



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DISTRIBUCE PLASTICKÉHO MAZIVA VE VALIVÉM LOŽISKU

DISTRIBUTION OF GREASE IN ROLLING BEARING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Hynek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Hynek**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Distribuce plastického maziva ve valivém ložisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Valivá ložiska jsou dnes strojní součásti, které se uplatňují od nejmenších mechanismů až po velké větrné elektrárny. Více než 85% všech ložisek využívá plastické mazivo a jsou zakrytovány s náplní na celou dobu života ložiska. Pro zajištění kvalitního mazání a dlouhé životnosti je důležitá počáteční distribuce plastického maziva v ložisku. Na tuto distribuci má zásadní vliv konstrukce klece a použité mazivo. V práci bude modifikováno současné zařízení, aby umožnilo rychlé rozložení radiálního ložiska, pozorování a optické měření distribuce maziva v průběhu záběhu ložiska.

Typ práce: výzkumná
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)
Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je zjistit jaký vliv mají provozní podmínky na úvodní distribuci plastického maziva ve valivém ložisku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled v oblasti mazání valivých ložisek plastickými mazivy,
- navrhnout úpravu současného zařízení pro pozorování a měření,
- realizovat experimenty, zjistit vliv na distribuci,
- interpretovat výsledky a sepsat výstupy práce.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukončení/>

Seznam doporučené literatury:

LUGT, P M. Grease lubrication in rolling bearings. Chichester: Wiley, 2013. Tribology series. ISBN 978-1-118-48397-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematiku distribuce plastického maziva ve valivém ložisku. U takto mazaných ložisek dochází často k problému hladovění, kdy kontaktní oblast není dostatečně zásobována mazivem, což vede k selhání ložiska. Obecně se tedy jedná se o velmi komplexní a obsáhlé téma. Konkrétně bylo řešeno popsání vlivu vybraných parametrů na distribuci plastického maziva ve valivém ložisku. Vyhodnocení probíhalo na kontaktních površích vnitřního a vnějšího kroužku a kuličkách ložiska. Vyhodnocována byly průměrná tloušťka filmu ve vybraných oblastech v místě kontaktu a před ním. Metodou pro pozorování byla fluorescenční mikroskopie. V práci jsou popsány vlivy procentuální náplně ložiska mazivem, frekvence otáčení, materiálu a konstrukce klece na distribuci a rozložení maziva na površích ložiska. Výsledkem jsou informace o rozložení maziva na drahách a kuličkách ložiska a jejich blízkém okolí. Bylo ukázáno, že použitý nový experimentální přístup, umožňuje hodnotit množství maziva dostupného pro mazání ložiska v reálné konfiguraci.

KLÍČOVÁ SLOVA

plastické mazivo, distribuce, valivé ložisko, rezervoár

ABSTRACT

The work deals with the issue of grease distribution in a rolling bearing. Grease lubricated ball bearing in this way often experience the problem of starvation, when the contact area is not sufficiently supplied with lubricant, which leads to bearing failure. In general, this is a very complex and comprehensive topic. Specifically, the description of the effect of selected parameters on the distribution of grease in the rolling bearing was solved. The evaluation took place on the contact surfaces of the inner and outer ring and bearing balls. The average film thickness in selected areas at the point of contact and in front of it were evaluated. The method for observation was fluorescence microscopy. The effects of the percentage filling of the bearing with grease, the speed, the material and the design of the cage on the distribution and distribution of the grease on the bearing surfaces are described in the thesis. The result is information about the distribution of the grease on the raceways and balls of the bearing and their immediate surroundings. It was shown that the new experimental approach used makes it possible to evaluate the amount of grease available for bearing lubrication in a real configuration.

KEYWORDS

grease, distribution, rolling bearing, reservoir

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HYNEK, Jakub. *Distribuce plastického maziva ve valivém ložisku* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149644>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu, Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., za odborné vedení a mnoho cenných rad a připomínek během vypracování práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a přítelkyni za podporu a motivaci během studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Kritická rešerše	15
2.2.1	Fáze při rozběhu ložiska	15
2.2.2	Vliv provozních parametrů, typu maziva a konstrukce ložiska na tloušťku vrstvy filmu	26
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	33
2.4	Mezera v poznání	35
3	CÍLE PRÁCE	36
3.1	Výzkumné otázky	36
3.2	Cíle výzkumu	36
3.3	Hypotézy	36
4	MATERIÁL A METODY	37
4.1	Metodika	37
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	37
4.2.1	Tester ložisek pro experimentální měření	37
4.2.2	Fluorescenční mikroskop	41
4.3	Materiál a testovací podmínky	42
4.3.1	Ložiska a mazivo	42
4.3.2	Testovací podmínky	43
4.4	Metody	44
4.4.1	Příprava ložisek	44
4.4.2	Kalibrace fluorescenčního mikroskopu a měření tloušťky filmu	45
4.4.3	Stanovení offsetu – vlivu pozadí při měření na ložisku	45
4.4.4	Zpracování dat	47
4.5	Testované predikce	48
5	VÝSLEDKY	49
5.1	Úprava měřicího zařízení	49
5.1.1	Úprava po zkušebních testech	51
5.2	Úvod k výsledkům	52

5.2.1	Kompletní sada snímků	55
5.3	Časový test	57
5.3.1	Distribuce maziva	59
5.4	Vliv frekvence otáčení	61
5.4.1	Distribuce maziva	63
5.5	Vliv materiálu a konstrukce klece	64
5.5.1	Distribuce maziva	66
5.6	Další vlivy	67
5.6.1	Distribuce maziva	69
6	DISKUZE	71
6.1	Interpretace výsledků	71
6.1.1	Časový test	71
6.1.2	Vliv frekvence otáčení	73
6.1.3	Vliv materiálu a konstrukce klece	75
6.1.4	Další vlivy	77
6.1.5	Natočení kuliček	79
6.1.6	Nejistoty spojeny s vlivem pozadí	80
6.2	Verifikace hypotéz	80
6.2.1	Přínos práce	82
7	ZÁVĚR	83
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	84
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	87
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	88
12	SEZNAM TABULEK	92

1 ÚVOD

V dnešní době je až 90 % všech valivých ložisek mazáno plastickým mazivem s náplní na celou životnost daného ložiska [1]. Pro zajištění dlouhého a bezproblémového chodu ložiska je důležité znát, jak probíhá distribuce plastického maziva a k čemu v ložisku dochází. Jedním z problémů, ke kterému u takto mazaných ložisek dochází je hladovění, kdy se do vstupu kontaktu nedostává dostatek maziva pro oddělení kontaktních povrchů. Výsledkem je poškození ložiska a jeho vyřazení z provozu. Distribuce maziva v ložisku se obecně považuje za velmi komplexní problém, který je ovlivněn mnoha faktory. Mezi ty patří vliv provozních parametrů, typ použitého maziva a samotná konstrukce a geometrie ložiska. Každý z těchto aspektů se do určité míry podílí na způsobu, jak probíhá distribuce maziva. Proto je nezbytné znát jejich vliv, aby nedocházelo ke špatnému mazání vedoucímu k poškození ložiska a následnému vyřazení z provozu.

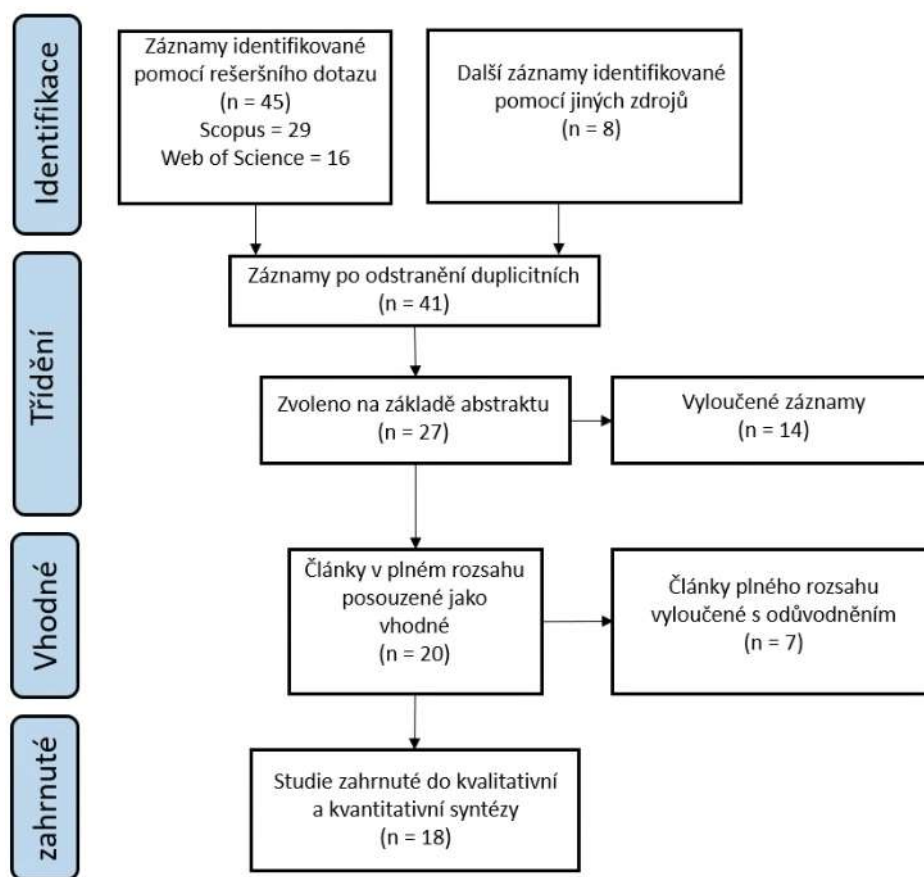
Většina testů se skutečnými ložisky se provádí s 30% náplní volného objemu ložiska mazivem. Jedná se o doporučovanou hodnotu výrobcí, ale nejsou studie, ve kterých by bylo zkoumáno jiné množství. Při provozu ložiska nastávají fáze, které popisují, k čemu zrovna v ložisku dochází. První je záběhová fáze a druhá, fáze uvolňování základového olej z maziva. Při první fázi dochází k úvodní distribuci a zároveň se během ní tvoří rezervoáry maziva. Ty jsou využívány během fáze uvolňování základového oleje, protože právě z nich je olej uvolňován a maže, tak kontakt, hlavně v pozdějších dobách chodu ložiska. Pro popsání a zkoumání vlivu hladovění se často používá zařízení v konfiguraci ball on disk. Zde však dochází k simulaci pouze jednoho kontaktu. V dnešní době se začínají více objevovat CFD simulace, díky lepší výpočetní technice. I přes to je nezbytné provádět testy se skutečnými ložisky, které poskytují nejlepší informace o tom, k čemu v nich dochází. Existuje více přístupů, jak testovat skutečná ložiska. Doposud však nebyla publikována práce se stejným přístupem a výsledky, jako byl použit v této práci.

Tato práce kombinuje pozorování vlivu navržených provozních parametrů na distribuci plastického maziva. S použitím kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem, díky čemu je možné s menší úpravou rozebrat ložisko a sledovat distribuci na kontaktních površích ložiska pomocí fluorescenční mikroskopie. Originalitou práce je použitý experimentální způsoby, díky kterého je možné hodnotit množství maziva dostupného pro mazání ložiska v reálné konfiguraci. Vyhodnocena je průměrná tloušťka filmu ze snímků z oblasti kontaktu a rozložení maziva v okolí kontaktu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Pro výběr informačních zdrojů, které se zabývají danou problematikou byly vytvořeny tři rešeršní dotazy, které byly zadány do databáze Scopus a Web of Science. Následně proběhla redukce množství nalezených výsledků pomocí doplnění dotazů o synonyma. V další fázi se výsledky z obou databází porovnaly a odstranily se duplicitní informační zdroje. Dalším postupem bylo přečtení abstraktu, díky čemu se vyřadily ty zdroje, které se odchylovaly od tématu práce. Na závěr se posoudila aktuálnost článků, které se zredukovaly dle data publikace z roků 2005 a starších. Dva z nich se vyřadily na základě informací, které nebyly pro práci, tak důležité. Konkrétní postup výběru finálního počtu článků je možné vidět na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 PRISMA diagram

Z celkového počtu osmnácti vybraných studií, bylo 12 z roku 2020 až do roku 2023. Zbytek byl z rozmezí let 2020 až 2007, kde byla zahrnuta i jedna kniha. Jen jeden článek tvořil výjimku, protože byl staršího data (1999).

Nejčastějšími časopisy, ve kterých byly zvolené články publikovány byl Friction (6) a Tribology International (6). Mezi autory publikací figurovali ve větší míře především čtyři autoři. Prvním byla Cann, Philippa M.E. (h-index 41), jejíž práce byly citovány ve 2 580 dokumentech. Druhým autorem byl Liang, He (h-index 10) citován v 176 dokumentech. Třetím byl Lugt, Piet M. (h-index 30), který byl citován 1 584krát. Čtvrtým autorem byl Wang, Wenzhong (h-index 24), kde jeho práce byly citovány ve 1 674 dokumentech. Z výsledků je patrné, že se jedná o autory, kteří patří ke špičce v dané problematice a vzhledem k počtu zvolených publikací, ve kterých byly zmiňováni se dá říci, že se jedná o kvalitní zdroje informací.

2.2 Kritická rešerše

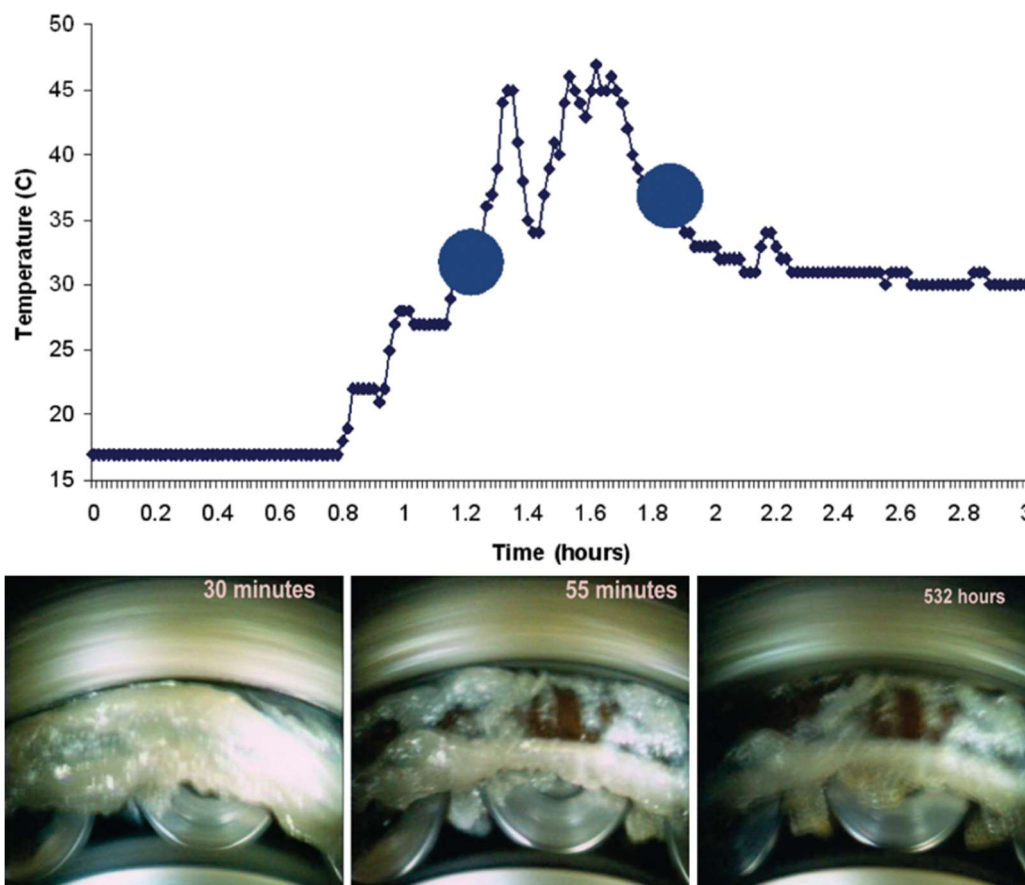
2.2.1 Fáze při rozběhu ložiska

Po naplnění ložiska plastickým mazivem a jeho uvedením do provozu nastávají dvě hlavní fáze. Tou první je záběhová fáze, která se dále dělí na dvě další pod fáze. První pod fází je kanálek (channeling), kdy se v prvních minutách chodu ložiska vytvoří kanálek (dráha). Druhou pod fází je čištění (clearing), kdy dochází k odstraňování plastického maziva z oběžné dráhy ložiska (zaplavený objem) do míst mimo oběžnou dráhu, jako jsou ramena, těsnění a kryty ložiska (nezaplavený objem). Druhou fází, která nastává po záběhové je fáze uvolňování základového oleje z maziva (bleeding), díky které je kontakt mazán po celou dobu chodu ložiska. V případě nedostatečného mazání může dojít k hladovění, což znamená, že v kontaktu není dostatečné množství maziva, což může vést k poškození ložiska a jeho vyřazení z provozu.

Záběhová fáze

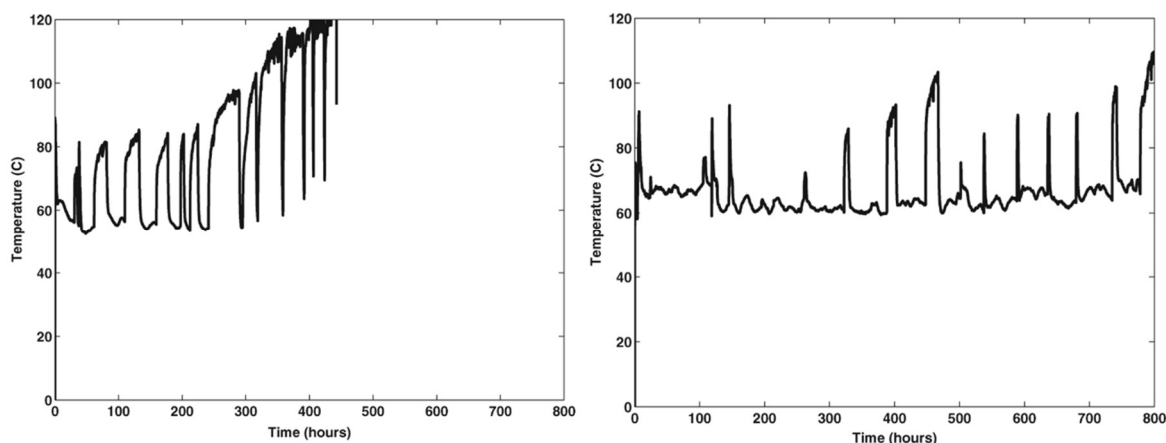
Dle informací uvedených v literatuře [1] se doba záběhové fáze pohybuje od několik hodin až po 24 hodin v závislosti na procentuálním množství náplně plastického maziva a frekvence otáčení. Fáze je typická růstem teploty v ložisku, což je zapříčiněno růstem třecího momentu díky vysoké viskozitě maziva. Následně se teplota ustálí na provozní teplotu, což je okamžik, který je označován za její konec [1]. Při záběhové fázi dochází k makroskopickému toku maziva, který bývá ovlivněn především vnitřním designem ložiska a reologickými vlastnostmi použitého maziva.

Zmíněný průběh záběhové fáze byl prezentován v článku [2], ve kterém Lugt, Piet M. a spol. provedli test s válečkovým ložiskem NU309, které bylo provozováno při frekvenci otáčení 3 000 ot/min s mazivem GWZ. Výsledný průběh je vidět na grafu Obr. 2.2, kde je vykreslena závislost teploty na čase. Z něho je patrné, že záběhová fáze skončila po 55 minutách, což jde vidět i na třech snímcích, kdy mezi snímkem po 55 minutách a 532 hodinách již nedošlo k dalšímu makroskopickému toku maziva.



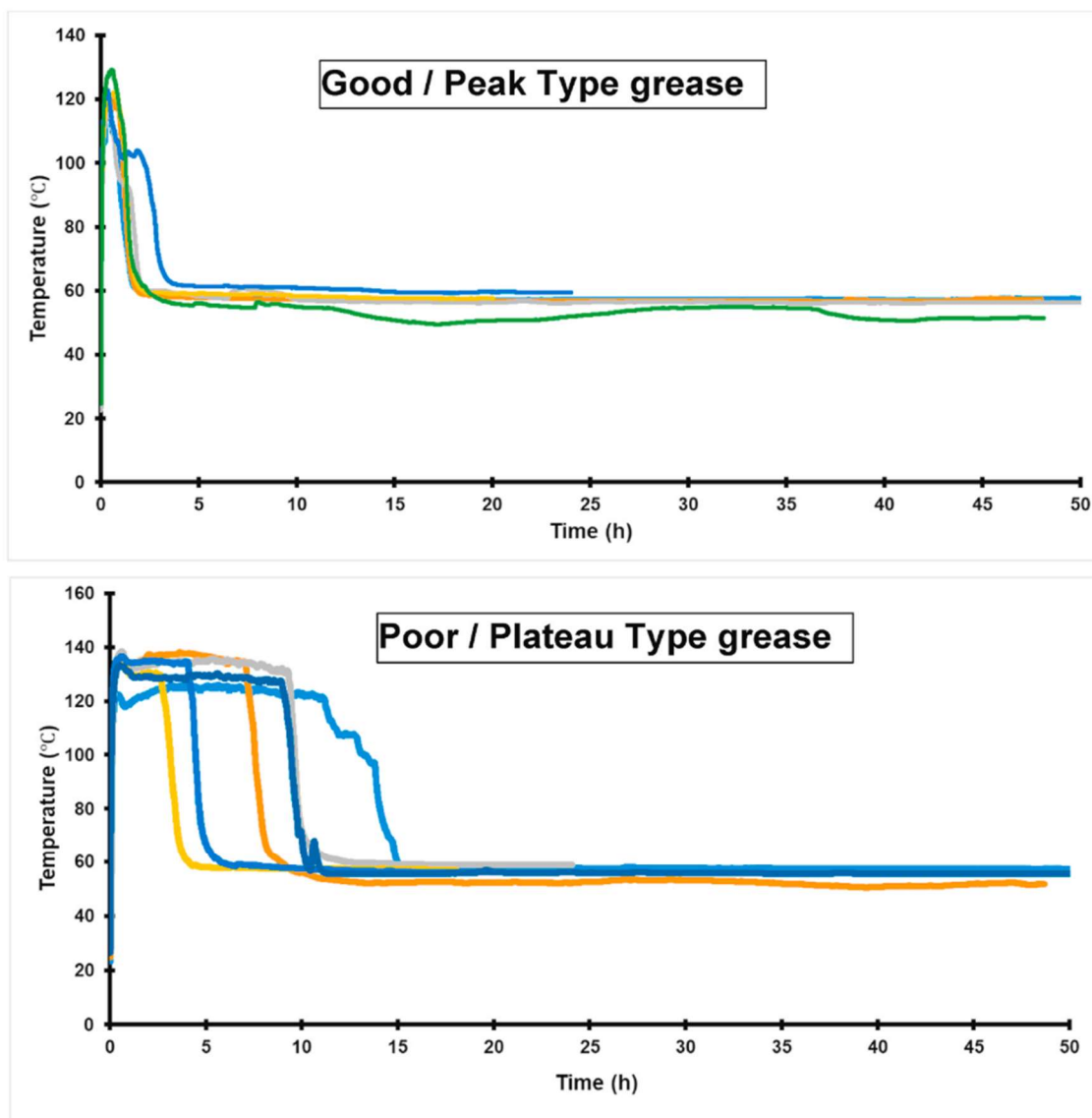
Obr. 2.2 Graf závislosti teploty na čase a snímky s mazivem po 30 min, 55 min a 532 hod, tečky v grafu odpovídají 30 a 55 minutám (test nezačal v čase $t=0$) [2]

Ve stejném článku [2], testovaly další válečkové ložisko NU312, které bylo provozováno s frekvencí otáčení 6 000 ot/min a zatěžováno silou 8,34 kN a naplněno stejným mazivem. Výsledkem byly dva grafy (Obr. 2.3) průběhu teploty v čase, kde je jasně vidět, že i když provedly identické testy, tak průběh teplot byl značně odlišný a dynamický. Zjistili, že teplotní výkyvy v prvním grafu jsou způsobeny kontaktem kov na kov při rozpadu mazacího filmu. Testování proběhlo opakovaně 6krát a pokaždé byl průběh značně dynamický, jako na druhém grafu. Autoři došli k závěru, že důvodem bylo nadměrné množství maziva nebo zmíněný kontakt kov na kov, tedy nedostatečné mazání.



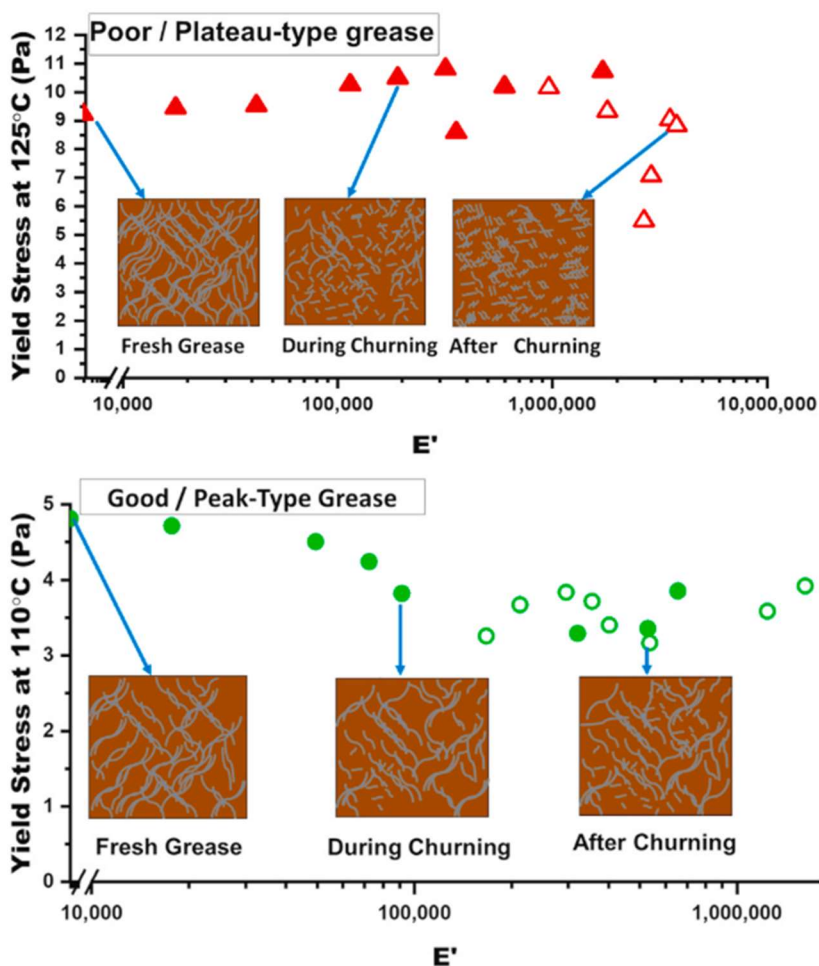
Obr. 2.3 Grafy závislosti teplot na čase se stejnými provozními parametry [2]

V článku [3] experimentálně zkoumali vliv typu použitého maziva na dobu záběhové fáze. Testy probíhaly na testovacím zařízení R0F s ložiskem 6204-2Z/C3, které mělo naplněno 30% volného objemu mazivem. Maziva byla použita dvě, LM2L a LM3L [3]. Provozní parametry byly 15 000 ot/min a radiální zatížení 150 N. První výsledek znázorňovaly dva grafy závislosti teploty na čase na Obr. 2.4, kde jde jasně vidět, že doba záběhové fáze se liší podle typu použitého maziva. Na prvním grafu s použitím maziva LM2L (označeno, jako dobré) byla doba záběhové fáze od 1,5 až 3 hodin. Kdežto při použití maziva LM3L (označeno, jako špatné) byla doba záběhové fáze od 3 do 18 hodin. Využitá maziva byla použita po testech, které byly provedeny v dřívější studii [4], kde dostaly tyto maziva označení, jako dobré a špatné vzhledem k délce doby záběhové fáze. I když se testy prováděly několikrát, je patrné, že doba záběhové fáze a nejvyšší dosažená teplota se test od testu lišily. Pro tento jev nemají autoři práce jasné vysvětlení, odkazují se však na dynamické chování maziva, jako bylo ukázáno v předešlé studii [2].



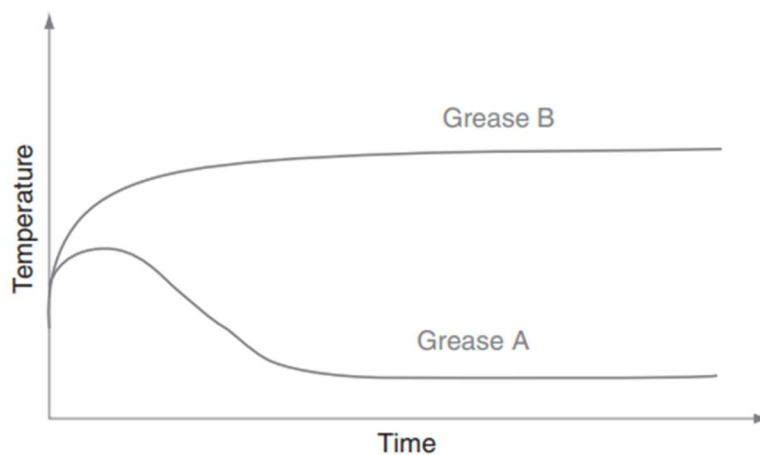
Obr. 2.4 Grafy závislosti teploty v čase: první graf – dobrý typ maziva (LM2L); druhý graf – špatný typ maziva (LM3L) [3]

Dále byla v článku [3] ukázána mikrostruktura použitých maziv. Výsledkem bylo zjištění, že u špatného typu maziva došlo během záběhové fáze ke značnému zkrácení vláken zahušťovadla v délce, kde naopak u dobrého typu maziva taková změna nenastala a většina vláken zahušťovadla zůstala stejná viz Obr. 2.5. Na koci záběhové fáze je jasně viditelné, že u špatného typu maziva došlo k jeho značné degradaci, kde mikrostruktura dobrého typu maziva zůstala relativně nezměněna. Najdeme zde i zmínku, že mez toku maziva, jako funkce energie (získané integrací teplot) byla do hodnoty $E' < 100\,000$ konstantní. Je vidět, že u špatného typu maziva byla hodnota konstantní až do okamžiku, kdy byla celá mikrostruktura maziva silně degradovaná, nemohla tedy absorbovat další energii, to mělo za následek vysoký pokles hodnoty meze toku. Naopak u dobrého typu maziva mez toku mírně poklesla a následně byla stabilní, záběhová fáze byla ukončena před degradací maziva viz Obr. 2.5. U dobrého typu maziva je vidět, že pokles meze toku maziva není způsoben degradací vláken zahušťovadla maziva, protože tato změna byla jen velmi malá.



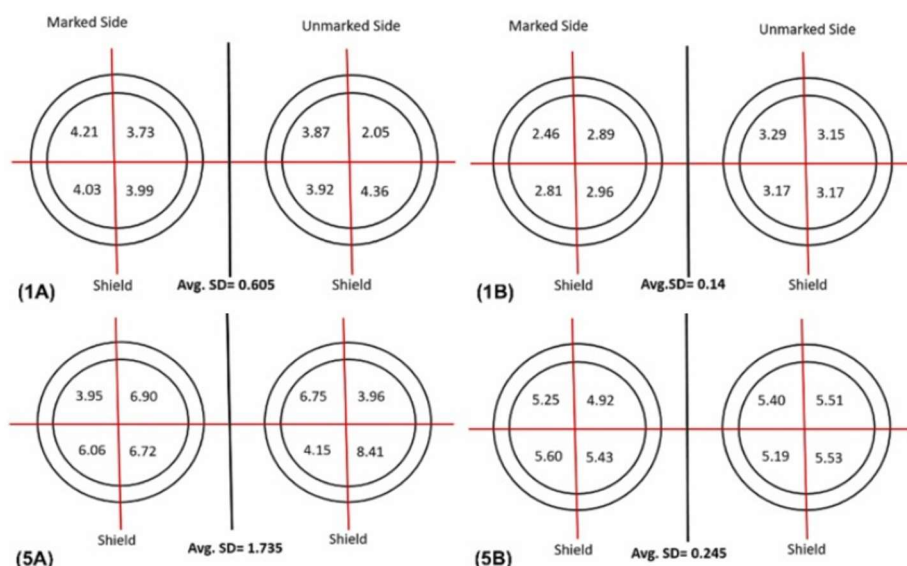
Obr. 2.5 Grafy meze toku maziva při záběhové fázi, jako funkce E' : vrchní graf – špatné mazivo; spodní graf – dobré mazivo (plné značky odpovídají záběhové fázi a prázdné uvolňování základového oleje z maziva) [3]

Podobný test, jako byl proveden s dobrým a špatným typem maziva provedl také Horth a spol. [1], který testoval mazivo A a B a jejich vliv na průběh záběhové fáze. Výsledek je vidět na grafu průběhu teploty v čase na Obr. 2.6, kde ukázal, že v případě maziva A neproběhlo jeho promíchání. Naopak mazivo B bylo neustále mícháno během chodu ložiska. Následně zjistili, že mazivo A tvrdlo, zatímco mazivo B si udrželo svoji konzistenci. Tvrdnutí maziva autor připisoval rychlému průběhu rozmístění maziva (channelingu), což vedlo na nízkou provozní teplotu.



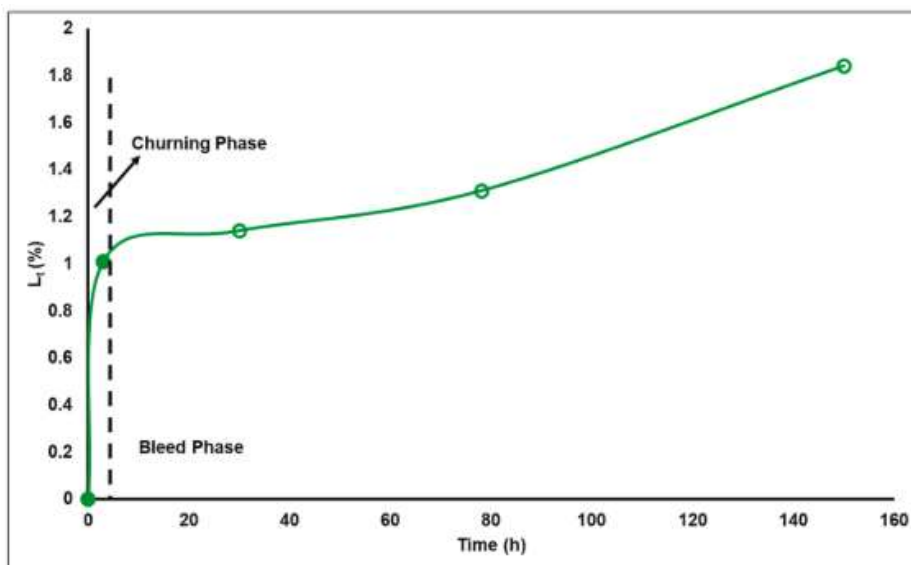
Obr. 2.6 Graf závislosti teploty na čase pro mazivo A a B [1]

V publikaci [5] se měřila mez toku maziva na rozhraní záběhové fáze a fáze uvolňování základového oleje z maziva. Měření se provedlo s jednořadým kuličkovým ložiskem s hlubokou drážkou (6209-2Z/C3) s 30 % náplní maziva, při frekvenci otáčení 5 000 ot/min a axiálním zatížení 513 N. Bylo použito šest maziv z toho tři vykazovaly dobrý a tři špatný průběh doby záběhové fáze. Mez kluzu maziva se měřila z krytů ložiska, které byly rozděleny na čtyři sektory viz Obr. 2.7 (jeden z krytů byl označen a druhý ne). Jednotné hodnoty meze toku maziva po záběhové fázi byly způsobeny usazením maziva bez jeho dalšího přemísťování. Naopak v průběhu záběhové fáze se hodnoty lišily právě kvůli neustálému mixování maziva před jeho usazením. Hodnoty meze toku u špatného typu maziva vykazovaly vyšší hodnoty kvůli vyšší degradaci částic zahušťovačla tak, jak uvedl článek výše [3]. Naopak u dobrého typu maziva došlo jen k reorientaci částic zahušťovačla bez jejich degradace, což způsobilo nižší hodnoty meze toku.

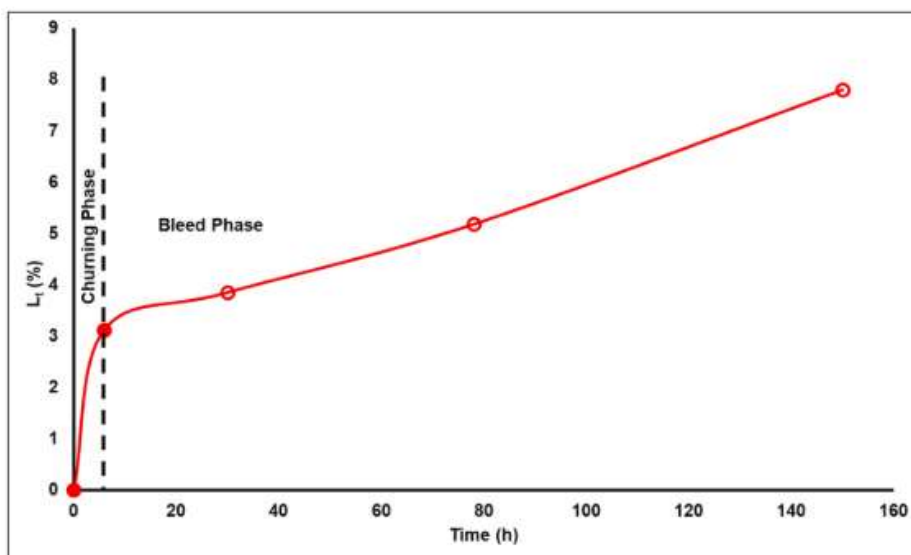


Obr. 2.7 Rozložení maziva na krytech ložiska: (A) během záběhové fáze; (B) po záběhové fázi; (1) dobré mazivo (LM2L); (5) špatné mazivo [5]

V článku [6] experimentálně ověřili kolik maziva z ložiska unikne během záběhové fáze a po jejím konci. Testovali s frekvencí otáčení 15 000 ot/min a radiálním zatížením 150 N. Byly testovány dva druhy maziva (LM2L a LM3L), kterými bylo naplněno 30 % volného objemu testovaného ložiska (6204-2Z/C3). Množství uniklého maziva určili pomocí změření hmotnosti ložiska před a po testu. Výsledné grafy ukázaly, že únik maziva nastává převážně během záběhové fáze. U špatného typu maziva byl únik maziva vyšší než u dobrého viz Obr. 2.8. Zjistili, že to je důsledek vyšší teplotně řízené hustoty energie, které po záběhové fázi roste daleko méně než během ní. Únik po záběhové fázi může být způsoben také uvolňováním základového oleje.



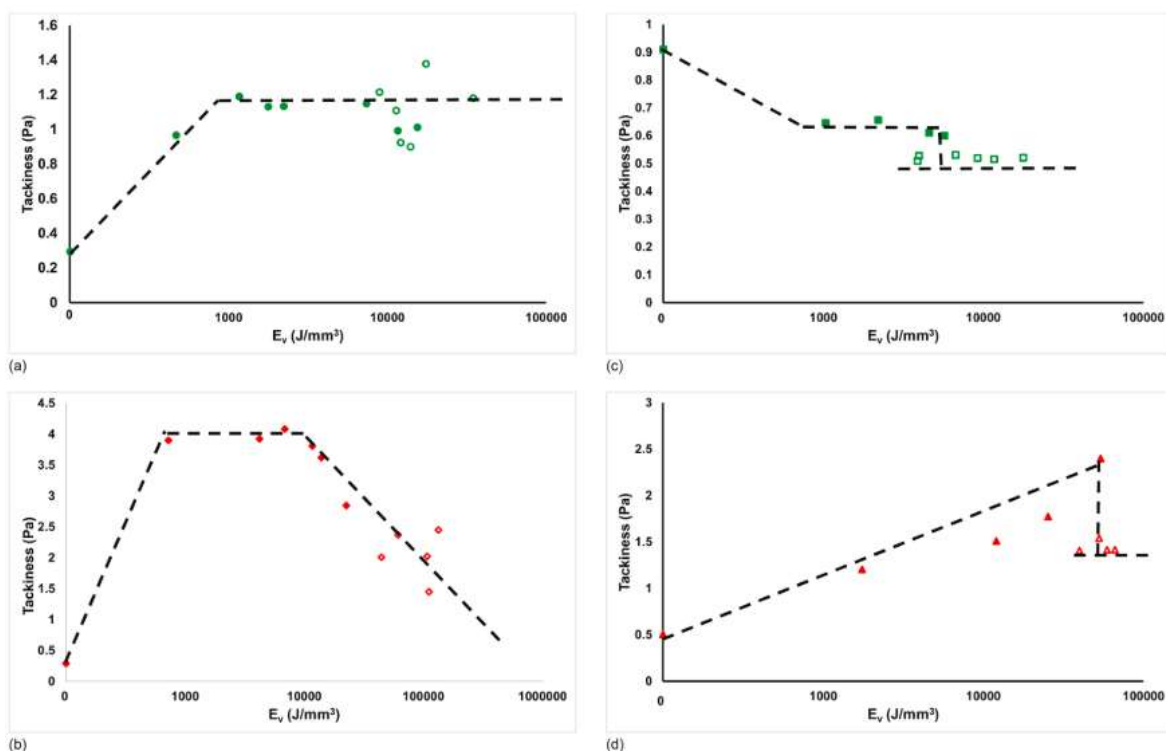
(a)



(b)

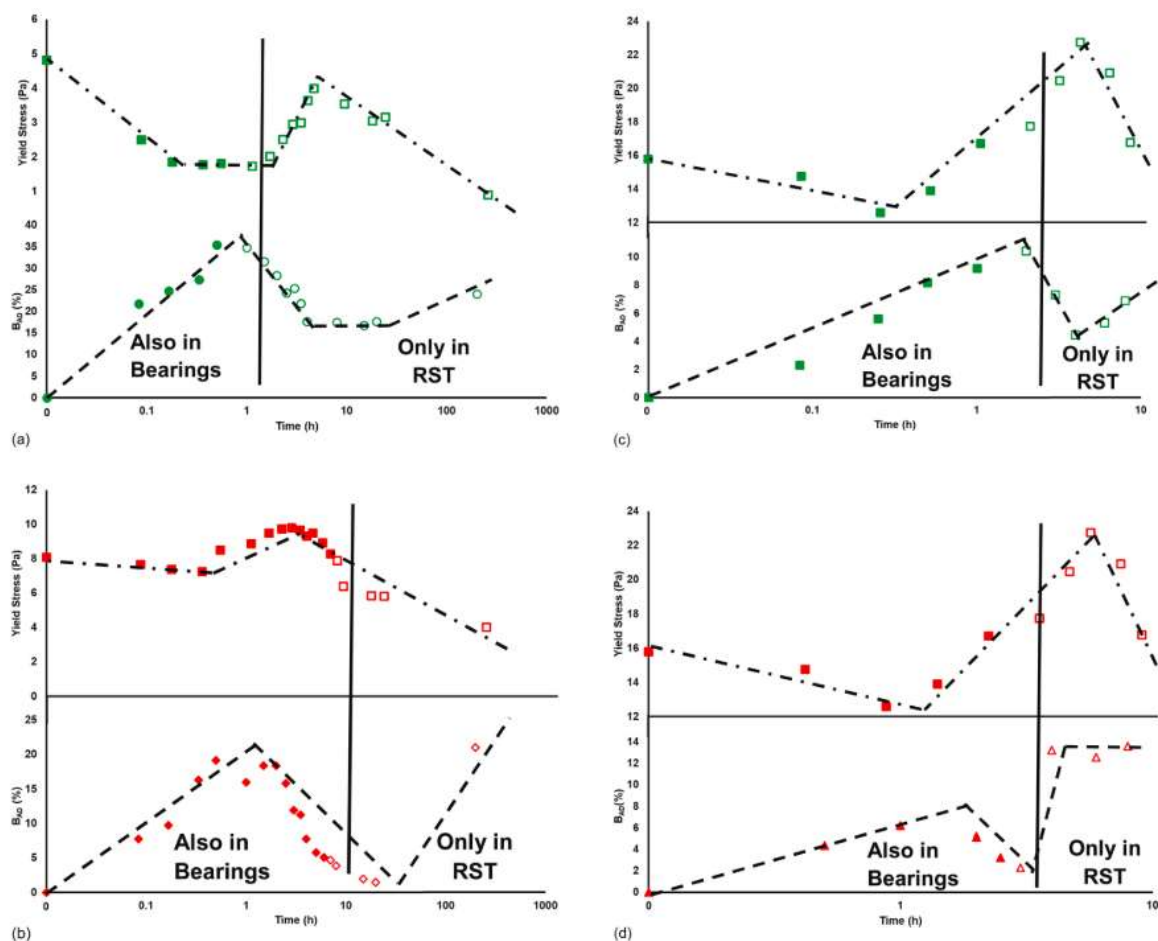
Obr. 2.8 Grafy úniku maziva v čase: (a) dobré mazivo (LM2L); (b) špatné mazivo (LM3L); plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje [6]

V článku [6] testovali autoři přilnavost čtyř typů maziv k povrchu ložiska během a po záběhové fázi. Z grafu na Obr. 2.9 jde vidět, že u dobrých typů maziva se přilnavost v průběhu záběhové fáze měnila. V okamžiku, kdy nastal konec záběhové fáze byly hodnoty přilnavosti téměř konstantní, zvlášť u grafu (c). u špatných typů maziv přilnavost během záběhové fáze rostla s větší disipací hustoty energie E_v . Tím došlo k degradaci maziva a následné redukci přilnavosti. Autoři uvedli, že není známo, jaká je vhodná hodnota přilnavosti maziva pro dlouhé ložiskové operace. Uvedli, že jednou z hypotéz v případě příliš malé přilnavosti je nemožnost udržet rezervoáry maziva, kdy se bude mazivo dostávat zpět do zaplavené oblasti, což povede na krátké záběhové fáze doprovázené růstem teploty a degradací maziva.



Obr. 2.9 Grafy přilnavosti maziva k povrchu ložiska: (a) LM2L; (b) LM3L; (c) LM3C; (d) LCP 2.5 C; zelená – dobré maziva; červená – špatné maziva; plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje (čárkovaná čára je čára trendu) [6]

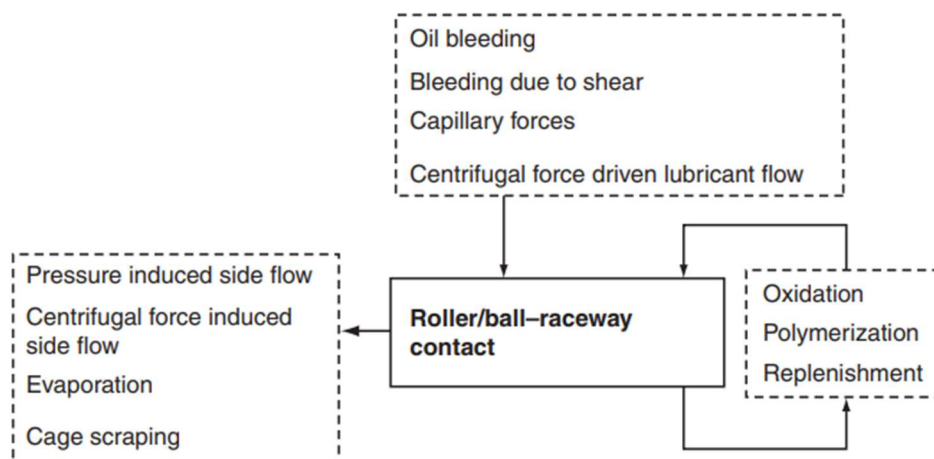
Nakonec byla v článku [6] měřena kapacita úniku základového oleje (jako plocha základového oleje). Výsledky porovnali s měřením meze toku maziva a bylo ukázáno, že při poklesu meze toku, ke které došlo díky degradaci mikrostruktury maziva byl sledován nárůst úniku základového oleje. Naopak při růstu meze toku následoval pokles úniku základového oleje z maziva (Obr. 2.10).



Obr. 2.10 Grafy porovnání měření kapacity úniku základového oleje a meze toku maziva: (a) LM2L; (b) LM3L; (c) LM3C; (d) LCP 2.5 C; zelená – dobré mazivo; červená – špatné mazivo; plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje (čárkovaná čára je čára trendu) [6]

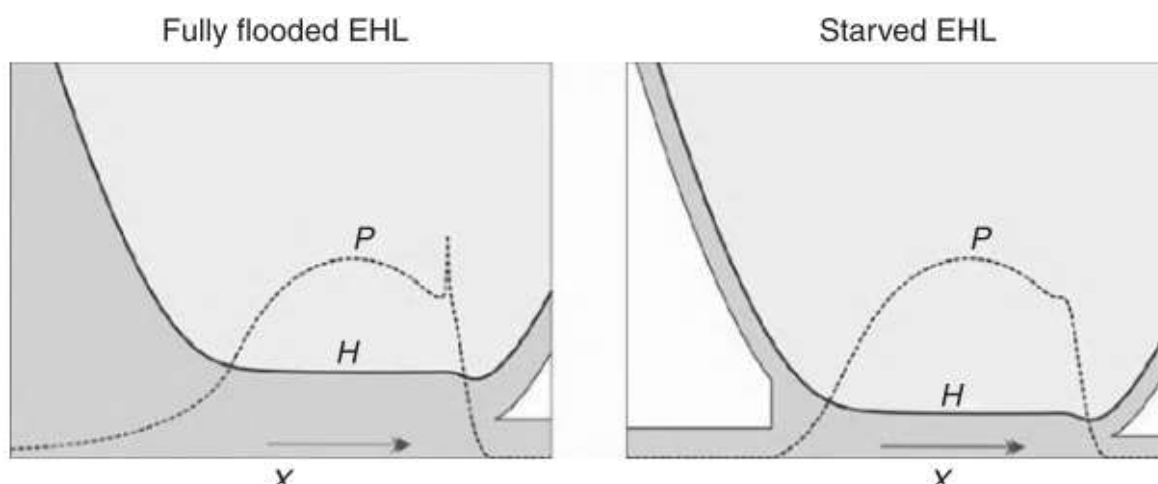
Fáze uvolňování základového oleje z maziva

Tato fáze nastává bezprostředně po záběhové a trvá až do doby, kdy dojde k vyčerpání základového oleje z maziva nebo do konce životnosti ložiska. Wikström a Jacobsson [1] uvedli, že tloušťka filmu je určena pomocí hmotnostní bilance mezi ztrátovými a doplňovacími mechanismy kontaktu (Obr. 2.11). Přívod oleje do kontaktu předpokládají jeho uvolňováním, stříhem, odstředivými a kapilárními silami. Dále uvedli, že oxidace a polymerizace nemusejí být vždy ztrátové mechanismy, protože mohou nepřímo ovlivnit vlastnosti maziva a mít tak pozitivní vliv na formulaci filmu. V případě průchodu vzduchu ložiskem považují vypařování za ztrátový mechanismus. Dále uvedli, že u některých typů ložisek může v případě velkých odstředivých sil docházet k toku maziva, jak do, tak také z kontaktu. V závěru se zmínili, že v případě klece může být mazivo seškrábáno nebo přerozděleno na oběžných drahách, což má pozitivní vliv na formulaci mazacího filmu.



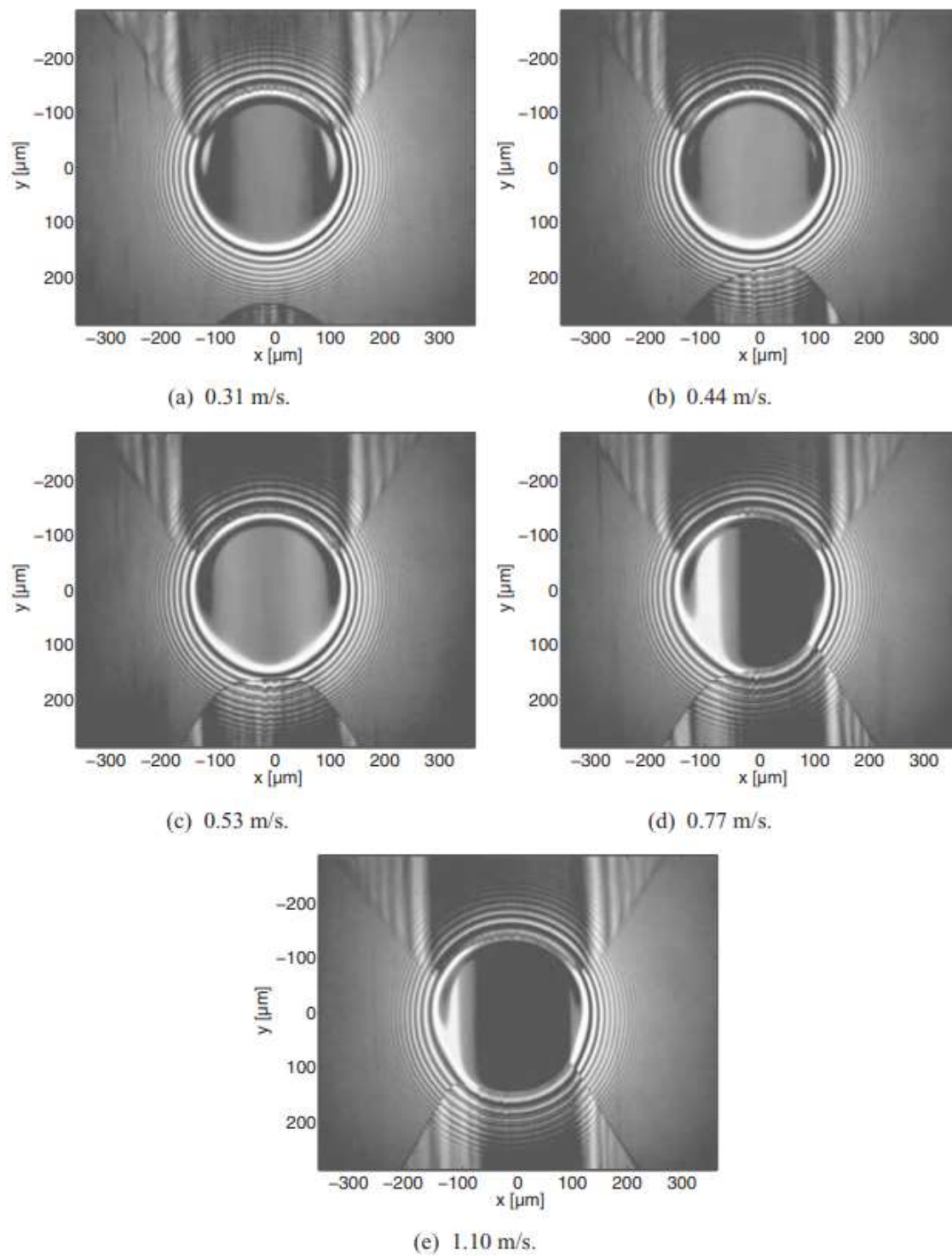
Obr. 2.11 Doplnovací a ztrátové mechanismy kontaktu [1]

V případě nedostatečného zásobování kontaktu mazivem dochází často ve valivých ložiskách k mechanismu zvanému hladovění. Při hladovění nevstupuje do kontaktu dostatečné množství maziva pro oddělení valivých prvků, čím dojde k spojení vrstev na valivých elementech a dráze, tím vznikne meniskus. To má za následek, že nárůst tlaku je posunut blíže k Hertzovu kontaktu a tloušťka filmu mezi valivými prvky je nižší viz Obr. 2.12.



Obr. 2.12 Schématické znázornění tlaku a tloušťky filmu v plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu [1]

Na Obr. 2.13 jsou zobrazeny interferometrické snímky z experimentu s kuličkou na disku, který provedl Popovici [kniha], kde ukázal postupné přibližování vstupního menisku Hertzově kontaktní oblasti se zvyšující se rychlostí.

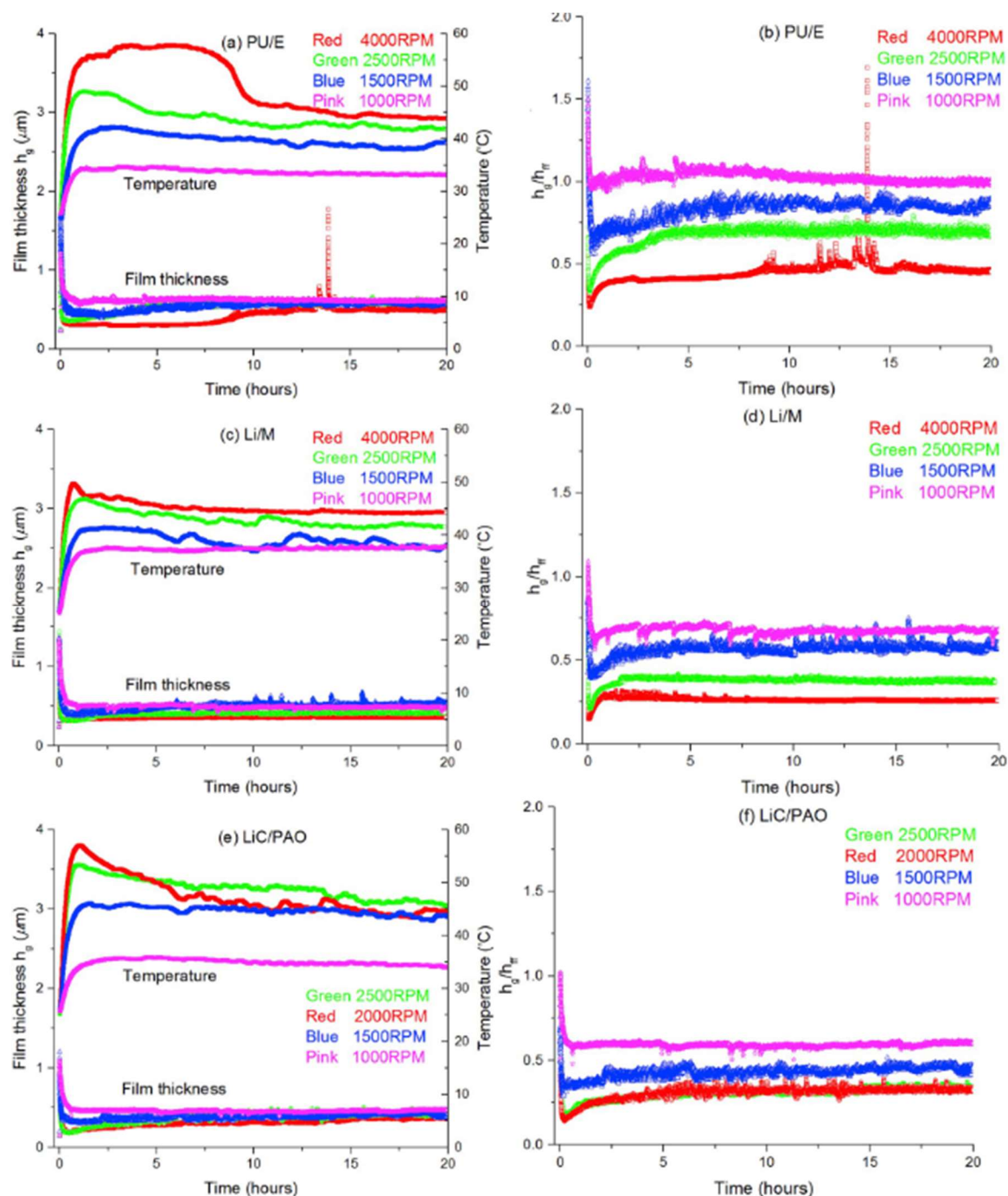


Obr. 2.13 Interferometrické snímky přibližování vstupního menisku Hertzově kontaktu se zvyšující se rychlostí (směr toku maziva je ze spodu nahoru) [1]

2.2.2 Vliv provozních parametrů, typu maziva a konstrukce ložiska na tloušťku vrstvy filmu

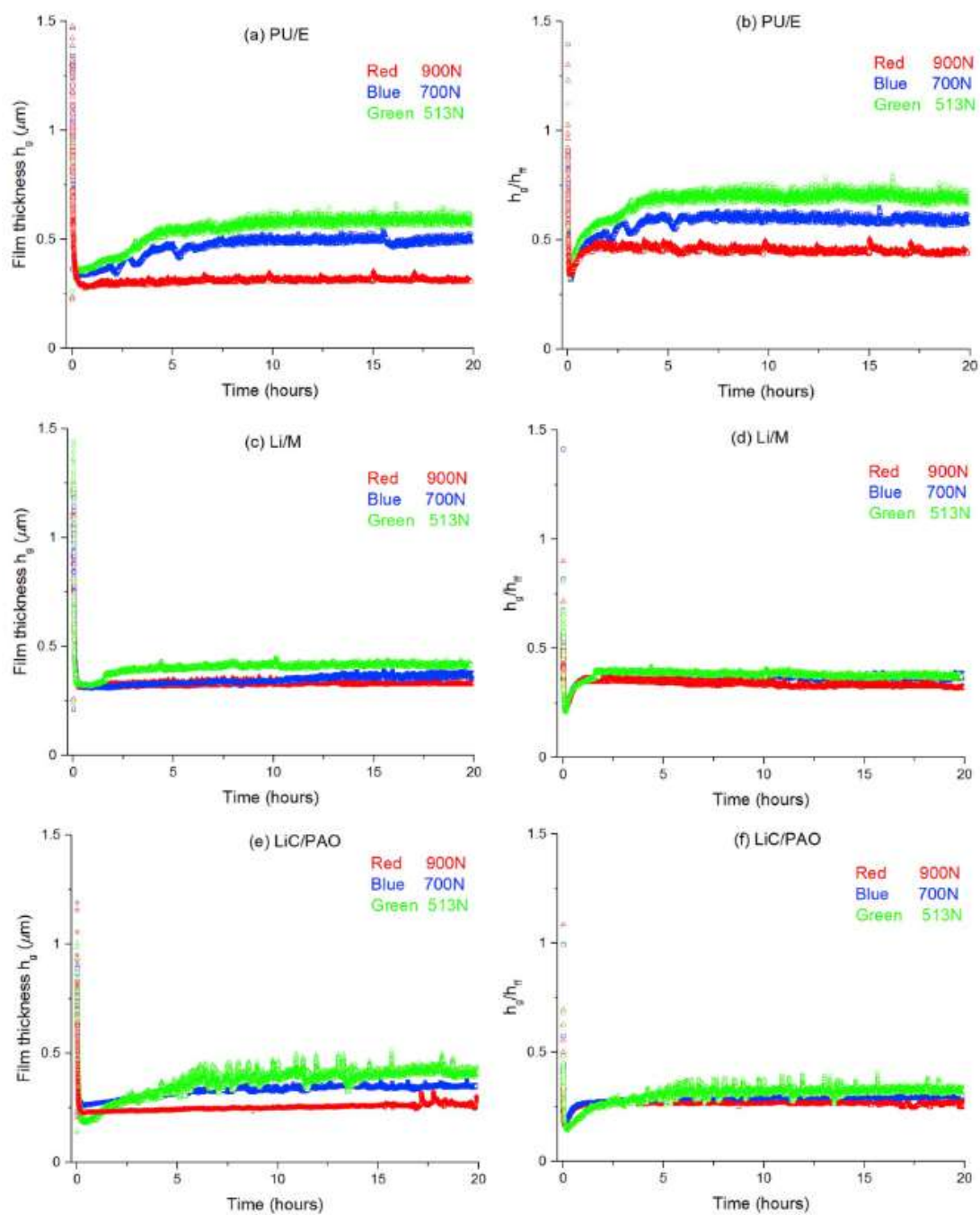
V publikaci [7] se autoři zabývali vlivem frekvence otáčení a zatížením a jejich vlivu na tloušťku filmu v kuličkovém ložisku s hlubokou drážkou 6209-2Z/C3, která byla měřena pomocí elektrické kapacitní metody. Porovnávali tloušťku vrstvy filmu při různých frekvencích otáčení a zatížení pro tři různá plastická maziva.

Výsledné grafy tloušťky filmu pro různé frekvence otáčení jsou zobrazeny na Obr. 2.14. Z výsledků je patrné, že tloušťka filmu s vyšší frekvencí otáčení klesá. Pokles tloušťky vrstvy filmu v počátku je ovlivněn růstem teploty, což vede na snížení viskozity základového oleje. Po ustálení teploty dochází k ustálení tloušťky vrstvy filmu. Autoři zmínili, že dochází ke snížení normalizované tloušťky filmu se zvyšující se rychlostí viz Obr. 2.14 (b), (d), (f), což znamená, že se zvyšuje míra hladovění. U maziva LiC/PAO vyzorovali, že při frekvenci otáčení 2 000 a 2 500 ot/min byla tloušťka vrstvy maziva téměř stejná. Autoři uvedli, že to může být způsobeno vysokou stříhovou stabilitou daného maziva, která omezuje schopnost uvolňování základového oleje. U testu s mazivem PU/E při 4 000 ot/min byl navíc pozorován náhlý nárůst tloušťky vrstvy filmu okolo 14 h chodu testu, což bylo po konci záběhové fáze. Autoři vysvětlili, že k tomuto jevu mohlo dojít tím, jak se mazivo příležitostně dostávalo do kontaktu díky creepovskému toku, vibracemi, odstředivými silami a nebo seškrabáváním maziva klecí, což již dříve vysvětlil Zhou a další.



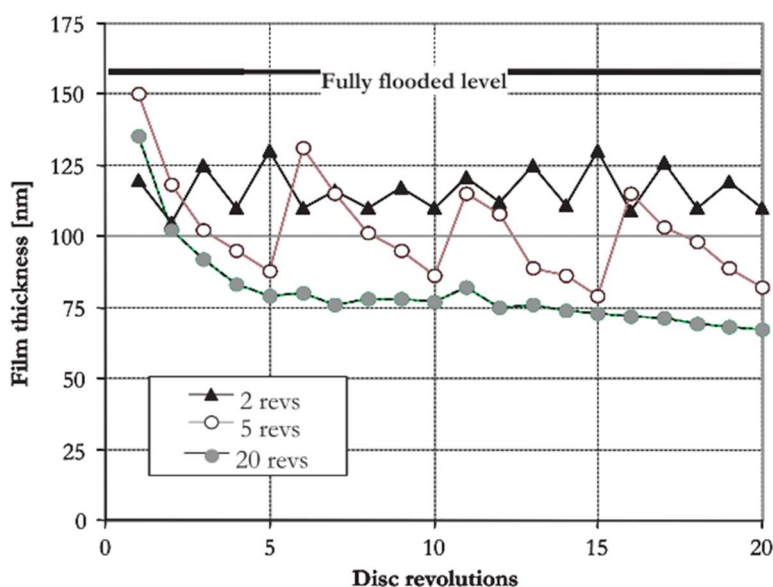
Obr. 2.14 Grafy vývoje teploty, tloušťky filmu (h_g) a poměru tloušťky filmu versus tloušťky filmu vypočítané z viskozity základového oleje (h_{gr}) v čase při různých frekvencích otáčení při zatížení 513 N: (a)(b) PU/E; (c)(d) Li/M; (e)(f) LiC/PAO [7]

V další části práce byl ukázán zmiňovaný vliv zatížení na tloušťku filmu, kde bylo pozorováno, že při růstu síly docházelo k poklesu tloušťky vrstvy filmu viz Obr. 2.15. Vliv zatížení na tloušťku filmu by velmi malý zvláště u maziva LiM a LiC/PAO. Naopak u maziva PU/E byl tento vliv výraznější, což autoři přisuzují nízké stříhové stabilitě maziva, což vede na zvyšování míry uvolňování základového oleje, jako dříve ukázal Zhou a další. Z grafů je také patrné, že při vyšším zatížení je doba pro dosažení ustálené tloušťky filmu kratší. To je důsledkem vyšší mechanické práce maziva, díky čemu je měkčí a také je zvýšena míra uvolňování základového oleje.



Obr. 2.15 Grafy tloušťky filmu (h_f) a poměru tloušťky filmu versus tloušťky filmu vypočítané z viskozity základového oleje (h_η) v čase při různém zatížení a s frekvencí otáčení 2 500 ot/min: (a)(b) PU/E; (c)(d) Li/M; (e)(f) LiC/PAO [7]

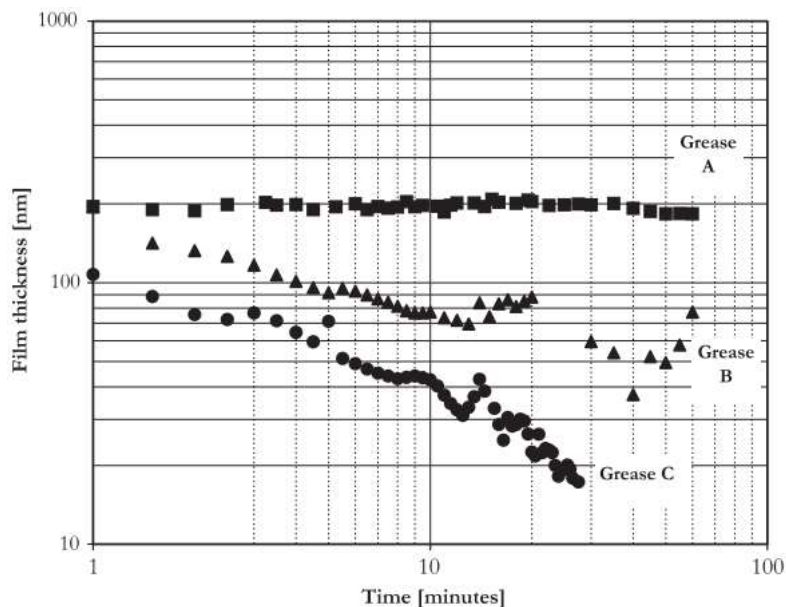
Další práci, ve které se autoři zabývali vlivem frekvence otáčení a zatížení na tloušťku filmu byla práce, kterou provedla Cann, Philippa M.E. a Lubrecht, Antonius A. [8]. Popsali, že v případě frekvence otáčení vede její zvyšování na redukcí tloušťky filmu, jako tomu bylo v předchozí studii. Dále však uvedli, že při vyšších rychlostech může dojít k vibracím, které napomůžou přerozdělení maziva, což bude mít pozitivní vliv na zvýšení tloušťky filmu. Autoři se zmiňují, že v případě zatížení dochází při jeho navyšování k zvětšení kontaktní oblasti, čím může dojít k hladovění, a to z důvodu větší vzdálenosti maziva od středu oběžné dráhy. V práci byl proveden test, kde bylo postupně periodicky snižováno zatížení po 2, 5 a 20 otáčkách disku. Na grafu Obr. 2.16 jde vidět, že tloušťka filmu u každého ze tří testů různě klesala s každou otáčkou. Autoři zmínili, že v případě dynamického zatěžování bude u radiálních ložisek k tomuto jevu docházet jednou za otáčku.



Obr. 2.16 Graf vlivu snižování zatížení na tloušťku filmu v hladovějícím režimu [8]

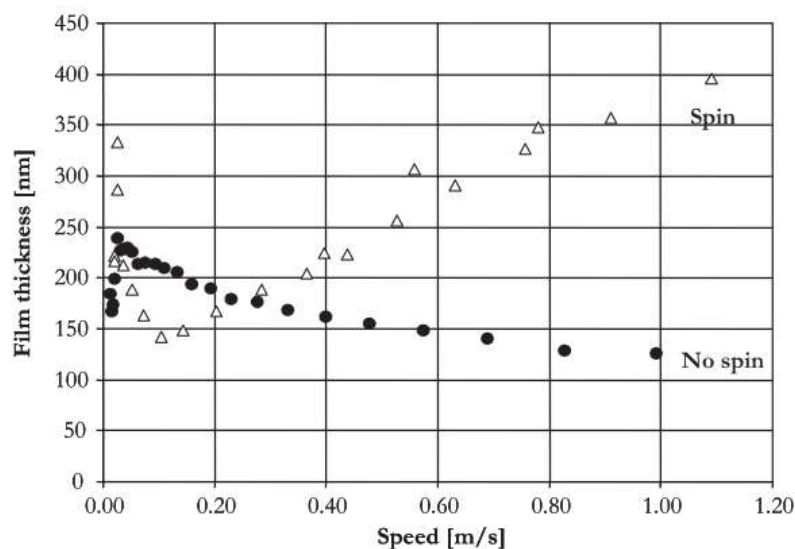
Třetím důležitým provozním parametrem je teplota, kde v článku [9] autoři uvedli, že u plastických maziva pracujících v rozmezí teplot 70-160 °C dojde k selhání po vyčerpání 50 % základového oleje. V článku [8] bylo uvedeno, že snižující se teplota bude mít za následek zvýšení viskozity základového oleje a díky tomu může nastat hladovění. Nakonec v článku [2] autoři uvedli, že při mechanické nebo teplotní degradaci maziva dojde k vyčerpání jeho životnosti a tím se znatelně zhorší podmínky mazání.

mimo jiné byl v práci [8] experimentálně ukázán vliv stříhové stability maziva na jeho schopnost uvolňovat základový olej. Je předpokládáno, že mazivo s nízkou stříhovou stabilitou bude uvolňovat základový olej rychle a tím pádem dojde dříve k hladovění. Naopak mazivo s vysokou stříhovou stabilitou bude uvolňovat základový olej pomalu a tím bude sníženo jeho množství vstupující do kontaktu. Autoři provedli test se třemi mazivy se stejnými základovými oleji, ale s rozdílnou stříhovou stabilitou. Na grafu na Obr. 2.17 jsou zobrazeny tloušťky filmu v čase pro tři maziva, kde mazivo A mělo nejmenší a mazivo C největší stříhovou stabilitu. Výsledky ukázaly, že mazivo A formovalo největší tloušťku filmu a mazivo C nejmenší. U maziva B bylo pozorován pokles a následný růst tloušťky filmu.



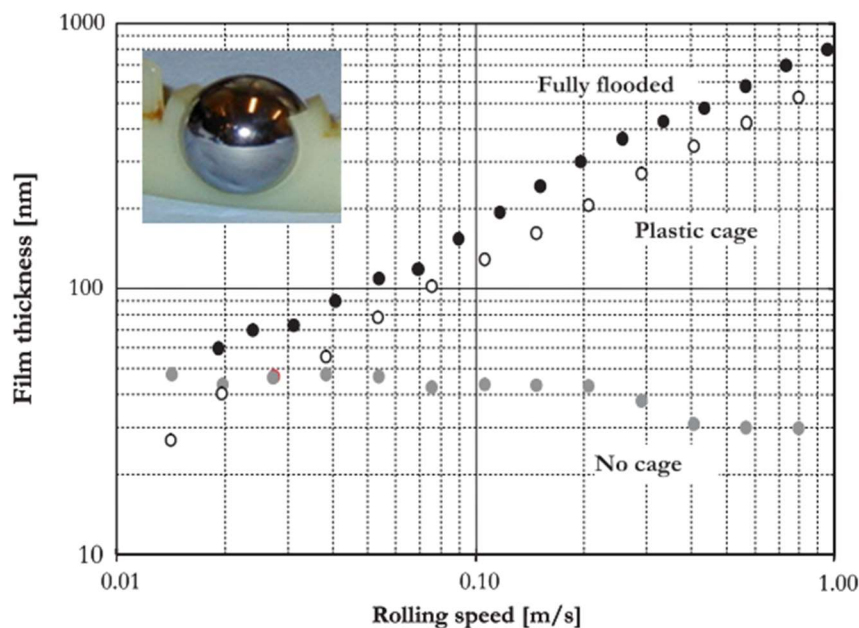
Obr. 2.17 Graf hladovějící tloušťky filmu v čase pro mazivo A, B a C [8]

Ve studii [8] byly provedeny dva testy se zařízením s ball on disk, kde v jednom případě byla rotace kuličky zamezena a v druhém případě kulička rotovala. Výsledkem je graf na Obr. 2.18, kde je jasné vidět, že v případě, kdy kulička nerotovala došlo k výraznému hladovění. Naopak v druhém případě měla rotace kuličky pozitivní vliv na nárůst tloušťky filmu, kdy kulička napomáhala dostávat mazivo do kontaktu. Autoři článku [9] uvedli, že při rotaci vnějšího kroužku je životnost maziva snížena o 42 % v porovnání s rotací vnitřního kroužku ložiska.



Obr. 2.18 Graf závislosti tloušťky filmu na rychlosti s rotací kuličky a bez rotace kuličky [8]

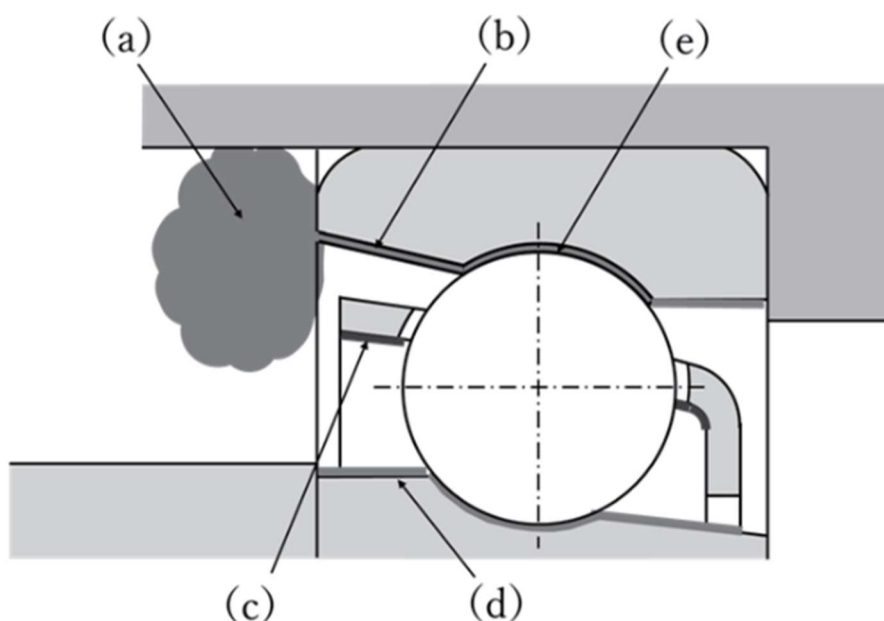
Následně byl v práci [8] proveden experiment, který popsal vliv klece, kde uvedli dva případy. V tom nejhorším může klec seškrabávat mazivo z valivých drah. Naopak v nejlepším případě může klec přerozdělovat mazivo, které je na ní uchyceno. Studie [8] na modelovém zařízení ukázala, že klec s blízkou konformitou kuličky zlepšuje mazání a má pozitivní vliv na tloušťku filmu viz Obr. 2.19.



Obr. 2.19 Graf vlivu plastové klece na tloušťku filmu při rychlosti hladovění [8]

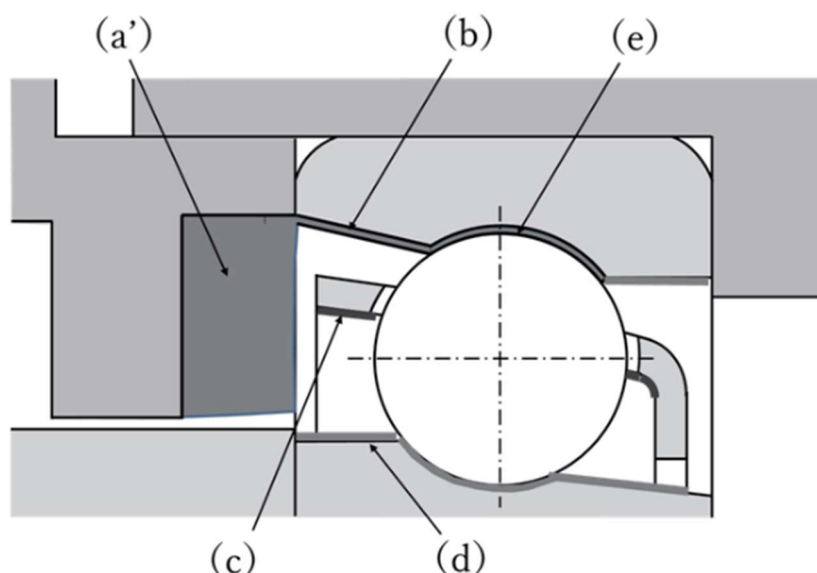
Závěrem bylo v práci uvedeno, že pokud je vůle mezi klecí a kuličkou příliš malá, tak je mazivo seškrabáváno a dochází k hladovění kontaktu. Následně bylo zmíněno, že je důležitý materiál klece, protože ocelové klece mohou poskytovat částice opotřebení, které mohou degradovat mazivo. A v poslední řadě bylo zmíněno, že je také důležitá samotná velikost ložiska, kde u větších ložisek je vzdálenost maziva od kontaktu větší a tím klesá možnost jeho doplňování.

V článku [10] autoři provedli test s kuličkovým ložiskem s kosoúhlým stykem 7206 B. Kde při jeho rozebrání ukázali rozložení maziva dle Obr. 2.20. Test provedli se zatížením 1 500 N při frekvenci otáčení 6 000 ot/min s udržovanou teplotou 120°C. Následně provedly dva testy, kdy při prvním testu ložisko běželo 2 hodiny a následně přidali na přední část ložiska kryt s 6 g čerstvého maziva dle Obr. 2.21. Na začátku druhého testu vstříkli do ložiska 1 g základového oleje a následně ložisko zakrytovali, jako v předchozím testu.



Obr. 2.20 Rozmístění maziva v ložisku po záběhové fázi: (a) přední část vnějšího kroužku; (b) rameno vnějšího kroužku; (c) vnitřní povrch klece; (d) rameno vnitřního kroužku; (e) oběžná dráha [10]

Zjistili, že základový olej se do kontaktu (e) pohybuje přes vrstvy maziva. Základový olej v místě (a) a na rameni ložiska (b) na Obr. 2.21 je propojen s místem kontaktu (e). Výsledkem je tvrzení, že základový olej se dostává do místa kontaktu přes vrstvu maziva a doplňuje základový olej ztracený vypařováním, disperzí atd. pro udržení rovnováhy ztrátových a doplňovacích mechanismů. Uvádějí, že množství maziva na spodní části klece (c) je mnohem menší než v místě (a) nebo (a') a přívod do místa (c) tedy není možné očekávat, protože místa nejsou propojeny. To znamená, že aby se dostalo mazivo do místa rozhraní klece s kuličkou, tak je to možné pomocí maziva na povrchu kuličky.



Obr. 2.21 Rozložení maziva v ložisku s s těsněním: (a') přidané těsnění s mazivem; (b) rameno vnějšího kroužku; (c) vnitřní povrch klece; (d) rameno vnitřního kroužku; (e) oběžná dráha [10]

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Na základě provedené rešerše lze prohlásit, že distribuce plastického maziva ve valivých ložiscích je velmi komplexní problém. Pro popsání fází, ke kterým ve valivých ložiscích dochází, bylo doposud provedeno mnoho testů. Obecně jich bylo nejvíce provedeno se zařízením ball-on-disk, kde je reprezentován pouze jeden kontakt. Proto je nezbytné zabývat se testováním reálných ložisek, kde získané výsledky odpovídají chování reálných ložisek v provozu. Třetím přístupem pro výzkum v oblasti ložisek jsou numerické simulace, které se v dnešní době díky lepší výpočetní technice dostávají stále více do popředí.

Zkoumáním doby záběhové fáze se zabýval Lugt, Piet M. a spol. [2], kteří zjistili, že doba fáze je typická růstem teploty a následně jejím ustálením na tzv. provozní teplotě. Také uvedli na třech snímcích, že doba fáze je typická makroskopickým tokem maziva, kdy po jejím konci již dochází pouze k mikroskopickému toku maziva. V publikaci, kterou sepsal Chatra K R, Sathwik s výše zmíněným autorem [3] byl popsán vliv typu použitého plastického maziva na dobu záběhové fáze. Hlavním zjištěním bylo, že typ použitého plastického maziva má zásadní vliv na dobu záběhové fáze, kde byly ukázány výsledky pro dvě maziva. Jedno nazvali, jako špatné a druhé, jako dobré pro dobu záběhové fáze. Následně popsali ukázali, že mikrostruktura u špatného maziva byla během a po skončení záběhové fáze silně z degradována. Naopak mikrostruktura u dobrého maziva nevykazovala skoro žádnou degradaci. To znamená, že příliš dlouhá doba záběhové fáze může mít za následek degradaci maziva a snížení jeho životnosti.

Wikström a Jacobsson [1] určili ztrátové a doplňovací mechanismy, ke kterým dochází během záběhové fáze a prohlásili, že tloušťka filmu je závislá na hmotnostní bilanci právě mezi ztrátovými a doplňovacími mechanismy.

Další autoři se zabývali vlivem provozních parametrů a jejich vlivu na distribuci plastického maziva v ložiskách. Cen a další [7] se zabývali vlivem rychlosti a zatížení na tloušťku filmu v ložisku. Ukázali, že tloušťka filmu se ustálí ve fázi, kdy dojde k ustálení teploty, tedy po záběhové fázi. Na grafu normalizované tloušťky filmu bylo ukázáno, že s vyšší frekvencí otáčení je tloušťka filmu menší. U zatížení bylo, jako u vlivu frekvence otáčení pozorováno menších tloušťek filmu při vyšších hodnotách zatížení. Následně ukázali, že při nižším zatížení je doba pro ustálení tloušťky filmu delší. Nakonec ukázali, že vliv zatížení na tloušťku filmu nemusí být vždy výrazný a že záleží na použitém mazivu, kdy maziva s vyšší stříhovou stabilitou neuvolňují základový olej, tak rychle.

Zmíněnou stříhovou stabilitou maziva se zabývala Cann, Philippa M.E. a další [8], která ukázala, že mazivo s nízkou stříhovou stabilitou bude uvolňovat základový olej rychleji, což povede z počátku na silnější filmy, ale dojde dříve k jeho vyčerpání, tedy k hladovění. Naopak mazivo s vysokou stříhovou stabilitou bude uvolňovat základový olej pomaleji, což povede na nižší tloušťky filmu, kdy může dojít až k hladovění kontaktu.

Zmínění autoři zkoumali také vliv rotace kuličky na tloušťku filmu, kdy ukázali, že rotace kuličky hraje důležitou roli na tloušťku filmu, kdy při rotace tloušťka výrazně rostla. Následně byl ukázán vliv klece a popsány její dva možné vlivy na mazání. V prvním případě bylo zmíněno, že může klec seškrabávat mazivo a to hlavně v případě malé vůle mezi kuličkou a klecí. V druhém případě spočíval vliv klece v schopnosti přerozdělit mazivo a zlepšit tak mazání.

S důležitým zjištěním přišel Tomonobu Komoriya a další [10], kteří ve své práci provedli sadu testů a následně zjistili, že se základový olej pohybuje přes vrstvy maziva a doplňuje tak kontakt.

Na základě provedené rešerše lze konstatovat závěry o tom, jak které mechanismy a provozní parametry ovlivňují distribuci plastického maziva ve valivých ložiskách. Nejdůležitější poznatky jsou shrnuty v následujících bodech:

- Na dobu záběhové fáze má zásadní vliv frekvence otáčení a typ použitého maziva.
- Tloušťka vrstvy filmu v ložisku je určena hmotnostní bilancí mezi ztrátovými a doplňovacími mechanismy.
- K ustálení tloušťky vrstvy v ložisku dochází po ustálení teploty.
- Stříhová stabilita maziva má zásadní vliv na schopnost uvolňovat základový olej a tím na životnost maziva.
- Důležitou roli při mazání hraje klec a rotace kuliček a jejich vzájemná vůle.

2.4 Mezera v poznání

Pro popsání mechanismů a celkově distribuce plastického maziva ve valivých ložiskách bylo provedeno nespočet testů. Nejvíce jich bylo provedeno se zařízením ball on disk, kde je ale reprezentován pouze jeden kontakt. Proto se následně prováděly testy se skutečnými ložisky, kde bylo možné lépe pozorovat a popsat distribuci maziva. Není však dostatečný počet studií, ve kterých by bylo ložisko po testování rozebráno a sledována distribuce maziva přímo v kontaktu. Chybí i studie, které by detailněji sledovali distribuci maziva v čase a to právě při prvotním spuštění ložiska, kdy nastává záběhová fáze, která má zásadní vliv na rozmístění maziva a tvorbu rezervoárů pro další chod ložiska.

Ze zmíněných studií v rešerši se autoři v žádné z nich nezabývali vlivem procentuálního množství maziva náplně maziva, kde všechny testy byly provedeny s 30 % náplní volného objemu ložiska, tak jak je uvedeno ve většině literatury. Bylo zjištěno, že důležitou roli při mazání hraje klec a rotace kuliček, jak by ukázáno ve studii [8]. Avšak v žádné práci nebyl popsán vliv klece, jak na tvorbu rezervoárů, tak také na tloušťku vrstvy maziva v ložisku. O vlivu rotace kuliček se ví, že má pozitivní efekt na mazání, avšak ani to doposud nebylo experimentálně ověřeno testy se skutečným ložiskem. Jen u zařízení ball on disk.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Výzkumné otázky

Výzkumná otázka č. 1

Jaký vliv bude mít procentuální množství náplně maziva na tloušťku vrstvy filmu na kontaktních površích ložiska?

Výzkumná otázka č. 2

Jaké mechanismy přispívají k zásobování kontaktu mazivem?

3.2 Cíle výzkumu

Hlavním cílem diplomové práce je pozorování distribuce plastického maziva ve valivém ložisku s popsáním vlivu množství náplně maziva, frekvence otáčení, materiálu a konstrukce klece na distribuci a zásobování kontaktu mazivem. Testování bude provedeno na experimentálním zařízení umožňujícím rychlé rozebrání ložiska.

Prvním dílčím cílem práce je úprava testovacího zařízení a následné ověření jeho funkčnosti. Druhým je navržení testovacích parametrů.

3.3 Hypotézy

Hypotéza č. 1

Lze předpokládat, že v případě nižší náplně ložiska mazivem bude tloušťka vrstvy maziva na površích tenčí, procentuálně podobně, jako bude procentuální náplň maziva. Je předpokládáno, že hlavním důvodem tenčí vrstvy maziva bude více prostoru mimo oběžnou dráhu ložiska, kde se usadí více maziva díky, jeho menšímu množství.

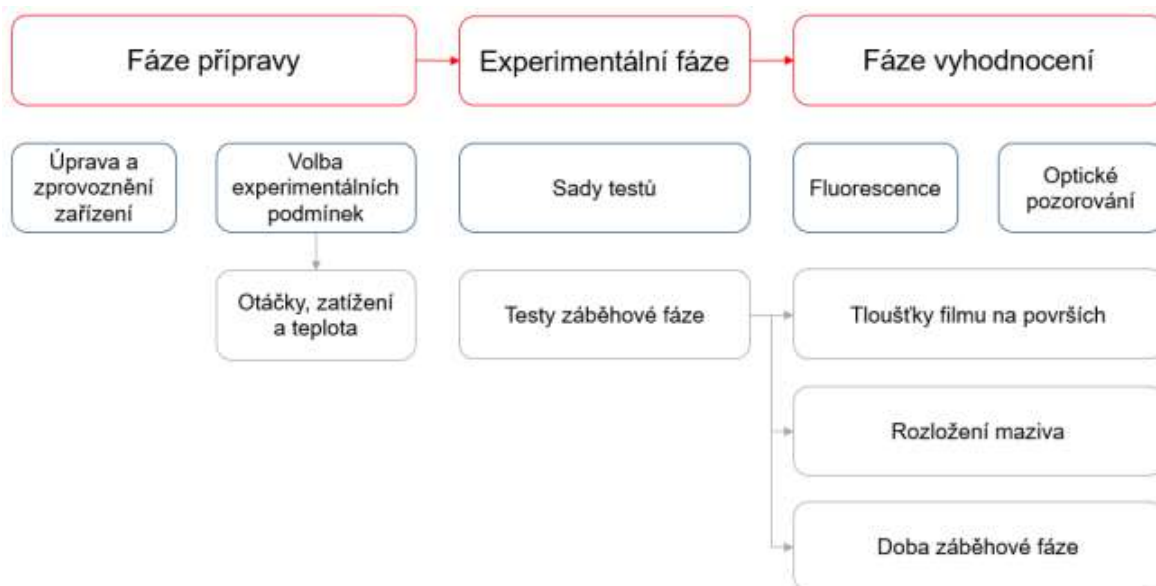
Hypotéza č. 2

Kontakt je zásobován mazivem z rezervoárů, kde hlavním mechanismem je uvolňování základového oleje z maziva. Důležitou roli hraje také mechanismus rotace kuličky, díky kterému dochází k redistribuci maziva z rezervoárů vytvořených na kleci do kontaktu. Tyto mechanismy budou závislé na množství maziva dostupného pro tvorbu rezervoárů a době záběhové fáze během které se tyto rezervoáry tvoří.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Diplomová práce řeší kauzální typ výzkumného problému, kde je zkoumán vliv provozních parametrů na úvodní distribuci plastického maziva ve valivém ložisku. Pomocí kvantitativní analýzy byla vyhodnocena tloušťka mazací vrstvy v místě kontaktu a před kontaktem, jak na dráze vnějšího a vnitřního kroužku ložiska, tak také na kuličkách ložiska. Prostřednictvím kvalitativní analýzy se vyhodnocuje distribuce a rozložení plastického maziva v ložisku. Práce byla rozdělena do tří fází, které je možné vidět na následujícím schématu Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schéma postupu řešení

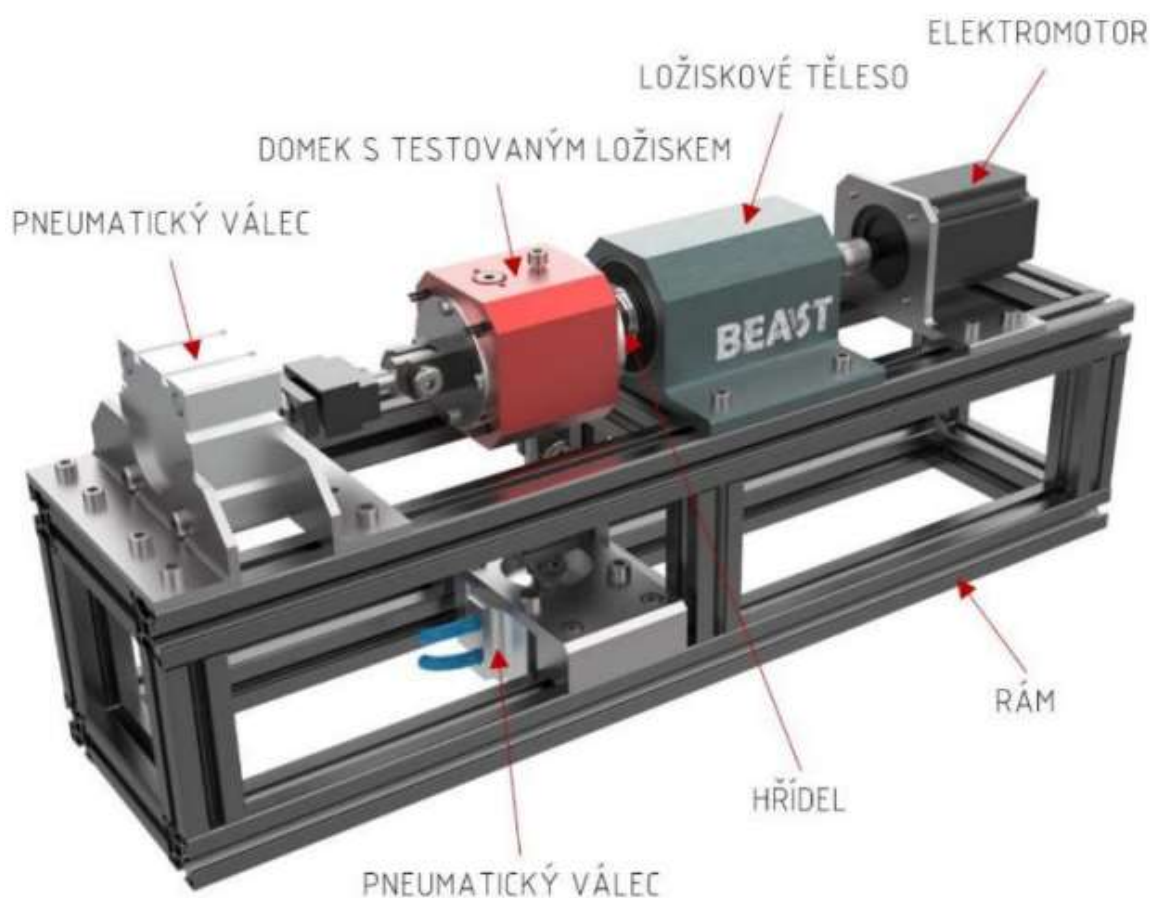
4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

4.2.1 Tester ložisek pro experimentální měření

Za účelem provedení experimentálního měření bylo modifikováno zařízení zkonstruované v rámci diplomové práce z roku 2020 [11]. Předlohou pro modifikaci se stal studentský projekt z roku 2019 [12], k jehož realizaci nedošlo. Jednalo se o zařízení navržené pro vyhodnocování stop plastického maziva na vnějším a vnitřním kroužku a valivých elementech ložiska. Úprava vedla k snadnější a rychlejší demontáži ložiska.

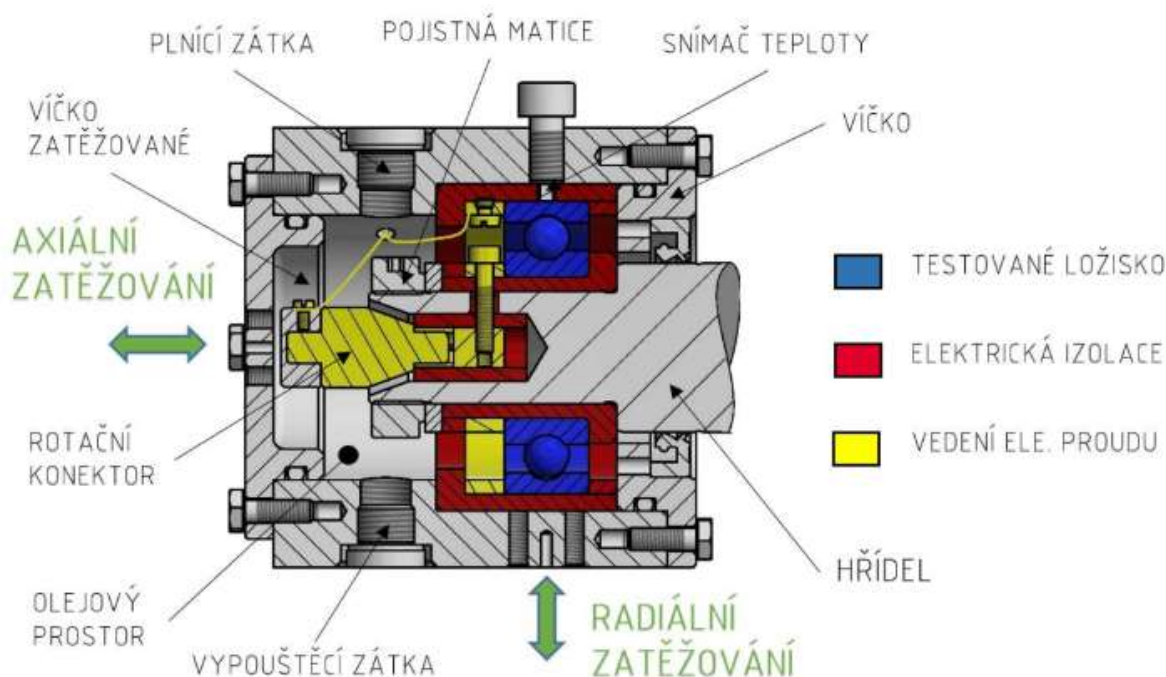
Tester 2020

Na Obr. 4.2 je zobrazen model zařízení z roku 2020, který byl zkonstruován a následně vyroben v rámci diplomové práce [11]. Hlavní částí byl červeně označený domek, ve kterém se nacházelo testované ložisko. Domek umožňoval studium elektrických metod měření. Testované ložisko se dalo zatěžovat, jak v axiálním, tak také v radiální směru pomocí dvou pneumatických válců, které dokázaly vyvinout zatížení až 1,5 kN. Zatížení snímaly dva tenzometrické snímače. Ložisko se otáčelo pomocí elektromotoru s frekvencí otáčení 6 000 ot/min. Otáčky z elektromotoru se přenášely na testované ložisko pomocí hřídelové spojky, která spojovala elektromotor a hřídel. Hřídel byla uložena ve dvou ložiscích v ložiskovém tělese. Celé zařízení se nacházelo na konstrukci z hliníkových stavebnicových profilů.



Obr. 4.2 Model testovacího zařízení z roku 2020 [11]

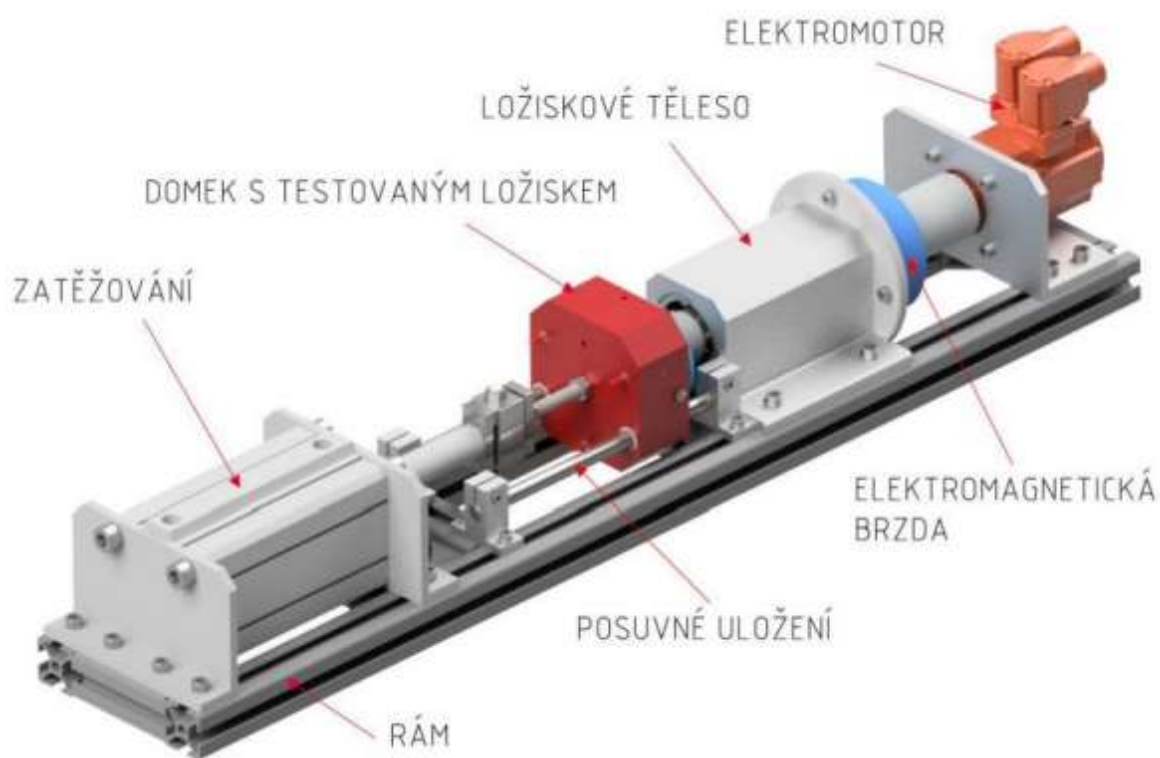
Hlavním konstrukčním uzlem byl domek s uložením testovaného ložiska, jehož model je zobrazen v řezu na Obr. 4.3. Domek měl možnost temperace až do teploty 100 °C pomocí čtyř topných patron. Testované ložisko (modře) bylo pomocí elektrické izolace (červeně) z nylonu 6 odizolováno od hřídele a domku z důvodu použití elektrických měřicích metod. Domek byl utěsněn O-kroužky a uzavřen víčky kvůli mazání broděním. Ložisko na hřídeli zajišťovala matice KMFE. Hlavní částí bylo vedení elektrického proudu (žlutě). Do domku vstupoval horním otvorem vodič, který byl připojen ke kovovému kroužku pomocí šroubu, který doléhal k vnějšímu kroužku ložiska, čím ho elektricky propojoval. Elektrický proud vedl z vnějšího kroužku ložiska přes mazané kontaktní oblasti k vnitřnímu kroužku ložiska. Kovový kroužek spojoval vnitřní kroužek ložiska, který byl pomocí šroubu spojen s kotvící částí rotačního konektoru. Vodič se vyvedl ven z domku ze statorové části rotačního konektoru otvorem v horní části domku. [11]



Obr. 4.3 Domek testovaného ložiska [11]

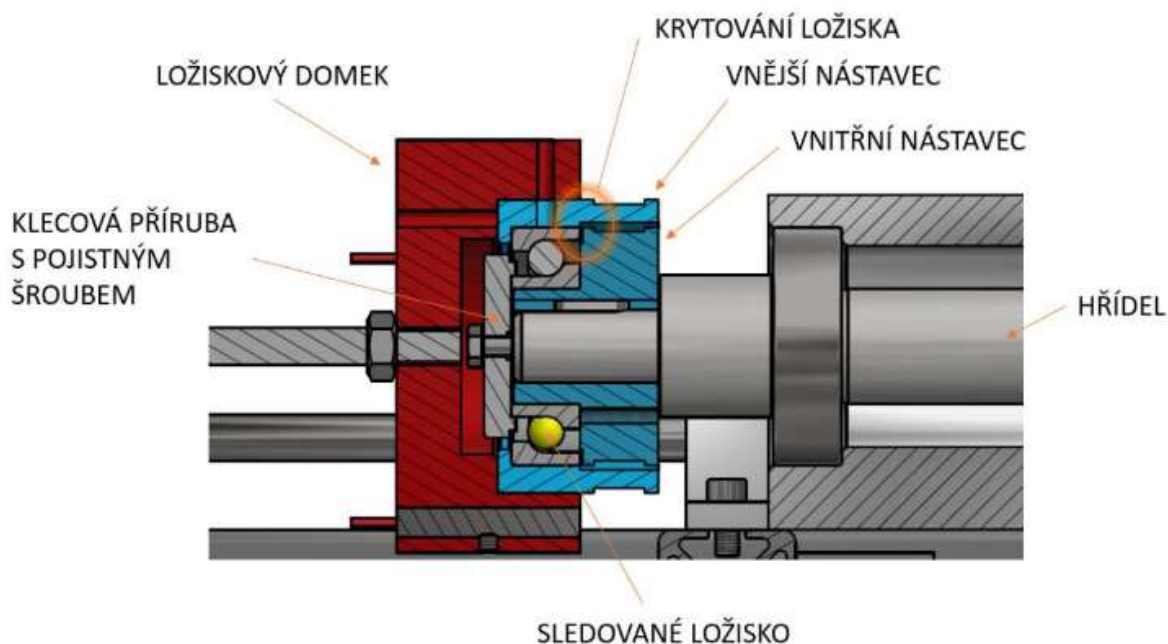
Zařízení na Obr. 4.4 bylo navrženo v rámci projektu z roku 2019 pro možnost pozorování stop plastického maziva na vnějším a vnitřním kroužku ložiska a na jeho valivých elementech [12]. Jeho hlavní předností je možnost rychlého zastavení a rozebrání ložiska. K realizaci projektu však nedošlo.

Testované ložisko se nachází v testovacím domku, který má možnost temperace až do teploty 100 °C pomocí tří topných patron. Ložisko se zatěžuje pomocí pneumatického válce se zdvihem 100 mm, který dokáže vyvinout sílu až 1,5 kN. Díky zdvihu pneumatického válce se realizuje rozebírání ložiska odsunutím domku po posuvném uložení. Síla se snímá tenzometrickým snímačem, jako u předchozího zařízení. Pohon ložiska zajišťuje elektromotor, který má schopnost vyvodit frekvenci otáčení až 6 000 ot/min. Před elektromotorem je implementovaná elektromagnetická brzda, díky které je možné zastavit zařízení za 0,002 s. Spojení elektromotoru s testovaným ložiskem je provedeno pomocí hřídele, která je uložena v ložiskovém tělese ve dvou ložiscích, jako tomu bylo u přechodného zařízení. Rám je opět vytvořen z hliníkových stavebnicových profilů.



Obr. 4.4 Model testovacího zařízení z roku 2019 [12]

Hlavním konstrukčním uzlem je uložení testovaného ložiska, které je možné vidět na Obr. 4.5. Vnitřní kroužek ložiska s klecí a valivými elementy je uložen na vnitřním nadstavci. Na hřídeli je zajištěn pomocí klecové příruby s pojistným šroubem v axiálním směru a proti rotaci perem. Vnější kroužek ložiska je uložen ve vnějším nadstavci, který je uložen v ložiskovém domku. Zde je zajištěn pojistným šroubem z vrchní části domku. Díky jednoduchému uložení ložiska je možné, po provedení experimentu, jeho rychlé rozebrání a vyjmutí ze zařízení.

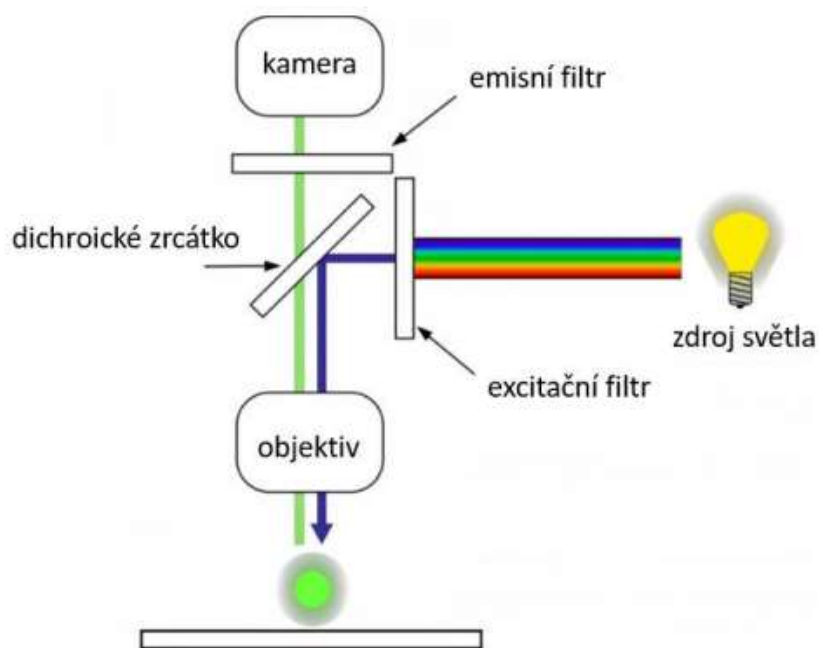


Obr. 4.5 Uložení testovaného ložiska (tester 2019) [12]

4.2.2 Fluorescenční mikroskop

Pro pozorování a vyhodnocování tloušťky vrstvy maziva na dráze vnějšího a vnitřního kroužku ložiska a na jeho valivých elementech byl použit fluorescenční mikroskop. Využilo se přirozené fluorescence použitého minerálního maziva.

Ve fluorescenčním mikroskopu světelný svazek ze zdroje prochází přes aperturní a polní clonu. Aperturní clona reguluje velikost úhlu kužele světla, který osvětluje vzorek a polní clona slouží pro vymezení pozorovaného zorného pole. Následně prochází světelný svazek sadou filtrů. Prvním je excitační filtr, který propouští dále jen světlo určitých vlnových délek. K oddělení světla kratších a delších vlnových délek slouží dichroické zrcátko, kdy světlo s delší vlnovou délkou projde a světlo s kratší vlnovou délkou je blokováno a odraženo do objektivu. Po dopadu světla na vzorek dochází k vybuzení fluoroforů ze vzorku, které prochází přes emisní filtr do kamery. Emisní filtr blokuje excitační paprsek a propouští paprsky vlnové délky jen z excitovaných fluoroforů, zároveň také filtruje nežádoucí složky světla přicházejícího ze vzorku. Schéma fluorescenčního mikroskopu je vidět na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Schéma principu fluorescenčního mikroskopu [13]

Jako zdroj světla se použila led dioda s výkonem 3 W a vlnovou délkou 370-375 nm. Pro pořízení snímků byla použita monochromatická kamera BFS-U3-51S5M-C USB 3.1 Blackfly® S [14] s rozlišením 5 Mpx a velikostí pixelu 3,45 μm . Kamera byla nastavena na 12 bitů s vypnutím automatických funkcí úpravy parametrů scény a vypnutím gama korekce. Objektiv byl od společnosti Mitutoyo s označením M Plan APO 2X [15], který disponuje pracovní vzdáleností 34 mm a rozlišovací schopností 5 μm .

4.3 Materiál a testovací podmínky

4.3.1 Ložiska a mazivo

Pro provedení experimentů byly zvoleny tři radiální kuličková ložiska s kosoúhlým stykem se stykovým úhlem 40° pro všechny ložiska. Lišila se v materiálech a konstrukcích klecí, které jsou společně s jednotlivými označeními zobrazeny na Obr. 4.7. Různé typy klecí byly vybrány kvůli porovnání jejich vlivu na distribuci plastického maziva v ložisku.

Pro všechny experimentální měření se použilo plastické mazivo Mogul LV 2-3, které má minerální základový olej a zahušťovadlem je lithné mýdlo. Kinematická viskozita základového oleje při 40 °C je 50 mm^2s^{-1} a NLGI třída 2-3, která se určuje podle měření penetrace.



Obr. 4.7 Použité ložiskové klece: (a) mosazná; (b) ocelová; (c) polyamidová

4.3.2 Testovací podmínky

Pro zodpovězení výzkumných otázek byly navrženy tři sady testů, přičemž každá obsahovala tři testy (Tab. 4.1). V první sadě byl testován vliv procentuální náplně ložiska mazivem. Postupně se zde testoval vliv 5, 15 a 30% náplně volného objemu ložiska mazivem. U testů se sledovala distribuce maziva v čase, z toho důvodu bylo ložisko rozebráno po 2, 5, 8, 10, 30, 60, 90 a 120 minutách chodu. Při každém rozebrání byly pořízeny snímky rozložení maziva na dráze vnějšího kroužku a na kuličkách ložiska.

V druhé sadě se testoval vliv frekvence otáčení. Každý test trval 60 minut, kdy po jeho skončení byly pořízeny snímky rozložení maziva z dráhy vnějšího a vnitřního kroužku a kuliček ložiska.

V poslední, třetí sérii byl testován vliv materiálu a konstrukce klece na distribuci plastického maziva a na tvorbu rezervoárů na kleci. Při každém testu se ložisko provozovalo 60 minut a následně byly pořízeny série snímků. Nejprve z drah vnějšího a vnitřního kroužku ložiska a z jeho kuliček a na závěr byly pořízeny snímky rozložení maziva na kleci.

Při všech provedených testech bylo ložisko zatěžováno v axiálním směru silou 1 400 N. Ta odpovídá přibližně 5 % dynamické únosnosti použitých ložisek. U každého testu se také snímala teplota pomocí teplotního čidla na vnějším kroužku ložiska.

Tab. 4.1 Sady testovacích podmínek

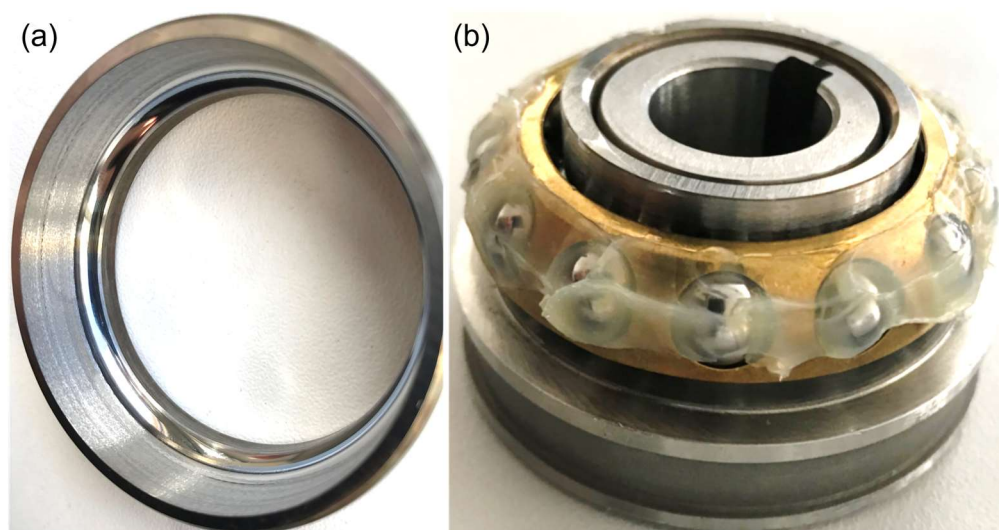
Sada testů	1			2			3		
Test	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Náplň maziva (%)	5	15	30		15			15	
Frekvence otáčení (ot/min)	2 000			500	1 000	2 000	2 000		
Typ klece	mosaz			mosaz			mosaz	ocel	polyamid

4.4 Metody

4.4.1 Příprava ložisek

Aby bylo možné provést pozorování v rozebraném stavu, bylo nejprve nutné upravit konstrukci ložisek tak, aby je bylo možné rozebrat. To bylo provedeno nahřátím vnějšího kroužku ložiska pomocí horkovzdušné pistole a ochlazením vnitřního kroužku ledem. Po jejich rozebrání, byly vnější kroužky zbroušeny, jak je patrné z Obr. 4.8 (a), aby je bylo možné opětovně skládat a rozkládat. Zbroušením nebyla narušena ani ovlivněna oblast hlavní valivé dráhy.

Před zahájením každého testu se navázilo patřičné množství plastického maziva pro dané ložisko, které bylo následně nanášeno na klec a kuličky ložiska viz Obr. 4.8 (b). Po provedení a vyhodnocení experimentu se ložisko očistilo od zbytků maziva a jeho části se umístily do nádoby s izopropylalkoholem. Ta byla vložena do ultrazvukové čističky po dobu cca dvou minut, ve které byly části ložiska zbaveny všech zbytků maziva. Stejný proces byl opakován před a po každém testu.



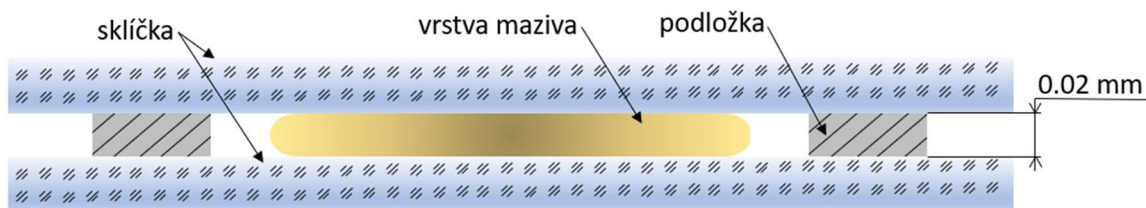
Obr. 4.8 (a) zbroušený vnější kroužek ložiska; (b) plastické mazivo na kleci a kuličkách ložiska

4.4.2 Kalibrace fluorescenčního mikroskopu a měření tloušťky filmu

Před kalibrací byl obraz světelné intenzity nehomogenní kvůli nehomogennímu rozložení světelného zdroje. Pro kalibraci mikroskopu byl použit jednoduchý přípravek, který je schematicky znázorněn na Obr. 4.9. Následně byly pořízeny dva snímky. Pomocí prvního snímku s kalibračním přípravkem bylo zjištěno kolik jasových hladin odpovídá tloušťce maziva 0,02 mm. Druhý snímek se pořídil se zavřenou clonou (background), což odpovídalo nulové hodnotě. Oba snímky byly použity v programu Micro – Manager pro homogenizaci pole (flat-field korekce). Následně se zhotovil snímek měřky s rozměrem fyzického elementu 1 mm. Z pořízeného snímku byla v programu Gwyddion zjištěna fyzická velikost jednoho pixelu, která odpovídala 3,15 μm . Poté se ve stejném programu určila průměrná světelná intenzita z kalibračního snímku, pomocí kterého se vypočítala vypočítaná hodnota pro přepočet světelné intenzity na tloušťku filmu podle rovnice (4.1).

$$k = \frac{t_{pod}}{I_{pr}} = \frac{20\,000}{903} = 22,15 \quad (4.1)$$

Kde k je hodnota pro přepočet intenzity světla na tloušťku filmu, t_{pod} je tloušťka podložky, I_{pr} je průměrná intenzita světla.



Obr. 4.9 Schéma kalibračního přípravku

Při měření se rozebrané ložisko umístilo na pozorovací přípravek, který byl vložen pod mikroskopem v 3D tištěné krabici (Obr. 4.10), aby do snímků nezasahovalo světlo z okolí. Při každém měření se pořídilo třináct snímků kuliček a drah na vnějším a vnitřním kroužku ložiska.

4.4.3 Stanovení offsetu – vlivu pozadí při měření na ložisku

Během pořizování snímků jednotlivých komponent v testovací fázi bylo zjištěno, že i přes to, že do scény nevstupovalo světlo z okolí, docházelo vlivem jejich geometrie k odrazu světla emitovaného mazivem v okolí pozorované stopy. Jednalo se o problém velkých rozdílů snímaných vrstev ve scéně. Vyskytovaly se rozdíly ve 3 řádech, tj. měřená vrstva s řádově 100 nm a v okolí vrstvy s řádově 100 μm . Pro ověření míry ovlivnění výsledků bylo provedeno několik testů pro každou část ložiska zvlášť.



Obr. 4.10 Rozebrané ložisko v přípravku a krabičce při pořizování snímků

V jednom testu bylo ložisko provozováno po dobu 30 minut a následně rozebráno stejným způsobem, jako při ostatních testech. Po jeho rozebrání byla půlka dráhy vnitřního a vnějšího kroužku a kuličky očištěna acetonem. Poté se pořídily snímky, ze kterých bylo patrné, že míra ovlivnění se u každé části ložiska liší. Zároveň bylo zjištěno, že nebylo možné dosáhnout stejné míry očištění, jako v případě běžného postupu zmíněného v kapitole 4.4.1. Z toho důvodu byl proveden ještě jeden test, při kterém bylo ložisko očištěno běžným postupem. Následně se na část vnitřní a vnější dráhy ložiska nanasla vrstva maziva. U kuliček bylo mazivo nanášeno po obvodu v blízkosti klece tak, aby zůstal vrchlík kuličky nedotčený. Po provedení byly pořízeny další snímky.

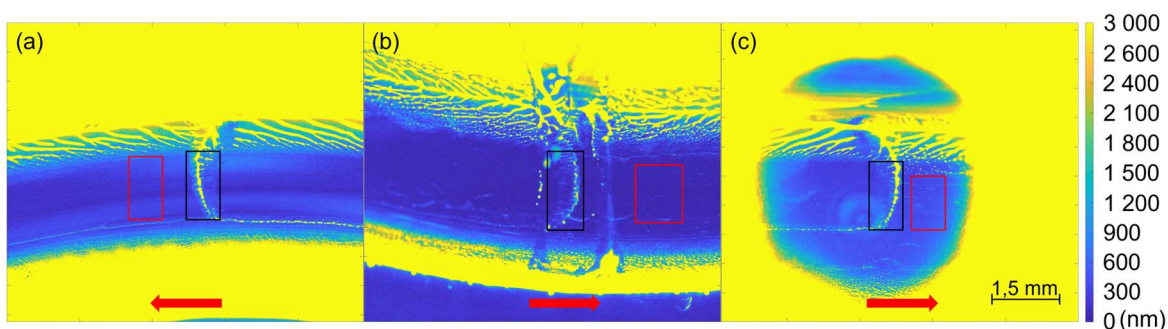
Na pořízených snímcích se v programu Gwyddion vyhodnotily očištěné oblasti. Ze získaných dat se následně stanovil průměrný offset, tj. hodnota vlivu pozadí pocházející z okolí měřené stopy maziva. Pro kuličky byla stanovena hodnota 20 ± 5 . U vnějšího kroužku ložiska byla hodnota 10 ± 5 a u vnitřního kroužku 4 ± 2 .

Hodnoty offsetu jednotlivých částí ložiska byly vzaty v potaz při tvorbě obrázků a dalším zpracování dat. Všechny data tedy obsahují offset, v případě kuličky a vnějšího kroužku ložiska tloušťky filmu obsahují nejistotu v rozmezí ± 110 nm a u vnitřního kroužku ± 44 nm.

4.4.4 Zpracování dat

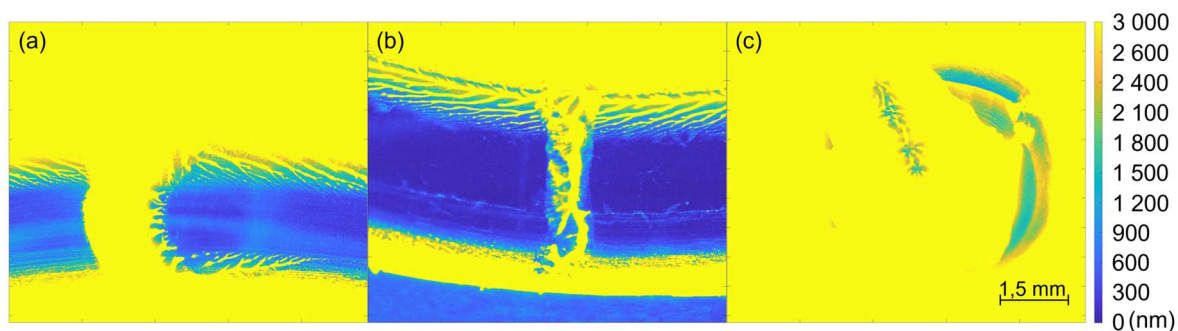
Výsledkem jednotlivých měření byl soubor obsahující rastrové snímky .tiff. Jejich následné zpracování probíhalo v programu Matlab pomocí dvou skriptů. Pomocí prvního skriptu byly snímky převedeny na .jpg soubory se zvoleným rozsahem světlené intenzity. Změnou rozsahu lze hodnotit i vyšší tloušťky, v této práci byl rozsah hodnocených tlouštěk fixně nastaven na 3 μm , tak aby byli viditelné především jevy ve valivé dráze. Žluté oblasti na Obr. 4.11 znamenají tloušťku vyšší než 3 μm . V dalším kroku se použil druhý skript, ve kterém probíhalo vyhodnocení průměrné intenzity světla ve zvolených oblastech. Oblast byla vybírána zadáním dvou bodů, z kterých vznikla obdélníková oblast pro průměrnou hodnotu.

Na každém z pořízených snímků se vybraly dvě oblasti viz Obr. 4.11. Jedna byla v místě, kde se nacházel původní kontakt (černá oblast) a druhá v místě před kontaktem (červená oblast). Černá oblast dává informaci o velikosti rezervoáru maziva na vstupu do kontaktu a červená hodnotí tloušťku vstupující do kontaktu. Výběr zvolených oblastí byl volen tak, aby v něm nebyly obsaženy místa kavitačních stop nebo oblasti v blízkosti kraje dráhy (oblast před kontaktem). Získané hodnoty průměrné světelné intenzity pro dané oblasti se dále zpracovaly v Excelu, kde byly přepočteny na průměrné hodnoty tloušťky filmu.



Obr. 4.11 Oblasti vyhodnocení: (a) vnější kroužek; (b) vnitřní kroužek; (c) kulička (černá – oblast kontaktu, červená – oblast před kontaktem); šipky značí směr pohybu

V průběhu vyhodnocení bylo nutné vyřadit snímky, na kterých nebylo možné vybrat požadovanou oblast anebo snímky, kde se data vymykala klasickému kontaktu pozorovanému na většině snímcích. Na Obr. 4.12 jsou příklady vyřazených snímků. Na snímku vnějšího kroužku (a) se nacházelo v místě kontaktu příliš velké množství maziva. Ze snímku vnitřního kroužku (b) nebylo možné určit kontaktní oblast, ale jen oblast před kontaktem. U snímku kuličky (c) došlo k setření velkého množství maziva při rozebírání z vnějšího kroužku. Vyřazení vybraných snímků bylo z důvodu, že existovalo velké riziko, že mazací vrstva byla ovlivněna procesem rozebrání.



Obr. 4.12 Vyřazené snímky: (a) vnější kroužek; (b) vnitřní kroužek; (c) kulička

Výše zmíněný hodně stručný postup výběru míst pro vyhodnocení bude detailněji rozebrán v kapitole s výsledky.

4.5 Testované predikce

Pro otestování H1, která se zabývá otázkou vlivu procentuální náplně volného objemu ložiska mazivem byla navržena první sada testů uvedena v kapitole 4.3.2. Predikce je taková, že s nižší náplní plastického maziva bude na povrchu vnějšího a vnitřního kroužku a na kuličkách menší vrstva maziva, než tomu bude v případě vyššího množství maziva. Mezi nezávislé proměnné bude patřit frekvence otáčení, zatížení, procentuální náplň ložiska a čas vyhodnocení z čehož poslední dvě zmíněné řadíme zároveň i mezi kontrolované proměnné. Mezi závislé bude patřit tloušťka vrstvy maziva na dráze vnějšího a vnitřního kroužku ložiska a na kuličkách.

U H2 se předpokládá, že zásobování kontaktu mazivem probíhá primárně z rezervoárů vytvořených během záběhové fáze. Počet a velikost rezervoárů bude záviset na době záběhové fáze a množství maziva v ložisku. Predikcí je, že mezi hlavní mechanismy, které se budou podílet na zásobování kontaktu mazivem bude patřit uvolňování základového oleje z rezervoárů vytvořených na ramenech ložiska. Druhým významným mechanismem bude rotace kuličky, která bude dodávat do kontaktu mazivo z rezervoárů vytvořených na kleci ložiska.

To bude otestováno pomocí třetí sady testů zmíněné v kapitole 4.3.2. Mezi nezávislé proměnné se bude řadit frekvence otáčení, zatížení, typ klece a množství náplně maziva, kde poslední dvě zmíněné budou patřit zároveň mezi kontrolované proměnné. Mezi závislé bude patřit rozložení maziva okolo kontaktu a posouzení vliv rotace kuličky na mazání.

5 VÝSLEDKY

Kapitola zabývající se výsledky práce byla z důvodu úpravy měřicího zařízení rozdělena na dvě části. V první části byla popsána úprava měřicího zařízení. Jako první bylo ukázáno, jaké komponenty byly využity ze starého zařízení a jejich doplnění o nové, pro možnost rychlého rozebírání ložiska. V závěru byl popsán hlavní konstrukční uzel zařízení, který slouží pro uložení testovaného ložiska. Druhá část práce se zabývala naměřenými výsledky z provedených experimentů a objasňuje vliv časového testu, vliv frekvence otáčení a vliv materiálu a konstrukce klece na distribuci plastického maziva ve valivém ložisku. Následně byl popsán vliv jednotlivých prvků na distribuci plastického maziva.

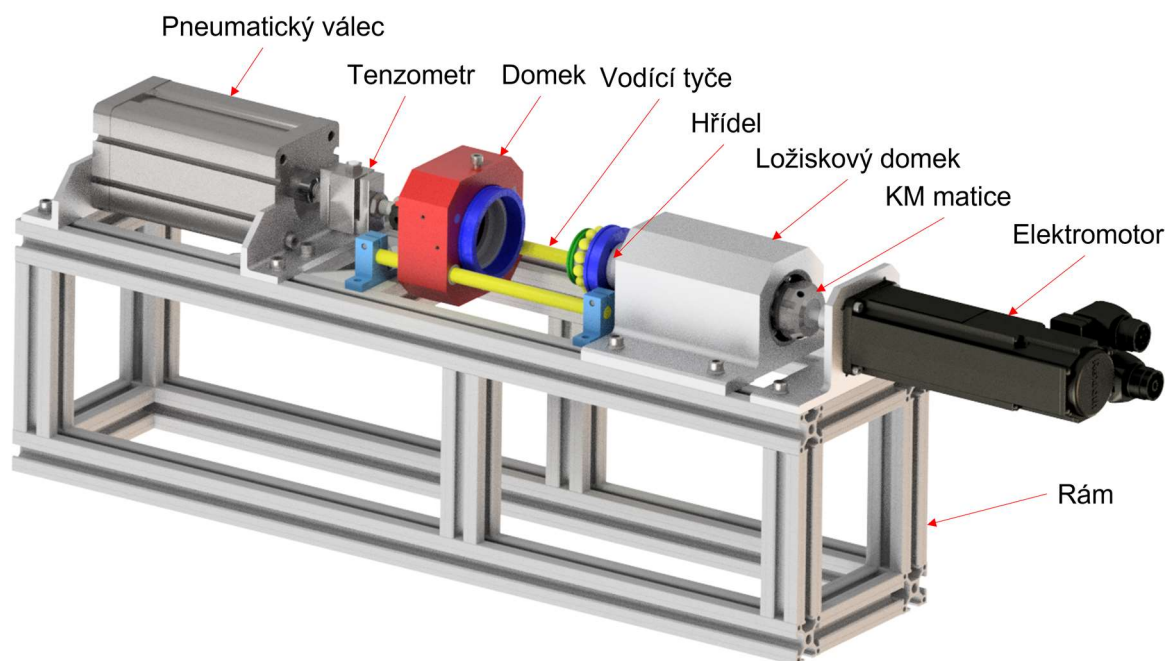
5.1 Úprava měřicího zařízení

V první fázi se zhodnotila možnost využití komponent z testeru 2020 [11], které se následně doplnily o nové komponenty z testeru 2019 [12]. Převzaté díly se před výrobou upravily kvůli zajištění kompatibility se starými. Tab. 5.1 obsahuje seznam použitých dílů a komponent.

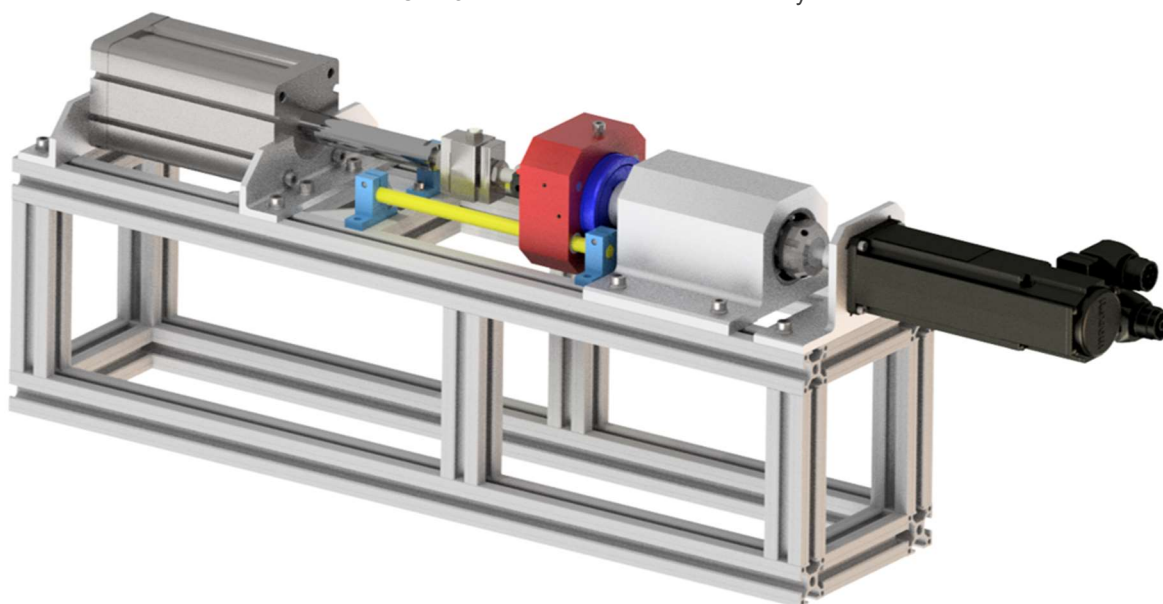
Tab. 5.1 Seznam použitých komponent

Tester 2020	Počet kusů	Tester 2019	Počet kusů
Elektromotor	1	Podpěry vodících tyčí	4
Úchyt motoru	1	Vodící tyče	2
Vlnovcová spojka	1	Pouzdra vodících tyčí	4
Pojistná matice	1	Pero	1
Ložiskový domek	1	Pružinový píst	1
Ložiska domku	2	Závitová tyč	1
Ú-úchyt	1	Pneumatický válec	1
Šroub úchytu	1	Hřídel	1
Tenzometr	1	Domek	1
Úchyt pneumatického válce	2	Vnitřní nadstavec	1
Rám konstrukce	1	Vnější nadstavec	1
		Pojistný člen	1

Nové zařízení je vidět na Obr. 5.1 a Obr. 5.2, kde je znázorněn stav před testováním (otevřený stav) a testovací stav (uzavřený stav). Pro vyvození otáček je použit elektromotor s frekvencí otáčení až 3 500 ot/min, který je pomocí vlnovcové spojky spojen s hřídelí, uloženou v ložiskovém domku ve dvou radiálních kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem. Na protější straně je posuvně uložen domek s testovaným ložiskem. Posuvný pohyb realizuje pneumatický válec, vodící tyče slouží pro zajištění vedení a definici trajektorie pohybu. Ze zadní strany domku je pomocí šroubu a závitové tyče připojen tenzometrický snímač, který snímá sílu vyvozenou pneumatickým válcem, který je schopný vyvinout sílu až 1,5 kN. Rám konstrukce je sestaven ze stavebnicových hliníkových profilů.

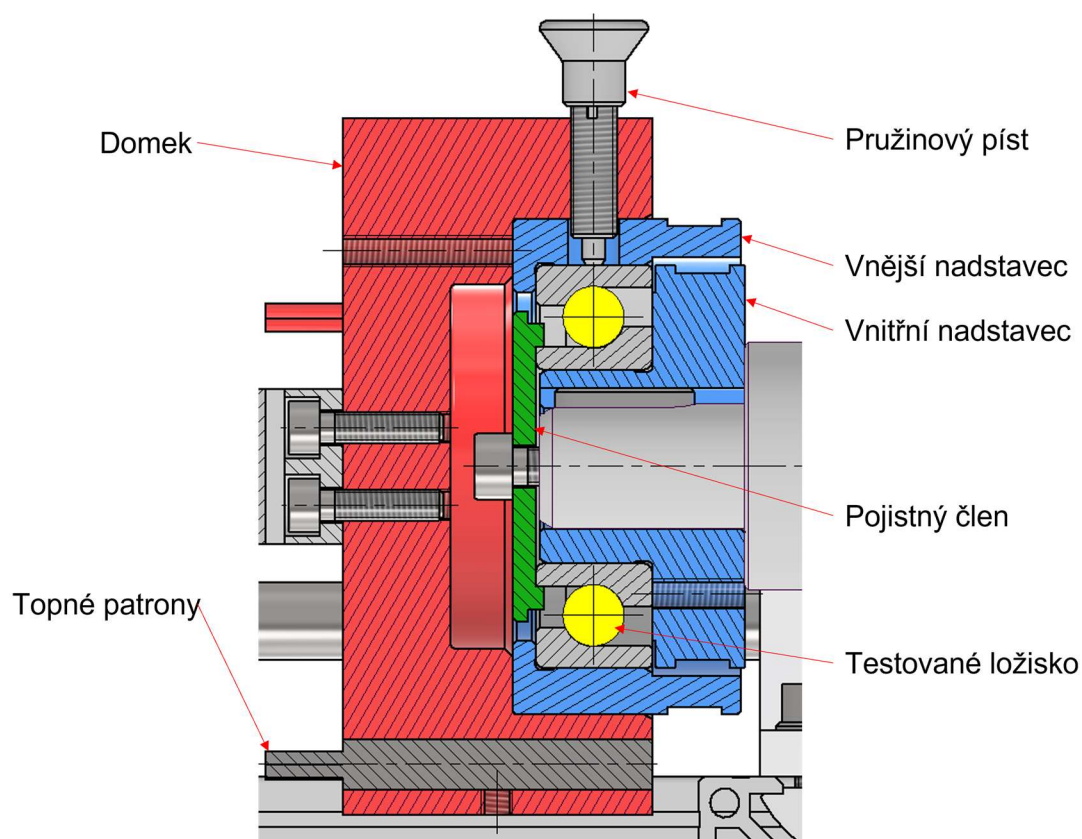


Obr. 5.1 Testovací zařízení – otevřený stav



Obr. 5.2 Testovací zařízení – uzavřený stav

Nejdůležitější částí celé konstrukce je uložení testovaného ložiska Obr. 5.3. Na konci hřídele je uložen vnitřní nadstavec, sloužící pro umístění vnitřního kroužku ložiska s valivými elementy a klecí. Nadstavec je zajištěn proti pootočení těsným perem a proti vysunutí z čela hřídele pojistným členem. Po obvodu jsou vytvořeny ve vnitřním nadstavci tři závitové díry pro jednoduší demontáž vnitřního kroužku ložiska. Vnější kroužek ložiska je umístěn ve vnějším nadstavci a zajištěn proti rotaci a vysunutí pomocí pružinového pístu z vrchní části domku. Nadstavec je uložen do hliníkového domku, který je možné pomocí tří topných patron temperovat až do teploty 100 °C.

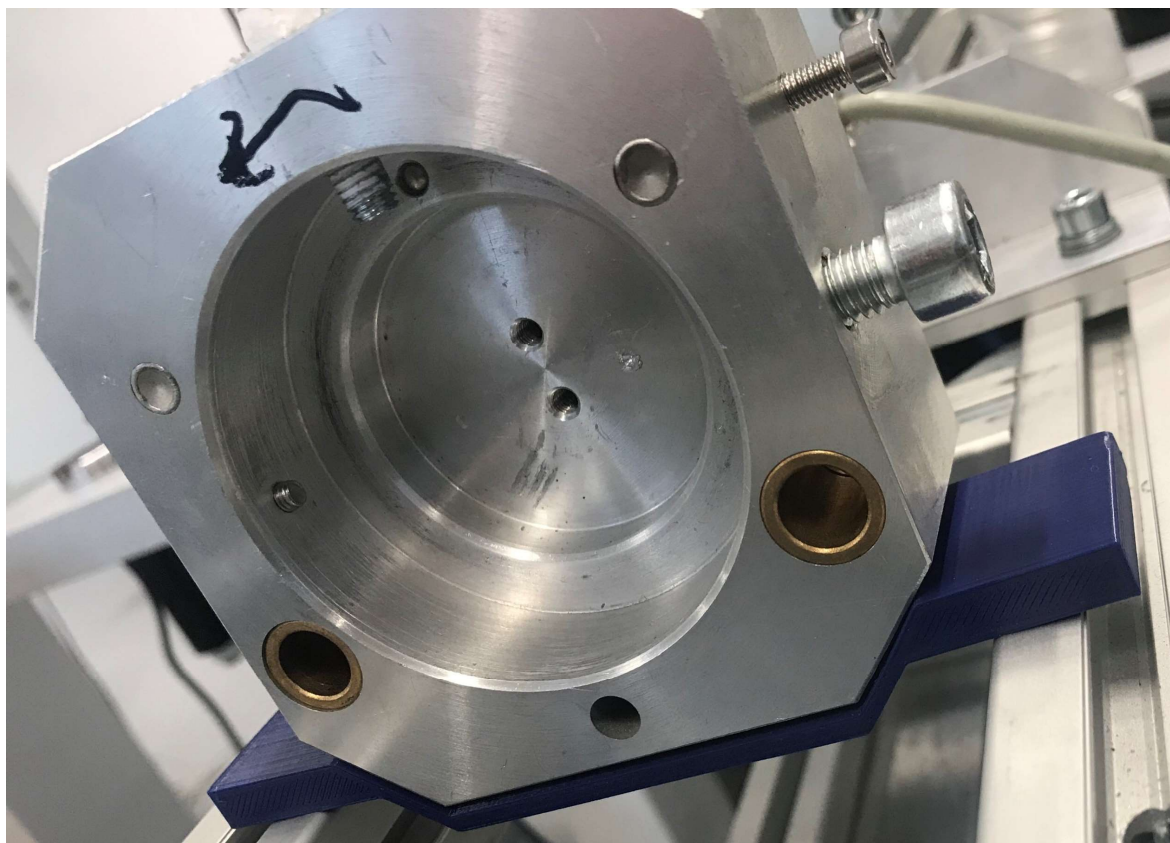


Obr. 5.3 Uložení testovaného ložiska

5.1.1 Úprava po zkušebních testech

Po provedení zkušebních testů s navrženým zařízením se zjistilo, že uložení ložiska není optimální. To bylo pozorováno z pořízených snímků. V některých kontaktních místech docházelo k pouze částečnému kontaktu a jinde zase nebylo možné kontaktní oblast vidět vůbec. Z toho důvodu se musel provést zásah do konstrukce zařízení.

Zjistilo se, že použité vodící tyče, které měly vysokou přesnost zajišťovaly přesné vedení bez vůlí. Proto se navrhnul a vytiskl plastový (PLA) díl viz Obr. 5.4, díky kterému mělo ložisko vymezenou dostatečnou vůli, aby došlo k rovnoměrnému kontaktu na všech třinácti valivých elementech. Aby se daly použít vodící tyče musela by se vyladit geometrická souosost ložiska s vedením nebo snížit, popřípadě zvýšit vůle s vedením. Způsob, který se použil pro řešení byl v dané situaci nejrychlejší a nejlevnější variantou s dostatečnou efektivitou pro funkčnost.



Obr. 5.4 Použitý vytištěný plastový díl

5.2 Úvod k výsledkům

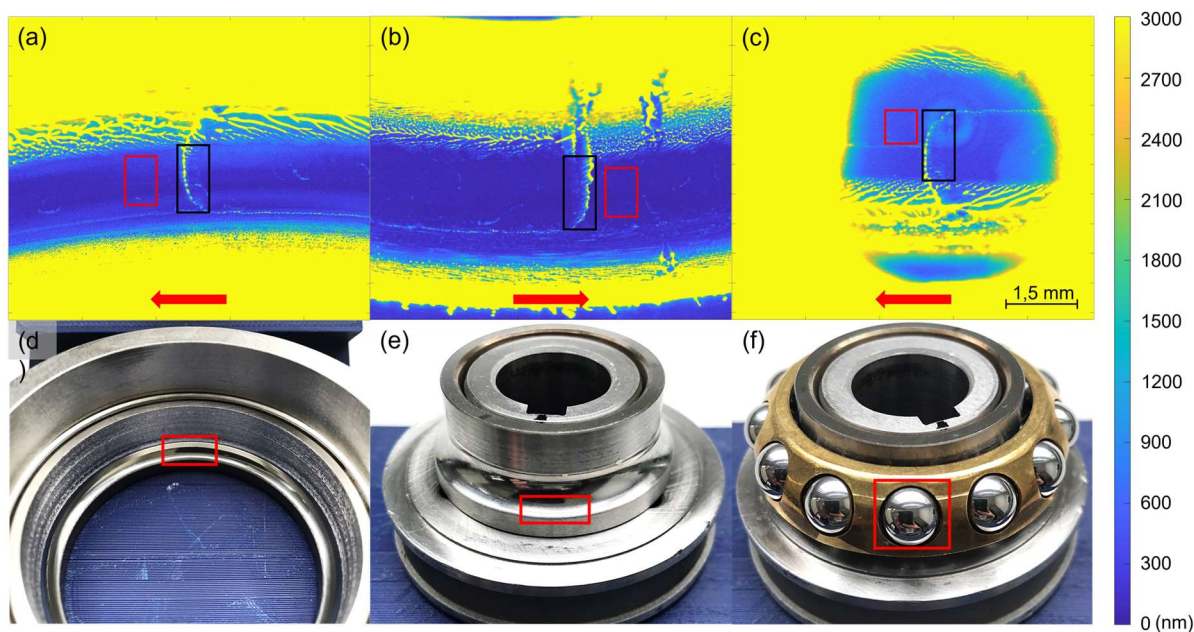
Jako první je nezbytné vysvětlit a popsat snímky z měření, které se budou vyskytovat dále v práci, aby bylo jasné, jak jsou na nich části ložiska orientovány a co je na nich vidět. Na Obr. 5.5 jsou postupně snímky vnějšího kroužku ložiska (a), vnitřního kroužku ložiska (b) a kuličky (c). Červené šipky na snímku vnějšího (a) a vnitřního (b) kroužku značí směr, ve kterém se odvalovaly kuličky po dráze. Šipka u snímku s kuličkou (c) značí směr, ve kterém se odvalovala po dráze vnějšího kroužku ložiska.

Na fotkách na Obr. 5.5 (d-f) jsou zobrazeny části ložiska, na kterých jsou vyznačeny oblasti, které jsou zobrazeny na snímcích (a-c). Z nich je tedy patrné, jak bylo ložisko při pořizování snímků orientováno. Rezervoár maziva na vtoku v dráze vnějšího kroužku vznikl při zastavování ložiska nahrnutím maziva kuličkou. Intenzita v kontaktu vypovídá o množství rezervoáru na vtoku do kontaktu. V horní části je místo výběhu vzniklé při rozebrání ložiska. Na snímku dráhy vnitřního kroužku je vidět místo stopy kontaktu, před kterou se nachází stopa vzniklá při sundání klece z vnitřního kroužku. K posunutí stopy místa rozebrání před místo, ve kterém došlo k zastavení a odtížení ložiska (oblasti kontaktu) došlo při pořizování snímků otáčením vnitřního kroužku.

Před naměřenými výsledky je důležité popsat a podrobněji ukázat, jak byly voleny oblasti pro vyhodnocení. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4.2, vybraly se dvě místa na každém snímku. Na Obr. 5.5 (a) je vidět dráha vnějšího kroužku ložiska. Na ní bylo možné u všech provedených experimentů a ve všech třinácti místech vidět oblast kontaktu (černě). Na základě toho bylo možné určit oblast před kontaktem (červeně). Výběr se provedl tak, aby byla vybrána jen oblast kontaktu nacházející se na dráze, tedy bez kavitačních stop ve vrchní části snímku. Výběr oblasti před kontaktem se volil o něco užší, než byla šířka dráhy, aby ve výběru nebyla obsažena místa blízko okraje dráhy.

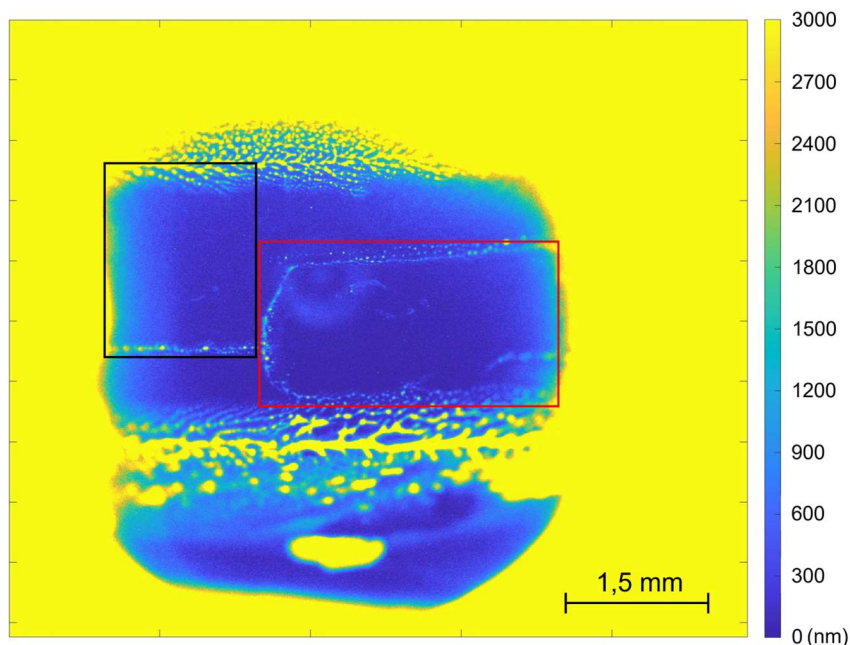
U vnitřního kroužku (b) nebylo v některých případech možné rozpoznat oblast kontaktu. K tomu docházelo v situacích, kdy při pořizování snímků došlo vlivem otáčení k posunutí kuličky do místa kontaktu. Následným sejmutím klece došlo k znehodnocení dat z místa kontaktu. U výběru kontaktní oblasti (černě) se bral zřetel na to, aby nebyla do výběru zahrnuta stopa před kontaktem v případě její blízkosti. Jinak probíhal výběr stejným způsobem, jako u vnějšího kroužku. Obdélník pro výběr místa před kontaktem (červeně) byl užší, aby do něj nezasahovaly stopy maziva na krajích dráhy a také stopa vytvořená sejmutím klece.

Oblast kontaktu na kuličkách nebylo většinou možné vidět na 4-6ti snímcích (bude ukázáno dále v práci). Pokaždé se jednalo o kuličky, které se při rozebírání ložiska nacházely v jeho spodní části. Zde došlo k pootočení nebo drobnému posunutí tím, že se oblast kontaktu zanořila do rezervoáru na kraji dráhy. Na snímcích kuliček, na kterých byla kontaktní oblast zachována, probíhal výběr dle Obr. 5.5 (c). Oblast výběru kontaktu byla omezena po kavitační stopy. Výběr oblasti před kontaktem byl ve spodní části omezen větví stopy maziva z kontaktu s vnitřním kroužkem. Vrchní část výběru byla po úroveň větve kontaktu s vnějším kroužkem.



Obr. 5.5 (a) dráha vnějšího kroužku; (b) dráha vnitřního kroužku; (c) kulička; (d) pohled na snímanou oblast vnějšího kroužku; (e) pohled na snímanou oblast vnitřního kroužku; (f) pohled na snímanou oblast kuličky (šipky zobrazují směr odvalování kuliček po dráze a směr odvalování kuliček, stupnice určuje tloušťku vrstvy maziva (nm))

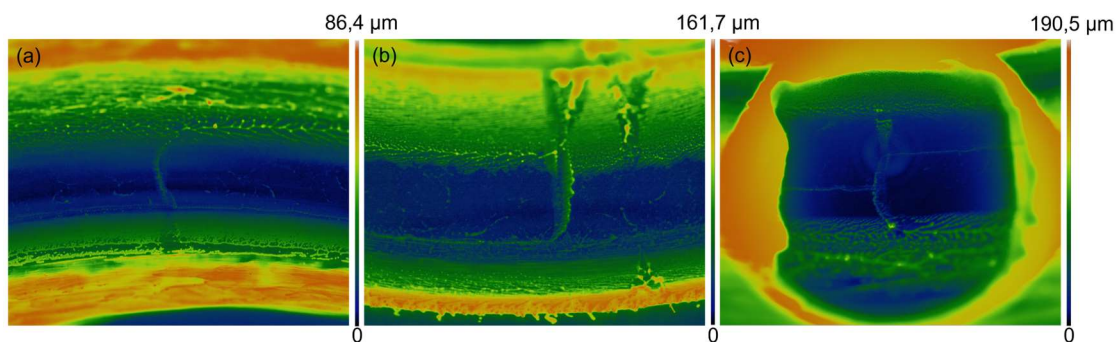
Pro popsání stop maziva na kuličkách je Obr. 5.6. Ve vyznačené červené oblasti je možné vidět stopu odpovídající té na dráze vnějšího kroužku ložiska. Mazivo vytlačené ze stopy tvoří dvě větve maziva o vyšší tloušťce. Ty udávají šířku kontaktu. V černé oblasti se nachází větve výstupní stopy na kuličce po kontaktu kuličky s vnitřním kroužkem. Stopy jsou vůči sobě přesazeny díky kosoúhlému styku ložiska.



Obr. 5.6 Přesazení kontaktu na kuličce: červená oblast – stopa z kontaktu dráhy vnějšího kroužku; černá oblast – koncová stopa z dráhy vnitřního kroužku

U všech vyhodnocených snímků byl nastaven rozsah škály tloušťky vrstvy maziva od nuly do 3 000 nm. Se zvoleným rozsahem bylo dobře vidět mazivo na drahách a kuličkách ložiska, oblasti mimo nebylo důležité vidět detailněji, jelikož nebyly brány v potaz při vyhodnocení.

Přesto je nezbytné ukázat, jak vypadá rozložení maziva na jednotlivých komponentech ložiska bez omezeného rozsahu. To je patrné z Obr. 5.7. Zde je zobrazen vnější kroužek (a), vnitřní kroužek (b) a kulička ložiska (c). Pro největší tloušťky v Obr. 5.7 jsou hodnoty už omezeny dynamickým rozsahem kamery a v oranžových místech bude skutečná tloušťka vyšší. Vybrané snímky jsou z testu, který byl proveden s frekvencí otáčení 2 000 ot/min po dobu jedné hodiny s 15 % náplní ložiska mazivem.



Obr. 5.7 Snímky: vnějšího kroužku ložiska (a); vnitřního kroužku ložiska (b); kuličky ložiska (c) v neomezeném rozsahu tloušťky vrstvy maziva s maximálními hodnotami

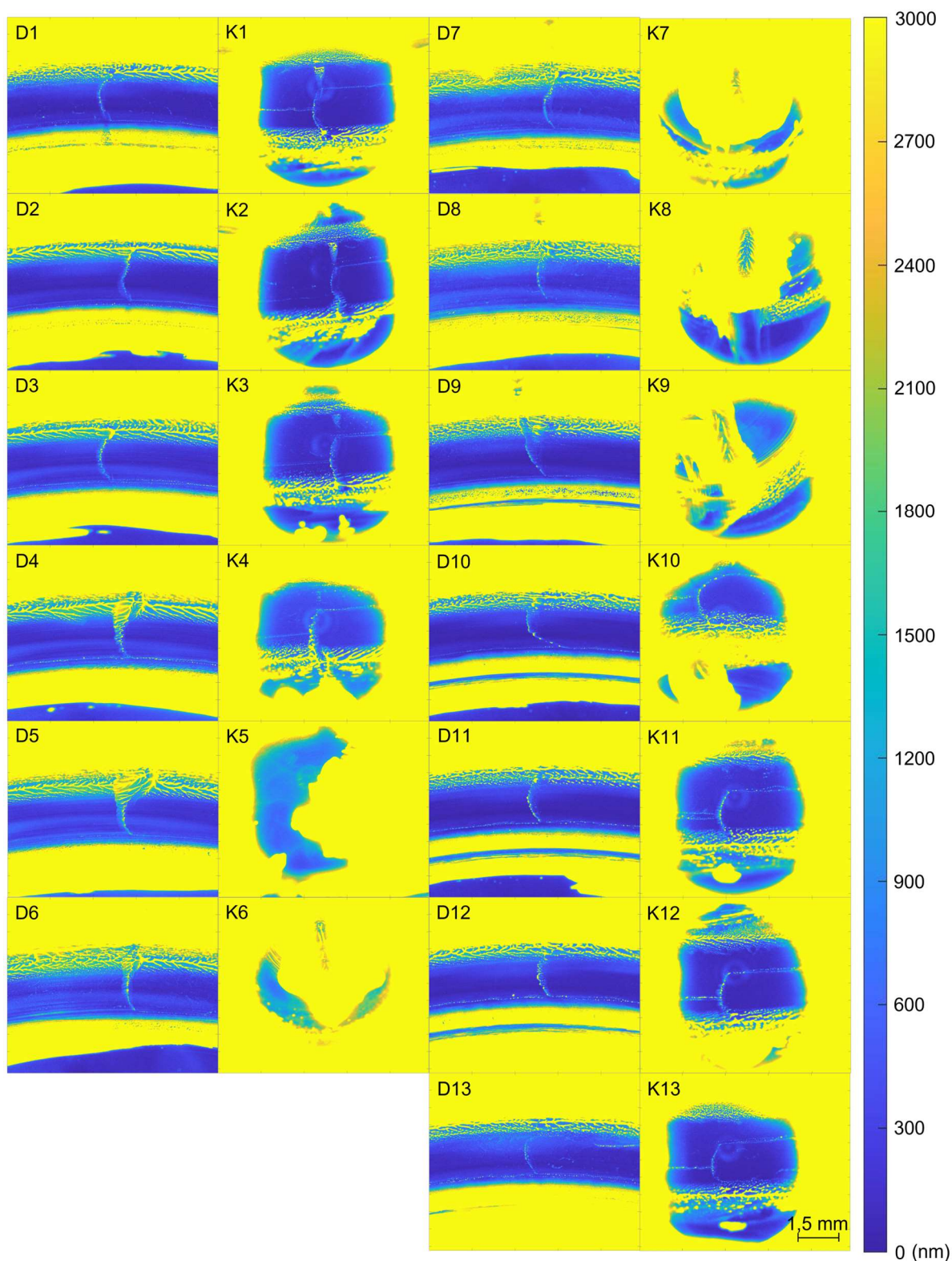
5.2.1 Kompletní sada snímků

Při každém provedeném měření bylo pořízeno celkem 39 snímků. Ty se rozdělily do tří sad. V první sadě se nacházely snímky kuliček (označováno K1-13), které byly po každém provedeném testu pořízeny, jako první. Druhá sada zahrnovala snímky drah vnějšího kroužku (označováno D1-13). V poslední sadě byly snímky drah vnitřního kroužku (označováno DD1-13).

První sada snímků byla pořízena od ukončení testu během pěti minut. Následně během dalších pěti minut byly pořízeny snímky dráhy vnějšího kroužku ložiska. Před poslední sadou snímků bylo nutné opatrně sejmout klec, proto byl čas pro pořízení poslední sady snímků přibližně 7 minut.

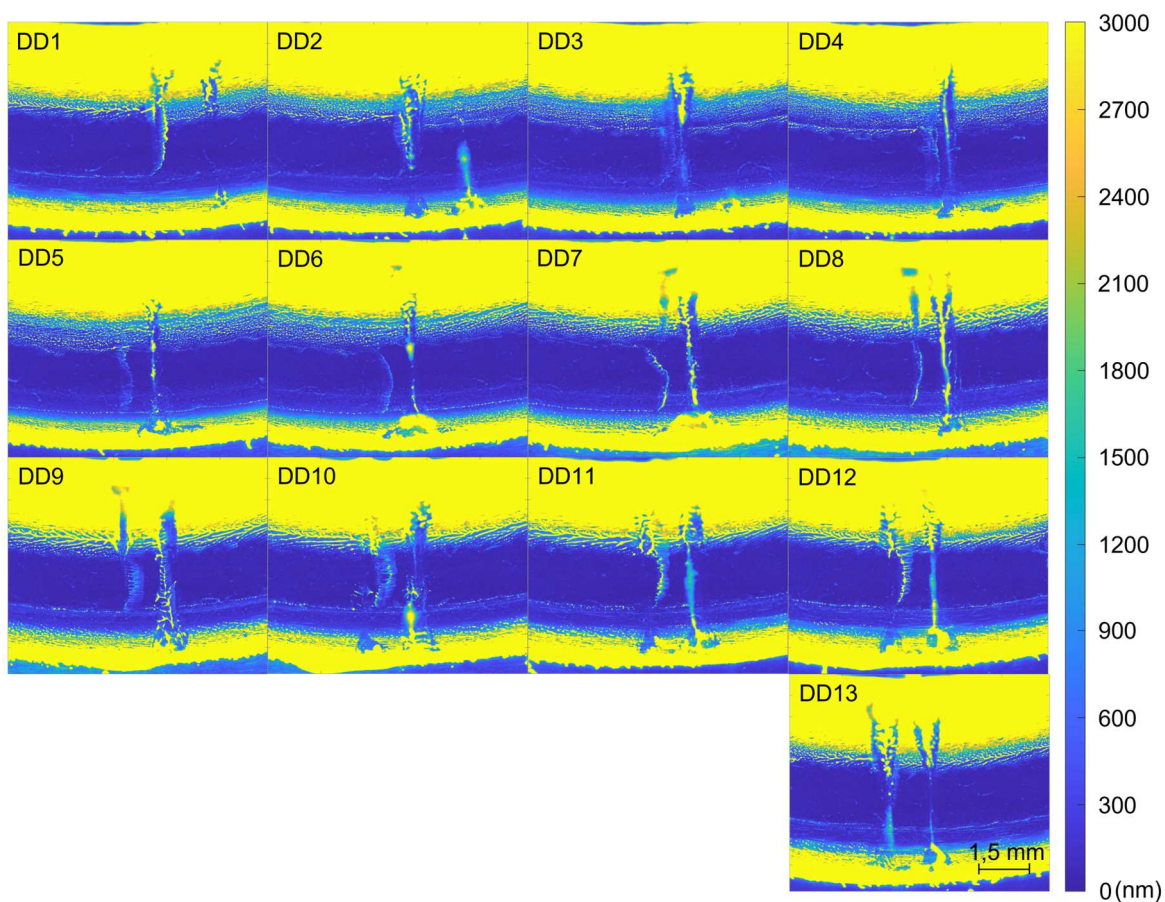
Na Obr. 5.8 a Obr. 5.9 jsou zobrazeny snímky z dráhy vnějšího a vnitřního kroužku a kuliček ložiska. Je možné pozorovat, že na snímcích kuliček došlo u šesti k dříve zmíněnému setření maziva z ramene vnějšího kroužku při rozebrání. Na snímku K10 je možné pozorovat, že došlo k pouze mírnému pootočení, kdy byla zachována oblast kontaktu. Nebylo již však možné vyhodnotit oblast před kontaktem. Ze snímků je zajímavé pozorovat, že u kuliček K1-3 a K11-13 jsou viděny menší tloušťky filmu než na ostatních kuličkách.

U snímků dráhy vnitřního kroužku lze pozorovat to samé na snímcích D1-2 a D9-11. Dalo by se očekávat, že si místa s nižší vrstvou na kuličkách a dráze budou odpovídat, ale jak je vidět, tak tomu tak ve všech případech není.



Obr. 5.8 Snímky třinácti míst dráhy vnějšího kroužku a tomu odpovídající kuličky

Na drahách vnitřního kroužku je tloušťka filmu na všech snímcích podobná bez větších rozdílů. Zajímavostí u snímků DD7-13 je, že ve vrchní části dráhy je pozorována silnější vrstva maziva blíže dráhy s kavitačními stopy, než je tomu u zbylých snímků.

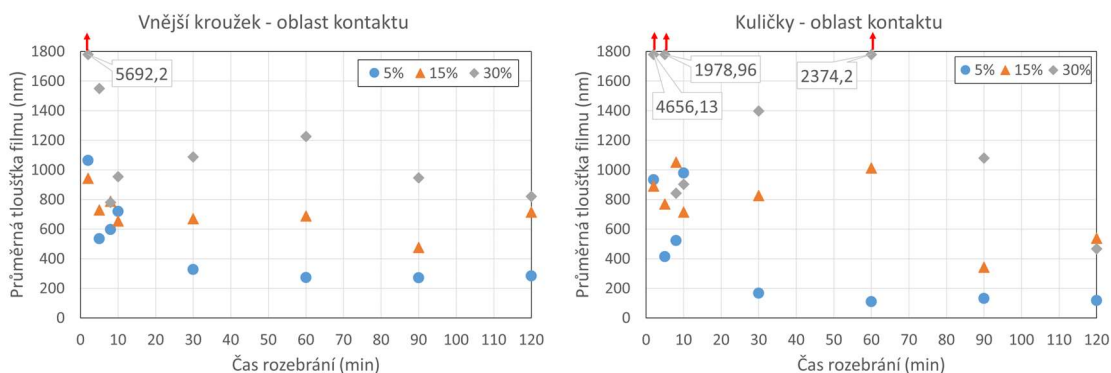


Obr. 5.9 Snímky třinácti míst drah vnitřního kroužku ložiska

5.3 Časový test

Pro pozorování vývoje distribuce maziva v čase byl proveden časový test s parametry dle kapitoly 4.3.2. Na Obr. 5.10 jsou zobrazeny dva grafy vývoje průměrné tloušťky vrstvy maziva v časech rozebrání na vnějším kroužku a kuličkách ložiska v oblasti kontaktu pro tři procentuální náplně maziva. Z prvního grafu je patrné, že vývoj průměrné tloušťky filmu odpovídá předpokladům, kdy nižší procentuální náplň vykazuje znatelně nižší průměrnou tloušťku filmu než vyšší náplň.

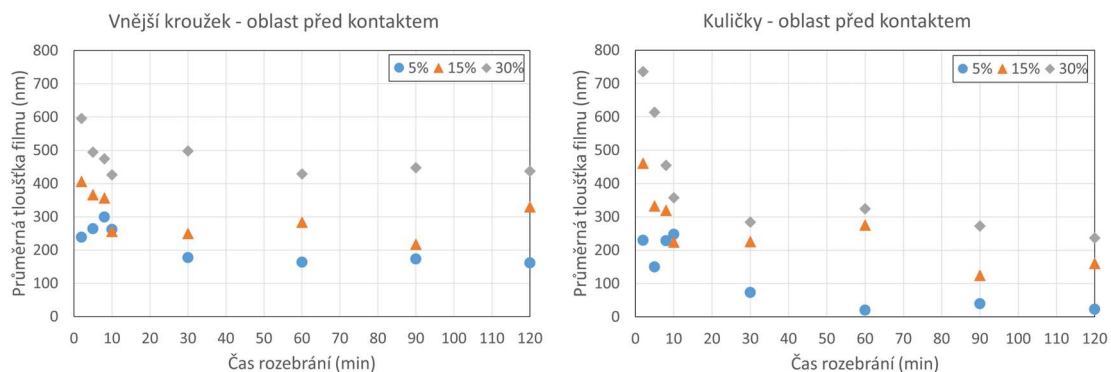
Na druhém grafu lze vidět, že konstantní průběh hodnot vykazuje pouze 5% náplň. U 15% náplně dochází mezi časem 60 a 90 minut k výraznému poklesu průměrné tloušťky filmu. A u 30% náplně jde vidět, že od 8 do 60 minuty dochází k růstu průměrné tloušťky filmu a po 60 minutě dochází k obratu a průměrná tloušťka filmu začala klesat. Je důležité říci, že u 5% náplně byly hodnoty tloušťky filmu velmi malé až pod hodnotami 200 nm.



Obr. 5.10 Grafy průměrné tloušťky filmu v časech rozebrání pro kontaktní oblast pro tři procentuální náplně ložiska mazivem u vnějšího kroužku (vlevo) a kuliček (vpravo)

Další dva grafy na Obr. 5.11 ukazují výsledky průměrná tloušťky vrstvy maziva v čase v oblasti před kontaktem. Na prvním grafu vnějšího kroužku je vidět, že trend je podobný, jako v případě kontaktní oblasti. Dále je možné pozorovat, že po počátečních 10 minutách, kdy hodnoty klesaly (30 a 15 %) nebo rostly (5 %), byl průběh od 30 minuty téměř konstantní.

U druhého grafu s kuličkami je patrné, že hodnoty s 15 % a 30 % si jsou dost podobné a od začátku vykazují podobný průběh. Zatímco hodnoty s 5 % mají téměř konstantní průběh jsou hodně malé. Důležitější, než hodnoty je však samotný trend průběhu, na který nemají nízké hodnoty tloušťky filmu žádný vliv.

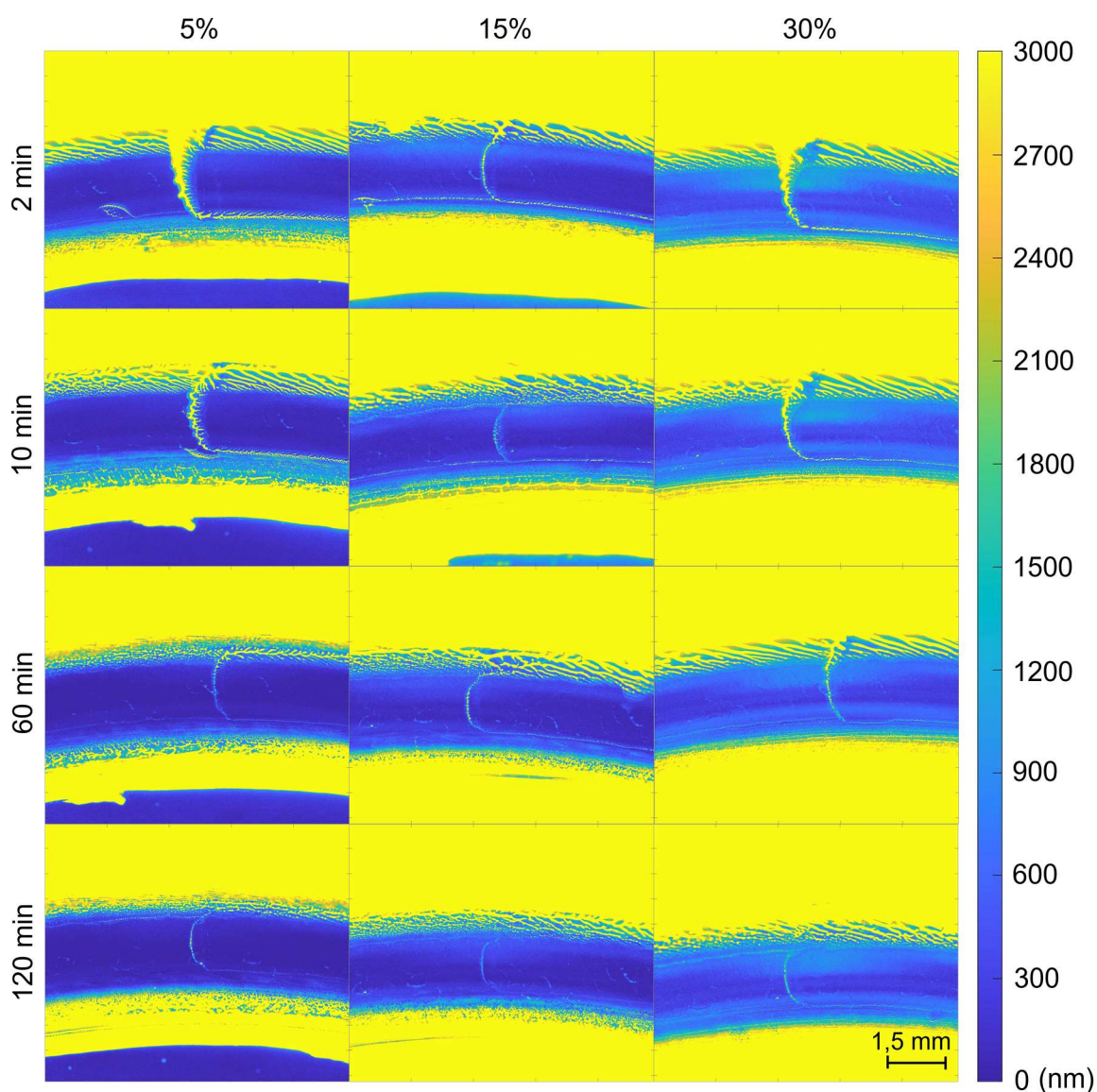


Obr. 5.11 Grafy průměrné tloušťky filmu v časech rozebrání na valivé dráze pro tři procentuální náplně ložiska mazivem u vnějšího kroužku (vlevo) a kuliček (vpravo)

Po provedení této série testů bylo rozhodnuto, že další testy budou provedeny s 15% náplní maziva. Důvodem volby bylo zjištění, že při 30% náplni dochází k úniku malého množství maziva mimo ložisko. V případě 5% náplně dosahovaly tloušťky filmů velmi malých hodnot a jsou už daleko od běžně doporučených množství.

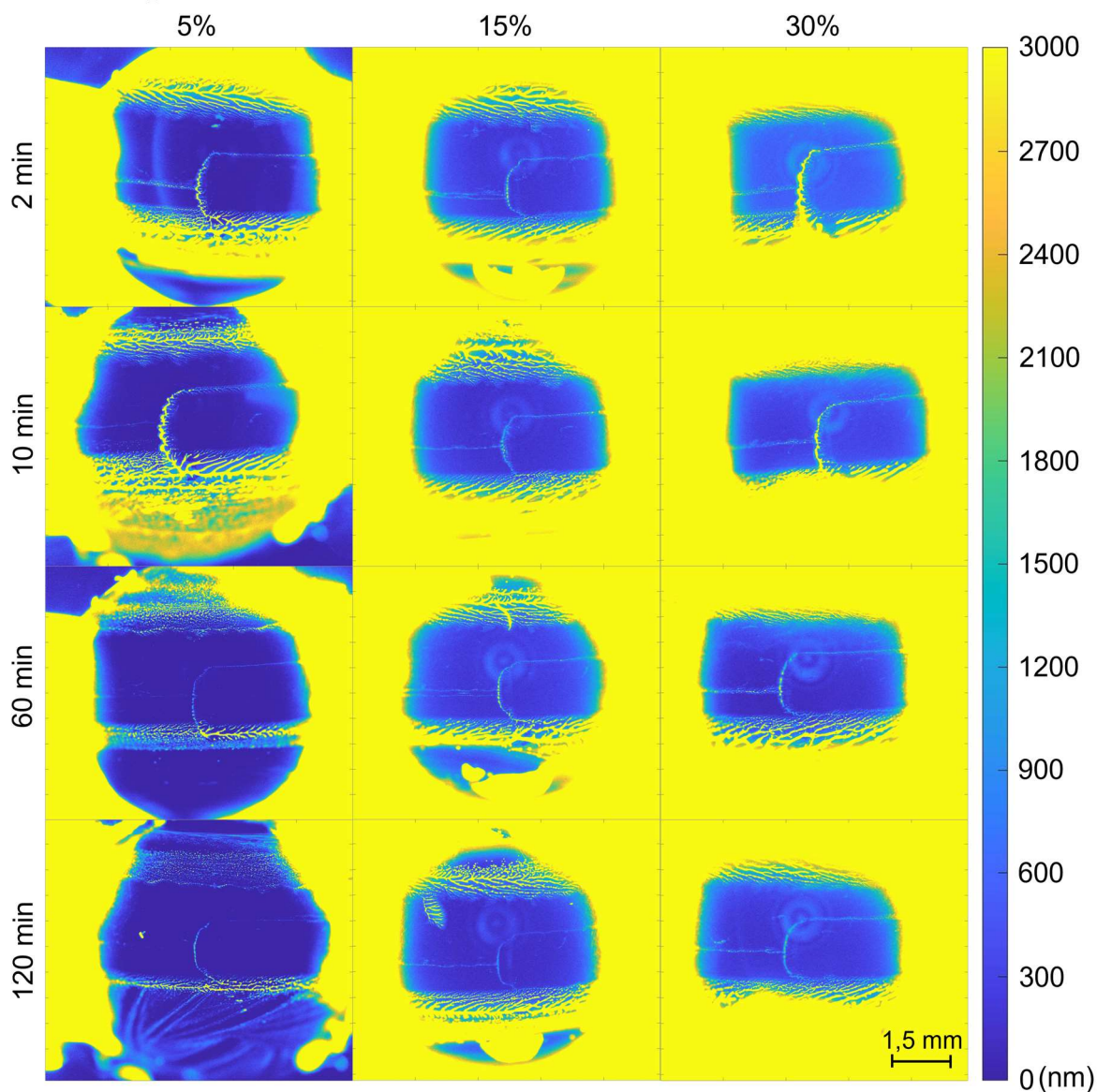
5.3.1 Distribuce maziva

Z provedených experimentů bylo vybráno jedno místo na dráze vnějšího kroužku pro porovnání distribuce plastického maziva s rostoucím časem. Obr. 5.12 znázorňuje 4 snímky pro každou procentuální náplň maziva pro čtyři časy rozebrání. Je z nich patrné, že při vyšším množství maziva byla v dráze vyšší tloušťka mazací vrstvy. Můžeme si zde i všimnout, že při 5% náplni je ve spodní části dráhy méně maziva než v případě 15% a 30% náplně. Z pohledu času rozebírání je zřejmé, jak při delším času bylo v kontaktní oblasti méně maziva. To můžeme pozorovat hlavně u 5% a 30% náplně, u 15 % je tento trend méně patrný. U 30% náplně je dobře viditelné, že okolo kontaktu na jeho výstupu je silnější vrstva filmu, ta stejná vrstva se nachází ve spodní části kontaktu. Podobný jev je možné pozorovat i u 15% náplně. Důležité je také zmínit, že i v případě menšího kontaktního rezervoáru jsou obě vrstvy téměř stejné i v pozdějším čase rozebrání ložiska.



Obr. 5.12 Snímky stejného místa dráhy na vnějším kroužku pro tři náplně maziva a čtyři časy rozebrání

Stejné pozorování distribuce maziva bylo provedeno i pro kuličky ložiska. Na Obr. 5.13 je zobrazeno 12 snímků rozložení maziva na kuličkách, které korespondují s místy na dráze vnějšího kroužku ložiska na Obr. 5.12. Snímky ukazují, jako v předchozím případě rozložení maziva pro 5, 15 a 30 % náplně maziva ve čtyřech časech chodu ložiska. Je zde zřejmý jasný vliv procentuální náplně, kdy při 30% náplni jde vidět pouze část kuličky, která se dostává do kontaktu s dráhou vnějšího kroužku. Z pohledu času je patrné, že se zvyšujícím se časem dochází podobně, jako v předchozím případě ke snižování množství maziva v kontaktní oblasti. U 5% náplně pozorujeme, že rezervoáry jsou s přibývajícím časem vidět pouze v místě kontaktu kuličky s klecí a ve velmi malé míře po stranách kuličky, jako je viditelné u vyšších procentuálních náplních. Další pozorovatelnou věcí u 5% náplně je možné běžným pozorováním součástí a snímků na Obr. 5.13 sledovat, jak postupem času dochází k tvorbě rezervoárů na kleci a ramenech ložiska, čím se zmenšuje množství maziva dostávajícího se do kontaktu. To je patrné se snímku ze 120 minuty, kdy mazivo dostávající se do kontaktu z větší části pochází z klece ložiska.

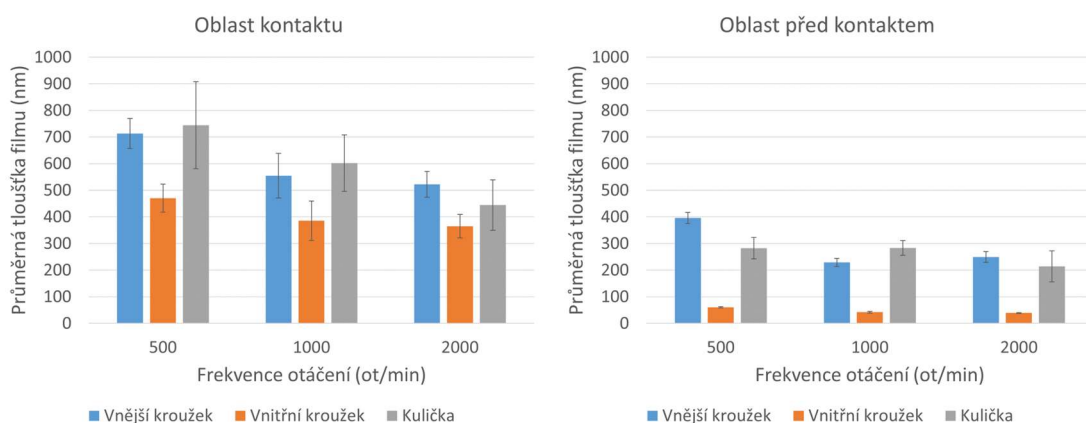


Obr. 5.13 Snímky stejné kuličky pro tři náplně a čtyři časy rozebrání

5.4 Vliv frekvence otáčení

V další sadě testů byl zkoumán vliv frekvence otáčení na distribuci plastického maziva. Testy byly realizovány podle druhé série testů s provozními parametry dle kapitoly 4.3.2. Jejich výsledky jsou patrné na grafech Obr. 5.14. Na prvním grafu jsou zobrazeny průměrné tloušťky filmu v oblasti kontaktu v závislosti na frekvenci otáčení, na vnějším a vnitřním kroužku a na kuličkách ložiska. Na druhém grafu je zobrazeno to stejné, co na prvním s tím rozdílem, že data byly vybrány z oblasti před kontaktem. Chybové úsečky v grafech udávají nejistotu určení střední hodnoty na základě variability hodnot a velikosti statického souboru.

Z grafu oblasti kontaktu je zřejmé, že ve všech případech došlo k poklesu průměrné tloušťky filmu na všech komponentech ložiska při zvyšování frekvence otáčení. Z druhého grafu oblasti před kontaktem je viditelné, že k výraznějšímu poklesu průměrné tloušťky filmu došlo jen na dráze vnějšího kroužku ložiska mezi frekvencí otáčení 500 ot/min a 1 000 ot/min. Rozdíly mezi ostatními hodnoty jsou velmi malé oproti rozdílům v oblasti kontaktu.

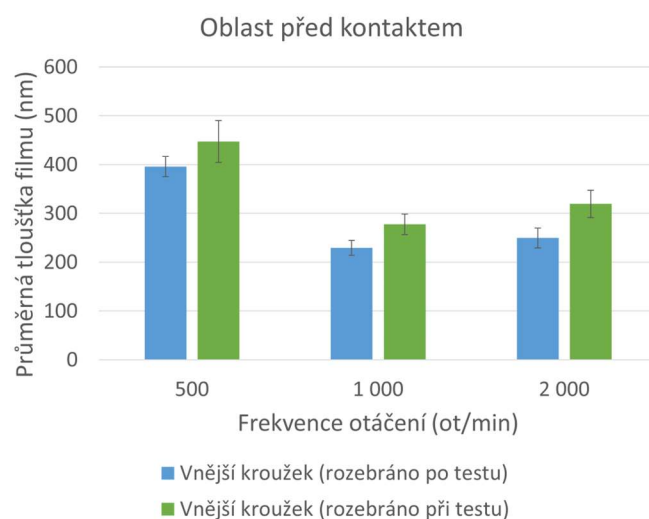


Obr. 5.14 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři různé frekvence otáčení na vnějším a vnitřním kroužku ložiska a na kuličkách v oblasti kontaktu (vlevo) a v oblasti před kontaktem (vpravo)

Po provedení druhé série testu byly navrženy a provedeny další tři testy, které měly za úkol ověřit, zdali bude průměrná tloušťka filmu stejná i když bude ložisko rozebráno, ještě před jeho zastavením. Díky tomuto přístupu měření nebylo možné získat informace o tloušťce filmu na vnitřním kroužku a kuličkách kvůli jejich rotaci po rozebrání. Také nebylo možné určit oblast kontaktu, proto jsou výsledky jen pro oblast před kontaktem.

Srovnání s výsledky, kdy se ložisko rozebralo po testu znázorňuje graf na Obr. 5.15. Ukazuje, průměrnou tloušťku filmu v závislosti na frekvenci otáčení na dráze vnějšího kroužku ložiska. Pro stav, kdy bylo ložisko rozebráno po jeho úplném zastavení a pro stav, kdy bylo ložisko rozebráno ve chvíli, kdy skončil test a ložisko začalo zastavovat. Při vyšší frekvenci otáčení byla doba do zastavení ložiska delší, než když bylo ložisko provozováno při nižší frekvenci otáčení.

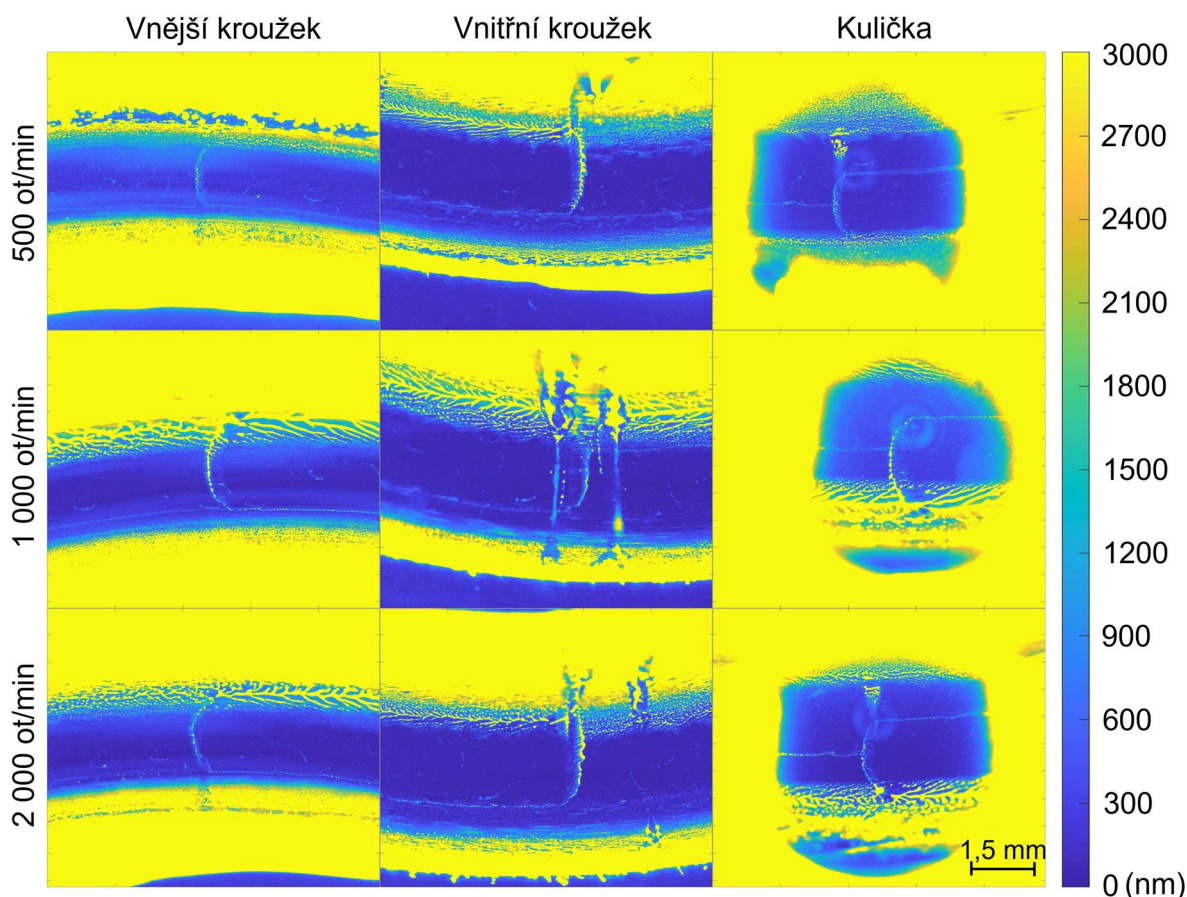
Z grafu je zřejmé, že průměrná tloušťka filmu dosahovala při rozebrání ložiska za rotace vyšších hodnot než při úplném zastavení ložiska. To znamená, že při chodu ložiska jsou na drahách a kuličkách vyšší tloušťky filmu než v době, kdy je ložisko zastaveno. Ještě je nutno zmínit, že trend zůstal stejný pro všechny testované frekvence otáčení.



Obr. 5.15 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři frekvence otáčení v oblasti před kontaktem na vnějším kroužku ložiska pro test, kdy bylo ložisko rozebráno po testu a během testu

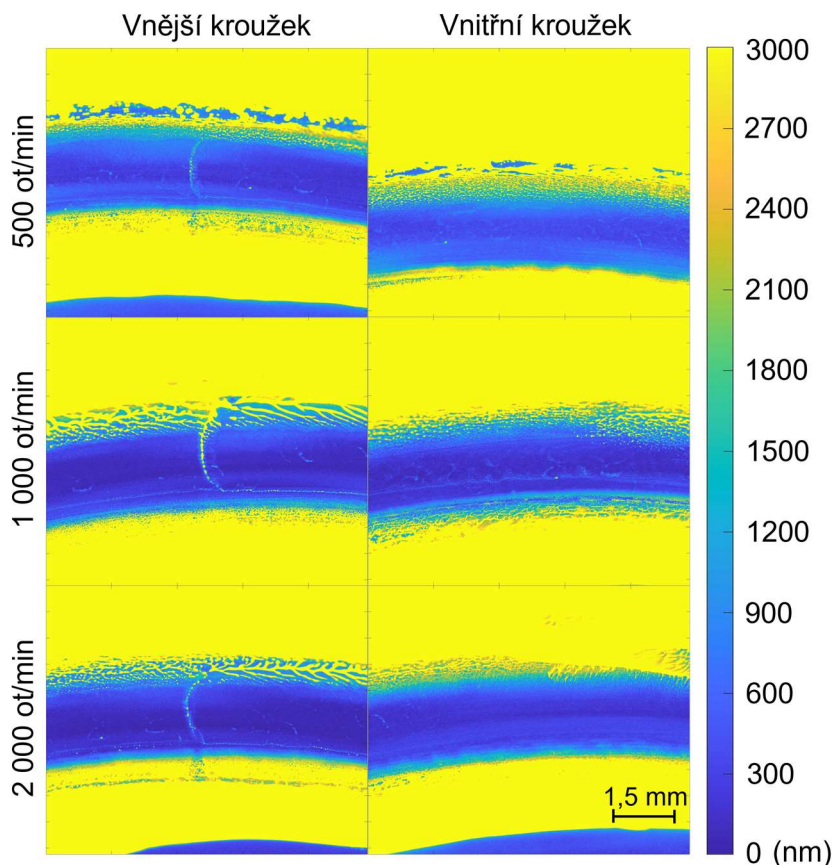
5.4.1 Distribuce maziva

Po vyhodnocení bylo vybráno devět snímků zobrazujících rozložení maziva na vnějším a vnitřním kroužku a kuličkách ložiska pro testované frekvence otáčení. Na Obr. 5.16 jde vidět, že při 500 ot/min není mazivo po stranách drah spojitě (v oblastech s výraznými známkami kavitačních stop), jako je tomu v ostatních případech. Také zde nejsou patrné známky kavitace, jako v ostatních případech, kde u 1 000 ot/min jsou kavitační oblasti nejvýraznější.



Obr. 5.16 Snímky stejného místa dráhy vnějšího kroužku (vlevo), vnitřního kroužku (uprostřed) a kuličky (vpravo) pro tři frekvence otáčení

Na dalším obrázku Obr. 5.17 jsou vidět dráhy vnějšího kroužku pro test kdy bylo ložisko rozebráno během (vpravo) a po skončení testu (vlevo). Ze snímků na pravé straně je očividné, že při rozebrání ložiska za běhu nebylo možné určit místa kontaktu, jak bylo zmíněno dříve. I přes to jsou zobrazené místa na snímcích ze stejných míst, jako v prvním případě. Můžeme zde i pozorovat, že tloušťka vrstvy maziva byla na snímcích, kdy bylo ložisko rozebráno při testu vyšší. Při frekvenci otáčení 500 ot/min jde vidět na obou snímcích nespojitost maziva ve vrchní části dráhy, která se u ostatních snímků nevyskytuje. Na snímcích, kdy bylo ložisko rozebráno při testu pozorujeme, že se do dráhy dostávalo větší množství maziva než v prvním případě. Což zapříčinilo vyšší průměrné tloušťky filmů.

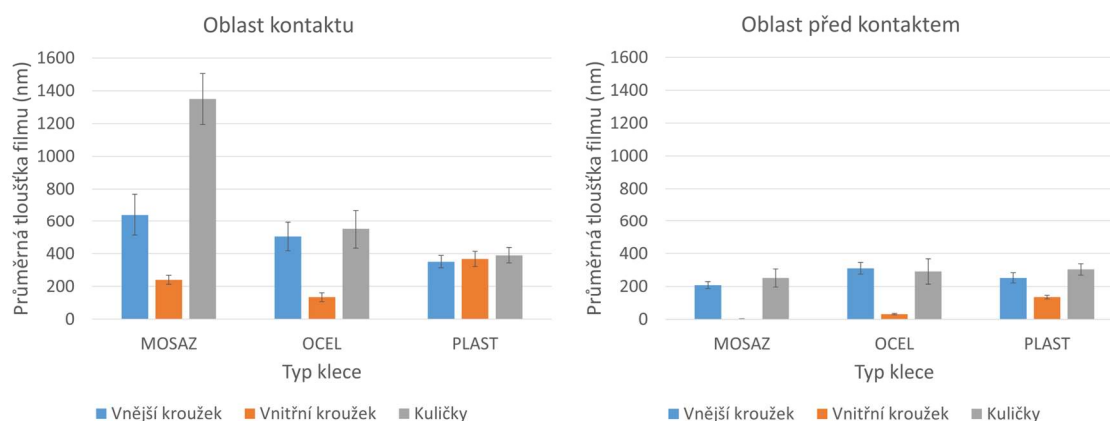


Obr. 5.17 Snímky dráhy vnějšího kroužku pro testy při rozebrání po zastavení ložiska (vlevo) a při rozebrání ložiska za chodu (vpravo)

5.5 Vliv materiálu a konstrukce klece

V poslední zmíněné sadě testů v kapitole 4.3.2 byl ukázán vliv materiálu a konstrukce klece na rozložení maziva a průměrnou tloušťku filmu na površích ložiska. Výsledky jsou zobrazeny na grafu Obr. 5.18. První graf znázorňuje průměrnou tloušťku filmu pro tři různé klece v oblasti kontaktu na vnějším a vnitřním kroužku a kuličkách ložiska. Je viditelné, že u vnějšího kroužku a kuliček byla největší průměrná tloušťka filmu u mosazné klece a nejmenší u polyamidové. Zároveň však byl u nejvyšších hodnot u mosazné klece nejvyšší rozptyl hodnot. Avšak u vnitřního kroužku byla průměrná vrstva maziva nejvyšší právě u polyamidové klece a nejnižší u ocelové.

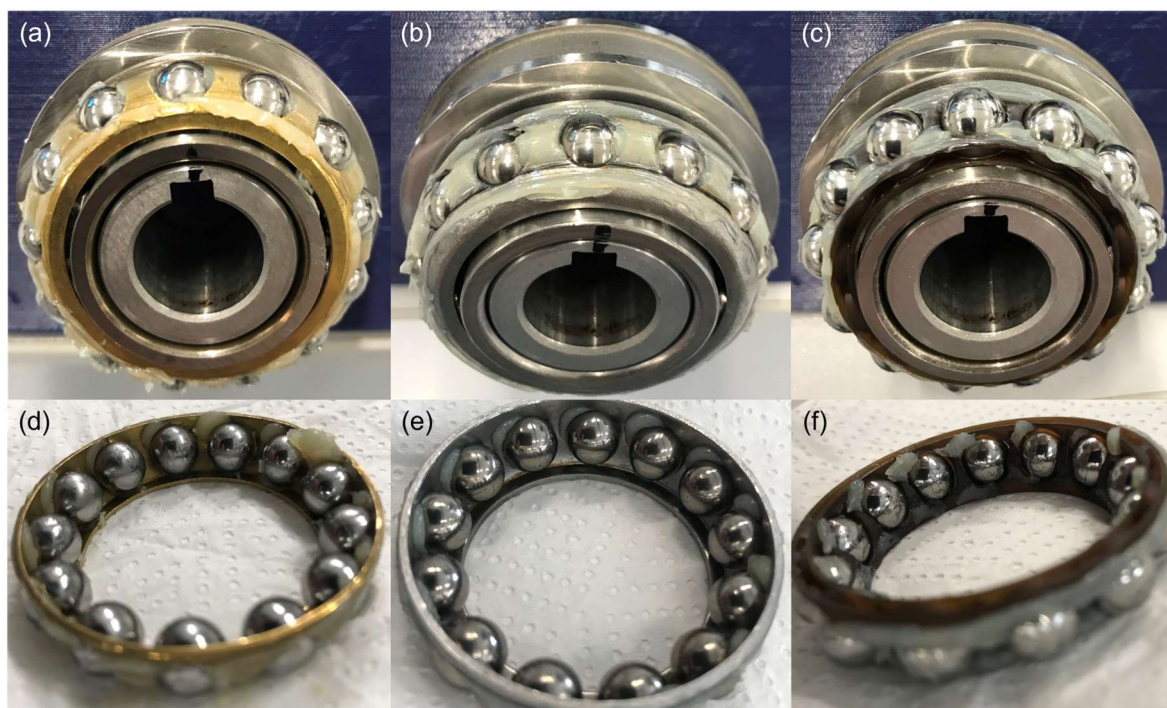
Druhý graf ukazuje to stejné, co první s tím rozdílem, že výsledky jsou pro oblast před kontaktem. Všechny získané hodnoty vykazovaly velmi malé tloušťky filmu, zvlášť hodnoty na vnitřním kroužku. Ani jejich rozptyl nebyl, tak velký, jako v předchozím případě. U ocelové klece se naměřila nejvyšší průměrná tloušťka filmu v dráze vnějšího kroužku a nejnižší u mosazné klece. Na vnitřním kroužku byla naměřena nejvyšší průměrná tloušťka filmu u polyamidové, stejně, jako v oblasti kontaktu. Je důležité zdůraznit že rozptyl hodnot není tak vysoký, jako v oblasti kontaktu.



Obr. 5.18 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři různé klece ložiska na vnějším kroužku, vnitřním kroužku a kuličkách ložiska pro oblast kontaktu (vlevo) a oblast před kontaktem (vpravo)

Po každém testu byly získány snímky klece s kuličkami ložiska. Na Obr. 5.19 je vidět, že nejvíce maziva bylo na povrchu ocelové klece mezi kuličkami (b). Na plastové kleci se mazivo nacházelo spíše v přední a zadní části klece (c). A na mosazné kleci bylo mazivo rozprostřeno po celé kleci, jak mezi kuličkami, tak také v přední a zadní části klece (a).

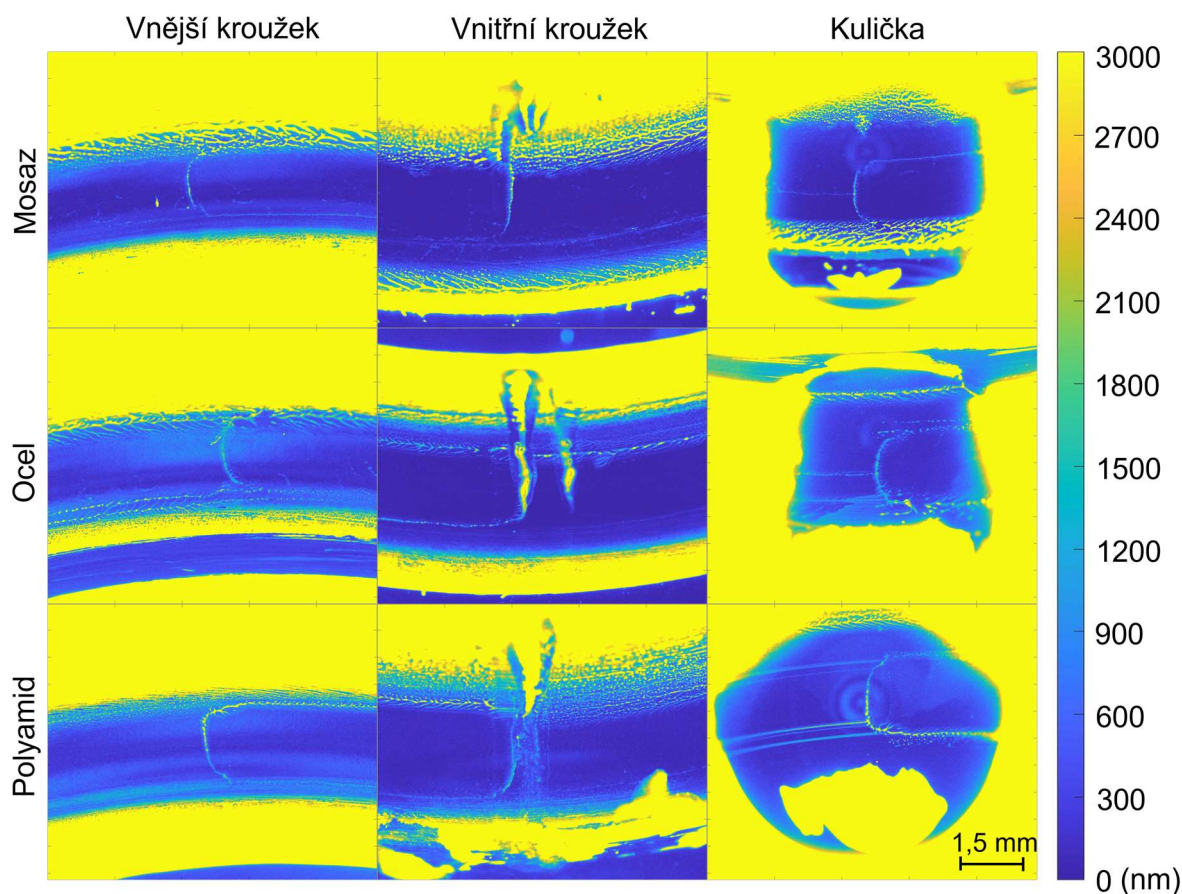
Na snímcích zobrazující spodní část klece pozorujeme vytvořené rezervoáry. Největší rezervoáry se vytvořily na mosazné (d) a ocelové kleci (e), naopak nejméně rezervoáru na polyamidové kleci (f).



Obr. 5.19 Rozložení maziva na mosazné kleci (a),(d), ocelové kleci (b),(e), polyamidové kleci (c),(f)

5.5.1 Distribuce maziva

Po provedení série testů bylo vybráno devět snímků s rozložením maziva pro každou s použitých klecí. Ze snímků Obr. 5.20 je patrné, že nejsilnější tloušťky filmu jsou na ocelové a polyamidové kleci. To však neodpovídá výsledkům z grafu, kde byla největší průměrná tloušťka naměřena právě u mosazné klece. Jelikož se však jedná o průměrnou hodnotu bylo by nutné pro korektní porovnání srovnat více snímků. U snímku kuličky s polyamidovou klecí jde vidět, že při rozebírání došlo k setření části maziva z vnějšího kroužku ložiska, čím došlo k mírnému pootočení kuličky. Zároveň je také možné pozorovat, že mazivo v okolí polyamidové klece je mnohem dál od středu kuličky, což je způsobeno menší konformitou mezi klecí a kuličkami. Na dráze vnitřního kroužku u ocelové klece lze pozorovat, že rezervuáry s mazivem jsou daleko dále od valivé dráhy, než je tomu ve zbylých dvou případech.



Obr. 5.20 Snímky Rozložení maziva na mosazné, ocelové a plastové kleci na vnějším kroužku (vlevo), vnitřním kroužku (uprostřed) a kuličkách (vpravo)

5.6 Další vlivy

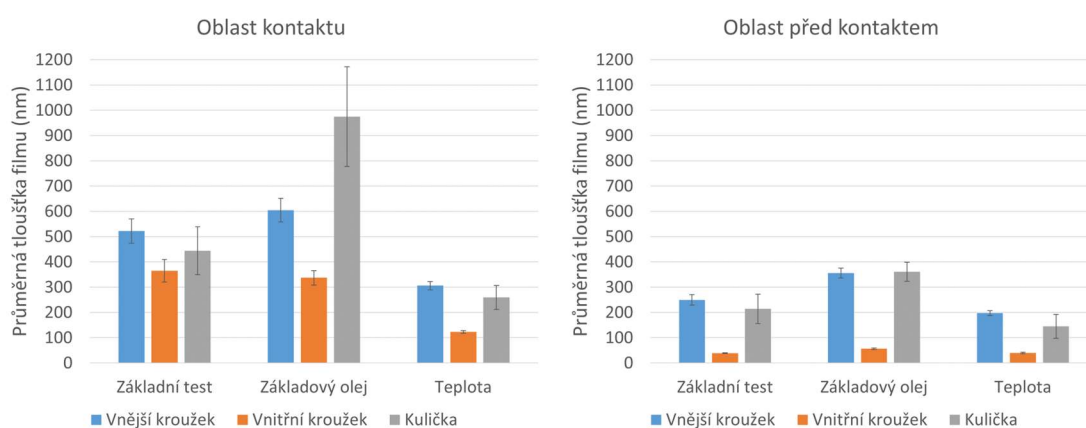
Po zhotovení předešlých tří sad experimentů byly provedeny další dva pro rozšíření výsledků. Při prvním z nich, byl pozorován vliv 5 % základového oleje na průměrnou tloušťku filmu na površích ložiska a vliv na rozložení maziva v ložisku. Test se provedl s 10 % plastického maziva, do kterého bylo přidáno 5 % základového oleje použitého maziva. Doba testu byla jedna hodina při frekvenci otáčení 2 000 ot/min se zatížením 1 400 N s použitím ložiska s mosaznou klecí.

Při druhém experimentu se pozoroval vliv přehřevu ložiska na distribuci maziva a průměrnou tloušťku filmu na površích ložiska. Tento test byl proveden při stejných podmínkách, jako předchozí s použitím 15 % maziva. Před jeho spuštěním se celý ložiskový domek ohřál na teplotu 90 °C.

Výsledky obou provedených experimentů se porovnaly se základním testem, který byl proveden se stejnými parametry bez ovlivnění teploty nebo přidání základového oleje. V grafu na Obr. 5.21 jsou zobrazeny průměrné tloušťky filmu na vnějším kroužku, vnitřním kroužku a kuličkách ložiska pro oblast kontaktu a před kontaktem.

Z prvního grafu je zřejmé, že přidání 5 % základového oleje mělo výrazný vliv na nárůst průměrné tloušťky filmu na kuličkách ložiska a mírný nárůst byl pozorován také na vnějším kroužku v oblasti kontaktu. Při ovlivnění teploty je průměrná tloušťka filmu na všech komponentech ložiska v místě kontaktu nižší než u základního testu.

V oblasti před kontaktem vykazuje přidání 5 % základového oleje podobný nárůst průměrné tloušťky filmu, jako v oblasti kontaktu. Vliv teploty vedl, jako v předchozím případě na nižší průměrnou tloušťku filmu, hlavně na vnějším kroužku a kuličkách ložiska.



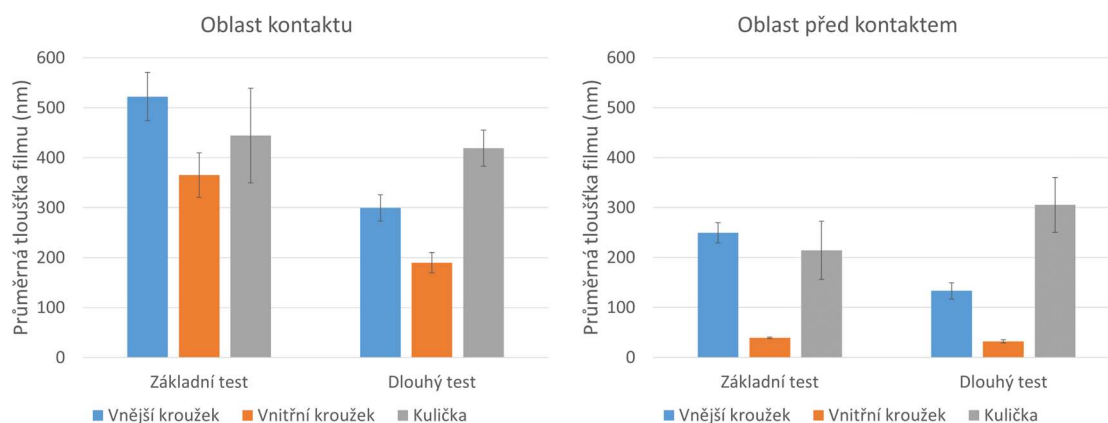
Obr. 5.21 Graf průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a kuličkách ložiska pro základní test, test vlivu základového oleje a vlivu teploty

Posledním provedeným testem byl 48hodinový test, který slouží pro srovnání se základním. Test byl proveden s 15% náplní maziva s ložiskem s mosaznou klecí při 2 000 ot/min a zatížení 1 400 N.

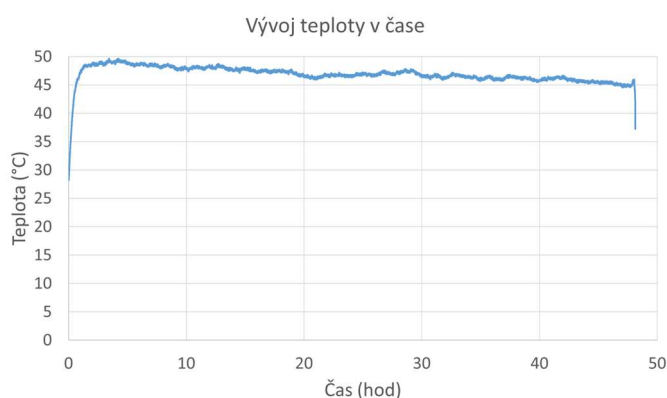
Po ukončení testu proběhlo opět porovnání výsledků, které znázorňují grafy na Obr. 5.22. Z prvního grafu je zřejmé, že při dlouhém testu došlo k naměření nižší průměrné tloušťky filmu v místě kontaktu na dráze vnějšího a vnitřního kroužku. Na kuličkách nepozorujeme výraznější rozdíly. Z chybových úseček je patrné, že ani rozptyl hodnot nebyl tak vysoký, jak tomu bylo u základového testu, což značí, že ložisko bylo provozováno po záběhové fázi.

V případě oblasti před kontaktem je na druhém grafu vidět, že u dlouhého testu došlo, jako v předchozím případě k poklesu průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku. Na dráze vnitřního kroužku nepozorujeme výraznější vliv. Průměrná tloušťka filmu na kuličkách vykazuje vyšší hodnoty než u základního testu s podobným rozptylem hodnot.

Nakonec byl vykreslen grafu průběhu teploty v čase viz Obr. 5.23. Nejvyšší teplota se pohyboval pod hranicí 50°C. V průběhu teploty není s použitou konfigurací patrný výraznější pokles teploty, který by označoval konec záběhové fáze.



Obr. 5.22 Graf průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a kuličkách ložiska pro základní a dlouhý test v oblasti kontaktu a oblasti před kontaktem



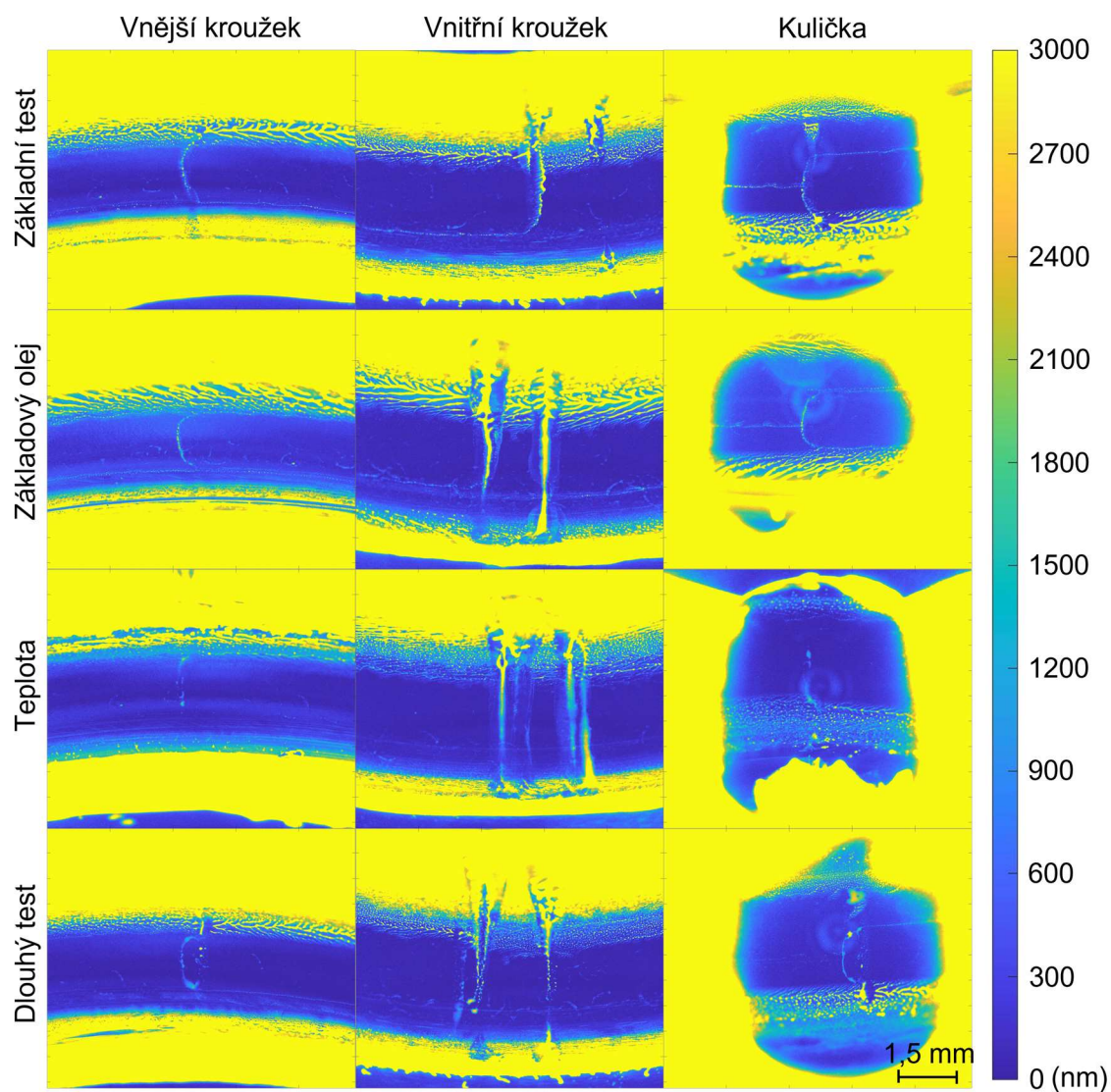
Obr. 5.23 Průběh teploty v čase u dlouhého testu

5.6.1 Distribuce maziva

Z provedených testů bylo vybráno dvanáct snímků s rozložením maziva na vnějším kroužku, vnitřním kroužku a kuličkách ložiska. Na Obr. 5.24 jsou zobrazeny vybrané snímky. U snímků se základovým olejem je patrné, že na dráze vnějšího kroužku a kuličkách, je větší vrstva maziva. Je tedy prokazatelné, že základový olej znatelně navyšoval tuto vrstvu. Ze snímků je dále patrné, že vedle valivých drah a v okolí kuličky vidíme více maziva dostávajícího se do kontaktu.

U vlivu teploty můžeme pozorovat, že na dráze vnějšího kroužku a na kuličkách je silnější vrstva maziva než u základního testu. V okolí valivých drah je možné vidět, že zde nejsou žádné kavitační stopy, jako u základního testu. Ve dráze vnějšího vidíme výraznější silnější vrstvu, nejspíše základového oleje, který se vyskytuje po okraji dráhy. Za zmínku stojí i fakt, že oblast kontaktu nevykazuje stejný tvar, jako v ostatních případech. Z toho důvodu bylo složité vybrat kontaktní oblast, jak na drahách, tak kuličkách ložiska.

U snímků dlouhého testu je patrné, že v okolí kuličky je poměrně silná vrstva maziva s porovnáním se základním testem. Na snímcích vnějšího a vnitřního kroužku pozorujeme, že okolo dráhy nejsou vidět kavitační stopy, jako je tomu v ostatních případech. Zároveň jde vidět, že oblast kontaktu je menší, než tomu je u základního testu.



Obr. 5.24 Snímky rozložení maziva na vnějším kroužku (vlevo), vnitřním kroužku (uprostřed) a kuličkách ložiska (vpravo) pro základní test, teste se základovým olejem, test se změnou teploty a dlouhý test

6 DISKUZE

6.1 Interpretace výsledků

V úvodní diskuzi je nutné zmínit, že byly provedeny zkušební testy, aby bylo ověřeno, zdali nedocházelo při snímání ložiska při jeho rotaci k volnému toku maziva. Tím se rozumí tok způsobený gravitací a silami povrchového napětí bez chodu ložiska. S ložiskem umístěným v pozorovacím přípravku byly provedeny dvě otáčky s pořízením snímků. Ty ukázaly, že v žádném z případů k volnému toku maziva nedošlo.

6.1.1 Časový test

Vlivem časového testu bylo snahou vyjádřit se k tomu, jestli má zvýšení množství náplně nějaký pozitivní vliv nebo ne. Vývoj průměrné tloušťky filmu v oblasti kontaktu znázorňuje graf na Obr. 5.10. Je možné pozorovat, že během prvních 10ti minut nevykazovaly hodnoty žádný konkrétní průběh, ale byly spíše rozdílné. Což je patrné i na Obr. 5.12 a Obr. 5.13, kde jsou viditelné poměrně velké rezervoáry kontaktní oblasti. Ty vznikly v důsledku prvotní distribuce maziva, při které nebyl dostatečný čas pro rozmístění většího množství maziva mimo oběžnou dráhu ložiska (clearing fáze). Při zastavování ložiska se začala vrstva maziva hromadit na vtoku do kontaktu před kuličkami.

V průběhu hodnot od 30 minuty lze pozorovat, že docházelo k jejich ustálení, které bylo výraznější u vnějšího kroužku. Ze snímků distribuce jde vidět, že rezervoáry kontaktní oblasti, již nebyly tak velké, protože došlo k rozmístění maziva po ložisku a k jeho usazení a vytvoření rezervoárů. Ze snímků distribuce je patrné, že kavitační stopy v okamžiku, kdy bylo ložisko pozorováno při časech do 10 minut jsou výrazné díky velkému množství maziva, které se ještě nestihlo rozmístit. Ve chvíli, kdy bylo ložisko pozorováno v časech po 10 minutě, již byl čas pro rozmístění maziva dostatečně dlouhý. Na základě toho byly kavitační stopy méně výrazné, a to hlavně u 5% náplní maziva. Jelikož tenčí film vytváří menší kavitační stopy, než je možné sledovat u 30% náplně.

Důležitější informace poskytuje oblast před kontaktem, protože tloušťky filmu více odpovídají stavu běžného provozu ložiska, kdy se tvoří souvislá vrstva mazacího filmu. Je však jasné, že při zastavování ložiska dojde ke snížení vrstvy filmu, jelikož se při snížení rychlosti snižuje i tloušťka, která prochází přes kontakt a je ve stopě za kontaktem. Navíc mazivo odchází do boku nebo se kumuluje na vtoku a tvoří rezervoár.

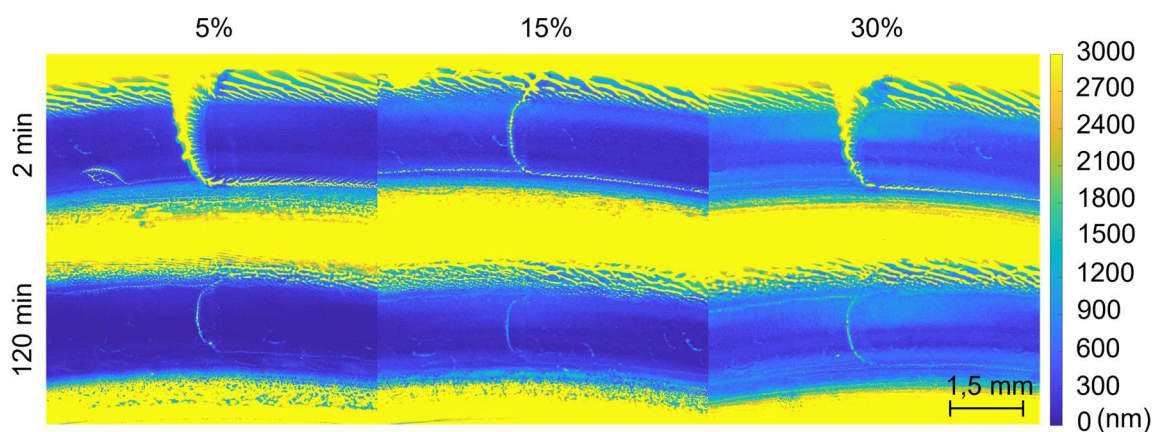
Grafy na Obr. 5.11 ukazují průměrnou tloušťku filmu v časech rozebrání v oblasti před kontaktem. Klesající průběh průměrné tloušťky filmu během prvních 10 minut běhu u 30 a 15% náplně je způsoben počáteční distribucí maziva. Jelikož bylo mazivo aplikováno na klec s kuličkami, došlo při spuštění ložiska k vytvoření oběžné dráhy vytlačením maziva na strany dráhy. Mezi dominantní mechanismus distribuce patřila rotace kuličky, které redistribuovala mazivo na spodní část klece, kde se tvořily rezervoáry a dále do dráhy vnitřního kroužku ložiska. Méně významným mechanismem byly odstředivé síly, které díky malé frekvenci otáčení neměly tak velký vliv, jako bývá u větších a rychloběžných ložisek. Po úvodních 10ti minutách je vidět, že vrstva maziva na dráze vnějšího kroužku a kuličkách byla téměř stálá.

Rovněž je důležité zmínit, že u 5% náplně došlo ve 30 minutě k poklesu tloušťky filmu s ustálením v režimu hladovění. To lze pozorovat i na snímcích dráhy vnějšího kroužku a kuličky ložiska. Kdy při růstu tloušťky filmu bylo v okolí dráhy velké množství maziva, což značí kavitační stopy na kraji dráhy. S poklesem byly viditelné menší kavitační stopy, z důvodu tenčího mazacího filmu v ložisku. To je zřejmé ze snímků kuliček, kdy ve 120 minutě běhu byly u 5% náplně pozorovány velmi jemné kavitační stopy. Mazivo dostupné pro kontaktní oblast bylo redistribuováno kuličkami z klece. Ze snímku je patrné, že na vnitřním kroužku musela být velmi slabá vrstva maziva, jelikož na kuličce je stopa větve z kontaktní oblasti na vnitřním kroužku téměř neviditelná. To je však pouhá hypotéza, které nebyla v této práci ověřena, jelikož měření vnitřního kroužku u časového testu nemohlo být provedeno.

Teorie uvádí, že vrstva filmu před kontaktem by měla být stejná na dráze vnějšího kroužku i kuličce [1]. Výsledky z provedeného experimentu vykazují na dráze vnějšího kroužku silnější film, než byl naměřen na kuličce. Podobné hodnoty je možné vidět u 5% náplně v čase 2 a 10 minut a u 15% náplně v čase 30 a 60 minut. Způsobené rozdíly mohou mít několik důvodů. Prvním je geometrie kuličky, na které při zastavování ložiska ulpí menší množství maziva než v dráze vnějšího kroužku ložiska. Druhým důvodem může být vliv nejistoty určení offsetu související s parazitní intenzitou, který je pro kuličku vyšší než pro dráhu. Což znamená, že s uvážením uvedeného rozsahu ± 5 , což odpovídá tloušťce vrstvy ± 110 nm nejsou rozdíly, tak velké.

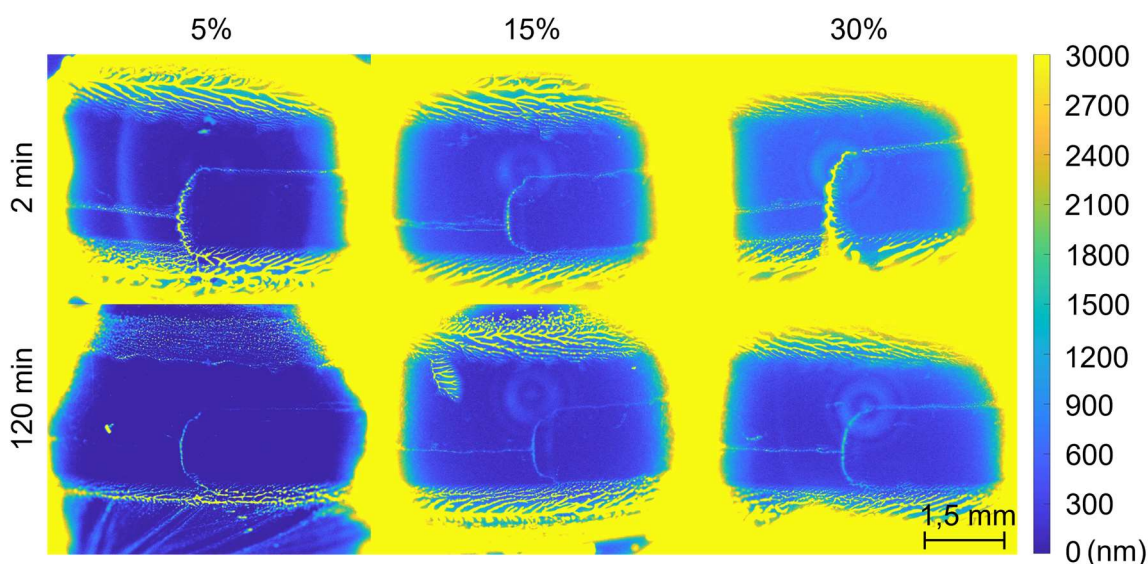
Detailnější pohled na distribuci

Ze snímků distribuce plastického maziva je na Obr. 6.1 a Obr. 6.2 jasně vidět, že v okamžiku, kdy tloušťka filmu dosahuje malých hodnot mají kavitační stopy velmi jemnou strukturu. Dále je možné pozorovat, že na dráze vnějšího kroužku jsou v její horní a dolní oblasti vidět silnější vrstvy maziva. Ze snímků s 30% náplní je patrné, že vrstva filmu v dráze není závislá na rezervoáru kontaktu, ale na mazivu na stranách dráhy.



Obr. 6.1 Detailní snímky dráhy vnějšího kroužku

Na snímcích kuliček je možné vidět, že množství maziva dostávajícího se do kontaktu u 5% náplně výrazně omezuje absence rezervoárů v horní a spodní části kuličky. Je zde i zřejmé, že se mazivo na kleci ložiska nachází dále od středu kuličky a jeho distribuce do kontaktu bude omezena oproti ostatním případům. Je patrné, že mazivo je z klece natahováno kuličkami a následně distribuováno až na dráhu vnitřního kroužku ložiska.



Obr. 6.2 Detailní snímky kuliček

6.1.2 Vliv frekvence otáčení

Dále bude diskutován vliv frekvence otáčení na distribuci maziva. Výsledky průměrné tloušťky filmu jsou pozorovatelné z grafu Obr. 5.14. Pro oblast kontaktu je patrné, že s vyšší frekvencí otáčení byla měřena na všech komponentech ložiska menší tloušťka filmu. Podobný trend byl pozorován i v místě před kontaktem, kde však nebyly rozdíly mezi hodnotami kuliček a vnitřních kroužků, tak vysoké.

EHD teorie říká, že s vyšší rychlostí otáčení by měla být v ložisku vyšší tloušťka filmu [1]. Což bylo pozorováno pouze v oblasti před kontaktem na dráze vnějšího kroužku mezi 1 000 ot/min a 2 000 ot/min. Rozpor s teorií lze vysvětlit provozem v režimu hladovění. V článku [8] bylo ukázáno, že se zvyšující se rychlostí docházelo k většímu hladovění.

Vysvětlením klesajícího trendu průměrné tloušťky filmu v oblasti kontaktu může být fakt, že s nižší frekvencí otáčení nejsou odstředivé síly, tak vysoké tudíž nedojde během hodinového testu k vytlačení velkého množství maziva mimo oběžnou dráhu ložiska. Při následném zastavování bude v rezervoáru v místě kontaktu více maziva, než tomu bude při vyšších frekvencích otáčení.

Dále je možné pozorovat, že v místě kontaktu byla naměřena větší tloušťka filmu na kuličkách kromě případu s 2 000 ot/min. To znamená, že při aplikaci maziva na klec a kuličky nedošlo při nízkých otáčkách k přemístění více maziva na dráhu vnějšího kroužku ložiska v důsledku odstředivých sil, jako v případě s 2 000 ot/min. Primární rezervoáry maziva byly tedy na kuličkách a jejich rotací se mazivo distribuovalo dál na valivé dráhy vnějšího a vnitřního kroužku. Jednou z možností přenesení většího objemu maziva na dráhu vnějšího kroužku při nízkých frekvencích otáčení by byly vibrace ložiska.

Důsledek silného hladovění je pozorovatelný z grafu oblasti před kontaktem, kdy byla na vnitřním kroužku ložiska naměřena vrstva menší než 100 nm pro všechny frekvence otáčení. Zároveň jde vidět, že tloušťka vrstvy s vyššími otáčkami klesala, což jen potvrzuje zmiňovaný článek [8]. Menší hodnoty na vnitřním kroužku byly prezentovány i v práci [16], kde rozdíl pro 1 000 ot/min byl 150 nm a pro 500 ot/min 170 nm. Viditelné jsou rozdíly při 1 000 ot/min, kdy rozdíl dosahuje 160 nm. Avšak u 500 ot/min je rozdíl výrazně vyšší. Jedním ze dvou vysvětlení je doba testu, která je pouze hodinu. Druhým může být teplota, která při 500 ot/min nepřesahuje hranici 30 °C, což znamená, že mazivo bylo viskóznější, tudíž se hůře pohybovalo.

Následně je důležité zmínit výsledky z grafu Obr. 5.15, kde byly ukázány průměrné tloušťky filmu pro případ, kdy bylo ložisko rozebráno za chodu. Na první pohled je patrné, že tloušťky filmu byly vyšší. Vlivem zamezení efektu brždění, kdy díky němu docházelo ke snižování tloušťky filmu odpovídaly naměřené hodnoty více skutečným hodnotám, které byly v ložisku během provozu.

Sledovaný trend byl stejný, jako v předchozím případě. Zároveň je z grafu vidět, že rozdíl mezi hodnotami je ve všech stavech přibližně 50 nm, jen v posledním případě 60 nm. Z toho vyplývá, že rozdíl, který dělá efekt brždění není, tak výrazný alespoň pro případ oblasti mimo kontakt.

Experimentálně získané hodnoty byly následně porovnány s výpočtem centrální tloušťky filmu dle Hamrock a Dowsonovi rovnice [1] (rov. 9.48). Výsledek pro 2 000 ot/min byl 380 nm, což je přibližně o 60 nm více než ukazuje experiment. Je důležité zmínit, že se jedná o výpočet pro základový olej nikoliv pro plastické mazivo. To však díky zahušťovacímu vykazuje vyšší tloušťky filmu. Což znamená, že z teoretického hlediska si hodnoty odpovídají.

Diskuze snímků s rozložením maziva

Snímky zobrazené na Obr. 5.16 ukazují, že při nízké frekvenci otáčení vykazovala kavitační vrstva velmi jemnou strukturu, jako tomu bylo v případě nízké procentuální náplně. Zároveň je možné pozorovat, že vrstva na vnějším kroužku ve vrchní části byla částečně oddělena od kavitační oblasti, což bylo pozorováno po celém obvodu ložiska. Důvodem mohla být nízká teplota, která při 500 ot/min nepřekročila 30°C. S tím je spojena viskozita maziva, která byla vyšší. T toho důvodu došlo k rozdělení maziva, kdy část na okraji valivé dráhy se podílela na mazání a druhá část byla stacionární a sloužila, jako rezervoár.

Na snímcích jsou vidět větší kavitační stopy za kontaktní oblastí, což odpovídá teoretickému průběhu centrální tloušťky zaplaveného kontaktu [1]. Před kontaktem jsou kavitační stopy menší a s dalším převalováním přes kontakt dojde k jejich zvětšení v oblasti za kontaktem.

Při rozebrání ložiska za chodu nebylo možné pozorovat stopy rezervoárů maziva (Obr. 5.17). Na snímcích s 500 a 1 000 ot/min jde vidět, že kavitační stopy byly velmi jemné v obou případech. Také jsou vidět poměrně silné vrstvy maziva blíže středu dráhy kontaktu. Při frekvenci 2 000 ot/min bylo pozorováno, že při rozložení ložiska došlo v některých místech k přemístění většího množství maziva do oblasti dráhy. Což je patrné i z posledního snímku, kde je na konci vidět, jak docházelo k přiblížení maziva na kraji dráhy jejímu středu. Důvodem byla vyšší frekvence otáčení než v předchozích dvou případech, při které kuličky stáhly část maziva z ramene ložiska do dráhy. Vliv na výsledky to ovšem nemělo, jelikož oblasti pro vyhodnocení byly vybrány tak, aby v nich nebyly zahrnuty ovlivněné oblasti.

6.1.3 Vliv materiálu a konstrukce klece

Výsledky testu jsou zobrazeny na dvou grafech na Obr. 5.18. V oblasti kontaktu byla na kuličce u mosazné klece pozorována poměrně silná vrstva maziva. Což značí, že hlavní rezervoár byl na kuličce, která distribuovala mazivo dále po ložisku.

Dále je z grafu možné vidět, že rezervoáry v oblasti kontaktu byly největší u mosazné klece, kromě vnitřního kroužku ložiska. U polyamidové klece jde jasné vidět, že v oblasti kontaktu byla na vnitřním kroužku naměřena největší vrstva maziva. Zároveň si byly průměrné tloušťky vrstev na všech třech komponentech ložiska podobné. To bylo pozorováno i v oblasti před kontaktem, kde však byly již větší rozdíly. Nejpravděpodobnějším důvodem je uložení kuliček v kleci, které mají větší vůli s klecí a jsou tak schopny dostat více maziva do dráhy vnitřního kroužku a to během hodiny provozu ložiska. Z pohledu průměrných tloušťek filmu na všech částech ložiska se tedy polyamidová klec jeví, jako nejlepší.

Hodnoty tloušťky filmu u ocelové a mosazné klece v oblasti před kontaktem jsou si také dost podobné. Zajímavé však bylo pozorovat, že na vnitřních kroužcích bylo naměřené opravdu malé množství maziva. Zde by mohl být problém v offsetu, který byl 10. Proto jsou spíše důležité pozorované trendy než samotné průměrné tloušťky filmu.

Na Obr. 5.19 jsou snímky z testů. Snímky (a-c) byly pořízeny bezprostředně po testu a snímky (d-f) po nafození všech částí ložiska. Na snímku (a) jde vidět, že rezervoáry s mazivem byly vytvářeny blízko kuliček, což znamená, že z nich bylo dostupné mazivo pro mazání kontaktů. U ocelové klece (b) byly vytvořeny poměrně silné vrstvy maziva na kleci mezi kuličkami. Zde zůstává otázkou, zda by při delším provozu ložiska bylo mazivo dostupné pro kontakt. Tomu by mohly pomoci vibrace a případně vyšší teplota. Ta by způsobila, že by bylo mazivo méně viskózní, a tím by se zlepšila jeho dostupnost do kontaktu. U polyamidové klece na snímku (c) bylo pozorováno, že rezervoáry maziva byly vytvořeny po obvodu klece před a za kuličkami. Jelikož zde nebylo pozorováno mazivo mezi kuličkami klece, je jedním z důvodů předpoklad, že se mazivo dostalo do valivých drah a podílelo se, tak na mazání. Což by vysvětlovalo podobné tloušťky filmu u této klece na všech částech ložiska v oblasti před kontaktem.

Ze snímků (d-f) bylo pozorováno, že rezervoáry maziva byly vytvořeny na nejvíce vzdáleném místě od kontaktu vlivem odstředivých sil. U polyamidové klece je však patrné, že rezervoáry nebyly zformovány, tak jako u mosazné a ocelové klece. Jedním z vysvětlení může být krátká doba pro formulaci rezervoárů. K ověření by bylo zapotřebí provést delší testy. Také jde vidět, že kousky maziva byly pozorovány i v místech pod kuličkami, což kvůli osazení u zbylých klecí nebylo. To je další známka důvodu nejsilnější naměřené vrstvy v místě kontaktu a před na vnitřním kroužku ložiska. Na závěr je důležité zmínit, že se nejednalo o ložiska od stejných výrobců, jak bylo zmíněno v kapitole 4.3.1, tudíž může hrát roli i rozdílný design.

Diskuze snímků s rozložením maziva

Průběh rozložení maziva u mosazné klece byl podobný, jako bylo pozorováno u vlivu frekvence otáčení. Výsledné snímky s rozložením maziva je možné vidět na Obr. 5.20. Ze snímků s polyamidovou klecí je patrné, že tloušťka filmu na všech částech ložiska dosahovala podobných hodnot a také, že tloušťka filmu na dráze vnitřního kroužku byla nejsilnější.

Na snímku vnitřního kroužku u polyamidové klece bylo pozorováno, že ve spodní části dráhy nebyla vrstva maziva taková, jako v ostatních případech. Jedním z důvodů mohla být právě nedokonaná formulace rezervoáru pozorovaná na Obr. 5.19 (f). Díky tomu bylo možné pozorovat místy větší části maziva nacházející se v dráze. To však mohlo být způsobeno až v okamžiku, kdy bylo ložisko rozloženo. Pro ověření a potvrzení by bylo nutné provést delší test.

Na kuličce u polyamidové klece byly ve spodní části pozorovány dvě větve maziva, které u ostatních kuliček viděny nebyly. Což může znamenat, že mohlo dojít k rotaci kuličky. Zároveň je viditelné, že oblast kontaktu byla mírně pousnuta směrem nahoru. K tomu došlo u více kuliček. Důvodem bylo uložení kuliček, kde z Obr. 5.19 (c) lze vidět, že kuličky nejsou v kleci, tak zapuštěny, jako v ostatních případech. Z toho důvodu došlo následně při rozebírání ložiska k pootočení kuliček.

U ocelové klece bylo na kuličkách pozorováno, že se mazivo nachází nejblíže středu kuličky. Což naznačuje, že ho bylo dost velké množství dostupného pro mazání. Na snímcích vnitřního kroužku bylo pozorováno, že v horní části dráhy je mezi silnou vrstvou maziva oblast, ve které byly v části ložiska pozorovány malé kavitační stopy a v druhé části ložiska větší. To mohlo být způsobeno kontaktem s klecí, která se na tom určitým způsobem mohla podílet.

6.1.4 Další vlivy

Zde bude diskutován vliv základového oleje, teploty a dlouhého testu. Výsledky prvních dvou vlivů jsou zobrazeny na Obr. 5.21. Je patrné, že přidání základového oleje mělo pozitivní vliv na nárůst průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku a kuličkách ložiska v porovnání se základním testem. Tím bylo potvrzeno, že vyloučený základový olej mohl přispět k toku plastického maziva zpět do kontaktu a přispět tím k doplňování valivých drah. Dále je patrné, že se podílel na tvorbě tloušťky filmu na vnějším kroužku ložiska a kuličce, ale na vnitřním kroužku jeho vliv nebyl výrazný. Důvodem by mohlo být jeho malé množství, které se pouze ve velmi malém množství dostalo do dráhy vnitřního kroužku. Zůstává otázkou, zda v případě delšího testu by bylo jeho množství na dráze vnitřního kroužku ložiska vyšší. Zároveň bylo pozorováno, že naměřená tloušťka filmu před kontaktem se shodovala s vypočtenou.

Zvýšení teploty vedlo ke snížení viskozity maziva a z toho důvodu byla tloušťka filmu nižší. To bylo pozorováno, jak v místě kontaktu, tak i před ním. Vliv na průměrnou tloušťku filmu na dráze vnitřního kroužku v oblasti před kontaktem tak výrazný nebyl. Důvodem byl malý objem maziva, které se dostalo na dráhu vnitřního kroužku. Ještě je důležité zmínit, že ani v případě teploty a základového oleje nebyl pozorován volný tok maziva při rozebrání ložiska.

Jako poslední byl ukázán vliv 48hodinového testu v porovnání se základním viz Obr. 5.22. Je očividné, že na všech částech ložiska došlo k naměření nižší vrstvy filmu kromě kuliček v oblasti před kontaktem. Tloušťka filmu dosahoval hodnot 120 nm na dráze vnějšího kroužku a 300 nm na kuličkách. Dle článku [7 asi] bylo ukázáno, že tloušťka filmu byla po 20 hodinách přibližně 300 nm. V součtu byla tloušťka filmu po 48 hodinách o 120 nm vyšší. Je zde však nutné brát v potaz offset a fakt, že tloušťka byla měřena u zastaveného ložiska. Průběh teploty s použitou konfigurací vykazoval chování, jako mazivo B v článku [1].

Diskuze snímků s rozložením maziva

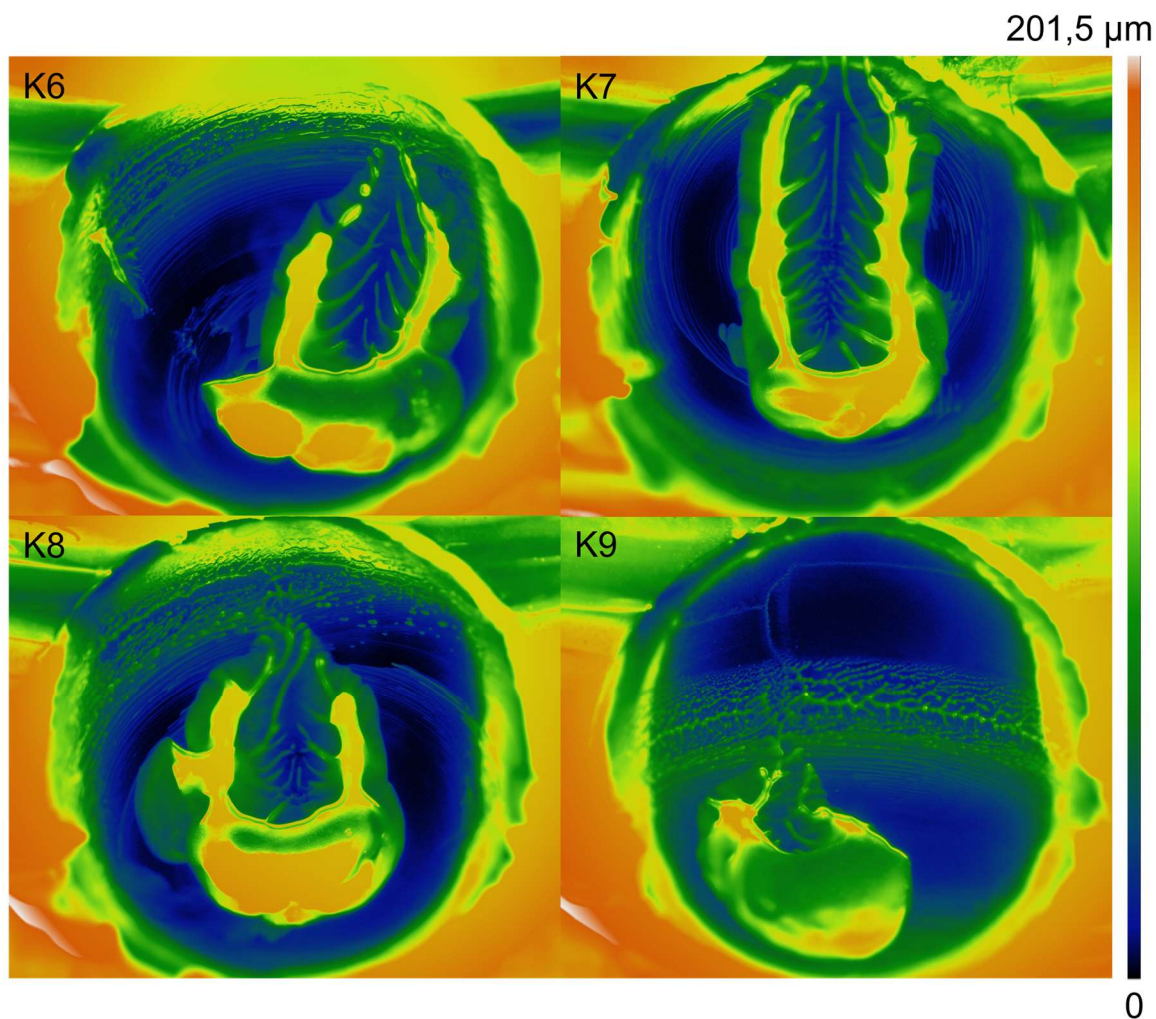
Z pořízených snímků na Obr. 5.24 je zřejmé, že základový olej výrazně zvýšil vrstvu maziva na dráze vnějšího kroužku a kuličkách, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole. Na snímcích s vlivem teploty nevykazovaly kontaktní oblasti stejný tvar, jako v ostatních případech. To bylo zapříčiněno vysokou teplotou, díky které se při zastavování ložiska rezervoáry kontaktu formulovaly pouze ze základového oleje maziva.

Také bylo ukázáno, že teplota stimulovala uvolňování základového oleje, který je možné spatřovat po stranách oběžné dráhy. Na snímcích vnějšího kroužku bylo pozorováno podobné oddělení vrstvy maziva v horní části dráhy, jako tomu bylo u vlivu frekvence otáčení s 500 ot/min, kde byl tento efekt přisouzen vlivu frekvence otáčení. Zde však byla frekvence otáčení vysoká, takže k tomu muselo dojít důsledkem teploty. Vysvětlením může být právě vysoká teplota, vlivem které nedokázalo mazivo přilnout k povrchu ložiska. Tím docházelo k jeho neustálému spadání do kontaktu, ze kterého bylo následně s další otáčkou vytlačováno, čím se zároveň uvolňoval základový olej.

U dlouhého testu byly rezervoáry v kontaktu vytvořeny základovým olejem, jelikož se v dráze nevyskytovalo samotné plastické mazivo, které bylo rozmístěné po ložisku a tvořilo rezervoáry. Okolo drah vnitřního a vnějšího kroužku jdou vidět poměrně stabilní vrstvy, které představují uvolňující se základový olej, který mazal kontakt. Ze snímků jde vidět, že rozdíly s hodinovým testem jsou způsobeny tím, že u 48hodinového testu byl pozorován základový olej, kdežto u hodinového i zahušťovadlo, díky kterému byla tloušťka filmu vyšší.

6.1.5 Natočení kuliček

U kuliček, které se nacházely ve spodní části ložiska docházelo při rozebrání k setření části maziva z vnějšího kroužku ložiska, čím došlo k jejich natočení. Při zobrazení kuliček v plném rozsahu bylo možné vidět detailněji stopy maziva v blízkosti klece viz Obr. 6.3. Je zřejmé, že mazivo na kleci v blízkosti kuliček bylo kuličkami redistribuováno a podílelo se na mazání kontaktů. Natočení mělo u časového testu v okamžiku složení ložiska vliv na vstup většího množství maziva do kontaktu, jelikož se kuličky nevrátily do jejich původních pozic.



Obr. 6.3 Natočení kuliček s viditelnými stopami maziva bez omezení rozsahu

6.1.6 Nejistoty spojeny s vlivem pozadí

Původně byl proveden odečet pozadí signálu, který pocházel z okolí prostoru laboratoře. Poté co bylo provedeno obsáhlejší měření, zjistilo se, že signál obsahuje ještě pozadí, které je ovlivněno bezprostředním okolím a emisí bezprostředního okolí. Vzhledem k tomu byl stanoven offset, který je použit tam, kde byly stanoveny nejistoty určení. Ovšem následně při kompletní sadě experimentů se zjistilo, že 5 % maziva je tak výrazně jiné množství, při kterém bylo bezprostředně v oblasti zorného pole méně maziva. Vliv pozadí tedy nemusí být tak velký, jako u 15 %. Z toho důvodu, byla hodnota offsetu na základě referenčních pozorování určena na 5 pro dráhu vnějšího kroužku a 10 pro kuličku. Jelikož ale toto určení nebylo založeno na takové šířce dat, jako pro referenční případ 15 %, má tato hodnota trošku nižší sílu. Pro přesnější určení by bylo zapotřebí provést více měření s 5 %.

6.2 Verifikace hypotéz

Výzkumná otázka č. 1

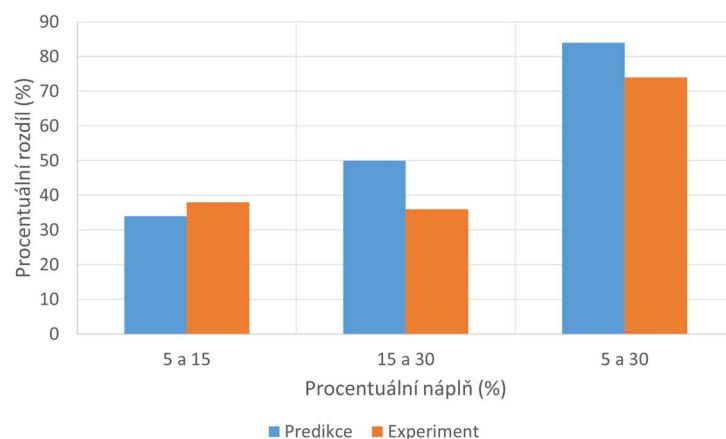
Jaký vliv bude mít procentuální množství náplně maziva na tloušťku vrstvy filmu na kontaktních površích ložiska?

Hypotéza č.1

Lze předpokládat, že v případě nižší náplně ložiska mazivem bude tloušťka vrstvy maziva na površích tenčí, procentuálně podobně, jako bude procentuální náplň maziva. Je předpokládáno, že hlavním důvodem tenčí vrstvy maziva bude více prostoru mimo oběžnou dráhu ložiska, kde se usadí více maziva díky, jeho menšímu množství.

Vyjádření

Hypotéza byla vyhodnocena pomocí grafické závislosti rozdílů mezi procentuálními náplněmi a procentuálních rozdílů předpokladu a experimentálního měření. Vyhodnocení je pro oblast tloušťky filmu před kontaktem. S uvažováním, že 30% náplň odpovídá 100 % byly spočítány predikované rozdíly (modře) mezi jednotlivými procentuálními náplněmi. Pro určení rozdílů mezi hodnotami z experimentů byly vybrány tři poslední hodnoty od každé procentuální náplně, jelikož jsou považovány za ustálené. Následně byl proveden součet hodnot z drah vnějších kroužků a kuliček jednotlivých procentuálních náplní. Poté byly vypočítány procentuální rozdíly mezi hodnotami odpovídajícími jednotlivým procentuálním náplním. Výsledky jsou vykresleny v grafu na Obr. 6.4. Nejlepší shoda byla mezi 5 a 15 % a nejmenší mezi 15 a 30 %. Predikce je tedy částečně potvrzena s maximálním rozdílem 14 %.



Obr. 6.4 Graf procentuálních rozdílů mezi predikcí a experimentem H1

Výzkumná otázka č. 2

Jaké mechanismy přispívají k zásobování kontaktu mazivem?

Hypotéza č.2

Kontakt je zásobován mazivem z rezervoárů, kde hlavním mechanismem je uvolňování základového oleje z maziva. Důležitou roli hraje také mechanismus rotace kuličky, díky kterému dochází k redistribuci maziva z rezervoárů vytvořených na kleci do kontaktu. Tyto mechanismy budou závislé na množství maziva dostupného pro tvorbu rezervoárů a době záběhové fáze během které se tyto rezervoáry tvoří.

Vyjádření

V rámci krátkých testů nebyly pozorovány známky volného oleje tedy uvolňování základového oleje. Mechanismus rotace kuličky nebyl přímo pozorován, ale bylo pozorováno, že kulička měla významný vliv na redistribuci maziva. Vzhledem k tomu, že bylo mazivo aplikováno na klec a kuličky. Bylo jedinou možností dodávky maziva do dráhy vnitřního kroužku právě rotace kuličky.

6.2.1 Přínos práce

Jedním z přínosů je metodika, jelikož neexistuje moc publikací, které by využívaly stejný přístup měření, při kterém se dají hodnotit i místa kontaktu. Bylo jednoznačně ukázáno, že tento přístup produkuje určité poznatky. Jelikož se dá posoudit a hodnotit třeba hladovění. Díky použité metodě měření je možné vidět, jak velké jsou rezervoáry a kolik maziva je dosažitelného pro kontakt, což je informace, které před tím nikde publikována nebyla. Ačkoliv test se zastavováním má vypovídající hodnotu, tak je třeba rozvíjet měření například testy bez zastavování ložiska. Toho se dá docílit například použitím safírových kroužků. Přesto, že měření je nové dají se dosažené výsledky propojit s literaturou, která je pro danou problematiku hodně rozsáhlá. Na základě zjištěných skutečností se dají vydefinovat nové vědecké otázky a hypotézy, které mohou přispět k rozšíření poznatků o dané problematice v navazujících pracích.

7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla experimentálně zkoumána distribuce plastického maziva ve valivých ložiscích za pomoci fluorescenčního mikroskopu. Distribuce plastických maziv je poměrně zkoumaný problém, protože víme že souvisí s životností a efektivitou provozu. Navíc jsou plastická maziva komplexní látky, které vykazují v ložiscích složité chování. Jedná se o první měření tohoto typu, kdy všechny prvky ložisek jsou reálně se zbroušením vnějších kroužků, což umožnilo zkoumat i klece.

K realizaci experimentů bylo nutné upravit konstrukci experimentálního zařízení. Vycházející z dřívějších konstrukcí, která byla upravena pro adaptaci ke zvoleným komponentám. Následně bylo nutné zařízení odzkoušet a provést odladění pro přesné měření. Bylo potřeba použít ložiska s kosoúhlým stykem, které měly odbroušeny vnější kroužky, aby šly rychle rozebrat. Mezi měřené oblasti patří místo rezervoáru kontaktu a oblast před kontaktem. Pro vyhodnocení průměrné tloušťky filmu byl využit Matlab.

Hlavním přínosem je metoda měření, díky které je možné sledovat rozložení maziva i mimo kontakty oproti kapacitním metodám. V experimentech byly pozorovány stopy a tloušťky, které jsou ve shodě s teorií. Pro podmínky a délku trvání experimentů měla 15% náplň maziva podobnou výkonnost, jako 30% náplň. Při pozorování vlivu klecí na distribuci a číselné hodnoty vyšla polyamidová klece, jako nejlepší. Avšak ocelová a mosazná klec také zajišťovaly v řadě aspektů podobnou výkonnost, což znamená, že výsledky nebyly diametrálně odlišné. Z pozorování bylo patrné, že provoz ložiska byl v hladovějícím režimu a že ztrátové a doplňovací mechanismy byly poměrně slabé.

Pro rozšíření výsledků by se dal navrhnout dlouhý test, který by docílil fáze uvolňování základového oleje. Dále vyzkoušet vliv maziva, které vykazují dobrý a špatný průběh záběhové fáze. Také testovat při intenzivnějších podmínkách, aby bylo docíleno výraznějších ztrátových a doplňovacích mechanismů. Další možností je například navrhnout a vyzkoušet jiné konstrukce klecí například pomocí 3D tisku.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Hynek, J. (2023). Measurement of grease distribution using fluorescence microscopy.

Stav rukopisu: finalizován

Abstrkt

This paper deals with the issue of grease distribution in a rolling bearing. Grease lubricated ball bearing in this way often experience the problem of starvation, when the contact area is not sufficiently supplied with lubricant, which leads to bearing failure. In general, this is a very complex and comprehensive topic. Specifically, the description of the effect of selected parameters on the distribution of grease in the rolling bearing was solved. The evaluation took place on the contact surfaces of the inner and outer ring and bearing balls. The average film thickness in selected areas at the point of contact and in front of it were evaluated. The method for observation was fluorescence microscopy. The effects of the percentage filling of the bearing with grease, the speed, the material and the design of the cage on the distribution and distribution of the grease on the bearing surfaces are described in this paper. The result is information about the distribution of the grease on the raceways and balls of the bearing and their immediate surroundings. It was shown that the new experimental approach used makes it possible to evaluate the amount of grease available for bearing lubrication in a real configuration.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LUGT, Piet M. Grease lubrication in rolling bearings [online]. Chichester: John Wiley, 2013 [cit. 2023-05-26]. Tribology series. ISBN 978-111835391-2.
- [2] LUGT, PIET M., SLAVCO VELICKOV a JOHN H. TRIPP. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. Tribology Transactions [online]. 2009, 52(5), 581-590 [cit. 2023-05-26]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000902825713
- [3] CHATRA K R, Sathwik a Piet M. LUGT. The process of churning in a grease lubricated rolling bearing: Channeling and clearing. Tribology International [online]. 2021, 153 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2020.106661
- [4] CHATRA K R, Sathwik a Piet M. LUGT. Channeling behavior of lubricating greases in rolling bearings: Identification and characterization. Tribology International [online]. 2020, 143 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.106061
- [5] CHATRA, K.R. Sathwik, Jude A. OSARA a Piet M. LUGT. The lubrication mechanism behind the transition from churning to bleeding in grease lubricated bearings – Experimental characterization. Tribology International [online]. 2023, 183 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2023.108375
- [6] SATHWIK CHATRA, K.R., Jude A. OSARA a Piet M. LUGT. Impact of grease churning on grease leakage, oil bleeding and grease rheology. Tribology International [online]. 2022, 176 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2022.107926
- [7] CEN, Hui a Piet M. LUGT. Film thickness in a grease lubricated ball bearing. Tribology International [online]. 2019, 134, 26-35 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2019.01.032
- [8] CANN, P M E a A A LUBRECHT. Bearing performance limits with grease lubrication: the interaction of bearing design, operating conditions and grease properties. Journal of Physics D: Applied Physics [online]. 2007, 40(18), 5446-5451 [cit. 2023-05-26]. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/40/18/S05
- [9] Grease life in ball bearings: The effect of temperatures. Tribology and Lubrication Technology [online]. 2010, 2010, 66(10), 36-38+40-42+44 [cit. 2023-05-26]. ISSN 1545858X.

- [10] KOMORIYA, Tomonobu, Ryosuke ICHIMURA, Tsuyoshi KOCHI, Michitaka YOSHIHARA, Masataka SAKAI, Daming DONG a Yoshitsugu KIMURA. Service Life of Lubricating Grease in Ball Bearings (Part 1) Behavior of Grease and Its Base Oil in a Ball Bearing. Tribology Online [online]. 2021, 16(4), 236-245 [cit. 2023-05-26]. ISSN 1881-2198. Dostupné z: doi:10.2474/trol.16.236
- [11] VALENTA, Jakub. Vývoj metody pro hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Šperka Ph.D.
- [12] GURÁŇL, Radoslav, Lukáš HALAMAN, Jiří KOČAŘ a Michal VODEHNAL. Návrh testeru ložisek pro pozorování maziva. Brno, 2018. Technická zpráva. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Šperka Ph.D.
- [13] CHAKRABORTY, Sanchari. Fluorescence Microscopy: 5 Important Facts You Should Know. Lambdageeks [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://lambdageeks.com/fluorescence-microscopy/>
- [14] *BFS-U3-5IS5M-C USB 3.1 Blackfly® S, Monochrome Camera. Edmundoptics [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.eu/p/bfs-u3-5is5m-c-usb3-blackfly-s-monochrome-camera/37239/>*
- [15] *Mitutoyo. Shop.mitutoyo [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: Mitutoyo - M Plan APO 2X. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/378-801-6/datasheet.xhtml](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/378-801-6/datasheet.xhtml)*
- [16] ZHANG, Xingnan a Romeo GLOVNEA. Grease film thickness measurement in rolling bearing contacts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology [online]. 2021, 235(7), 1430-1439 [cit. 2023-05-26]. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1177/1350650120961278

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam použitých zkratk

CFD	Computer Fluid Dynamics
.tiff	tag image file format
.jpg	joint photographic experts group
PLA	Polylactic Acid
EHD	elastohydrodynamický

Seznam použitých symbolů

k	hodnota přepočtu intenzity světla na tloušťku filmu
t_{pod}	tloušťka podložky
I_{pr}	průměrná intenzita světla

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1 PRISMA diagram.....	14
Obr. 2.2 Graf závislosti teploty na čase a snímky s mazivem po 30 min, 55 min a 532 hod, tečky v grafu odpovídají 30 a 55 minutám (test nezačal v čase $t=0$) [2]	16
Obr. 2.3 Grafy závislosti teplot na čase se stejnými provozními parametry [2].....	17
Obr. 2.4 Grafy závislosti teploty v čase: první graf – dobrý typ maziva (LM2L); druhý graf – špatný typ maziva (LM3L) [3]	18
Obr. 2.5 Grafy meze toku maziva při záběhové fázi, jako funkce E' : vrchní graf – špatné mazivo; spodní graf – dobré mazivo (plné značky odpovídají záběhové fázi a prázdné uvolňování základového oleje z maziva) [3].....	19
Obr. 2.6 Graf závislosti teploty na čase pro mazivo A a B [1]	20
Obr. 2.7 Rozložení maziva na krytech ložiska: (A) během záběhové fáze; (B) po záběhové fázi; (1) dobré mazivo (LM2L); (5) špatné mazivo [5]	20
Obr. 2.8 Grafy úniku maziva v čase: (a) dobré mazivo (LM2L); (b) špatné mazivo (LM3L); plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje [6].....	21
Obr. 2.9 Grafy přilnavosti maziva k povrchu ložiska: (a) LM2L; (b) LM3L; (c) LM3C; (d) LCP 2.5 C; zelená – dobré mazivo; červená – špatné mazivo; plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje (čárkovaná čára je čára trendu) [6] ..	22
Obr. 2.10 Grafy porovnání měření kapacity úniku základového oleje a meze toku maziva: (a) LM2L; (b) LM3L; (c) LM3C; (d) LCP 2.5 C; zelená – dobré mazivo; červená – špatné mazivo; plné tečky – záběhová fáze; prázdné tečky – fáze uvolňování základového oleje (čárkovaná čára je čára trendu) [6]	23
Obr. 2.11 Doplnňovací a ztrátové mechanismy kontaktu [1]	24
Obr. 2.12 Schématické znázornění tlaku a tloušťky filmu v plně zaplaveném a hladovějícím kontaktu [1]	24
Obr. 2.13 Interferometrické snímky přibližování vstupního menisku Hertzově kontaktu se zvyšující se rychlostí (směr toku maziva je ze spodu nahoru) [1].....	25
Obr. 2.14 Grafy vývoje teploty, tloušťky filmu (h_g) a poměru tloušťky filmu versus tloušťky filmu vypočítané z viskozity základového oleje (h_{ff}) v čase při různých frekvencích otáčení při zatížení 513 N: (a)(b) PU/E; (c)(d) Li/M; (e)(f) LiC/PAO [7].....	27
Obr. 2.15 Grafy tloušťky filmu (h_g) a poměru tloušťky filmu versus tloušťky filmu vypočítané z viskozity základového oleje (h_{ff}) v čase při různém zatížení a s frekvencí otáčení 2 500 ot/min: (a)(b) PU/E; (c)(d) Li/M; (e)(f) LiC/PAO [7]	28

Obr. 2.16 Graf vlivu snižování zatížení na tloušťku filmu v hladovějícím režimu [8]	29
Obr. 2.17 Graf hladovějící tloušťky filmu v čase pro mazivo A, B a C [8].....	30
Obr. 2.18 Graf závislosti tloušťky filmu na rychlosti s rotací kuličky a bez rotace kuličky [8]	31
Obr. 2.19 Graf vlivu plastové klece na tloušťku filmu při rychlosti hladovění [8].....	31
Obr. 2.20 Rozmístění maziva v ložisku po záběhové fázi: (a) přední část vnějšího kroužku; (b) rameno vnějšího kroužku; (c) vnitřní povrch klece; (d) rameno vnitřního kroužku; (e) oběžná dráha [10]	32
Obr. 2.21 Rozložení maziva v ložisku s s těsněním: (a') přidané těsnění s mazivem; (b) rameno vnějšího kroužku; (c) vnitřní povrch klece; (d) rameno vnitřního kroužku; (e) oběžná dráha [10]	33
Obr. 4.1 Schéma postupu řešení.....	37
Obr. 4.2 Model testovacího zařízení z roku 2020 [11]	38
Obr. 4.3 Domek testovaného ložiska [11]	39
Obr. 4.4 Model testovacího zařízení z roku 2019 [12]	40
Obr. 4.5 Uložení testovaného ložiska (tester 2019) [12]	41
Obr. 4.6 Schéma principu fluorescenčního mikroskopu [13].....	42
Obr. 4.7 Použité ložiskové klece: (a) mosazná; (b) ocelová; (c) polyamidová	43
Obr. 4.8 (a) zbroušený vnější kroužek ložiska; (b) plastické mazivo na kleci a kuličkách ložiska	44
Obr. 4.9 Schéma kalibračního přípravku.....	45
Obr. 4.10 Rozebrané ložisko v přípravku a krabičce při pořizování snímků	46
Obr. 4.11 Oblasti vyhodnocení: (a) vnější kroužek; (b) vnitřní kroužek; (c) kulička (černá – oblast kontaktu, červená – oblast před kontaktem); šipky značí směr pohybu	47
Obr. 4.12 Vyřazené snímky: (a) vnější kroužek; (b) vnitřní kroužek; (c) kulička.....	48
Obr. 5.1 Testovací zařízení – otevřený stav.....	50
Obr. 5.2 Testovací zařízení – uzavřený stav	50
Obr. 5.3 Uložení testovaného ložiska	51
Obr. 5.4 Použitý vytištěný plastová díl	52
Obr. 5.5 (a) dráha vnějšího kroužku; (b) dráha vnitřního kroužku; (c) kulička; (d) pohled na snímanou oblast vnějšího kroužku; (e) pohled na snímanou oblast vnitřního kroužku; (f) pohled na snímanou oblast kuličky (šipky zobrazují směr odvalování kuliček po dráze a směr odvalování kuliček, stupnice určuje tloušťku vrstvy maziva (nm))	54

Obr. 5.6 Přesazení kontaktu na kuličky: červená oblast – stopa z kontaktu dráhy vnějšího kroužku; černá oblast – koncová stopa z dráhy vnitřního kroužku	54
Obr. 5.7 Snímky: vnějšího kroužku ložiska (a); vnitřního kroužku ložiska (b); kuličky ložiska (c) v neomezeném rozsahu tloušťky vrstvy maziva s maximálními hodnotami....	55
Obr. 5.8 Snímky třinácti míst dráhy vnějšího kroužku a tomu odpovídající kuličky	56
Obr. 5.9 Snímky třinácti míst drah vnitřního kroužku ložiska.....	57
Obr. 5.10 Grafy průměrné tloušťky filmu v časech rozebrání pro kontaktní oblast pro tři procentuální náplně ložiska mazivem u vnějšího kroužku (vlevo) a kuliček (vpravo).....	58
Obr. 5.11 Grafy průměrné tloušťky filmu v časech rozebrání na valivé dráze pro tři procentuální náplně ložiska mazivem u vnějšího kroužku (vlevo) a kuliček (vpravo).....	58
Obr. 5.12 Snímky stejného místa dráhy na vnějším kroužku pro tři náplně maziva a čtyři časy rozebrání.....	59
Obr. 5.13 Snímky stejné kuličky pro tři náplně a čtyři časy rozebrání	60
Obr. 5.14 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři různé frekvence otáčení na vnějším a vnitřním kroužku ložiska a na kuličkách v oblasti kontaktu (vlevo) a v oblasti před kontaktem (vpravo)	61
Obr. 5.15 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři frekvence otáčení v oblasti před kontaktem na vnějším kroužku ložiska pro test, kdy bylo ložisko rozebráno po testu a během testu .	62
Obr. 5.16 Snímky stejného místa dráhy vnějšího kroužku (vlevo), vnitřního kroužku (uprostřed) a kuličky (vpravo) pro tři frekvence otáčení	63
Obr. 5.17 Snímky dráhy vnějšího kroužku pro testy při rozebrání po zastavení ložiska (vlevo) a při rozebrání ložiska za chodu (vpravo).....	64
Obr. 5.18 Graf průměrné tloušťky filmu pro tři různé klece ložiska na vnějším kroužku, vnitřním kroužku a kuličkách ložiska pro oblast kontaktu (vlevo) a oblast před kontaktem (vpravo)	65
Obr. 5.19 Rozložení maziva na mosazné kleci (a),(d), ocelové kleci (b),(e), polyamidové kleci (c),(f)	66
Obr. 5.20 Snímky Rozložení maziva na mosazné, ocelové a plastové kleci na vnějším kroužku (vlevo), vnitřním kroužku (uprostřed) a kuličkách (vpravo).....	67
Obr. 5.21 Graf průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a kuličkách ložiska pro základní test, test vlivu základového oleje a vlivu teploty.....	68
Obr. 5.22 Graf průměrné tloušťky filmu na dráze vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a kuličkách ložiska pro základní a dlouhý test v oblasti kontaktu a oblasti před kontaktem	69
Obr. 5.23 Průběh teploty v čase u dlouhého testu.....	69

Obr. 5.24 Snímky rozložení maziva na vnějším kroužku (vlevo), vnitřním kroužku (uprostřed) a kuličkách ložiska (vpravo) pro základní test, teste se základovým olejem, test se změnou teploty a dlouhý test	70
Obr. 6.1 Detailní snímky dráhy vnějšího kroužku	73
Obr. 6.2 Detailní snímky kuliček	73
Obr. 6.3 Natočení kuliček s viditelnými stopami maziva bez omezení rozsahu	79
Obr. 6.4 Graf procentuálních rozdílů mezi predikcí a experimentem H1	81

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Sady testovacích podmínek	43
Tab. 5.1 Seznam použitých komponent	49