVOD

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá mazacími procesy uvnitř radiálních kuličových ložisek (dále RKL). Tyto procesy spadají pod vědní obor tribologie, což je nauka o procesech tření, mazání a opotřebení. Přesněji lze téma zařadit do oblasti elastohydrodynamického mazání, dále EHD. Jedná se mazací režim, který vzniká právě u valivých ložisek, ale také u vačkových mechanismů, nebo u ozubených převodů. Tento režim vzniká při kontaktu dvou nekonformně zakřivených povrchů a při přítomnosti maziva. Vzniklý mazací film má rozměry srovnatelné s deformacemi těles, a je primárně definován viskozitou maziva, rychlostí, tlakem a také množstvím maziva. V případě RKL mazanými plastickými mazivy dochází po většinu doby jejich provozu k hladovějícímu EHD režimu. Při hladovění EHD kontaktu vzniká tenčí mazací film, než v případě plně zaplavených podmínek. Ztenčení mazací vrstvy je zapříčiněno nedostatkem maziva pro daný kontakt, a pokud dojde k zredukování mazacího filmu na úroveň povrchových nerovností, může dojít k inicializaci únavového opotřebení nebo zadření ložiska[35]. I nepatrné vylepšení ložisek směrem k delší životnosti, nebo k nižšímu tření má dalekosáhlý dopad, protože se jedná o jednu nejčastěji využívanou strojní komponentu v průmyslu. Ložiska lze nalézt téměř v jakémkoliv stroji, nebo mechanismu a mají přímí vliv na potřebnou energii k jejich používání. Přičemž se odhaduje, že okolo 20 % světové energie je právě využíváno na překonání tření [1].

V posledních desetiletích došlo k výraznému navýšení přenášených zatížení, také k používání méně viskóznějších maziv a navyšování provozních teplot. Hlavní motivací je vytvářet stroje s vyšší energetickou účinností. Tato snaha se projevuje na nižší tloušťce mazacího filmu. U ložisek s trvalou náplní vzniká vyšší riziko, že nastane hladovění. Částečná úroveň hladovění se ukazuje jako příznivá, protože pomáhá redukovat tření v ložisku Obr. 1. Z tohoto důvodu je snaha tyto procesy hladovění pečlivě popsat a pochopit. Během minulých let vznikla celá řada analytických a numerických modelů, které popisují procesy hladovění a predikují jejich dopad na tloušťku filmu[14]. Ovšem, modely nedokážou kompletně obsáhnout složitost reálného ložiska a komplexnost reologických vlastností plastického maziva. Proto jsou procesy hladovění studovány experimentálně pomocí tribometrů a optických metod. Nejčastěji využívaným zařízením je tribometr konfigurace Ball-on-disc (dále BoD). Tyto tribometry umožňují díky transparentnosti disku přímo pozorovat množství maziva kolem kontaktu a v kontaktu. Ovšem, tribometry disponují zjednodušenou geometrií, která ovlivňuje chování maziva kolem kontaktu a tvoří tak odlišné podmínky než v případě RKL.




Obr. 1 Vývoj tření v ložisku v závislosti na tloušťce filmu [2]

Hlubší porozumění mazacích procesů uvnitř ložisek nabízí možnost optimalizování jejich vnitřní geometrie a také optimalizaci samotných maziv. Vnitřní geometrie a použitá maziva spolu úzce souvisí. Parametry obou se ovlivňují a mají přímý vliv na provoz ložiska a jeho konečnou životnost. Předložené pojednání se zabývá procesy mazání vznikajícími v kontaktech ve valivých kuličkových ložiscích. Práce je zaměřena na studium vlivu vnitřní geometrie ložiska a vlivu samotných plastických maziv na úroveň hladovění.

# 2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Problematika mazání RKL je oproti jiným strojním komponentám značně specifická. Jedná se o uzavřený systém, který je převážně definován geometrií, použitými materiály a druhem aplikovaného maziva. Pohyb valivých elementů není pouze čisté valení, ale také u nich dochází ke spinu. Do výsledné kinematiky elementů přispívá interakce s klecí, působení gyroskopického momentu nebo odstředivé síly. K výsledné složitosti podstatně přispívají plastická maziva, která se v 90 % využívají pro mazání valivých ložisek. Jedná se směsi, které mají polotekutý charakter a komplexní reologické vlastnosti. Přesněji, plastická maziva jsou složena ze základového oleje 65 - 90 %, zahušťovadel 10 - 25 % a aditiv 5 % [3]. Mají charakter Binghamských kapalin, tedy tok nastává až po překročení určitého smykového napětí. Díky této vlastnosti jsou před oleji upřednostňována v aplikacích, kde je vyžadováno mazání bez průběžného doplňování maziva. Ovšem, jejich nevýhoda je dočasná životnost, kterou neumíme přesně předpovědět.

Mazací procesy v ložisku lze rozdělit do několika základních fází. Úvodní fáze provozu ložiska se nazývá Churning fáze [4]. Během této fáze dochází k redistribuci maziva po ložisku, kdy převážná část maziva zůstává přichycena na kleci. Fáze je doprovázena vyššími teplotami a vyšším odporem, díky brodění valivých elementů v mazivu. Snahou je tento proces zkrátit na minimum, protože vyšší teplota urychluje oxidační procesy maziva a přispívá k zbytečnému uvolňování základového oleje ze struktury zahušťovadla. V návaznosti na Churning fázi nastává Clearing fáze [5], kdy ve valivých drahách zůstává omezené množství plastického maziva. Toto množství je vlivem přejezdů elementů mechanicky zpracováváno. Poté dochází k postupnému snižování teploty, až na stabilní hodnotu. Po úvodních fázích nastává Bleeding fáze, která převládá po zbytek doby provozu ložiska. Na mazání se podílí převážně „bleedovaný“ základový olej [6]. Uvolňování základového oleje je postupný proces, kdy se uvolní jen určité množství oleje. Toto množství je během provozu ložiska zmenšováno vlivem odparu maziva a vytečením z ložiska. Dále je mazivo znehodnocováno vlivem oxidace a dalších degradačních procesů. Proto během bleeding fáze nastávají okamžiky silného hladovění, kdy nedochází k vytvoření dostatečně silné mazací vrstvy v kontaktech. Tyto okamžiky jsou spojeny s nárůstem teploty, která vychází z nárůstu tření. Při kumulaci okamžiků silného hladovění dochází k inicializaci únavového opotřebení, které je v případě ložisek nazýváno jako Pitting. Nárůst teploty vlivem tření ovšem napomůže k snadnějšímu uvolnění nového základového oleje, který navrátí opět dostatečné množství maziva pro tvorbu mazacího filmu. Procesy silného hladovění a znovudoplnění maziva mají stochastický charakter a objevují se po celou dobu bleeding fáze.

Bleeding fáze trvá převážnou část života ložiska. Během této fáze se stochasticky mění mazací podmínky pro mazání kontaktů. O tom, jak je daný kontakt dobře mazaný, vypovídá dostupné množství maziva v jeho okolí, a to především před kontaktem. Rozhraní maziva a vzduchu před kontaktem je nazýváno jako vstupní meniskus a poloha tohoto menisku je jedním z určujících parametrů pro úroveň hladovění. Omezené množství maziva před kontaktem zapříčiní rychlejší nárůst tlaku oproti plně zaplaveným podmínkám, kdy začátek nárůstu je v nekonečně vzdáleném bodě [7], [8]. Omezená hranice nárůstu tlaku se projeví nedostatečným vytvořením mazacího film v kontaktu. Wedeven jako první pozoroval hladovění EHD kontaktu a pokles tloušťky filmu v kontaktu se snižující se vzdáleností menisku [9]. Vlivem přejezdu valivého elementu se má mazivo tendenci rozestoupit do dvou postranních pásů, ze kterých se mazivo dávkuje do kontaktní oblasti [10]. Děj, kdy se mazivo doplňuje do kontaktu, je nazýván jako replenishment, a Chiu specifikoval vzorec pro určení množství maziva pro opětovné doplnění do valivé dráhy po průjezdu [11]. Výsledná úroveň hladovění je poté determinovaná jako rovnováha mezi ztrátovými mechanismy a procesy doplňování maziva do kontaktu [12]. Klíčovými parametry jsou viskozita maziva, rychlost, povrchové napětí, kapilární síla a dostupné množství maziva. Chevalier přestal využívat vzdálenost vstupního menisku a začal využívat množství maziva na hranici před kontaktem [13], [14]. Tento přístup byl mnohem vhodnější a přesnější pro stanovení úrovně hladovění a vyvinul teoretický model pro predikci centrální tloušťky v závislosti na množství maziva před kontaktem.

Distribuce maziva v ložisku je podstatná pro určení úrovně hladovění. Van Zoelen a spol. vyvinuli model pro určení migrace mazací vrstvy vlivem odstředivých sil [15], [16]. Pomocí modelu byli schopni simulovat pokles filmu vlivem přejezdů, ale nezahrnuli do modelu procesy opětovného doplňování maziva. Dále byl model rozšířen o Van der Waalsovy síly [17]. Pozorované procesy hladovění byly rozděleny do tří stádií, kdy pro mírné úrovně hladovění dochází ještě ke spojení postranních pásů před kontaktem vlivem kapilárních sil. Posléze dochází k protržení menisku a povrchové napětí hraje v tomto případě klíčovou roli. Při dalším navyšování rychlosti dochází k poklesu tloušťky filmu téměř na stabilní hodnotu okolo 20 nm. Tahle tenká vrstva maziva je vytvářena právě díky Van der Waalsovým silám [17]. Tyto síly jsou intenzivní v blízkosti povrchů těles a poskytují tak efektivní mechanismus doplňování maziva. Tento stav je nazýván jako (Parched lubrication) [18]. Numerický model doplňování maziva do kontaktu byl rozšířen v publikaci [16]. Byl zde představen model pro kruhový i eliptický kontakt, kde vstupní vzdálenost menisku byla modelována jako funkce počáteční tloušťky filmu s předpokladem, že lze využít standardní EHD teorii. Model ale nepředpokládal působení odstředivé síly, která v reálných aplikacích může hrát významnou roli. Vliv odstředivých sil ukázal Gershuni [20] a studoval znovu zacelení mazací vrstvy po přejetí valivého elementu. Obnovení mazací vrstvy má silně nelineární charakter a vliv na tloušťky filmu je obdobný. Po průjezdu valivého elementu dochází ke spojení postranních pásů, kdy významný dopad na tloušťku filmu v kontaktu

nastává až po spojení. Čas úplného spojení pásu po projetí s porovnáním rychlostí přejezdů v reálném ložisku je ovšem zanedbatelný, proto se prioritní mechanismus doplňování projevuje před samotným kontaktem. Tuto hypotézu potvrdil Cen [21], kdy pozoroval tloušťku filmu v reálném ložisku s různým počtem valivých elementů. Nižší počet elementů způsobil snížení tloušťky filmu místo očekávaného navýšení, tedy navýšení času mezi jednotlivými průjezdy nebylo příznivé. Vliv odstředivých sil byl pozorován v publikaci [22], kdy prostřednictvím vysokorychlostního tribometru byla zaznamenána změna postranních rezervoárů maziva. Kontakt byl vytvořen na BoD tribometru a při vysokých rychlostech došlo k vymizení vzdálenějšího rezervoáru od osy rotace disku. Díky tomu tloušťka filmu v kontaktu nebyla vytvořena rovnoměrně, ale část s menším postranním pásem vykazovala výraznější stupeň hladovění.

Převážná část studií věnována problematice hladovění EHD kontaktu využívá základový olej. Olej je využíván při numerických modelech, i při experimentech z pragmatického důvodu. Komplexní reologické vlastnosti plastických maziv a chaotické chování značně zkreslují výsledky. Práce popisující mazací mechanismy s plastickým mazivem často opírají o BoD tribometr. Cannová pozorovala při úvodních otáčkách vyšší tloušťku mazacího filmu, která s navyšujícím se počtem otáček disku postupně klesala [23]. Důvod tvorby vyšší tloušťky jsou částice zahušťovadla, které vstupují do kontaktu. Částice zahušťovadla mají tendenci ulpívat na kontaktních površích a vytvářejí tak tloušťku filmu, kterou lze rozdělit na dvě složky [24]. Část tvořena zahušťovadlem a část tvořena olejem, která lze určit podle EHL teorie. Po delší době dochází k poklesu tloušťky filmu a ke stabilizování. Ke stabilizování napomáhá bleedování oleje ze struktury plastického maziva, které vtéká do valivé dráhy [25]. Míra hladovění poté převážně závisí na množství dostupného maziva, ochotě plastického maziva uvolňovat základový olej, viskozitě a rychlosti.

Výše zmíněné práce pozorují mazací mechanismy na tribometrech s výrazně zjednodušenou geometrií, nebo pomocí analytických a numerických modelů, které se omezují převážně na základový olej. Některé modely se snaží popsat vlastnosti plastických maziv i přímo v kontaktu [26], ale bez silnějších propojení s okolním rozložením maziva. Nejnovější publikace cílí na propojení distribuce maziva v ložisku s pozorováním vývoje tloušťky v kontaktech [26, 28, 38, 39]. Pro studie jsou využívané simulátory inspirované skutečnou geometrii ložiska a konstrukcí ložiska. Simulátory obsahují ložisko s nahrazeným vnějším kroužkem zpravidla za skleněný, který umožní vhled dovnitř. Díky průhlednosti kroužku je možné pozorovat distribuci maziva jak v ložisku, tak i dopad na tloušťku filmu v kontaktu a distribuci kolem kontaktu.

Nejnovější publikace ukazují trend ve výzkumu mazání ložisek. Nejvíce využívaný je experimentální přístup používající zařízení, která disponují geometrií samotných ložisek. Tento experimentální postup nabízí věrohodné informace, které lze přímo využít při optimalizaci ložisek i maziv. Tyto publikace se ale věnují převážně základovým olejům, a ne plastickým mazivům. Navíc, nejvíce využívaná zařízení nemají drážku ve skleněném kroužku, která je přítomná v radiálních ložiscích. Valivý element odvalující se v drážce v ložisku vytváří rozdílnou distribuci maziva a replenishment než v případě kroužku bez drážky. Předložené pojednání má za cíl doplnit právě tuhle oblast. Práce využívá zařízení vytvářející identické kontaktní podmínky vyskytující se v ložiscích a fluorescenční mikroskopii, která dovoluje pozorovat plastické mazivo v kontaktu i vně kontaktu. Umožňuje také pozorovat jednotlivé složky plastického maziva. Separátní pozorování složek a reálná geometrie tribometru nabízí nejpřesnější informace o mazacích mechanismech ve valivých ložiscích.

# 3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

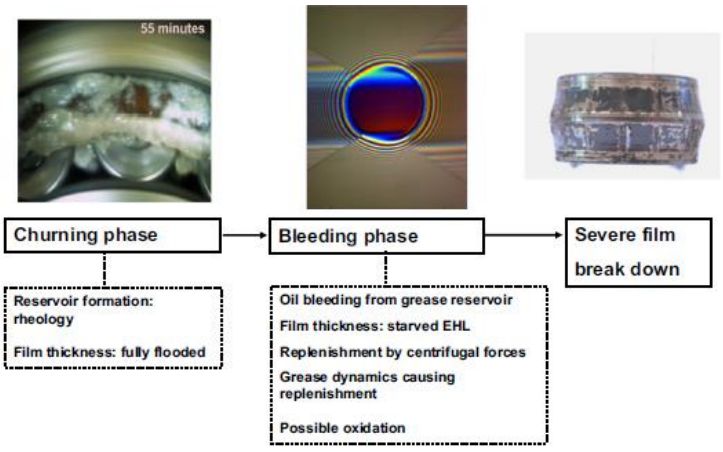
## 3.1 Mazací procesy v ložisku

[31] LUGT, Piet M. Modern advancements in lubricating grease technology. *Tribology International*. 2016, roč. 97, s. 467–477. ISSN 0301679X.

Přehledový článek shrnující dosavadní vývoj a poznatky v mazání ložisek plastickými mazivy. V úvodní části jsou specifikované fáze mazání ložiska během jeho provozu. Následuje představení pozorovaných indikátorů, které jsou stěžejní pro životnost ložiska a životnost maziva. Na konci článku je uveden nástin propojení vnitřní geometrie ložiska a chování plastického maziva. Pro pochopení mazacích mechanismů v tomto pojednání udává tento článek komplexní náhled na problematiku.

**Výsledky**

Po úvodní Churning fázi nastává Bleeding fáze, která přerušovaně trvá až do konce životnosti ložiska Obr. 2. Většina plastického maziva zůstává přichycena na kleci a poskytuje zásobárnu základového oleje. Základový olej se v průběhu provozu ložiska uvolňuje ze struktury zahušťovadla a podílí se na mazání. Vylučování základového oleje je označováno jako Bleeding a je ovlivněno viskozitou oleje, druhem zahušťovadla a strukturou zahušťovadla. Při Bleeding fázi, kdy kontakty odděluje menší tloušťka filmu než při plně zaplavených podmínkách, dochází k postupnému úbytku oleje. Postupné zmenšování využívaného množství způsobuje výraznější hladovění kontaktů. Když dojde k ztenčení mazacího filmu na úroveň povrchových nerovností, dochází k nárůstu tření a teploty. Tento nárůst teploty zapříčiní snazší vyloučení čerstvého oleje díky nižší viskozitě. Tyto děje nárůstů tření a doplnění maziva se dějí až do konce životnosti ložiska, kdy na konci plastické mazivo obsahuje přibližně ještě 50 % oleje. Vyšší teplota ložiska ale také zrychluje oxidační procesy, které zkracují životnost plastického maziva.




Obr. 2 Životní cyklus ložiska s plastickým mazivem

**Závěr**

Přehledový článek udávající komplexní vhled do problematiky mazání ložisek. Po úvodní fázi provozu ložiska lze klasifikovat mazací stav jako hladovějící EHD režim. V tomto stavu je stěžejní rovnováha mezi příznivými procesy replenishmentu a ztrátovými mechanismy jako je boční výtok. Pokud se dokáže dostatečné množství maziva dostat do okolí kontaktu, a především před kontakt, dochází k mírnému stupni hladovění. V opačném případě k výraznému stupni hladovění a zadírání ložiska. Zvýšená teplota vlivem opotřebení ovšem dokáže uvolnit nový základový olej nebo přímo část maziva z rezervoáru. Nové mazivo navrátí opět stabilní režim mazání a napomůže snížit teplotu ložiska. Případy výrazného hladovění a znovu doplňování maziva se během provozu ložiska nahodile objevují.

---

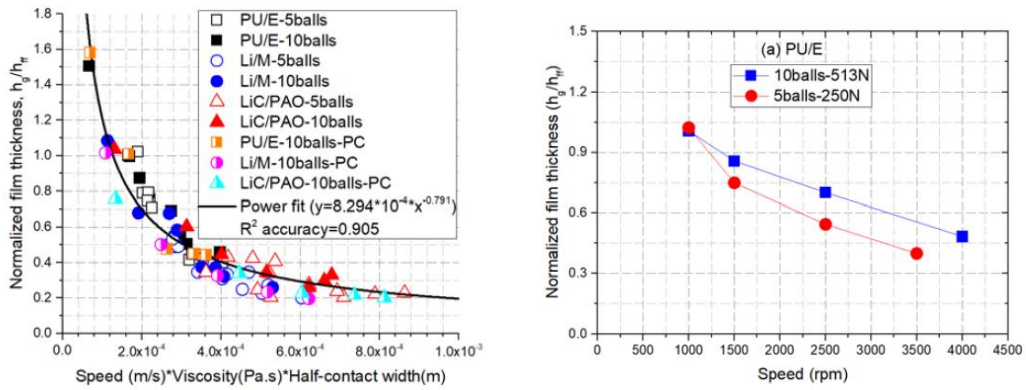
[21] CEN, Hui a Piet M LUGT. Replenishment of the EHL contacts in a grease lubricated ball bearing. *Tribology International*. 2019, s. 106064. ISSN 0301-679X.

[32] CEN, Hui a Piet M LUGT. Film Thickness in a Grease Lubricated Ball Bearing. 2018.

Publikace je zaměřena na proces replenishmentu v kuličkovém ložisku mazaném plastickým mazivem. Při jednotlivých experimentech byly studovány vlivy jako je počet valivých elementů ložiska, zatížení, rychlost nebo také druh použitého plastického maziva na normalizovanou tloušťku filmu v kontaktu. Veškeré testy byly provedeny na reálném kuličkovém ložisku 6209 a tloušťka v kontaktech byla měřena pomocí kapacitní metody. Je zde představen analytický výpočet pro normalizovanou tloušťku filmu a je porovnán s experimentem na zařízení konfigurace BoD.

**Výsledky**

Tloušťka v kontaktech ložiska je primárně ovlivněna třemi parametry a to rychlostí otáčení ložiska, viskozitou použitého maziva a šířkou kontaktu. Na experimenty byly použity ruzná plastická maziva s rozdílným typem zahušťovadla. Vliv typu zahuštovadla je pozorovatelný ale ne zásadní Obr. 3. Ovšem, vliv zahušťovadla se projevil nejenom na tloušťce ale i na teplotě celého ložiska. Změna teploty má přímý vliv na viskozitu oleje, která způsobí menší hodnoty tloušťky filmu a ovlivní celkové chování maziva v ložisku. Podstatný rozdíl v tloušťce filmu nastal při snížení počtu valivých elementů, kdy nižší počet vykazoval normalizovanou tloušťku menší než dvojnásobný počet elementů. Jednoduchým snížením elementů byl ukázán vliv času přejezdů na replenishment maziva. Lze tvrdit, že vetší mezera mezi elementy není příznivá a má negativní vliv na replenishment.




Obr. 3 Normalizovaná tloušťka filmu v závislosti na testovaných parametrech

Na základě pozorování byl specifikován vzorec pro výpočet normalizové tloušťky:

$$\frac{\mathrm{h}_c}{\mathrm{h}_{cff}} = 8{,}294 * 10^{-4}(u * \eta * b)^{-0.791}$$

Kde normalizovaná tloušťka filmu, tedy poměr mezi reálnou tloušťkou $\mathrm{h}_g$ a tloušťkou v plně zaplavených podmínkách $\mathrm{h}_{ff}$ je primárně ovlivněna rychlostí $u$, dynamickou viskozitou $\eta$ a šířkou kontaktu $b$.

**Závěr**

Na základě výsledků publikace byly stanoveny stěžejní parametry ovlivňující tloušťku filmu. Ovšem, použitá metodika je omezena pouze na měření teploty a kapacitance, která se přepočítává na tloušťku filmu. Tento přístup nenabízí detailní popsání jevů, které nastávají v okolí kontaktu. Je patrné, že vnitřní geometrie má vliv na replenishment, ale představený vzorec nedokáže zahrnout další parametry vnitřní geometrie, jako je například radiální vůle nebo konformita.

---

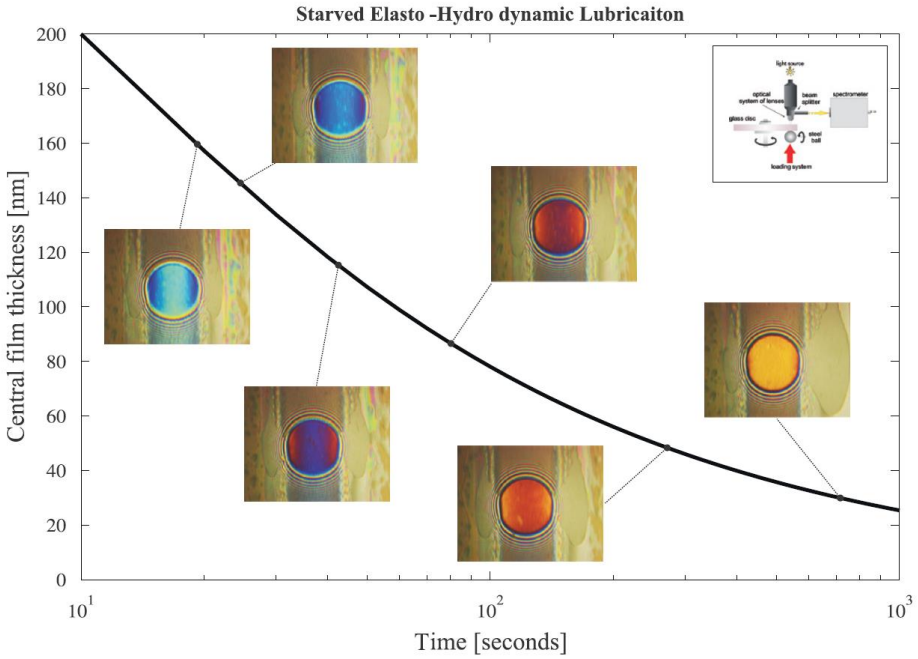
[16] VAN ZOELEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT. The prediction of contact pressure-induced film thickness decay in starved lubricated rolling bearings. *Tribology Transactions*. 2010, roč. 53, č. 6, s. 831–841. ISSN 10402004.

[33] VENNER, C. H., M. T. VAN ZOELEN a P. M. LUGT. Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. *Tribology International*. 2012, roč. 47, s. 175–187. ISSN 0301679X.

Dvě výše zmíněné publikace se zaměřují na popsání vývoje tloušťky filmu v kuličkovém ložisku pomocí numerické simulace a experimentů na BoD tribometru. Numerický model byl nejprve využit pro zjištění vlivu odstředivých sil na pozvolný pokles tloušťky filmu. Následně byla simulace rozšířena o migraci maziva po valivých drahách v ložisku a o stav, kdy nedochází k doplňování maziva do této dráhy. Teoretické modely přepokládají hladovějící kontakt, u kterého dochází k pozvolnému zmenšování tloušťky filmu v kontaktu. Následné experimenty využívající optickou interferometrii ukázaly shodu se simulacemi.

**Výsledky**

Podle získaných výstupů numerických simulací je pozvolný pokles tloušťky filmu v kontaktu rychlejší, než lze pozorovat u reálných valivých ložisek. Předložené výsledky lze považovat za nejhorší možný scénář, který může nastat při mazání ložisek. Bylo zjištěno, že na valivé dráze ložiska během provozu není mazivo schopné udržet adekvátní vrstvu filmu, pokud nenástávají výrazné procesy replenishmentu Obr. 4. Rychlost poklesu a doba poklesu tloušťky filmu byla primárně ovlivněna rychlostí ložiska, kdy vyšší rychlost způsobila delší čas rozpadu. Při porovnání soudečkového ložiska a kuličkového ložiska ukázala predikce u soudečkového ložiska delší čas rozpadu filmu než u kuličkového. Tento rozdíl byl vysvětlen rozdílnou geometrií kontaktu. I když model předpokládá jako hlavní mechanismus rozpadu filmu tlak mezi tělesy, vliv radiálního zatížení na čas rozpadu filmu byl malý.




Obr. 4 Pokles centrální tloušťky filmu v závislosti na času experimentu.

.

**Závěr**

Výše zmíněné publikace si kladly za cíl popsat pozvolný rozpad filmu maziva v ložisku. Bylo prokázáno, že po úvodní části provozu ložiska kontakty začnou hladovět. Pozvolný rozpad filmu na valivé dráze je způsoben vlivem kontaktního tlaku. Numerické modely i experimenty ukázaly mnohem rychlejší pokles tloušťky filmu, než který je charakteristický u valivých ložisek. Tato odchylka byla zapříčiněna s největší pravděpodobností zjednodušením modelu, který nedokázal zahrnout všechny procesy replenishmentu. Procesy replenishmentu jsou zjednodušeny i na tribometru Ball-on-disc, který nenapodobuje skutečnou geometrii RKL.

---

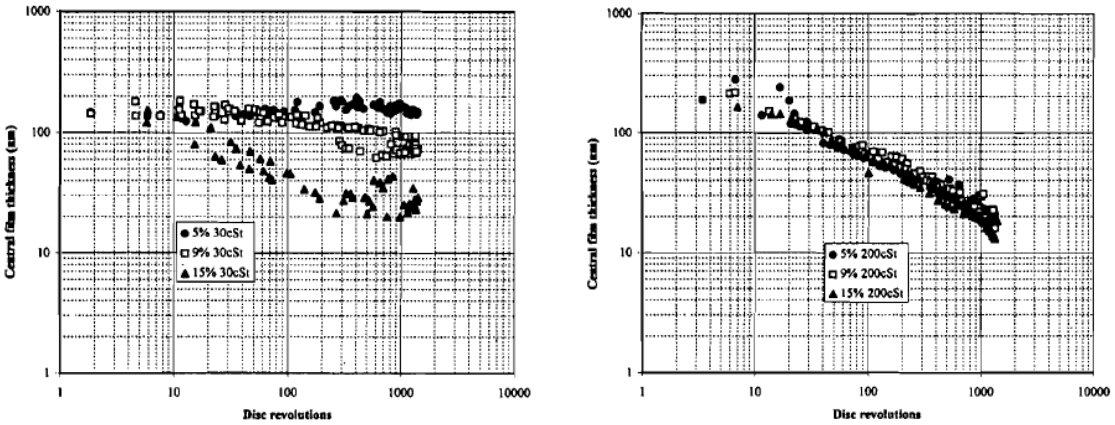
[34] CANN, Philippa. An Analysis of the Mechanisms of Grease Lubrication in Rolling Element Bearings. nedatováno, roč. 00, č. May 1999, s. 227–245.

[35] CANN, P. M. Starved grease lubrication of rolling contacts. *Tribology Transactions*. 1999, roč. 42, č. 4, s. 867–873. ISSN 1547397X.

Následující dvě publikace se zaměřují na chování plastického maziva v EHD kontaktu. Pro studium byl využit tribometr konfigurace BoD, kde s pomocí optické interferometrie byly kontakty pozorovány. Byly studovány podmínky plně zaplaveného kontaktu a hladovějícího kontaktu s plastickými mazivy i základovými oleji. Byly zkoumány vlivy rychlosti, viskozity i vlivu zahušťovadla na výslednou centrální tloušťku filmu v kontaktu. Experimentálně bylo prokázáno, že inlet-replenishment je jedním z hlavních parametrů určující úspěšnou funkci ložiska.

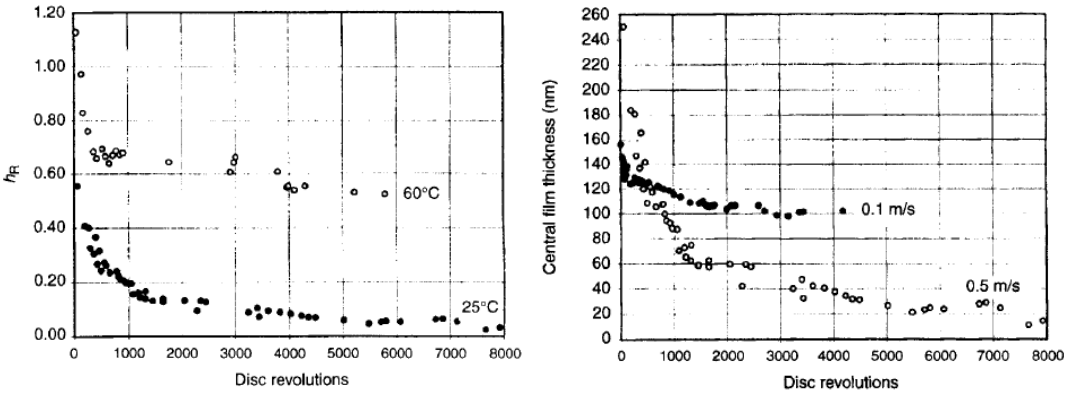
**Výsledky**

Během experimentů byla porovnávána distribuce plastického maziva a oleje na disku. Plastické mazivo mělo tendenci se rozestoupit do stran od valivé dráhy i při malé rychlosti. U základového oleje tomu tak ale nebylo. Během zvyšující se rychlosti se u plastického maziva i při plně zaplavených podmínkách částice zahušťovadla významně podílely na mazacím filmu. Nejvyšší četnost se vyskytovala při nejnižších rychlostech, a po dosažení určité hodnoty začal převládat film tvořený převážně základovým olejem. V případě plně zaplavených podmínek a vysokých rychlostí nebyl značný rozdíl mezi olejem a plastickým mazivem. Ovšem, při hladovějících podmínkách roste rozdíl mezi oleji a plastickými mazivy, stejně tak jako rozdíl mezi různými druhy plastických maziv Obr. 5. Byly porovnávány různé koncentrace zahušťovadla pro různé viskozity základových olejů. V případě viskóznějšího oleje došlo k výraznějšímu stupni hladovění pro všechny koncentrace zahušťovadla. V případě oleje s nižší viskozitou bylo možné pozorovat vliv koncentrace zahušťovadla, kde mazivo s vyšším podílem zahušťovala, mělo tendenci více hladovět.




Obr. 5 Srovnání dvou plastických maziv při hladovějícím režimu

Dalšími zkoumanými parametry byly teplota a rychlost. Bylo prokázáno, že vyšší rychlost vytváří méně příznivé podmínky pro replenishment, a dochází k znatelnějšímu snížení tloušťky filmu Obr. 6. Vliv teploty byl také pozorovatelný, a při vyšší teplotě došlo k mírnějšímu stupni hladovění. Tento poznatek podporuje dřívější tvrzení, že méně viskózní základový olej lépe zásobuje kontakt mazivem.




Obr. 6 Vliv provozních parametrů na úroveň hladovění kontaktu

## Závěr

Publikace se zabývaly chováním plastického maziva v EHD kontaktu. Hlavním záměrem bylo prozkoumání různých vlastností plastického maziva a testovacích podmínek, a ukázání jejich vlivu na úroveň hladovění. Při pozorování plastického maziva byla zaznamenána separace oleje od zahušťovadla vlivem tlaku. Uvolněný olej napomáhal replenishmentu a měl tendenci se vázat zpátky na plastické mazivo. Byl ukázán vliv zahušťovadla, vliv teploty, viskozity a rychlosti. Zařízení typu BoD napodobuje situaci vznikající v ložisku, ale jen částečně, protože zanedbává geometrické poměry.

## 3.2 Hladovění

[14] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M.E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ. Film thickness in starved EHL point contacts. *Journal of Tribology*. 1998, roč. 120, č. 1, s. 126–133. ISSN 15288897.

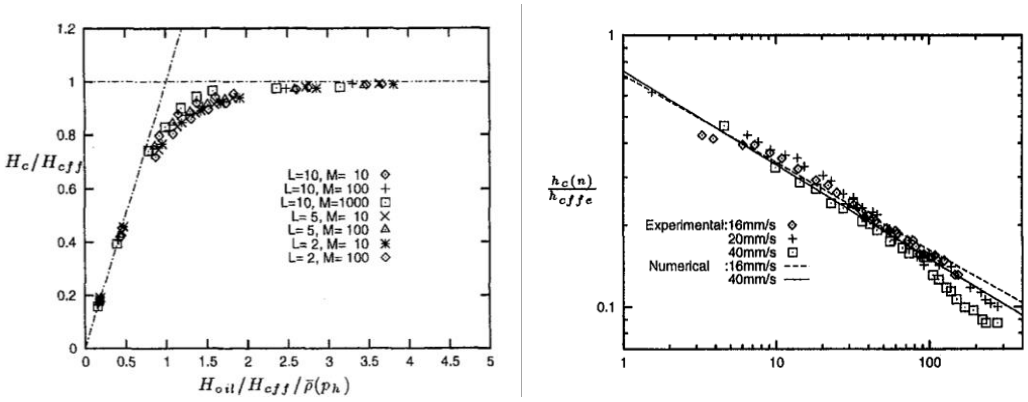
Následující publikace představuje numerickou studii vlivu množství maziva před kontaktem na úroveň hladovění kontaktu. Dříve sledovaná poloha menisku je nahrazena přímo množstvím maziva nacházejícího se na povrchu před kontaktem. Jedná se o teoretickou studii, která byla v následujících letech potrvzena. Stupeň hladovění je poté definován poměrem vstupního množství maziva a centrální tloušťky filmu.

**Výsledky**

Na Obr. 7 je vyobrazena závislost centrální tloušťky v kontaktu v závislosti na množství maziva na vstupu. Jsou zde uvedeny dvě asymptoty, kde první $H_{oil}$ / $H_{cff}$ je poměr mezi množstvím maziva na vstupu a centrální tloušťky filmu daného kontaktu při plně zaplavených podmínkách. Druhá asymptota je $H_c/H_{cff}$, kde $H_c$ je aktuální tloušťka v kontaktu při hladovění. Z hodnot lze odečíst, že hranice, kde nastává výraznější hladovění, je přibližně dvojnásobek množství maziva před kontaktem, než je v aktuální tloušťka filmu v kontaktu. Asymptota $H_c/H_{cff}$ byla dále využita pro stanovení rozpadu mazací vrstvy na dráze. Byl zde představen analytický vzorec, který dával do rovnosti právě $H_c/H_{cff}$ s parametrem R, který byl označen jako redukce centrální tloušťky mazacího filmu.

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

- R - redukce centrální tloušťky mazacího filmu (Hc/Hcff)
- $R_0$ - relativní tloušťka mazacího filmu $H_{oil}$ / $H_{cff}$ / $\rho$
- $n$ - počet průchodů kontaktem
- $\gamma$ - odpor proti bočnímu tečení
- $\rho$ - bezrozměrná hustota




Obr. 7 Závislost centrální tloušťky filmu v kontaktu na množství maziva před kontaktem a pokles tloušťky vlivem počtu průchodů

Představený přístup umožňuje stanovit průběžný pokles tloušťky filmu vlivem bočního výtoku maziva, kdy s dalším průjezdem dochází k dalšímu poklesu. Právě rovnováha mezi procesy doplňování a bočním výtokem určí výsledné množství maziva dostupného pro kontakty. Model ovšem procesy doplňování zanedbává.

**Závěr**

Publikace popisuje vliv množství maziva na vstupu kontaktu na vývoji centrální tloušťky téhož kontaktu. Hranice, kdy se hladovění začíná projevovat na schopnosti tvořit mazací film, je množství odpovídající dvojnásobku množství v kontaktu. Během navyšování úrovně hladovění je pokles centrální tloušťky rychlejší, než je v případě minimální tloušťky. Rozložení tloušťky v kontaktu při stavech výrazného hladovění připomíná ploché Hertzovo rozložení.

---

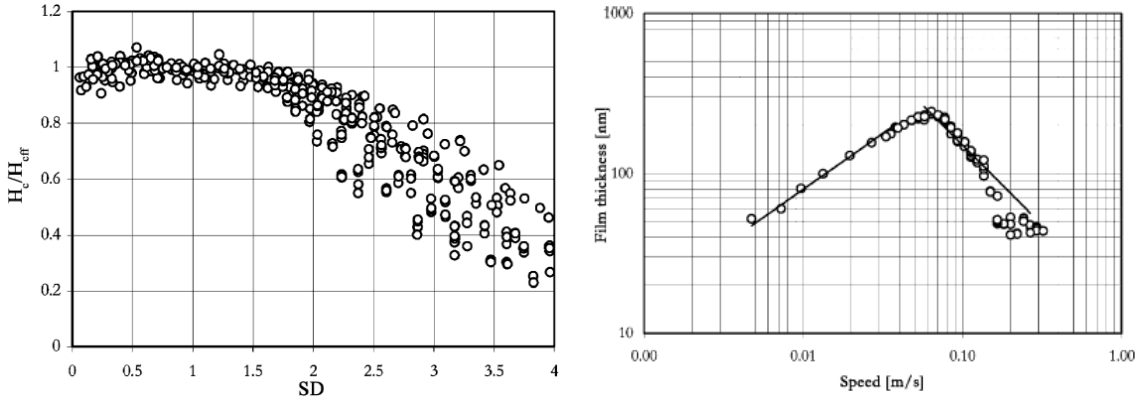
[36] CANN, P. M.E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 10, s. 859–864. ISSN 0301679X.

[10] DAMIENS, B., C.H. VENNER, P.M.E. CANN a A.A. LUBRECHT. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. *Journal of Tribology*. 2004, roč. 126, č. 1, s. 105–111.

Následující dvě práce se zaměřují na popis hladovějícího kontaktu. První publikace se zaměřuje na přechodovou oblast mezi plně zaplaveným a hladovějícím kontaktem. Tato oblast je značně citlivá na provozní podmínky a autoři prezentovali zjednodušující parametr (Starvation degree). Druhá publikace se zaměřuje na hladovějící eliptický kontakt. Práce pojednává o bočním výtoku maziva a porovnává kontakty s rozdílnou elipticitou.

**Výsledky**

Na Obr. 8**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je vyobrazen přechod mezi plně zaplavenými a hladovějícími podmínkami. Tento přechod byl experimentálně zkoumán a bylo zjištěno, že je ovlivněn pěticí parametrů. Na základě parametrů byl sestaven vzorec pro výpočet SD parametru. Tento vzorec nabízí popis úrovně hladovění pomocí jednoho čísla.

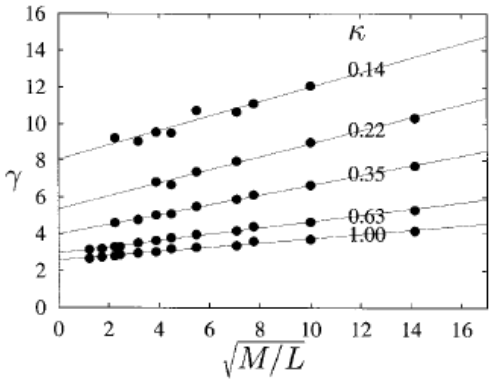



Obr. 8 Vliv rychlosti na vývoj tloušťky a závislost poměr hladovění na parametru SD

$$SD = \frac{\eta_0 * u * a}{h_{oil\infty} * \sigma_s}$$

- SD - Stupeň hladovění
- $\eta_0$ - dynamická viskozita maziva
- $u$ - rychlost
- $a$ - šířka valivé dráhy
- $\sigma_s$- povrchové napětí
- $h_{oil\infty}$- množství maziva v blízkosti kontaktu

Hladovění je příznivě ovlivněno množstvím maziva a povrchovým napětím. Při narůstající rychlosti, viskozitě a velikosti kontaktu dochází k snadnějšímu vyhladovění. Model uvažuje lokální procesy replenishmentu a nepočítá s bočním výtokem maziva. Přechod nastává při hodnotě SD parametru 1,5. Vztah mezi SD parametrem a tloušťkou filmu byl určen následovně: SD < 1,5 – $h_c$ / $h_{cff}$ =1 a pro SD > $h_c$ / $h_{cff}$ = *(1,5* / SD)$^{1,67}$. Druhá zmíněná publikace rozšiřuje představený model o eliptický kontakt. Byl zkoumán vliv Moesových parametrů a elipticity na redukci filmu a boční výtok Obr. 9. Bylo zjištěno, že vzrůstající elipticita kontaktu napomáhá k redukci bočního výtoku.




Obr. 9 Vliv MOES parametrů na hodnotu γ pro různé elipticity

**Závěr**

Pomocí představených modelů lze určit míru hladovění. Byl představen SD parametr, který je jednoduchým ukazatelem míry hladovění, kdy v případě rozsahu 0-1,5 jsou splněny plně zaplavené podmínky. Druhá publikace následně uvádí vliv konformity na boční výtok maziva z kontaktu a porovnává elipticitu s parametry M a L. Bylo prokázáno, že při vhodně zvoleném parametru elipticity může docházet k pozvolnějšímu poklesu tloušťky, tedy oddálení silného hladovění kontaktu.

## 3.3 Vliv nízkých rychlostí na mazání plastickými mazivy

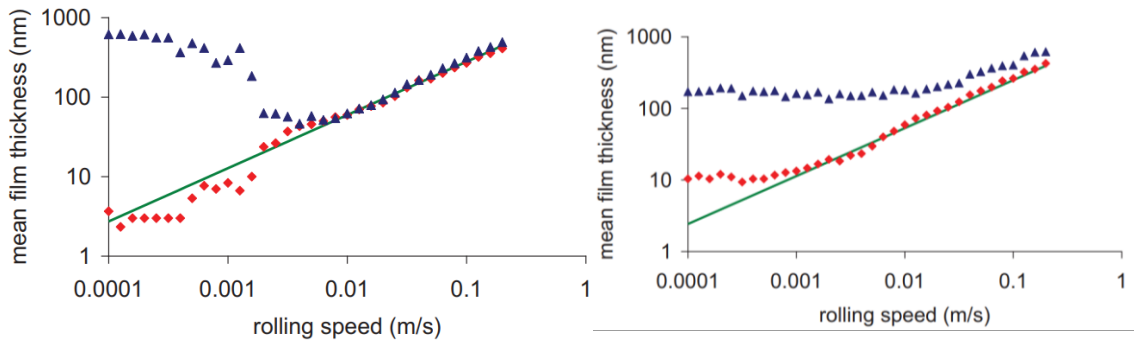
[37] TAYLOR, Publisher, Hui CEN, Piet M LUGT, Guillermo MORALES-ESPEJEL a Université De LYON. On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds. nedatováno, č. August 2014, s. 37–41.

[38] MORALES-ESPEJEL, G. E., P. M. LUGT, H. R. PASARIBU a H. CEN. Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings. *Tribology International*. 2014, roč. 74, s. 7–19. ISSN 0301679X.

Následující dvě publikace pojednávají o mazání plastickými mazivy při nízkých rychlostech. Byly provedeny experimenty na tribometrech BoD a následně byly ověřeny na reálném kuličkovém ložisku. Byl zkoumán vliv zahušťovadla na tvorbu filmu a vlivy provozních parametrů, jako zatížení nebo teplota. Výsledky ukazují na dvě fáze mazání, kdy při nízkých rychlostech je tvorba filmu dramaticky ovlivněna vstupováním zahušťovadla do kontaktu. Při dosáhnutí kritické rychlosti začne převládat tvorba filmu tvořená převážně základovým olejem a v této situaci lze využít predikční vztahy pro určení tloušťky filmu.

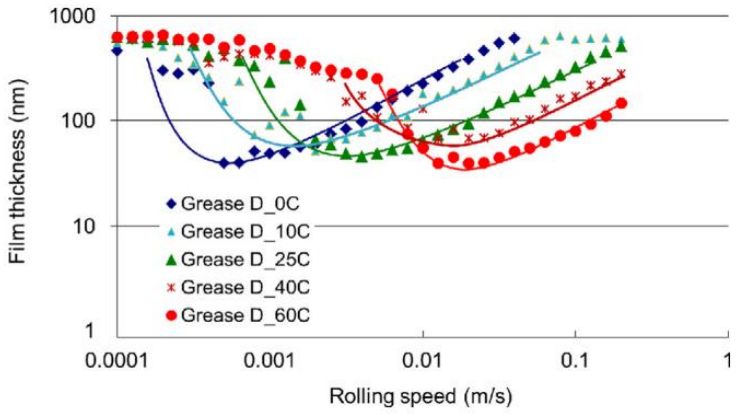
## Výsledky

Na Obr. 10 jsou zobrazeny dva grafy porovnávající vývoj tloušťky filmu na tribometru BoD a ve skutečném valivém ložisku. Jsou zde vyobrazeny tři křivky, kdy modrá odpovídá plastickému mazivu, červená „bleedovanému“ oleji a zelená teoretickému předpokladu. Oba grafy jsou podobně rozděleny do dvou úseků, kde v úvodním je tloušťka plastického maziva nad úrovní předpokladu nebo oleje. Experimenty prokázaly, že při nízké rychlosti zahušťovadlo přímo vstupuje do kontaktu. Ovšem, při kritické rychlosti dochází k přiblížení hodnot k oleji nebo k teoretickým hodnotám. V případě ložiska byly hodnoty nad úrovní i při vyšších rychlostech. Rozdíl může být způsoben rozdílnou geometrií, jak přímo kontaktní oblasti, tak i samotné konfigurace, přičemž ani v případě tribometru ani v případě ložiska nedojde k překrytí křivek, a to z několika důvodů. Zahušťovadlo v plastickém mazivu má tendenci ulpívat na povrchu drah a lépe na sebe vázat vrstvu oleje. Dále v plastickém mazivu bývají aditiva, která ovlivňují reologické vlasti maziv.




Obr. 10 Tloušťka filmu v kontaktu na tribometru Ball-on-disc a ve valivém radiálním ložisku

Při zkoumání vlivu provozních parametrů bylo zjištěno, že výrazný vliv má pouze změna teploty experimentu. Zatížení nebo prokluz měly minimální vliv. Teplota změnila viskozitu maziva a výsledné křivky se při vzrůstající teplotě posouvaly doprava Obr. 11. Tedy kritická rychlost, kdy docházelo k příklonu k teoretickým hodnotám, byla vyšší.




Obr. 11 Vliv teploty na kritickou rychlost

**Závěr**

Výše zmíněné publikace popsaly tvorbu mazacího filmu v kontaktu v případě plně zaplavených podmínek a při využití plastických maziv. V obou případech tribometry i ložiska vykazují stejné průběhy, kdy při nižších rychlostech převládá tvorba filmu pomocí zahušťovadla. U vyšších rychlostí je tvorba filmu převážně zapříčiněna olejem, ovšem i při vyšších rychlostech dochází ke vstupování zahušťovadla do kontaktu. Rychlostní hranice je dána viskozitou základového oleje a velikostí částic zahušťovadla, kdy menší částice snižují kritickou rychlost.

---

[39] WILLIAMSON, B. P. An optical study of grease rheology in an elastohydrodynamic point contact under fully flooded and starvation conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1995, roč. 209, č. 1, s. 63–74. ISSN 2041305X.

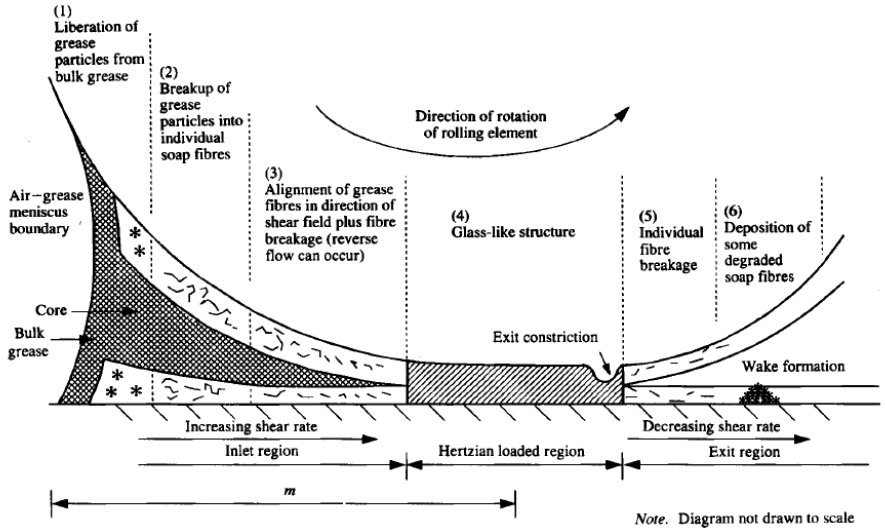
[40] VENGUDUSAMY, Balasubramaniam, Marius KUHN, Michael RANKL a Reiner SPALLEK. Film Forming Behavior of Greases Under Starved and Fully Flooded EHL Conditions. *Tribology Transactions*. 2016, roč. 59, č. 1, s. 62–71. ISSN 1547397X.

Následující dvě publikace popisují mazací procesy vznikající v kontaktu mazaném plastickým mazivem. Jsou představeny fáze, kterými si plastické mazivo projde při průchodu EHD kontaktem. Obě práce jsou experimentální, kdy pomocí aparatury BoD jsou vytvořeny plně zaplavené nebo hladovějící podmínky. Při těchto podmínkách jsou zkoumány jednotlivé reologické vlastnosti plastického maziva a jejich vliv na schopnost vytvářet tloušťku filmu v kontaktu.

**Výsledky**

Obě práce se shodují v tvrzení, že chování plastického maziva je značně podobné pro plně zaplavené i hladovějící podmínky. Při nízkých rychlostech dochází k výraznějšímu ovlivnění tloušťky filmu vlivem vstupování částic zahušťovadla do kontaktu. Bylo prokázáno, že s narůstající teplotou, tedy se snižující se viskozitou základového oleje, míra ovlivnění tloušťky filmu roste. Větší ovlivnění tloušťky nenastalo pouze při nízkých rychlostech, ale i při středních rychlostech. Výsledná tloušťka filmu je příznivě ovlivněna zvětšující se koncentrací zahušťovadla a taktéž viskozitou oleje. Na Obr. 12 je znázorněný popis průchodu plastického maziva EHD kontaktem, kdy lze průchod rozdělit do několika fází. V oblasti před kontaktem dochází k uvolňování větších kousků zahušťovadla, které se vlivem střihového namáhání dále dělí. Chování plastického maziva v této oblasti závisí

mimo jiné i na velikosti částic zahušťovadla. Větší částice prochází přímo do kontaktní oblasti, u menších částic dochází k víření před oblastí, kdy část dále postupuje do kontaktu a část obtéká kontakt. U drobných částic zahušťovadla vstupujících do kontaktu dochází k dalšímu zmenšení a k přeorientování ve směru působícího střihového namáhání. V kontaktní oblasti díky vysokému tlaku dochází k výraznému nárůstu viskozity až do stavu skelného přechodu. Po výstupu z kontaktu mazivo ulpívá na kontaktních površích.




Obr. 12 Popis průchodu plastického maziva EHD kontaktem

**Závěr**

Vliv zahušťovadla na tvorbu filmu je podstatný. Bylo zjištěno, že vyšší koncentrace zahušťovadla a nižší viskozita přispívají k většímu vlivu zahušťovadla na tvorbě filmu. Nižší viskozita maziva způsobila i aktivnější účast při středních rychlostech. Viskozita maziva a rychlost v kontaktu určují tloušťku filmu v kontaktu. Od nízkých rychlostí do tranzitní rychlosti, kdy je tvorba filmu převážně dána viskozitou základového oleje, dochází k výraznému ovlivnění tloušťky. Ovlivnění nejspíše koresponduje se vzdáleností kontaktních povrchů od sebe, kdy nedochází k takovému víření zahušťovadla a střihovému namáhání maziva před kontaktem. Do kontaktu jsou poté vtahovány větší kousky zahušťovadla, které utvářejí větší tloušťku filmu

---

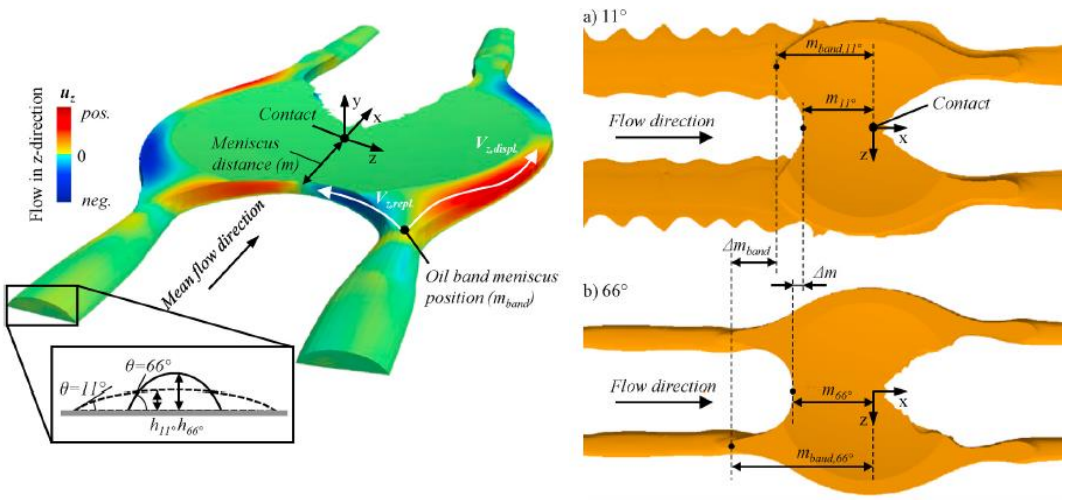
## 3.4 Nejnovější publikace

[41] FISCHER, Dennis, Stephan VON GOELDEL, Georg JACOBS a Andreas STRATMANN. Numerical investigation of effects on replenishment in rolling point contacts using CFD simulations. *Tribology International*. 2021, roč. 157, č. October 2020, s. 106858. ISSN 0301679X.

Výše zmíněná publikace se zaměřuje na vytvoření CFD simulace replenishmentu maziva kolem bodového kontaktu. Tento kontakt byl vytvořen mezi deskou a odvalující se kuličkou. Simulace má za cíl identifikovat vliv množství maziva a vliv smáčivosti kontaktních povrchů na vzdálenost menisku od kontaktu, právě vzdálenost menisku je klíčová a ukazuje velikost hladovění kontaktu. Simulace obsahuje proudění vzduchu v okolí i proudění samotného maziva. Validace modelu proběhla na tribometru konfigurace BoD. Cílem bylo přiblížit chování replenishmentu v ložisku, kdy je mazací film vytvářen pouze pomocí vyloučeného základového oleje a zahušťovadlo vstupuje do kontaktu minimálně.

**Výsledky**

Výsledná vzdálenost menisku byla silně ovlivněna množstvím maziva i smáčivostí povrchů. Pro hodnocení byl využit parametr (kapilární číslo) zohledňující rychlost odvalování, povrchové napětí i množství maziva dostupného v okolí kontaktu. Bylo prokázáno, že větší kontaktní úhel mezi mazivem a povrchem napomáhá ke zvětšení vzdálenosti menisku od kontaktu. Při porovnávání různého množství maziva a kontaktního úhlu bylo zjištěno, že vzdálenost menisku se zkracuje  klesajícím množstvím maziva velice podobně. Vliv kontaktního úhlu maziva má značný dopad na tvar postranních rezervoárů, které přímo zodpovídají za tvorbu menisku. Navyšující se množství dostupného maziva má pozitivní vliv na tvorbu menisku, ale množství je omezováno tvorbou postranních rezervoárů. Při dosažení určitého množství maziva už neodcházelo k prodloužení stavu, kdy distribuce neměla charakteristický tvar tzv. „butterfly shape“  Obr. 13. Při přechodu do stavu dva už docházelo k přibližování nebo setrvávání vzdálenosti menisku.




Obr. 13 Distribuce maziva kolem EHD kontaktu s rozdílnou smáčivostí povrchů

**Závěr**

I když práce popisovala pouze chování oleje v blízkosti kontaktu, definovala stěžejní parametry určující vzdálenost menisku od kontaktu. Právě tato vzdálenost je zásadní pro oddálení stavu silného hladovění. Výrazný vliv na toto oddálení má také dostupné množství maziva, dále parametry jako smáčivost a kapilární číslo.. Podle výsledků je zřejmé, že vzdálenost postranních pásů od sebemá vliv na tvorbu menisku. Čím je vzdálenost větší, tím je tvorba omezenější. Vzdálenost je ovlivněna právě množstvím maziva, smáčivostí ale taktéž samotnou geometrií kontaktní dvojice. Ovšem chování samotného oleje se bude lišit od chování plastického maziva, které celou situaci významně problematizuje.

---

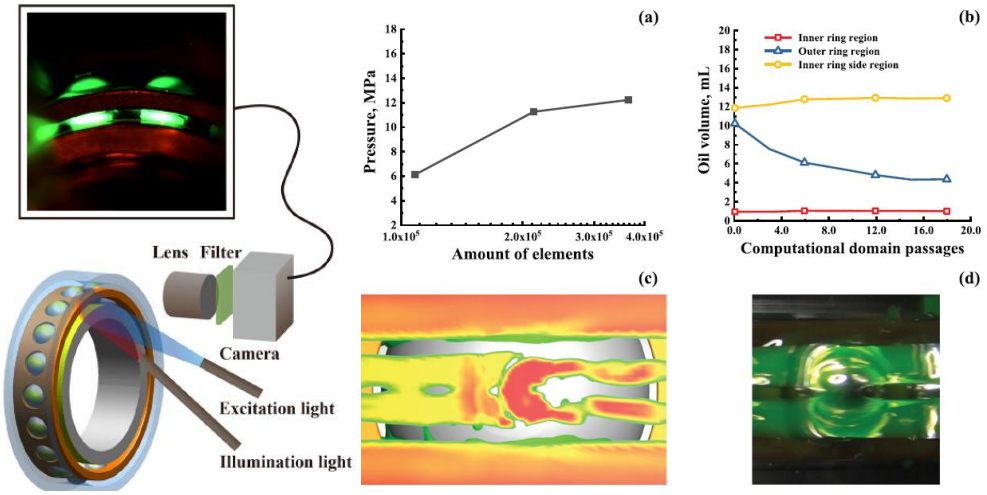
[29] CHEN, Hongbai, He LIANG, Wenzhong WANG a Shengguang ZHANG. Investigation on the oil transfer behaviors and the air-oil interfacial flow patterns in a ball bearing under different capillary conditions. *Friction*. 2022, roč. 1. ISSN 2223-7690.

[30] CHEN, Hongbai, Wenzhong WANG, Ziqiang ZHAO a He LIANG. Evolution and flow maps of the oil layer in successive rolling point contact systems: Bearing as a case. *Physics of Fluids*. 2022, roč. 34, č. 3. ISSN 10897666.

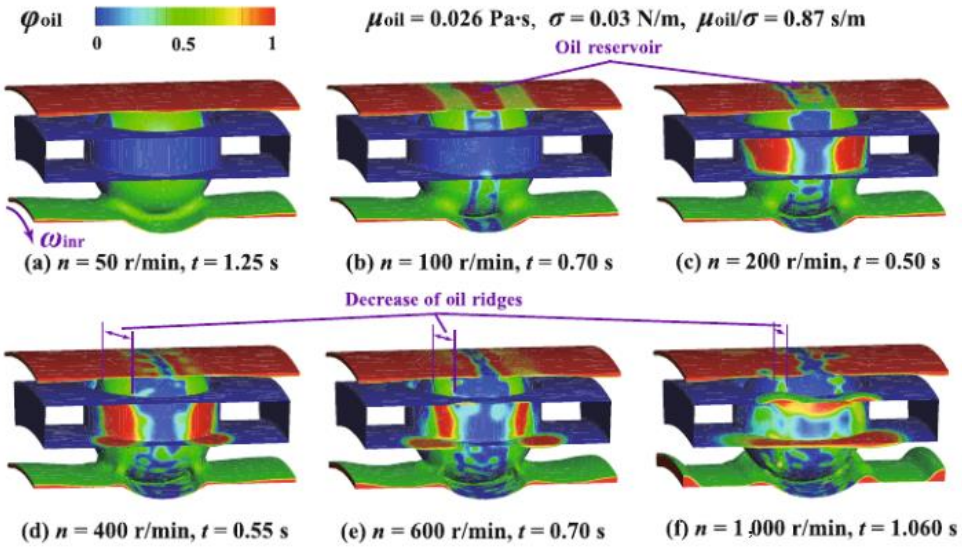
Následující dvě práce mapují migraci oleje v ložisku pomocí experimentů pozorování a CFD simulace. Pro experimenty je využíváno zjednodušené ložisko, kde je vnější kroužek nahrazen skleněným. V obou případech byl využit skleněný kroužek bez drážky. Pomocí fluorescence lze pozorovat i kvantifikovat množství redistribuovaného maziva po ložisku. Následně, výsledky experimentů byly porovnávány z CFD simulací.

**Výsledky**

Obě práce se shodují v hlavních parametrech ovlivňujících migraci maziva po ložisku. Klíčovým parametrem je rychlost otáčení ložiska a poměr mezi viskozitou maziva a povrchovým napětím. Experimentální data i data ze simulace ukazují shodu v množství maziva kolem kontaktu, kdy po určité době dochází ke stabilizaci. U vnějšího kroužku docházelo k postupnému snižování množství maziva, zato u vnitřního kroužku bylo množství maziva stabilizované. Při pozorování replenishmentu kolem kontaktu byla prokázána shoda se zařízení Ball-on-disk. Ovšem, chybějící drážka v kroužku značně změnila replenishment. Při pozorování distribuce maziva na valivém elementu lze pozorovat tvorbu postranních pásů. Velikost postranních pásů se s vzrůstající rychlostí zvětšuje, i množství maziva přímo před valivou dráhou se zmenšuje. Meniskus na vnějším kroužku se při vyšší rychlosti rozpadl a mazivo se přesunulo do postranních pásů. Na vnitřním kroužku lze pozorovat tendenci spojování postranních pásů před kontaktem i při vyšší rychlosti Obr. 14. Důvodem může být navyšování objemu postranních pásů na vnitřním kroužku.




Obr. 14 Schéma aparatury a distribuce maziva




Obr. 15 Vizualizace maziva při rozdílných rychlostech

## Závěr

Práce se zabývají popsáním migrace maziva v ložisku, a to jak v nejbližším okolí kontaktu, tak ve vzdálenějším okolí Obr. 15. Práce docházejí ke stejnému závěru jako publikace [41] tedy že primární vliv má rychlost, povrchové napětí, množství a viskozita maziva. Lze pozorovat rozdíl v množství maziva kolem kontaktu, kdy se na vnějším kroužku nacházelo více maziva. Není zřejmé, jestli byl rozdíl zapříčiněn odstředivou silou, nebo absencí drážky v prstenci. Práce ovšem nenabízejí propojení replenishmentu a tloušťky filmu v kontaktu.

---

[42] LIANG, He, Yu ZHANG a Wenzhong WANG. Influence of the cage on the migration and distribution of lubricating oil inside a ball bearing. *Friction*. 2022, roč. 10, č. 7, s. 1035–1045. ISSN 22237704.

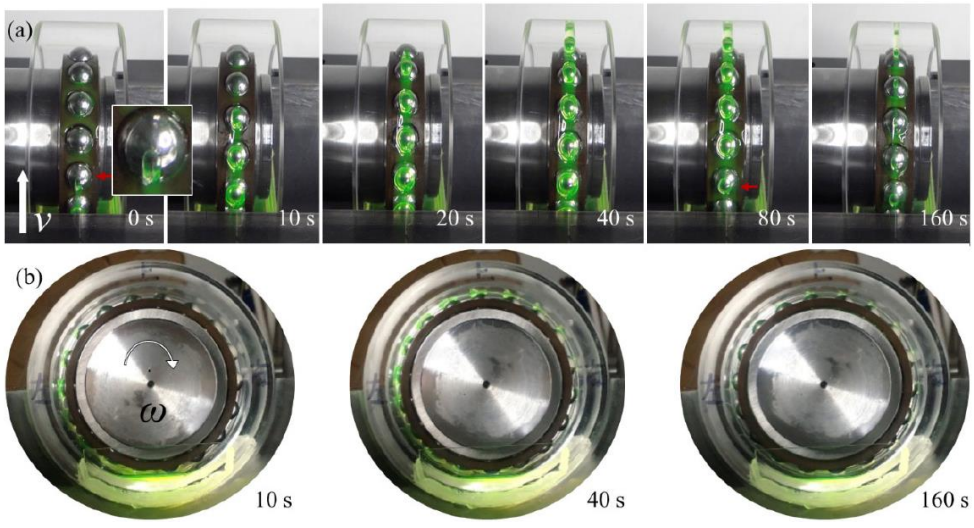
Publikace je zaměřena na pozorování distribuce oleje v ložisku se zaměřením na vliv geometrie klece Obr. 16 . Práce využívá podobné zařízení jako předchozí zmíněná publikace. Jedná se o kuličkové ložisko s vnějším skleněným kroužkem, přes který je možné pozorovat chování maziva. Cílem práce bylo hodnotit množství maziva kolem kontaktu a migraci po ložisku.

**Výsledky**

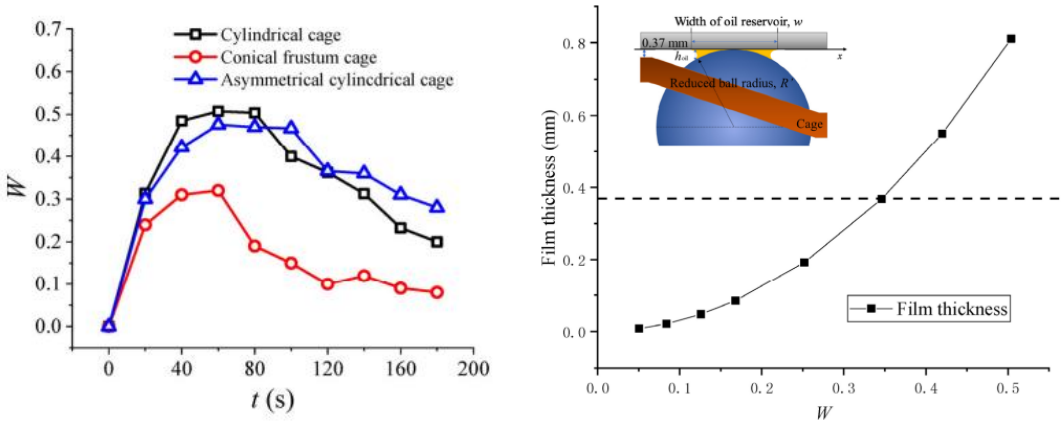
Práce ukazuje vliv množství maziva kolem kontaktu na tloušťku filmu v kontaktu. S navyšujícím se množství maziva kolem kontaktu roste i tloušťka v kontaktu. Pro hodnocení byl využít parametr W, který je definován následovně:

$$W = \frac{\mathrm{w}}{\mathrm{D}} \qquad (4)$$

Kde w je maximální šířka rezervoárů maziva kolem kontaktu a D je průměr valivého elementu. Při konstantní rychlosti docházelo během experimentu k migraci maziva po ložisku. Tato migrace byla silně ovlivněna geometrií klece Obr. 17. Nejhorší výsledky ukazovala konická klec. Konický tvar klece zapříčinil vyraznější posun maziva na stranu ložiska. Tento posun omezil množství maziva na tvorbu rezervoárů kolem kontaktu. Porovnání symetrické a asymetrické klece nevykazovala výraznější rozdíl. Autoři publikace provedli experimenty s povlakováním klece s olejofobickým povlakem. Tento povlak navýšil množství dostupného maziva pro replenishment kolem kontaktu. Během průběhu experimentu byl pozorován postupný úbytek maziva kolem kontaktu, který způsobil postupný pokles tloušťky filmu. Otvory v kleci pro valivé elementy ovlivňují schopnost replenishmentu dvojím způsobem. První vlastností je stírání oleje z valivého elementu a druhou je zásobiště oleje pro mazání. Volba vhodné vůle mezi otvorem v kleci a valivým elementem se jeví jako klíčový prvek pro návrh ložiska.




Obr. 16 Znázornění migrace maziva v ložisku




Obr. 17 Vývoj bezrozměrného parametru W na době otáčení ložiska.

**Závěr**

Práce analyzovala distribuci oleje v ložisku během úvodních otáček provozu. Bylo prokázáno, že geometrie klece má signifikatní dopad na výsledný replenishment maziva. Zásadní pro vývoj tloušťky je dostupné množství maziva v okolí kontaktu, které se bude podílet na tvorbě rezervoárů. I když se jedná o zjednodušené ložisko a úvodní čas provozu, článek dává dobrý vhled do chování maziva v ložisku.

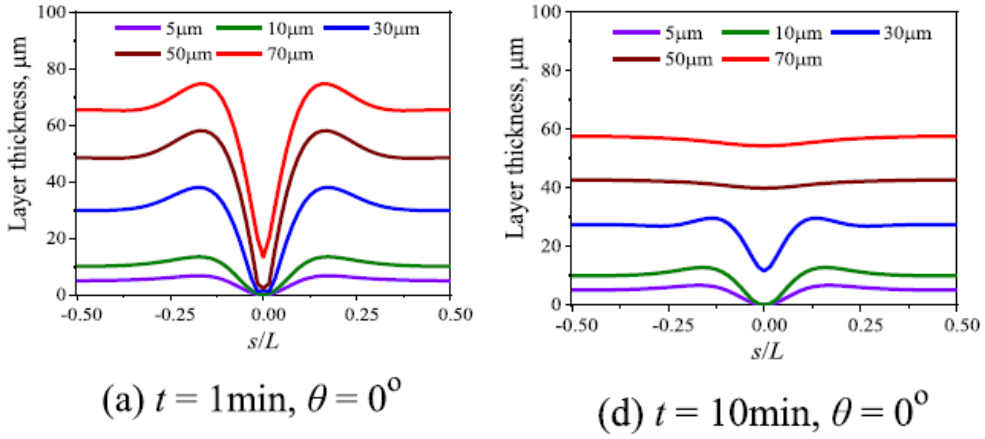
---

[43] GAO, Min, He LIANG, Wenzhong WANG a Hongbai CHEN. Oil redistribution and replenishment on stationary bearing inner raceway. *Tribology International*. 2022, roč. 165, č. October 2021, s. 107315. ISSN 0301679X.

Tento článek pojednává o redistribuci maziva na povrchu valivé dráhy statického ložiska. Představuje teoretický model popisující migraci maziva zapříčiněnou povrchovým napětím a gravitační silou. Jsou zkoumány vlivy jako množství maziva, viskozita maziva, velikost povrchového napětí. Bylo prokázáno, že nižší viskozita má kladný efekt na replenishment stejně tak jako větší povrchové napětí. Model byl experimentálně verifikován na vnitřním kroužku ložiska. Na dráze byla provedena stopa a bylo pozorováno a měřeno znovuzacelení filmu.

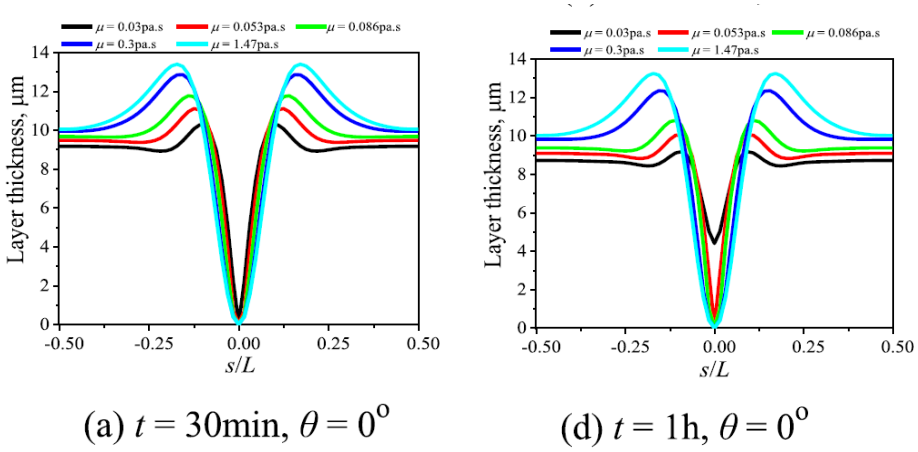
**Výsledky**

Výsledky ukazují, že po projezdu se má vrstva filmu tendenci ustálit na stabilní hodnotě. Byl pozorován přesun maziva po ložisku, kdy na vyšší straně ložiska došlo k pozvolnému vymizení maziva vlivem gravitační síly. Jednalo se o místo, kde po čase nemohl nastat replenishment. Naopak, situace vespod ložiska byla přesně opačná. Větší počáteční tloušťka filmu a větší povrchové napětí jsou příznivé Obr. 18.




Obr. 18 Vliv množství naneseného maziva na replenishment

Snižující se viskozita měla příznivý vliv na replenishment Obr. 19. V případě maziva s vyšší viskozitou docházelo k pomalejšímu replenishmentu a boční „hřebeny" byly podstatně větší. Při navyšování vlivu povrchového napětí docházelo ke zmenšování vzdálenosti vrcholů těchto postranních hřebenů od středu valivé dráhy. Vliv replenishmentu je ovšem v případě reálného ložiska výrazně složitější, protože do výsledku je zapotřebí zahrnout vliv spinnu valivých elementů i vliv klece.




Obr. 19 Vliv povrchového napětí na replenishment

## Závěr

Výše zmíněná publikace popisovala zásadní parametry určující migraci maziva po povrchu valivé dráhy ložiska. Tyto parametry přímo ovlivňují i replenishment kolem kontaktu a jsou tedy stěžejní i pro pochopení funkce celého ložiska. Experimenty i predikční model popisovaly pouze statický model ložiska. Ovšem vytvořené závěry jsou aplikovatelné na reálné fungující ložisko. Modely byly omezeny na aplikaci čistého oleje, kde jsou jasně stanoveny veličiny jako viskozita nebo povrchové napětí. V případě využití plastického maziva lze očekávat rozdílné výsledky.

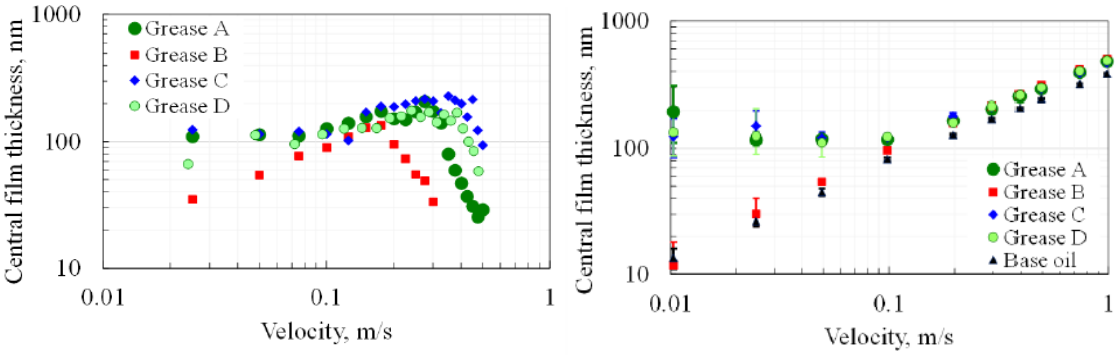
[44] K., Sakai, Yusuke AYAME, Yoshimu IWANAMI a Nobuharu KIMURA. sakai-2020-Observation of Grease Fluidity in a Ball Bearing Using Neutron Imaging Technology.pdf. *Tribology Online*. 2021, roč. 2, s. 146–150

[45] SAKAI, Kazumi, Yasuha TOKUMO, Yusuke AYAME, Yuji SHITARA, Hiroyoshi TANAKA a Joichi SUGIMURA. Effect of Formulation of Li Greases on Their Flow and Ball Bearing Torque. 2016, roč. 2, s. 168–173.

Výše zmíněné publikace pojednávají o vlivu zahušťovadla na chování plastického maziva v ložisku. Publikace potvrzují, že rozdílná chemická podstata zahušťovadla způsobuje rozdílné chování, které se projeví rozdílným odporem ložiska. Vybraná maziva byla zkoumána na tribometru BoD, kde pomocí optické interferometrie byla pozorována ochota zahušťovadla vstupovat do kontaktu. Následně byly analyzovány postranní rezervoáry. Rozdílné chování maziva se projevilo i v celém ložisku. Pomocí neutronového zobrazovacího systému, díky kterému lze pozorovat reálný pohyb maziva po ložisku, byly pozorovány rozdíly v distribuci v okolí kontaktu Obr. 21.

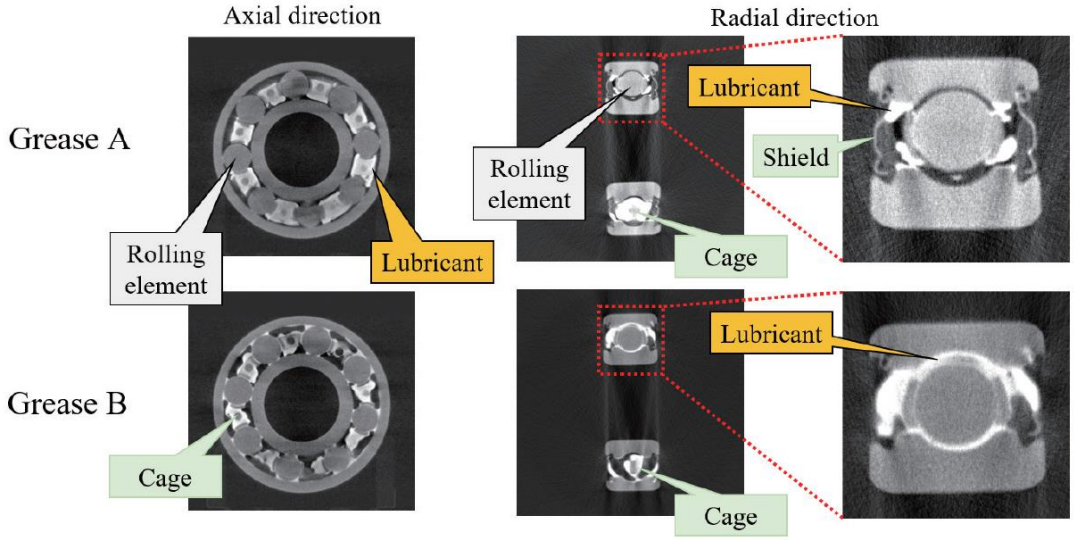
**Výsledky**

Provedené experimenty na tribometru BoD s rozdílnými mazivy ale stejnými podmínkami ukazují různé chování Obr. 20. V případě hladovějících podmínek, kdy nebylo uměle dodávané mazivo do kontaktu, docházelo k hladovění při rozdílné rychlosti. Mazivo B, u kterého došlo k vyhladovění nejrychleji, vykazovalo při nižších rychlostech nejmenší odpor. Při plně zaplavených podmínkách se mazivo chovalo skoro jako základový olej, tedy při nižších rychlostech nedocházelo k vstupování zahušťovadla do kontaktu. Menší vliv zahušťovadla a větší ochota k hladovění svědčí o méně příznivém inlet-replenishmentu maziva.




Obr. 20 Vývoj centrální tloušťky v závislosti na rychlosti (hladovější/plně zaplavený kontakt)

Distribuce maziva v ložisku se liší v závislosti na použitém zahušťovadle. Mazivo se zahušťovadlem typu stearátu litného (Grease B), způsobujícím vyšší odpor ložiska, se mělo snahu shromažďovat více v okolí valivých elementů Obr. 21. Vlivem brodění elementů v plastickém mazivu a většího podílu zahušťovadla v kontaktu rostl i odpor ložiska. Větší tendence k ulpívání maziva na valivé elementy je dána polaritou zahušťovadla. Čím větší polarita zahušťovadla, tím větší ochota k ulpívání. Mazivo A s nižší polaritou se naopak mělo tendenci shromažďovat mezi elementy na kleci. Větší míra zahušťovadla ve valivé dráze se projeví větší tloušťkou filmu v kontaktu a menší úrovní hladovění. Naopak, mazivo způsobující menší odpor ložiska bude vytvářet tenčí mazací film, a citlivost k vyhladovění kontaktu tak bude vyšší.




Obr. 21 Vizualizace rozložení maziva pomocí neutronového zobrazování

**Závěr**

Zahušťovadlo způsobuje rozdílné chování plastického maziva v ložisku, které se projevuje rozdílným odporem, tloušťkou filmu anebo ochotou k hladovění. Zmíněné publikace popisují chování zahušťovadla v kontaktu při nízkých rychlostech, kdy je vliv zahušťovadla nejvýraznější. Dále publikace popisují rozdílné rozložení v ložisku. Vliv na repenishment byl okrajově zmíněný při snímcích kontaktu na tribometru BoD. Metoda neutronového zobrazování nedisponuje takovou přesností, aby byla schopna vizualizovat i inlet-replenishment kolem kontaktu.

# 4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE

Z provedené rešerše publikovaných prací je patrné, že replenishment plastického maziva v radiálním kuličkovém ložisku má přímý vliv na tloušťku filmu v kontaktu. Pokud se nedokáže nashromáždit dostatečné množství maziva před kontakt, tvorba mazací vrstvy je negativně ovlivněna a hrozí poškození ložiska. V současné době existuje celá řada teoretických prací, které umožňují předpovědět tloušťku mazacího filmu v závislosti na okolních podmínkách [14], [46], [20], [35], [47]. Tyto modely dokáží ukázat vliv provozních parametrů, ovšem řešení je převážně aplikovatelné na základový olej. Teoretické modely umožňují i předpovědět distribuci maziva po vnitřní geometrii ložiska [15], [16], [48] a pozvolný pokles tloušťky vlivem tlaku a přejezdů. V kontextu práce lze vyvodit tyto závěry:

- Kontaktní tlak mezi elementy a kroužkem ložiska způsobuje boční tok maziva, kdy mazivo má tendenci se rozestoupit do stran. Tento mechanismus způsobuje pozvolný pokles tloušťky mazací vrstvy.
- Pokles mazací vrstvy se stabilizuje na hranici několika desítek nanometrů, důvodem stabilizovaní jsou Van der Waalsovy síly, které hrají významnou roli při drobných vzdálenostech povrchů. Pozvolný pokles tloušťky je ovlivněn samotnou geometrií těles.
- Proti poklesu mazací vrstvy působí mechanismy replenishmentu.
- Replenishment mimo kontakt je při porovnání s rychlostí přejezdů zanedbatelný, proto nejpodstatnější děje se odehrávají těsně před samotným kontaktem.
- Podstatnými parametry ovlivňujícími mechanismus replenishmentu v ložisku jsou viskozita maziva, povrchové napětí, Van der Waalsovy síly, valivá rychlost, množství dostupného maziva, odstředivé síly, gravitační síly a samotná vnitřní geometrie ložiska a tvar kontaktní oblasti.
- Pokud se před kontaktem nachází méně než dvojnásobné množství maziva, než je v samotném kontaktu, dochází ke zhoršení schopnosti tvorby mazacího filmu v tomto kontaktu. Zhoršení tvorby mazacího filmu je zapříčiněno omezením vzdálenosti, na kterou působí kontaktní tlak.
- Většina modelů není schopna zahrnout vliv zahušťovadla na replenishment a proto se soustředí výhradně na základový olej.

Hlavním nástrojem pro studium replenishmentu v posledních několika desetiletích byl optický simulátor v konfiguraci Ball-on-disc [10]. Tato konfigurace nabízí experimentální validaci teoretických modelů popisující závislost tloušťky mazací vrstvy na množství maziva u vstupu kontaktu [49]. Pomocí vhodných optických metod a této konfigurace simulátoru lze pečlivě studovat tvorbu mazacího filmu v kontaktu při použití různých maziv, teplot, materiálů nebo drsností. Nabízí i vizualizaci replenishmentu maziva kolem kontaktu, kterému se ovšem nevěnuje taková pozornost [50], [51], [24]. Vhled do kontaktu poskytuje informace i o vlivu zahušťovadla na tvorbu mazacího filmu [45], [52]. Mazací film je silně ovlivněn druhem zahušťovadla, které ulpívá na kontaktních površích, a při vyšších rychlostech způsobuje větší tloušťku než jen v případě základového oleje. Lze pozorovat vliv velikosti částic zahušťovadla, chemickou podstatu ale také koncentraci zahušťovadla. Minimum prací je ale věnováno dějům před kontaktem. Při plně zaplavených podmínkách a při nízkých rychlostech lze pozorovat vznik „back-streamů“. Dochází k vytláčení kusů zahušťovadla před kontakt, kde se kusy víří a dále buď vstupují do kontaktu, nebo kontakt obtékají [26]. Množství vstupujícího zahušťovadla do kontaktu je ovlivněno rychlostí valení a při nízkých rychlostech je vstup výraznější. Vztaženo k replenishmentu v ložiscích lze konstatovat závěry:

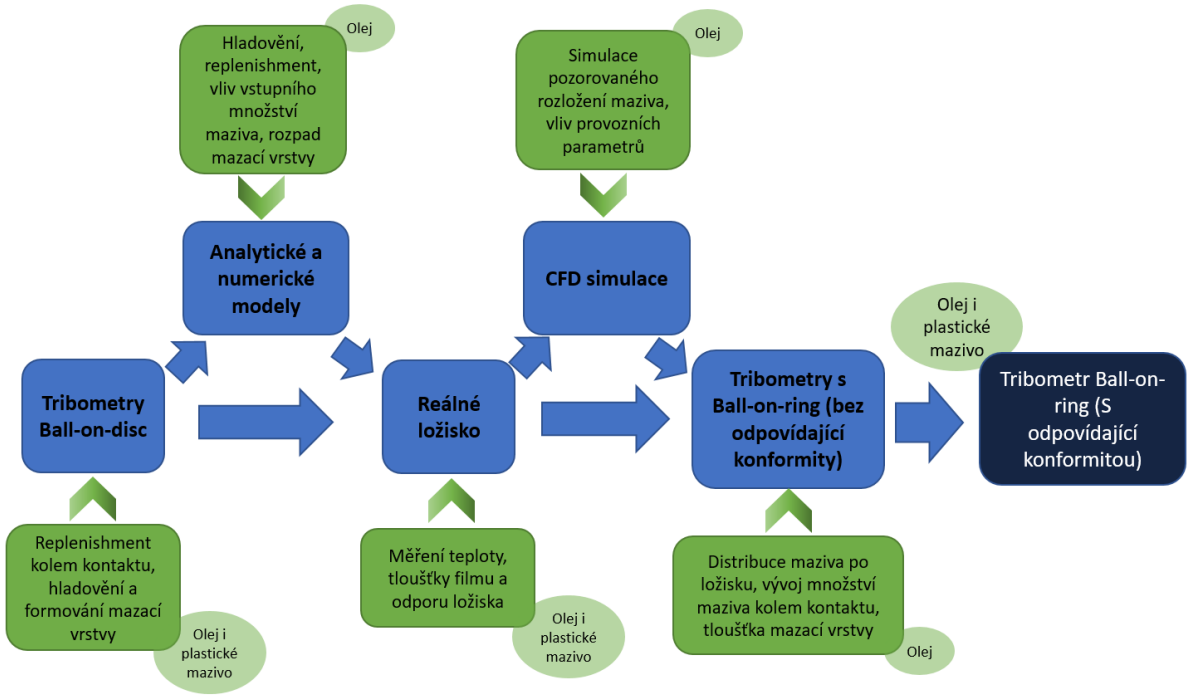
- Změna smyslu víření zahušťovadla před kontaktem má vliv na schopnost vstupu do kontaktní oblasti a tedy na tvorbu mazacího filmu.
- Rychlost se jeví jako stěžení parametr pro stanovení poměru složek plastického maziva tvořícího mazací vrstvu v kontaktu. Vliv teploty se projeví v rozdílné tranzientní rychlosti.
- Zjednodušená kontaktní geometrie tribometru ovlivňuje replenishment maziva a tím ztěžuje vytvoření stabilních hladovějících podmínek, jaké vznikají v ložisku.
- Přilnavost zahušťovadla na kontaktní povrchy je výrazně ovlivněna jeho polaritou. Nižší polarita zahušťovadla usnadňuje tok kolem kontaktu a vytváří tak horší inlet replenishment kontaktu.
- Při snadnějším uvolnění základového oleje ze struktury plastického maziva dochází k efektivnějšímu replenishmentu , tedy mazací mechanismy jsou ovlivněny převážně reologickými vlastnostmi a množstvím dostupného oleje.
- Experimentální metody se jeví jako jediný možný přístup pro sledování a analyzování jednotlivých složek kolem a v kontaktu.

Nejnovější přístup rozšiřující problematiku replenishmentu je využití tribometrů s věrohodnější geometrií. Přímý vhled do ložiska umožňuje pozorovat reálné rozložení maziva. Práce využívající ložisko s nahrazeným vnějším kroužkem [42], [30], [29], [28], poskytuje propojení mezi obvyklým Ball-on-Disk tribometrem a reálným ložiskem. Přestože tyto práce překonávají experimenty na obvyklých tribometrech, nenabízejí identické kontaktní podmínky mezi elementy s vnějším kroužkem. Zjednodušení znemožňují pozorování skutečného replenishmentu v tomto místě a proto jsou informace nekompletní. V experimentech byl využíván pouze základový olej, který vytvořil více stabilní podmínky, ovšem zkreslené od běžného ložiska. V souvislosti s inlet replenishmentem lze stanovit tyto závěry:

- Většina maziva neslouží pro tvorbu mazacího filmu v kontaktech. Na tvorbě se podílí jen nepatrné množství a zbytek maziva cirkuluje po ložisku.
- Vývoj toku maziva kolem kontaktu se mění s rychlostí, a protržení je ovlivněno kapilárním číslem.
- Při navyšování rychlosti dochází k rozpadu mazací vrstvy na površích. Vyšší rychlost způsobuje kratší čas pro nashromáždění dostatečného množství mazivo pro tvorbu mazací vrstvy v kontaktu.
- Vyšší viskozita maziva způsobuje zhoršení schopnosti formování vstupního menisku, proto dochází ke snazšímu a rychlejšímu rozpadu mazací vrstvy.
- Velikost mazací vrstvy na valivých elementech může být pozitivně ovlivněna vhodnou geometrií klece, která funguje jak stěrka pro shromažďování maziva.

Naprostá většina autorů dosavadních prací využila pro studium replenismentu v radiálních kuličkových ložiscích experimentální zařízení se zjednodušenou kontaktní geometrií. Tedy jediné experimenty s přesnou geometrií byly zatím provedeny na reálných ložiscích, která ovšem neumožňují přímé pozorování kontaktní oblasti. Tyto experimenty nelze provádět za konstantních podmínek jako je teplota nebo čisté valení, výzkum je tedy nutné omezit tribometry s nevěrohodnou geometrií, nebo na analytické nebo numerické modely. Tyto vyvinuté modely zatím nedokáží věrohodně zohlednit všechny reologické vlastnosti plastických maziv, v současné době je tedy jedinou cestou pro studium chování plastických maziv v okolí kontaktu experimentální přístup.

Z provedené rešerše je patrné, že k problematice replenishmentu maziva v RKL se v průběhu let přistupovalo různými přístupy. Jednotlivé přístupy a metody vznikaly pozvolně a často paralelně, proto je obtížné stanovit jasný průběh. Pro zjednodušení a snazší orientaci v problematice lze použít následovné schéma Obr. 22




Obr. 22 Schéma evoluce problému

# 5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

## 5.1 Zaměření disertační práce

Studiu mazacích procesů uvnitř radiálních kuličkových ložisek se věnovala velká škála publikací. Značný důraz byl kladen na studium dějů vznikajících v kontaktní oblasti, které jsou přímo zodpovědné za životnost ložiska. Dostatečná pozornost ovšem zatím nebyla věnována dějům před kontaktní oblastí u těchto ložisek. Děje před kontaktní oblastí přímo ovlivňují následné formování mazací vrstvy v kontaktu. Dosavadní výzkum se převážně opírá o experimenty využívající tribometry se zjednodušenou geometrií, numerické modely nezohledňující komplexní reologické vlastnosti plastických maziv, nebo o experimenty s reálnými ložisky, které ovšem neumožňují přímé pozorování vnitřních mazacích procesů. Proto jsou dosavadní studie nedostatečné a neposkytují ucelené informace o přesném chovaní maziva v oblasti před kontaktem. Pomocí nejpoužívanějšího zařízení typu Ball-on-disc jsme navíc schopni vytvořit dobře podmínky plně zaplavených kontaktů, nebo silně hladovějících kontaktů. Ovšem situace v reálném kuličkovém ložisku se nejčastěji nachází mezi těmito dvěma extrémy. Hlavním faktorem přispívajícím ke stabilní úrovni hladovění je množství dostupného maziva, které je schopné se nashromáždit před kontaktem. Komplexní práce studující inlet-replenishment na odpovídající geometrii radiálních kuličkových ložisek chybí, a toto bílé místo si klade za cíl zaplnit tato disertační práce

Disertační práce, kterou předložené pojednání představuje, bude zaměřena na inlet replenishment plastického maziva před kontaktem vznikající v radiálních kuličkových ložiscích. Práce bude orientovaná jako 95% základní výzkum a 5% aplikovaný výzkum a jejím cílem je přinést rozšiřující poznání o chování plastického maziva. Bude zkoumán vliv vnitřní geometrie ložiska a situací, ve kterých se ložiska nachází. Výsledkem budou nové poznatky o chování maziva, které mohou napomoct při optimalizaci samotných maziv.

## 5.2 Cíl disertační práce

Základní podstatou této práce je výzkum inlet-replenishmentu radiálních kuličkových ložisek mazaných plastickými mazivy.

Dílčí cíle:

- Zprovoznění testovacího zařízení a odlazení optické metody
- Návrh parametrů experimentu pro ověření vlivu vnitřní geometrie a vlastností plastických maziv

- Experimentální studium vlivu radiální vůle v ložisku na inlet-replenishment maziva
- Experimentální studium vlivu konformit na inlet-replenishment maziva
- Zjištění reálného toku plastického maziva kolem kontaktu v radiálním kuličkovém ložisku.
- Studium vlivu vnitřní geometrie na tok plastického maziva kolem kontaktu

**Vliv konformity na inlet-replenishment a citlivost k hladovění kontaktu**

Mazací procesy u valivých ložisek lze rozdělit na Churning a Bleeding fázi. Nejprve nastává Churning fáze, kdy se mazivo distribuuje po ložisku a jsou splněny podmínky plně zaplaveného kontaktu. Poté nastává Bleeding fáze, která trvá většinu provozního času ložiska. Bleeding fáze nemá charakter plně zaplaveného kontaktu, spíše kontaktu ve stavu mírného hladovění, kdy tloušťka filmu je nižší než teoretická tloušťka filmu [6]. Tato fáze je doprovázena stavy silného hladovění, kdy dochází k ohřátí ložiska vlivem opotřebení povrchů. Tyto situace jsou silně nechtěné a jsou způsobené nedotčenou mazací vrstvou, která by oddělovala kontaktní povrchy od sebe. Úroveň hladovění je stěžejní pro životnost daného ložiska a je závislá na reologických vlastnostech maziva, aplikovaném množství maziva, na geometrii těles a kinematice těles [20]. Jedním z klíčových parametrů při návrhu ložiska je konformita mezi valivými elementy a valivou dráhou. Konformita je zodpovědná za řadu vlastností ložisek, a to za jeho valivý odpor, tuhost a také i životnost [53]. I když konformita je klíčový parametr pro vnitřní geometrii ložiska, prozatím nebyla provedena studie zhodnocující vliv tohoto parametru na inlet-replenishment maziva a vliv na hladovění ložiska.

**Vědecká otázka 1**

*„Jaký má vliv konformita radiálního kuličkového ložiska na replenishment maziva kolem kontaktu a úroveň hladovění kontaktu?“*

**Pracovní hypotéza 1**

*„Rozdílná konformita u ložisek má přímý vliv na velikost kontaktní oblasti. Čím je konformita menší, tím je kontakt širší, a dochází tak k většímu rozestoupení maziva do stran vlivem tlaku těles. Větší vzdálenost maziva od středu kontaktu znamená delší čas pro zaplavení tohoto kontaktu* [36]. *Menší konformita ale vytváří silnější kapilární efekt, který má silně pozitivní vliv na schopnost replenishmentu* [20]. *Širší kontakt způsobuje větší odpor proti toku maziva do stran, tedy vykazující stejnou úroveň hladovění jako kontakt užší s větším množství dostupného maziva před kontaktem* [54].*“*

### Vliv radiální vůle valivého ložiska na inlet-replenishment maziva

Významným faktorem při návrhu ložiska je vnitřní vůle, která vzniká mezi kroužky ložiska a valivými elementy. Lze ji klasifikovat jako radiální a axiální, kdy axiální vůle bývá přibližně 10x vetší než radiální vůle. Počáteční vůle v ložisku je vždy větší než vůle při provozu ložiska, kdy vlivem předepnutí dochází k vymezení. Pro vymezení ložiskové vůle je zapotřebí ložisko předepnout v axiálním směru. Podle normy ISO Standard ISO 5753 existuje 5 tříd vnitřních vůlí sloužících pro návrh ložiska [55]. Vnitřní vůle má vliv na životnost ložiska, na tuhost a intenzitu vibrací během provozu. Větší vůle v ložisku umožňuje větší posunutí a naklopení vnitřního kroužku vůči vnějšímu kroužku. Vnitřní vůle s kombinací axiální síly mění i kinematiku valivých elementů, kdy dochází k výraznějšímu spinu v případě kuličkových ložisek a prokluzu v kontaktní oblasti.

### Vědecká otázka 2

*„Jaký má vliv radiální vůle u radiálního kuličkového ložiska na replenishment maziva?*

### Pracovní hypotéza 2

*„Velikost axiální síly u (RKL)s vnitřní vůlí způsobí posunutí kroužku vůči sobě a posunutí valivých elementů mimo dno drážky. Toto posunutí zapříčiní také posunutí rezervoárů maziva, které zásobují kontakt. Čím je umístění rezervoáru dále od dna drážky, tím větší vliv má odstředivá síla na tento proces replenishmentu* [22]. *Nesymetričnost rezervoárů zapříčiní zdeformování vstupního menisku a změnu toku maziva kolem kontaktu. Odstředivá síla ale posouvá mazivo na dno drážky, tedy mimo valivou dráhu. “*

### Vliv vnitřní geometrie ložiska na migraci zahušťovadla kolem kontaktu a jeho schopnosti se podílet na tvorbě filmu

Částice zahušťovadla vstupují do kontaktní oblasti a napomáhají při tvorbě mazacího filmu [32]. Množství zahušťovadla, které se podílí na mazání kontaktů, se liší dle provozních parametrů. Nejvýznamnějším parametrem je rychlost valení, kdy při pomalejších rychlostech má zahušťovadlo vyšší procentuální zastoupení v mazacím filmu než při vyšších rychlostech. Toto rozdílné zastoupení vytváří charakteristickou V-křivku při pozorování tloušťky filmu v kontaktu v závislosti na rychlosti [38]. Rychlost, při které dochází ke snížení koncentrace zahušťovadla na stabilní hodnotu je nazývána jako tranzientní rychlost.

**Vědecká otázka 3**

*„Jaký má vliv změna toku maziva kolem kontaktu, vlivem změny vnitřní geometrie ložiska, na vstupování částic zahušťovadla do kontaktní oblasti?“*

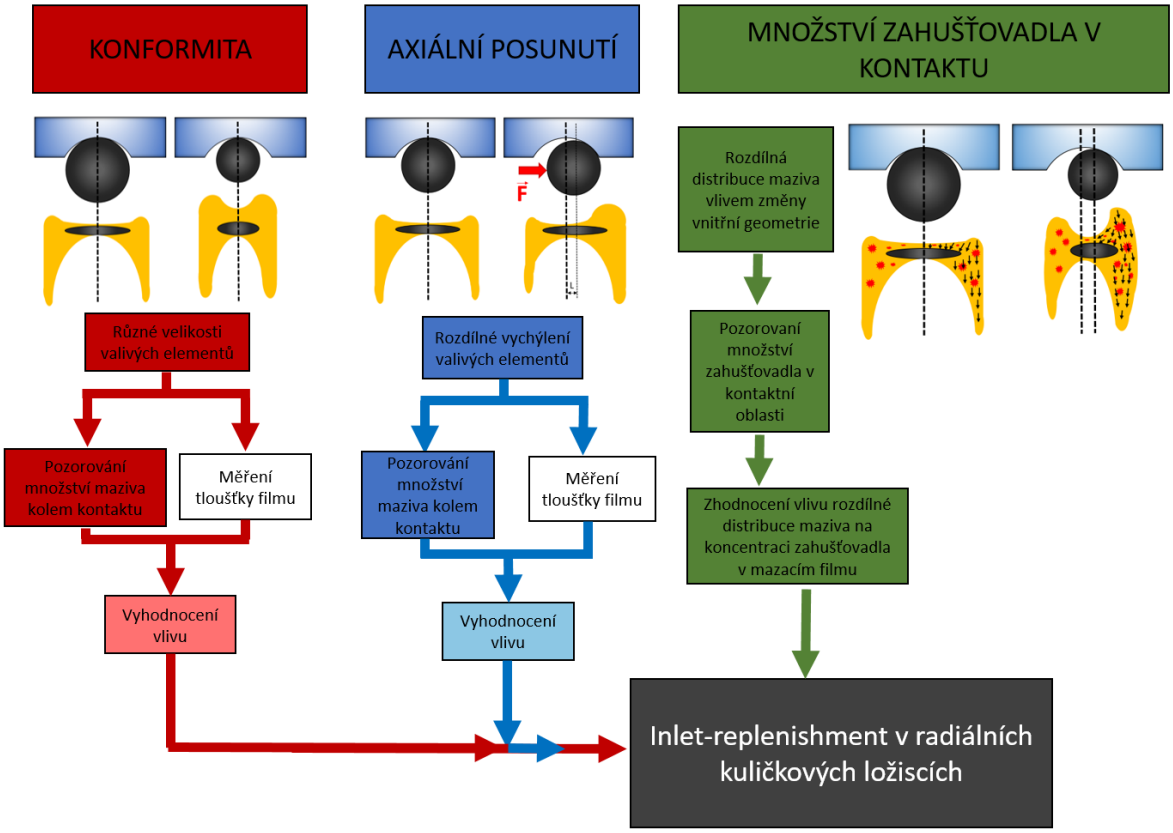
**Pracovní hypotéza 3;**

*„Tok maziva kolem kontaktu je silně ovlivněn tvarem samotného kontaktu a rozdílnou vnitřní geometrií u RDL. Odlišný tok maziva zapříčiní odlišné podmínky pro vstup částic zahušťovadla do kontaktní oblasti* [26]. *Užší kontakt napomůže k snadnějšímu obtoku maziva kolem kontaktu, zato širší kontakt napomůže k většímu víření maziva před kontaktem. Širší kontaktní oblast při menší konformitě ale vytváří užší spáru, která limituje víření maziva v této oblasti. Při posunutí elementu mimo dno drážky dojde k deformaci tvaru menisku, kdy vzdálenější část menisku obsahuje více maziva. Změna tvaru rozložení změní i styl víření před kontaktem. Způsob distribuce maziva a smyslu víření může mít vliv na množství a velikost částic zahušťovadla vstupujícího do kontaktu. Zahušťovadlo v kontaktu následně napomáhá při tvorbě mazacího filmu, ale navyšuje odpor ložiska a jeho vibrace během provozu* [24].

## 5.3 Způsob řešení a použité metody

Na základě získaných poznatků z literatury v problematice chování plastického maziva v RKL byl složený předběžný postup, podle kterého bude možné vyplnit vytyčená bílá místa. Řešení problematiky se bude skládat z těchto hlavních linií Obr. 23.

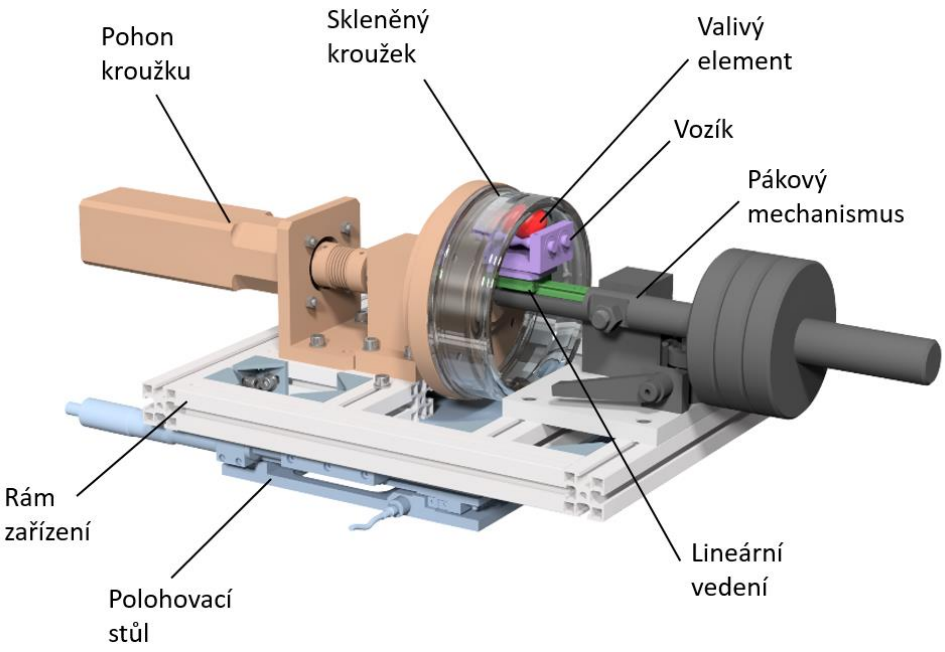
a) Studium vlivu konformity mezi drážkou a valivým elementem na citlivost k hladovění kontaktu a na inlet-replenishmentu maziva
b) Studium vlivu vnitřní vůle v ložisku na hladovění a replenishment maziva
c) Studium vlivu rozdílné distribuce plastického maziva kolem kontaktu, která je způsobená rozdílnou vnitřní geometrií RKL, na vstup částic zahušťovadla do kontaktní oblasti.




Obr. 23 Schéma postupu řešení disertační práce

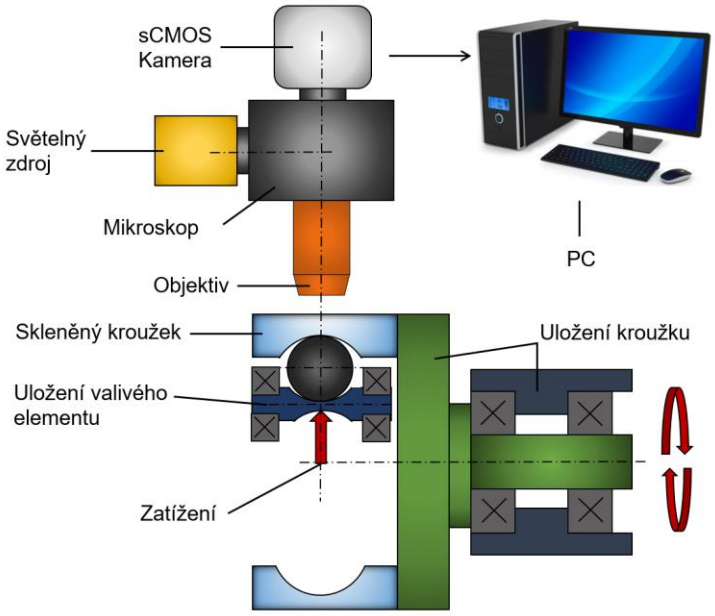
### 5.3.1 Experimentální zařízení

Opěrným zařízením pro experimentální studium bude tribometr konfigurace Ball-on-ring Obr. 24. Jedná se o zařízení, které vzniklo v rámci diplomové práce autora této práce v roce 2020. Jádrem zařízení je skleněný kroužek s drážkou a valivý element, který je přitlačovaný pákovým mechanismem ke skleněnému kroužku. Skleněný kroužek je vyroben s borosilikátového skla BK7 a má identickou geometrii s radiálním kuličkovým ložiskem 6314. Valivý element je uložen na sestavě dvou hřídelek, které zprostředkovávají podmínky čistého valení. Hřídelky i s valivým elementem jsou umístěné ve vozíku, který je připevněný k lineárnímu vedení. Toto vedení umožňuje vystředění valivého elementu na dno drážky během provozu nebo umožňuje posunutí mimo dno drážky. Navržené zařízení dokáže vytvořit kontaktní podmínky jako v radiálním kuličkovém ložisku v rozmezí rychlosti 0-2 m/s v kontaktu.




Obr. 24 Sestava experimentálního zařízení

Zařízení je navrženo s ohledem na využití optických metod. Využitou optickou metodou bude fluorescenční mikroskopie, která umožňuje studium dějů jak kolem kontaktu, tak i v kontaktu. Pro použití fluorescenční mikroskopie je podstatná vhodná transparentnost skleněného kroužku pro specifické vlnové délky tak, aby nedocházelo k filtraci pozorovaného světla. Optická sestava i s kontaktní dvojicí je zobrazena na Obr. 25. Hlavní optické komponenty jsou průmyslový mikroskop, který má k sobě připevněnou kameru sCMOS a světelný zdroj pro excitaci fluorescenční látky. Následný post-proccesing naměřených dat probíhá pomocí osobního počítače. Pro využití fluorescenční mikroskopie jsou uvnitř mikroskopu umístěné fluorescenční bločky pro filtraci světla.




Obr. 25 Schéma zařízení při využití fluorescenční mikroskopie

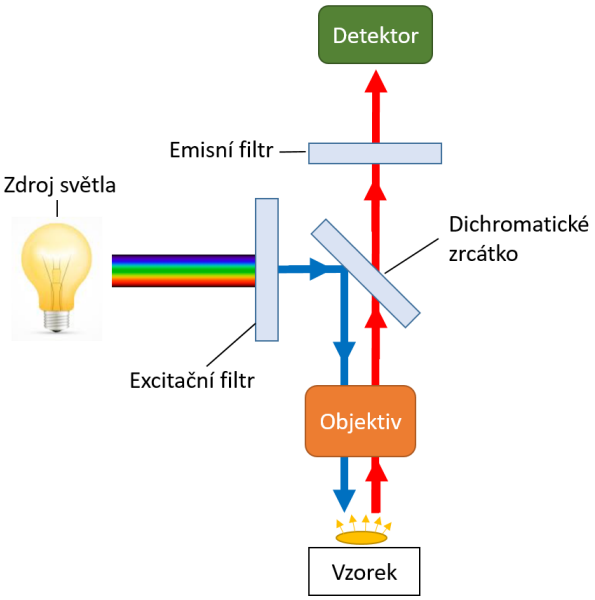
### 5.3.2 Princip fluorescentní mikroskopie

Fluorescenční mikroskopii mimo jiné také definoval Haugland a kol [56] a byla popsána ve třech fázích:

a) Excitace – foton, který je excitován žhavící lampou nebo laserem, je absorbovaný fluorescenčním barvivem, nastává fáze rozrušeného pohybu molekuly.

b) Fáze rozrušeného pohybu – molekula setrvává v tomto stavu přibližně 1 až 10 ns, během této doby podstupuje excitované barvivo určitou formu relaxace (dochází k disipaci energie), následně může fluorescenční barvivo emitovat záření.

c) Emise – vzhledem k disipaci energie během fáze rozrušeného pohybu má foton vyzařovaný barvivem nižší energii, tedy větší vlnovou délku. Tento rozdíl v hodnotách vlnových délek je známý jako Stokesův posun, který je z hlediska možné separace excitace a emise naprosto zásadní (umožňuje definovat výtěžek fluorescence).




Obr. 26 Schéma principu fluorescenční mikroskopie

Schéma fluorescenční mikroskopie je na Obr. 26. Pro použití této metody je zapotřebí mít odpovídající světelný zdroj, který bude excitovat fluorescenční barvivo. Každé barvivo potřebuje pro excitaci světlo o specifické vlnové délce, a specifická je také vlnová délka světla, které barvivoemituje. Pro zahrnutí optické dráhy a filtraci světla je zapotřebí seskládat sestavu filtrů dle schématu. Pro přiblížení pozorované oblasti je využit vhodný objektiv (který minimálně filtruje excitační a emitační spektrum světla) a pro záznam je využit detektor. V současném stavu je v plánu použít fluorescenční barvivo Pyren a Coumarin 6. Jedná se o barviva už odzkoušená a využívaná v tribologii.

| **Barvivo** | **Světelná spektra** | | **Optická aparatura** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Absorpce** | **Emise** | **Zdroj světla** | **Fluorescenčn í filtr** |
| Pyren [1%] | 310-340 nm | 450-490 nm | Led dioda/Rtuťová lampa | 49000 ET-DAPI |
| Coumarine 6 | 400-450 nm | 500-540 nm | Led - dioda/Rtuťová lampa | 19001-Aqua-longpass |

Tabulka. 1 Seznam barviv a potřebných informací

### 5.3.3 Vzorky pro experimenty

Pro experimenty budou využity plastická maziva a základové oleje od japonské společnosti Eneos. Jedná se o výrobce maziv, se kterým byla navázána spolupráce v rámci projektu Joint Research. Spolupráce přímo s výrobcem nabízí možnost obarvení vzorků fluorescenčním barvivem už během výrobního procesu plastických maziv, díky čemuž lze využít širšího spektra maziv s deklarovanými vlastnostmi. Pro experimenty je v plánu použití standardních plastických maziv na bázi lithného komplexního mýdla a urea mýdla.

Jedná se o nejrozšířenější typ plastických maziv. Jako základový syntetický olej bude využit poly-alfa-olefin. Seznam maziv je uveden v Tabulka. 2.

| **Vzorek** | **Urea-1CP** | **Urea-2CP** | **Li-1CP** |
|---|---|---|---|
| **Základový olej** | Poly-alpha-olefin(PAO) | | |
| **Zahušťovadlo** | Alicyclic di-urea | | Litný komplex |
| **Fluorescenční barvivo** | Coumarin-6 (200ppm – zahušťovadlo)<br>Pyrene (1% – PAO) | | |
| **Velikost částic zahušťovadla** | Normální | Jemné | Normální |
| **Penetrace (60W)** | 258 | 221 | 268 |

Tabulka. 2 Seznam plánovaných maziv

Maziva obsahují už potřebná fluorescenční barviva. Principem nemísitelnosti zahušťovadel a základových olejů mezi sebou je jejich rozdílná polarita. Při obarvení složek plastického maziva byla respektována jejich polarita a na nepolární olej byl navázán pyren, který se ochotně rozpouští v nepolárním rozpouštědle. Na zahušťovadlo byl navázán Coumarine 6, který má opačné vlastnosti.

### 5.3.4 Vyhodnocení výsledků měření

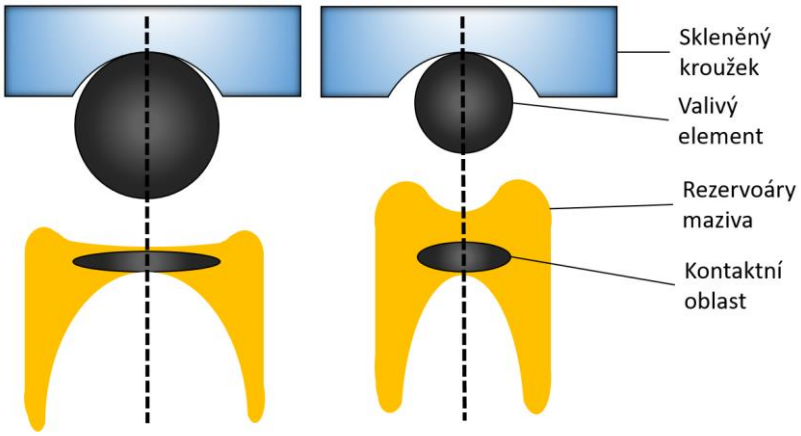
Vzhledem k povaze zvolené metody je evaluace výsledků spojena se zpracováním obrazu. Zvolený postup práce počítá s využitím kalibrace, díky které bude možné kvantifikovat množství maziva v určitém místě. Druhá cesta pro hodnocení je porovnávání výsledků mezi sebou. Pro kalibraci je nutné pořízení kalibračního snímku, ze kterého jsme na základě znalostí jeho parametrů schopni dopočítat odpovídající tloušťku k dané intenzitě maziva.

### 5.3.5 Plán publikací

Publikace budou rozděleny do tří hlavních oblastí této práce. První částí je experimentální ověření vlivu konformit na replenishment maziva a citlivost k hladovění kontaktu. Druhá publikace se bude zabývat vlivem posuvu valivého elementu v drážce a odstředivých sil na replenishment. Třetí publikace bude věnována studiu vstupování částic zahušťovadla do kontaktní oblasti.

Publikace 1

Cílem první publikace je ověření vlivu konformity na replenishment maziva a citlivost k hladovění. Pro experimenty bude využito současné zařízení s rozdílnými valivými elementy. Experimenty s kuličkami o rozdílném průměru a drážkou o konstantním rádius v prstenci vytvoří potřebné konformity. Experimenty budou provedeny jak s plastickým mazivem, tak i se základovým olejem. Cílem měření bude určení citlivosti na hladovění při rozdílných rychlostech pomocí pozorování množství maziva na vstupní oblasti, tloušťky filmu v kontaktní oblasti a množství maziva kolem kontaktu. Experimentálně získaná data budou porovnávána s predikčními analytickými vztahy pro výpočet životnosti ložiska pro dané konformity Obr. 27. Citlivost na hladovění daných konformit bude dalším z aspektů, které mohou být brány v potaz při návrhu ložisek. Výstupy z měření je v plánu publikovat v odborném časopise Tribology International (IF 4,271).




Obr. 27 Schéma vlivu konformit na distribuci maziva kolem kontaktu

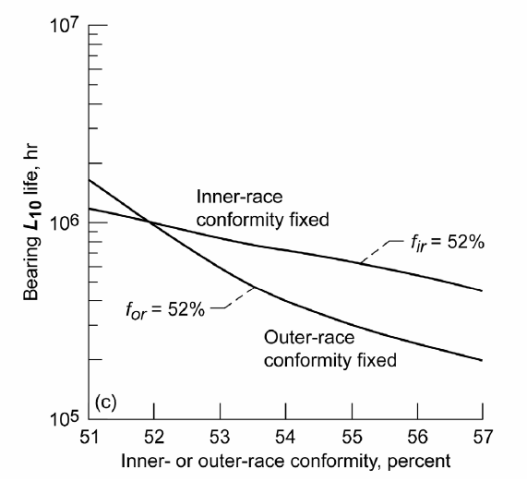
Cílem experimentů je pokrytí rozsahu běžně používaných konformit. Při konstantní velikosti drážky 13,2 mm byly zvoleny tři standardizované velikosti kuliček viz. Tabulka. 3. Jednotlivé série experimentů budou rozčleněny dle použitého zatížení a maziv. Srovnávací analytické výpočty životnosti ložisek při rozdílných konformitách obsahují konstantní zatížení na ložisko. Pokles životnosti je tedy dán přímo úměrně nárůstu napětí v kontaktu. Tedy pro srovnání bude provedeno měření s konstantním zatížením pro rozdílné průměry kuliček. Při druhé sérii experimentů bude naopak dodržený stejný kontaktní tlak. Experimenty budou provedeny i s plastickým mazivem i se základovým olejem. Hlavním cílem měření je identifikovat citlivost na hladovění, proto budou provedeny experimenty pro různé množství maziva a různé rychlosti.

| Rádius drážky [mm] | Průměr valivého elementu [mm] | Konformita [-] |
|---|---|---|
| 13,2 | 25,4 | 0,52 |
| 13,2 | 23,8 | 0,55 |
| 13,2 | 22,2 | 0,59 |

Tabulka. 3 Návrh konformit

| | Množství mazivo | Zatížení | Rychlost | Sledovaná veličina |
|---|---|---|---|---|
| **1. Měření** | (30 ,40, 50, 60) µl- základového oleje | 50 N / 0,5 GPa | 0-2 m/s | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |
| **2. Měření** | (30 ,40, 50, 60) µl- základového oleje | 50 N / 0,5 GPa | 0,5 m/s | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |
| **3. Měření** | 0,5 g plastické mazivo | 50 N / 0,5 GPa | 0-2 m/s | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |

Tabulka. 4 Návrh experimentu pro první publikaci




Obr. 28 Ukázka vlivu konformit na trvanlivost ložiska [53]

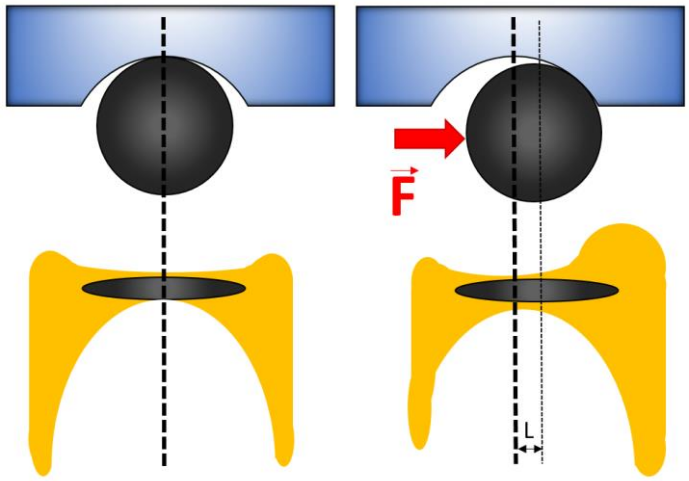
## Publikace 2

Cílem druhé publikace bude studium vlivu vnitřní vůle v ložisku. Pro experimenty bude využito identické zařízení, u kterého bude vytláčen valivý element ze dna drážky. Posunutí elementu simuluje dopad vnitřní vůle v ložiska a předpětí ložiska.

| Velikost koule (23,8) | Množství mazivo | Zatížení | Rychlost | Sledovaná veličina |
|---|---|---|---|---|
| **1. Měření** | (30 ,40, 50, 60) µl- základového oleje | 50 N | 1-1,5 m/s | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |
| **2. Měření** | (30 ,40, 50, 60) µl - základového oleje | 50 N | 0,5 m | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |
| **3. Měření** | 0,5 g plastické mazivo | 50 N | 1-1,5 m/s | Centrální tloušťka, množství maziva kolem kontaktu |

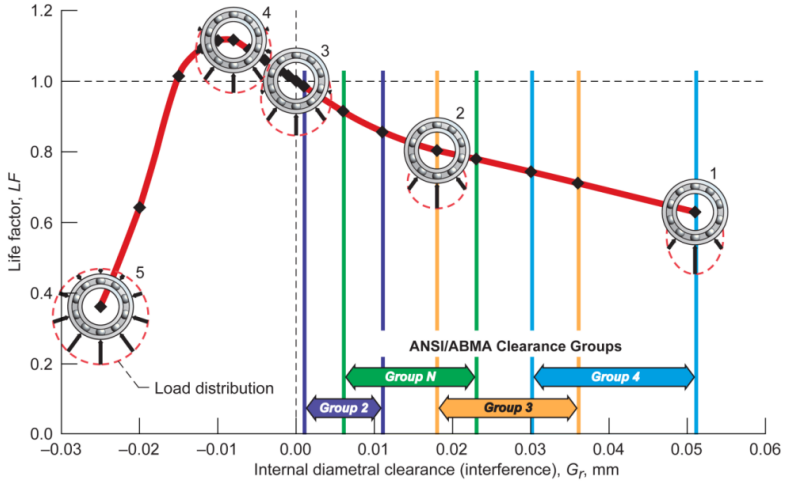
Tabulka. 5 Návrh experimentu pro první publikaci

Vlivem působení axiální síly na kuličku dojde k jejímu posunutí mimo dno drážky. Pro posunutí bude použit přítlačný mechanismus, který díky lineárnímu vedení pod uložením kuličky způsobí potřebné posunutí. Posunutím kuličky dojde i k posunu rezervoárů, které tak budou vystaveny odlišnému vlivu odstředivých sil. Toto posunutí vytvoří rezervoáry nesymetrické vzhledem k valivé dráze. Předpokládaný rozdíl tvaru rezervoáru je znázorněn na Obr. 29.




Obr. 29 Schéma distribuce maziva vlivem vymezení vnitřní vůle v ložisku

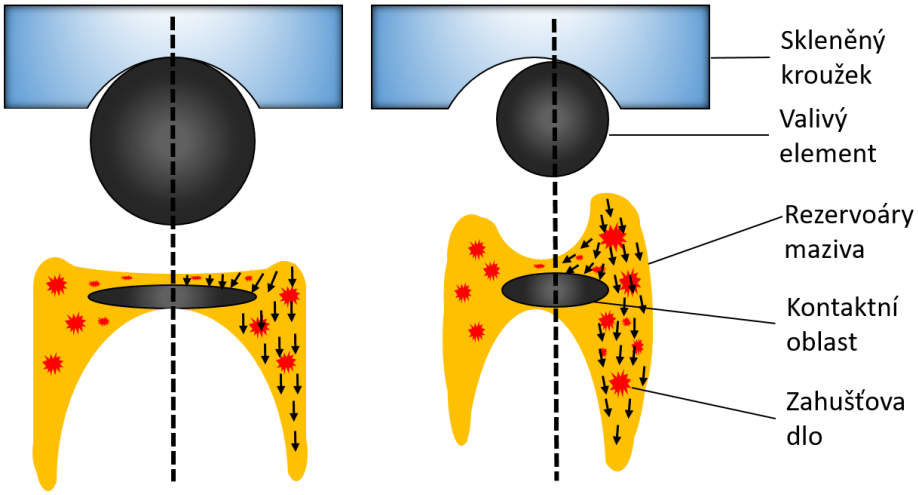
Nesymetrické rozložení maziva kolem kontaktu způsobí vychýlení vstupního menisku na jednu stranu. Vlivem odstředivých sil může dojít k efektivnějšímu zásobení maziva, které má ale větší vliv jen z jedné strany. Tedy k úspěšnému vytvoření menisku nemusí dojít po celé šířce kontaktu, a tedy část kontaktu bude hladovět silněji než ta druhá. Během experimentů bude vyhodnocován vliv tohoto posunutí a výsledky budou porovnány s analytickými výpočty určující faktoru životnosti pro rozdílné vůle v ložisku Obr. 30.



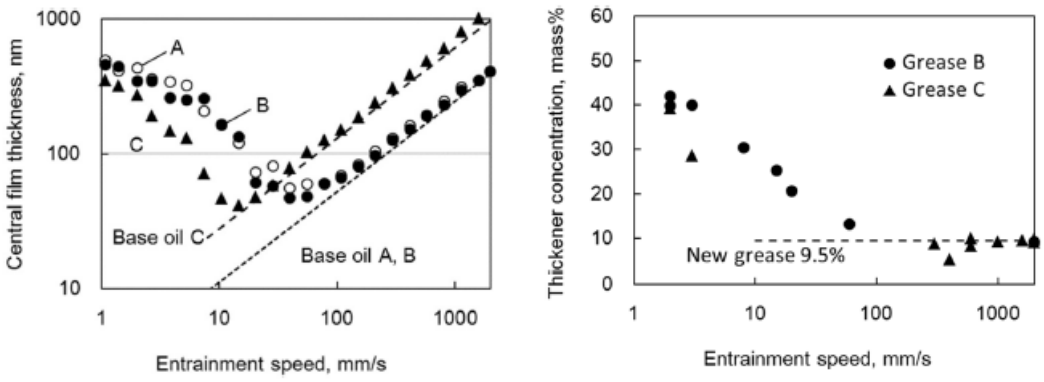

Obr. 30 Vliv vnitřní vůle na faktor životnosti [55]

## Publikace 3

Cílem třetí publikace je ověření vlivu distribuce maziva kolem kontaktu, na množství vstupujícího zahušťovadla do kontaktu Obr. 31. Zastoupení zahušťovadla v mazacím filmu způsobuje navýšení tloušťky mazací vrstvy a zvětšuje i odpor. Přičemž, během nízkých otáček se zastoupení zahušťovadla v mazacím filmu značně vyvíjí Obr. 32. Pro experimenty bude využito stejné zařízení jako v přechozích případech, kde pomocí rozdílné konformity a posunutí elementu docílíme rozdílného rozložení maziva během experimentu. Pomocí plastického maziva, které bude mít obarvené částice zahušťovadla, jsme poté schopni analyzovat jeho zastoupení v mazacím filmu. Dále bude opticky zaznamenáván a analyzován smysl vírů před kontaktem. Očekává se, že rozdílné rozložení maziva a poloha menisku budou toto víření ovlivňovat. Pro experimenty budou využita standartní plastická maziva, která jsou zmíněna v předchozí podkapitole. Cílovým časopisem je Tribology International (IF 4,271).




Obr. 31 Schéma distribuce maziva vlivem změny vnitřní geometrie

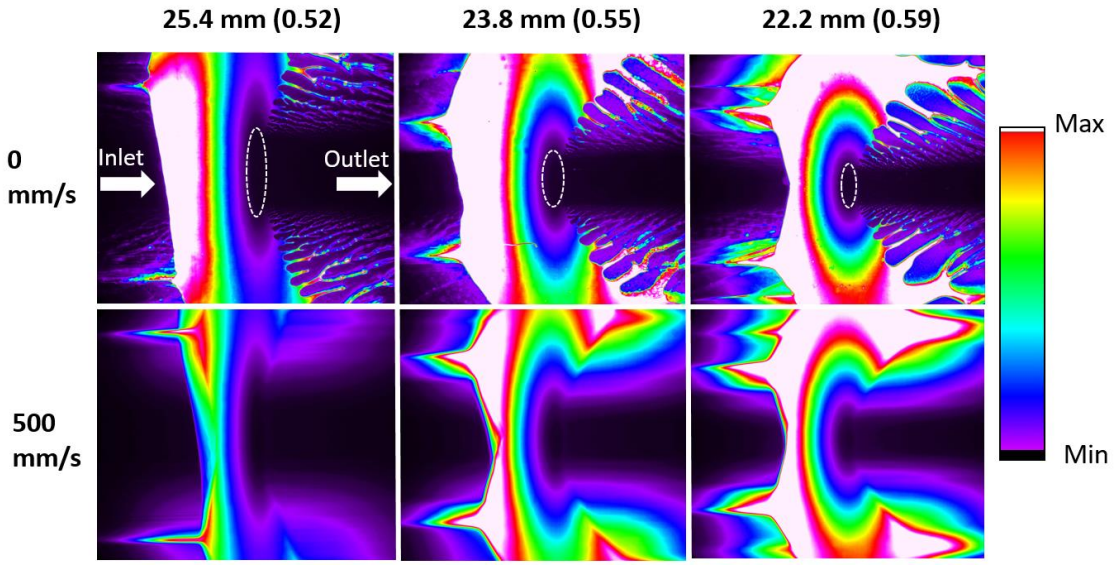



Obr. 32 Vývoj koncentrace zahušťovadla v mazacím filmu

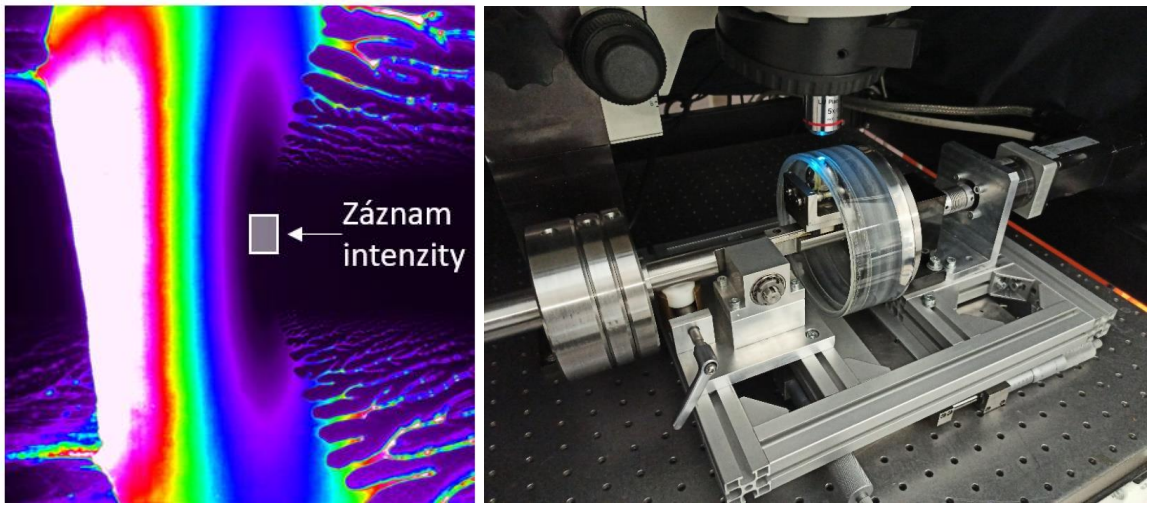
# 6 SOUČASNÝ STAV A ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

## 6.1 Zprovoznění testovacího zařízení a odlazení optické metody

Úvodní experimenty na zařízení ukazují funkčnost zařízení i pozorovací metody. Výsledky z experimentů byly prezentovány v roce 2022 na WTC (World tribology congress) v Lyonu. Ukázka porovnání distribuce maziva kolem různých konformit je znázorněna na Obr. 33 Ovšem, během úvodních měření bylo zjištěno, že měření tloušťky filmu v kontaktu je ovlivněno zářením maziva kolem kontaktu. Při měnících se podmínkách (konformita, množství maziva, rychlost), kdy dochází ke změně množství maziva kolem kontaktu, docházelo k výrazné změně intenzity záření i v kontaktu. Je to zapříčiněno převážně tím, že fluorescenční barvivo emituje záření všemi směry. Proto intenzita z rezervoárů kolem kontaktu navyšovala intenzitu i v kontaktu. Tato vlastnost fluorescence zabraňuje měření tloušťky při pozorování oblasti kolem kontaktu. Řešení tohoto problému tkvělo ve zmenšení pozorovací oblasti pomocí clony. Pro měření je využíván epifluorscenční mikroskop, který využívá polní a aperturní clonu umístěnou v optické cestě před zdrojem světla. Pří výměně polní clony za menší a ozařování oblasti přibližně veliké 0,1 $mm^2$ problém nenastal. Nevýhodou tohoto přístupu měření je neschopnost pozorovat vývoj menisku před kontaktem během měření. V případě použití základového oleje, kdy je opakovatelnost výrazně lepší než v případě plastického maziva, lze provést pro pozorování menisku jiný experiment se stejnými podmínkami. V případě plastického maziva je tento přístup nepřesný.




Obr. 33 Porovnání distribuce maziva při různých konformitách

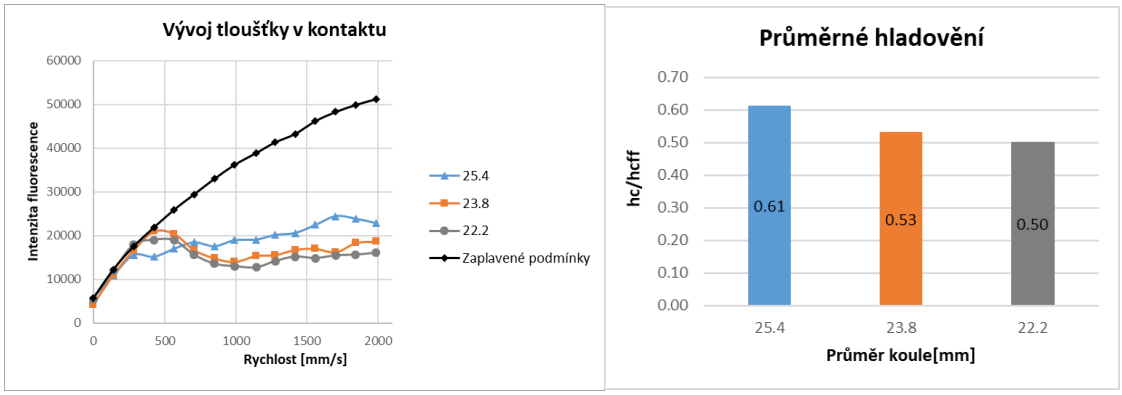



Obr. 34 Oblast pro záznam tloušťky filmu a experimentální zařízení

Zařízení bylo odzkoušeno v rozsahu rychlostí 0-2 m/s při podmínkách čistého valení. Valivý element je uložený na dvou hřídelkách, které jsou uložené v ložiscích. Tento systém uložení dovoluje využití různých průměrů valivých elementů. Nevýhodou tohoto uložení je ale možný výskyt občasného prokluzu, který by bránil otáčení valivého elementu. Pro ověření velikosti prokluzu byly snímány otáčky hřídelky podepírající element pomocí optického otáčkoměru. Nárůst otáček byl však lineární, ovšem prokluz může při nevhodných podmínkách nastat a ovlivnit tak měření tloušťky filmu v kontaktu.

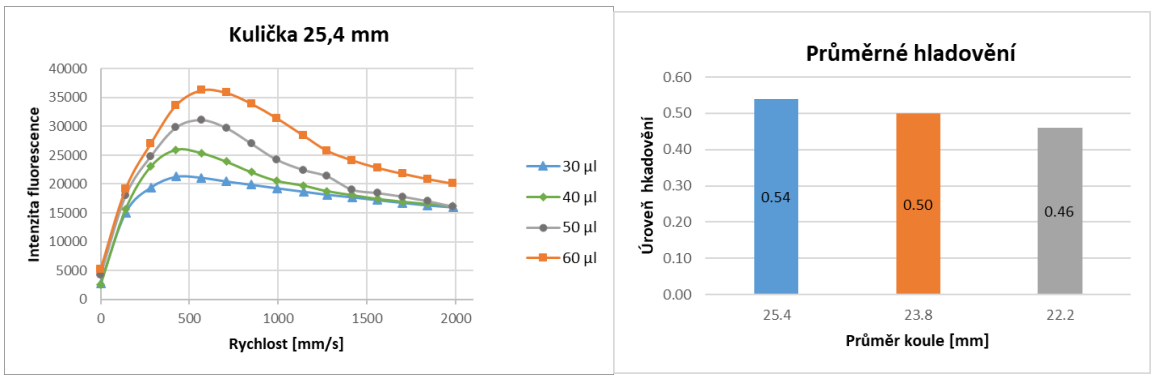
### Úvodní experimenty

Pro ověření vlivu konformit byly využity série experimentů při identické teplotě a kontaktního tlaku. Jediných měnícím se faktorem byla velikost valivých elementů. Použito bylo mazivo se zahušťovadlem typu lithného komplexu o normální velikosti částic zahušťovadla. Vzorek byl obarvený barvivem pyrenem, který byl rozmíchán v základovém oleji. Byly provedeny dvě série experimentů, kdy hlavním zaznamenávajícím údajem byla intenzita fluorescence v centrální oblasti kontaktu. Tato intenzita odpovídá tloušťce filmu vytvářeného pomocí oleje. První série experimentů byly provedeny pro každou velikost elementu v hladovějícím režimu. Druhá série byla provedena při plně zaplavených podmínkách. Zaplavené podmínky reprezentují ideální stav, který může nastat v daném kontaktu. Hladovějící podmínky reprezentují přirozený stav, který samotná konformita vytvoří. Pro každou konformitu bylo provedeno 5 měření, které se průměrovaly. Každá hodnota jednoho měření vznikla zprůměrováním 5 hodnot získaných během jednoho pozorování. Toto systematické průměrování očistilo data o nežádoucí odchylky. Plně zaplavené podmínky byly vytvořeny pomocí stírače, který uměle dodával mazivo do kontaktu. Výsledky zprůměrovaných hodnot jsou na Obr. 35.




Obr. 35 Vliv konformit při použití plastického maziva

Experimenty s plastickým mazivem vykazovaly značnou míru nahodilosti, proto pro ověření vlivu geometrie byly provedeny stejné experimenty se základovým olejem. Množství oleje jsme schopni přesně kontrolovat a vytvořit tak konkrétní mazací podmínky. Pro měření byl použit rozsah (30-60 µl) maziva a plně zaplavené podmínky. Porovnávání a zprůměrování bylo provedeno stejně jako v případě plastického maziva.

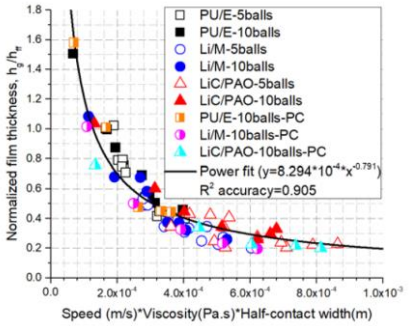



Obr. 36 Vliv množství oleje na tloušťku filmu a průměrné hladovění konformit

Výsledky se základovým olejem vykazují podobné trendy jako v případě plastického maziva Obr. 36.Větší valivý element tvořící menší konformitu vykazuje efektivnější replenishment a menší průměrné hladovění. Při testování vlivu množství maziva byl pozorován kladný efekt většího množství. Toto pozorování potvrzuje poznatky v rešeršní části. Tedy, výrazný rozdíl bude nastávat jen v případě dostatečného množství maziva.

### Porovnání experimentálních a teoretických hodnot

Získaná experimentální data byla porovnána s teoretickým výpočtem z článku [21]. Publikace představuje vzorec pro výpočet normalizované tloušťky, kde vstupujícími veličinami jsou rychlost, dynamická viskozita maziva a šířka kontaktu. Jedná se o křivku, která reprezentuje vývoj mazací vrstvy v ložisku. Výsledná křivka má charakter lineární lomené funkce a je vyobrazena na Obr. 37.




Obr. 37 Normalizovaná tloušťka filmu v závislosti na parametru (u*η*a)

$$\frac{\mathrm{h}_c}{\mathrm{h}_{cff}} = 8{,}294 * 10^{-4}(u * \eta * a)^{-0.791} \tag{1}$$

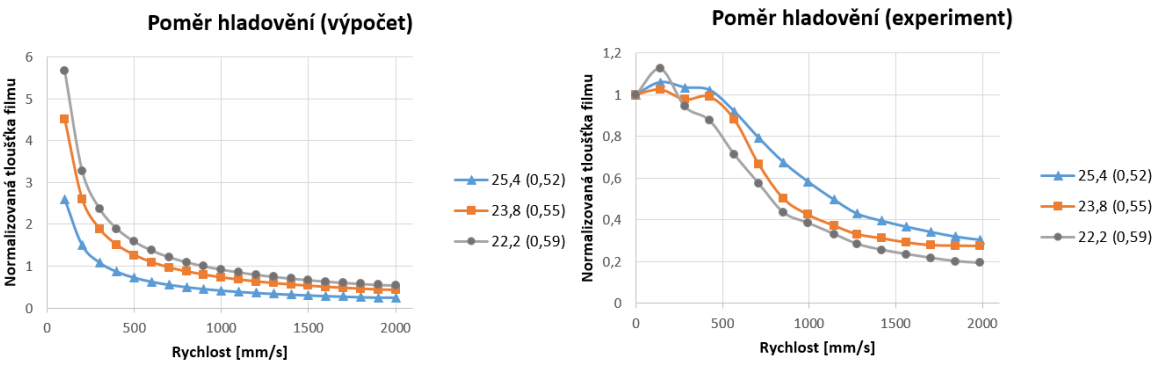
Rovnice (1) použitá pro výpočet normalizované tloušťky byla inspirována publikací [36], která popisovala přechod mezi plně zaplaveným kontaktem a hladovějícím kontaktem. Stěžejní pro výpočty je SD (starvation degree) parametr, který je získán podle následujícího vzorce, kde kromě předchozích parametrů vstupuje do výpočtu i povrchové napětí a množství maziva kolem kontaktu:

$$\mathrm{SD} = \frac{\eta_0 * u * a}{\mathrm{h}_{oil\infty} * \sigma_s} \tag{2}$$

Pomocí SD parametru lze následně kvantifikovat tloušťku filmu při různých podmínkách pomocí následují formulace:

$$\frac{\mathrm{h}_c}{\mathrm{h}_{cff}} = \left(\frac{1{,}5}{SD}\right)^{1{,}67} \tag{3}$$

Úvodní vzorec (1) zanedbává vliv povrchového napětí a množství maziva v ložisku. V případě ložiska mazaného plastickým mazivem lze jen těžko kvantifikovat, kolik vyloučeného základového oleje se nachází v blízkosti kontaktů. Z tohoto důvodu byly vyloučeny, a výpočet je omezen na základní tři vstupy. Při porovnání teoretických a experimentálních dat lze vidět průběhovou podobnost Obr. 38 při rozdílných hodnotách Tento rozdíl může být zapříčiněn tím, že konstanty u vzorce (1) zohledňují celé ložisko. V případě experimentálních dat je zaznamenáván pouze kontakt s vnějším kroužkem ložiska. Vykreslením teoretických dat testovaných konformit lze vidět, že širší kontakt vytváří méně příznivé podmínky pro replenishment. Experimentální data ukazují dle očekávání opačný trend. Zvětšující se šířka kontaktu sice prodlužuje čas replenishmentu, ale v případě změny konformit ložiska dochází i ke změně kapilárních sil. V případě replenishmentu mohou být tedy kapilární síly klasifikovány jako podstatnější než šířka kontaktní oblasti.




Obr. 38 Srovnání analytického výpočtu a experimentálních dat.

# 7 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současné poznatky v oblasti replenishmentu maziva ve valivých kuličkových ložiscích. Replenishment maziva je klíčový mechanismus předcházející hladovění a následnému zadření ložisek. Dostatečné porozumění této problematiky umožňuje další optimalizaci plastických maziv a tak docílení požadovaných vlastností ložisek. Dosavadní poznatky vzešly převážně z experimentálních studií, opírající se o tribometry Ball-on-disc. Současný trend ukazuje posun od tribometrů se zjednodušenou geometrií, k tribometrům napodobující skutečné podmínky. Na tento trend navazuje i tato disertační práce. Pozornost v současném stavu poznání je především věnovaná experimentům na tribometru Ball-on-ring. Podstatou experimentů je využití potenciálu fluorescenční mikroskopie, která nabízí sledování jednotlivých složek plastického maziva a to nezávisle. Pomocí metody jsme schopni analyzovat vývoj maziva, jak v okolí kontaktu, tak i v kontaktu samotném. Využívané zařízení je unikátní ve schopnosti tvorby reálných kontaktních podmínek, jaké vznikají právě v ložiscích. Díky implementaci fluorescenční mikroskopie jsme poté schopni opticky analyzovat toto reálné rozložení maziva a zkoumat tak vliv vnitřní geometrie na toto rozložení i na samotný mazací film v kontaktu. Na základě provedené rešerše relevantních zdrojů k danému tématu jsou definované cíle disertační práce, také jsou položeny vědecké otázky a pracovní hypotézy, stejně tak i metodický postup. V poslední části je shrnut současný stav řešení disertační práce, ve kterém jsou popsané úvodní úspěšné výsledky. Tyto výsledků dovolují stanovit předpoklad o úspěšném splnění primárního cíle této disertační práce.

# 8 BIBLIOGRAFIE


[1] HOLMBERG, K. a A. ERDEMIR. Global impact of friction on energy consumption, economy and environment. *FME Transactions*. 2015, roč. 43, č. 3, s. 181–185. ISSN 14512092.

[2] POLL, G., XINMING, L., BADER, N. a F. GUO. Starved Lubrication in Rolling Contacts-A Review. *Bearing World Journal*. 2019, roč. 4, May, s. 69–81.

[3] LUGT, P. M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*. 2009, roč. 52, č. 4, s. 470–480.

[4] LUGT, P. M. a D. M. PALLISTER. *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. 1. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

[5] CHATRA, K. R. a P. M. LUGT. The process of churning in a grease lubricated rolling bearing: Channeling and clearing. *Tribology International*. 2021, roč. 153, č. September 2020, s. 106661. ISSN 0301679X.

[6] TAYLOR, P., P. M. LUGT, S. VELICKOV a J. H. TRIPP. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication. 2009, č. October 2014, s. 37–41.

[7] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts - 3. Fully Flooded Results. *American Society of Mechanical Engineers*. 1976, č. 76-Lub-30, s. 264–275. ISSN 04021215.

[8] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. Part 4 - Starvation results. *Trans. Asme, Ser. F, J. Lubr. Technol.* 1977, roč. 99,1., č. April, s. 15–23.

[9] WEDEVEN, L., D., EVANS, D., CAMERON, A. Optical Analysis of Ball Bearing Starvation. *Journal of Lubrication Technology*. 1971, roč. 93, č. 3, s. 349–361.

[10] PEMBERTON, J. a A. CAMERON. A mechanism of fluid replenishment elastohydrodynamic contacts in. 1976, roč. 37, č. 1, s. 185–190.

[11] CHIU, Y. P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems. *Tribology Transactions*. 1974, roč. 17, č. 1, s. 22–35.

[12] JACOD, B., F. PUBILIER, P.M. E. CANN a A. A. LUBRECHT. An Analysis of Track Replenishment Mechanisms in the Starved Regime. *Energy Procedia*. 1998, roč. 1.st ed., s. s. 483. ISSN 18766102.

[13] CHEVALIER, A. A., LUBRECHT, P. M. E., CANN, F., COLIN, G. a F. DALMAZ. Starvation Phenomena in E.H.L. Point Contacts: Influence of Inlet Flow Distribution. *Tribology Series*. 1996, roč. 31, s. 213–223.

[14] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M.E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ. Film thickness in starved EHL point contacts. *Journal of Tribology*. 1998, roč. 120, č. 1, s. 126–133. ISSN 15288897.

[15] TAYLOR, P., M. T. Van ZOELEN, C. H. VENNER a P. M. LUGT. Free Surface Thin Layer Flow in Bearings Induced by Centrifugal Effects Free Surface Thin Layer Flow in Bearings Induced by. 2010, č. November 2014, s. 37–41.

[16] VAN ZOELEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT. The prediction of contact pressure-induced film thickness decay in starved lubricated rolling bearings. *Tribology Transactions*. 2010, roč. 53, č. 6, s. 831–841. ISSN 10402004.

[17] GUANGTENG, G. a H. A. SPIKES. The role of surface tension and disjoining pressure in starved and parched lubrication. 1996, roč. 210.

[18] GUANGTENG, G. A study of parched. 1992, roč. 153.

[19] NOGI, T., H. SHIOMI a N. MATSUOKA. Starved Elastohydrodynamic Lubrication with Reflow in Elliptical Contacts. *Journal of Tribology*. 2018, roč. 140, č. 1, s. 1–9. ISSN 15288897.

[20] GERSHUNI, L., M. G. LARSON a P. M. LUGT. Lubricant replenishment in rolling bearing contacts. *Tribology Transactions*. 2008, roč. 51, č. 5, s. 643–651. ISSN 1547397X.

[21] CEN, H. a P. M. LUGT. Replenishment of the EHL contacts in a grease lubricated ball bearing. *Tribology International*. 2019, s. 106064. ISSN 0301-679X.

[22] LIANG, H., D. GUO, L. MA a J. LUO. Experimental Investigation of Centrifugal Effects on Lubricant Replenishment in the Starved Regime at High Speeds. *Tribology Letters*. 2015, roč. 59, č. 1, s. 1–9. ISSN 1573-2711.

[23] CANN, P. M.E., F. CHEVALIER a A. A. LUBRECHT. Track Depletion and Replenishment in a Grease Lubricated Point Contact: A Quantitative Analysis. *Tribology Series*. 1997, roč. 32, s. 405–413. ISSN 01678922.

[24] CANN, P. M. Starvation and reflow in a grease-lubricated elastohydrodynamic contact. *Tribology Transactions*. 1996, roč. 39, č. 3, s. 698–704. ISSN 1547397X.

[25] HURLEY, S., P. M. CANN a H. A. SPIKES. Lubrication and reflow properties of thermally aged greases. *Tribology Transactions*. 2000, roč. 43, č. 2, s. 221–228. ISSN 1547397X.

[26] KOCHI, T., M. SAKAI, T. NOGI, D. DONG a Y. KIMURA. Experimental Study on the Physics of Thick EHL Film Formation with Grease at Low Speeds. *Tribology Letters*. 2019, roč. 67, č. 2, s. 1–10. ISSN 10238883.

[27] CHENNAOUI, M., M. FOWELL, H. LIANG a A. KADIRIC. A Novel Set-up for In-situ Measurement and Mapping of Lubricant Film Thickness in a Model Rolling Bearing Using Interferometry and Ratiometric Fluorescence Imaging. *Research Square*. 2022, s. 1–17. ISSN 1573-2711.

[28] CHEN, H., W. WANG, H. LIANG a X. GE. Tribology International Observation of the oil flow in a ball bearing with a novel experiment method and simulation. *Tribology International*. 2022, roč. 174, č. July, s. 107731. ISSN 0301-679X.

[29] CHEN, H., H. LIANG, W.WANG a S. ZHANG. Investigation on the oil transfer behaviors and the air-oil interfacial flow patterns in a ball bearing under different capillary conditions. *Friction*. 2022, roč. 1. ISSN 2223-7690.

[30] CHEN, H., W. WANG, Z. ZHAO a H. LIANG. Evolution and flow maps of the oil layer in successive rolling point contact systems: Bearing as a case. *Physics of Fluids*. 2022, roč. 34, č. 3. ISSN 10897666.

[31] LUGT, P. M. Modern advancements in lubricating grease technology. *Tribology International*. 2016, roč. 97, s. 467–477. ISSN 0301679X.

[32] CEN, H. a P. M. LUGT. Film Thickness in a Grease Lubricated Ball Bearing. nedatováno.

[33] VENNER, C. H., M. T. VAN ZOELEN a P. M. LUGT. Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. *Tribology International*. 2012, roč. 47, s. 175–187. ISSN 0301679X.

[34] CANN, P. An Analysis of the Mechanisms of Grease Lubrication in Rolling Element Bearings. nedatováno, roč. 00, č. May 1999, s. 227–245.

[35] CANN, P. M. Starved grease lubrication of rolling contacts. *Tribology Transactions*. 1999, roč. 42, č. 4, s. 867–873. ISSN 1547397X.

[36] CANN, P. M.E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 10, s. 859–864. ISSN 0301679X.

[37] TAYLOR, P., H. CEN, P. M. LUGT, G. MORALES-ESPEJEL. On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds On the Film Thickness of Grease-Lubricated Contacts at Low Speeds. nedatováno, č. August 2014, s. 37–41.

[38] MORALES-ESPEJEL, G. E., P. M. LUGT, H. R. PASARIBU a H. CEN. Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings. *Tribology International*. 2014, roč. 74, s. 7–19. ISSN 0301679X.

[39] WILLIAMSON, B. P. An optical study of grease rheology in an elastohydrodynamic point contact under fully flooded and starvation conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1995, roč. 209, č. 1, s. 63–74. ISSN 2041305X.

[40] VENGUDUSAMY, B., M. KUHN, M. RANKL a R. SPALLEK. Film Forming Behavior of Greases Under Starved and Fully Flooded EHL Conditions. *Tribology Transactions*. 2016, roč. 59, č. 1, s. 62–71. ISSN 1547397X.

[41] FISCHER, D., S. VON GOELDEL, G. JACOBS a A. STRATMANN. Numerical investigation of effects on replenishment in rolling point contacts using CFD simulations. *Tribology International*. 2021, roč. 157, č. October 2020, s. 106858. ISSN 0301679X.

[42] LIANG, H., Y. ZHANG a W.WANG. Influence of the cage on the migration and distribution of lubricating oil inside a ball bearing. *Friction*. 2022, roč. 10, č. 7, s. 1035–1045. ISSN 22237704.

[43] GAO, M., H. LIANG, W.WANG a H. CHEN. Oil redistribution and replenishment on stationary bearing inner raceway. *Tribology International*. 2022, roč. 165, č. October 2021, s. 107315. ISSN 0301679X.

[44] SAKAI, K., Y. AYAME, Y. IWANAMI a N.KIMURA. Observation of Grease Fluidity in a Ball Bearing Using Neutron Imaging Technology.pdf. *Tribology Online*. 2021, roč. 2, s. 146–150.

[45] SAKAI, K., Y. TOKUMO, Y. AYAME, Y. SHITARA, H. TANAKA a J. SUGIMURA. Effect of Formulation of Li Greases on Their Flow and Ball Bearing Torque. 2016, roč. 2, s. 168–173.

[46] NOGI, T. An Analysis of Starved EHL Point Contacts with Reflow. 2015, roč. 1, s. 64–75.

[47] VENNER, C ., H., VAN. ZOELEN, M. T. a M. LUGT, P. Tribology International Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. *Tribiology International*. 2012, roč. 47, s. 175–187. ISSN 0301-679X.

[48] VAN ZOELEN, M. T., C. H. VENNER a P. M. LUGT. Free surface thin layer flow on bearing raceways. *Journal of Tribology*. 2008, roč. 130, č. 2, s. 1–10. ISSN 07424787.

[49] KOSTAL, D., P. SPERKA a M. HARTL. CONTROLLING AND MEASURING STARVATION. 2014, roč. 21, č. 5, s. 321–328.

[50] ÅSTRÖM, H., O. ISAKSSON a E. HÖGLUND. Video recordings of an EHD point contact lubricated with grease. *Tribology International*. 1991, roč. 24, č. 3, s. 179–184. ISSN 0301679X.

[51] 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.

[52] 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, roč. 214, č. 4, s. 327–336. ISSN 13506501.

[53] ZARETSKY, E. V., J. V. POPLAWSKI a L. E. ROOT. Reexamination of ball-race conformity effects on ball bearing life. *Tribology and Lubrication Technology*. 2012, roč. 68, č. 4, s. 44–60. ISSN 1545858X.

[54] DAMIENS, B., C. H. VENNER, P.M.E. CANN a A.A. LUBRECHT. Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. *Journal of Tribology*. 2004, roč. 126, č. 1, s. 105–111.

[55] OSWALD, F. B., E. V. ZARETSKY a J. V. POPLAWSKI. Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings. *Tribology Transactions*. 2012, roč. 55, č. 2, s. 245–265. ISSN 10402004.

[56] HAUGLAND, R. P., M. T. SPENCE a I. D. JOHNSON. *Handbook of fluorescent probes and research chemicals. 6th ed. Eugene*. 6th ed. Eu. B.m.: OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402):Molecular Probes, 1996. ISBN ISBN 09-652-2400-7.

# 9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Vývoj tření v ložisku v závislosti na tloušťce filmu [1] ..... 7
Obr. 2 Životní cyklus ložiska s plastickým mazivem ..... 12
Obr. 3 Normalizovaná tloušťka filmu v závislosti na testovaných parametrech ..... 14
Obr. 4 Pokles centrální tloušťky filmu v závislosti na času experimentu. ..... 15
Obr. 5 Srovnání dvou plastických maziv při hladovějícím režimu ..... 17
Obr. 6 Vliv provozních parametrů na úroveň hladovění kontaktu ..... 17
Obr. 7 Závislost centrální tloušťky filmu v kontaktu na množství maziva před kontaktem a pokles tloušťky vlivem počtu průchodů ..... 19
Obr. 8 Vliv rychlosti na vývoj tloušťky a závislost poměr hladovění na parametru SD ... 20
Obr. 9 Vliv MOES parametrů na hodnotu γ pro různé elipticity ..... 21
Obr. 10 Tloušťka filmu v kontaktu na tribometru Ball-on-disc a ve valivém radiálním ložisku ..... 22
Obr. 11 Vliv teploty na kritickou rychlost ..... 22
Obr. 12 Popis průchodu plastického maziva EHD kontaktem ..... 24
Obr. 13 Distribuce maziva kolem EHD kontaktu s rozdílnou smáčivostí povrchů ..... 25
Obr. 14 Schéma aparatury a distribuce maziva ..... 27
Obr. 15 Vizualizace maziva při rozdílných rychlostech ..... 27
Obr. 16 Znázornění migrace maziva v ložisku ..... 28
Obr. 17 Vývoj bezrozměrného parametru W na době otáčení ložiska. ..... 29
Obr. 18 Vliv množství naneseného maziva na replenishment ..... 30
Obr. 19 Vliv povrchového napětí na replenishment ..... 30
Obr. 20 Vývoj centrální tloušťky v závislosti na rychlosti (hladovější/plně zaplavený kontakt) ..... 31
Obr. 21 Vizualizace rozložení maziva pomocí neutronového zobrazování ..... 32
Obr. 22 Schéma evoluce problému ..... 36
Obr. 22 Schéma postupu řešení disertační práce ..... 41
Obr. 23 Sestava experimentálního zařízení ..... 42
Obr. 24 Schéma zařízení při využití fluorescenční mikroskopie ..... 43
Obr. 25 Schéma principu fluorescenční mikroskopie ..... 44

Obr. 26 Schéma vlivu konformit na distribuci maziva kolem kontaktu ..... 46
Obr. 27 Ukázka vlivu konformit na trvanlivost ložiska [53] ..... 47
Obr. 28 Schéma distribuce maziva vlivem vymezení vnitřní vůle v ložisku ..... 48
Obr. 29 Vliv vnitřní vůle na faktor životnosti [54] ..... 48
Obr. 30 Schéma distribuce maziva vlivem změny vnitřní geometrie ..... 49
Obr. 31 Vývoj koncentrace zahušťovadla v mazacím filmu ..... 49
Obr. 32 Porovnání distribuce maziva při různých konformitách ..... 50
Obr. 33 Oblast pro záznam tloušťky filmu a experimentální zařízení ..... 51
Obr. 34 Vliv konformit při použití plastického maziva ..... 52
Obr. 35 Vliv množství oleje na tloušťku filmu a průměrné hladovění konformit ..... 52
Obr. 36 Normalizovaná tloušťka filmu v závislosti na parametru (u*η*a) ..... 53
Obr. 37 Srovnání analytického výpočtu a experimentálních dat. ..... 54

# 10 SEZNAM TABULEK

Tabulka. 1 Seznam barviv a potřebných informací ..... 44
Tabulka. 2 Seznam plánovaných maziv ..... 45
Tabulka. 3 Návrh konformit ..... 47
Tabulka. 4 Návrh experimentu pro první publikaci ..... 47
Tabulka. 5 Návrh experimentu pro první publikaci ..... 47