



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

STUDIUM CHOVÁNÍ PLASTICKÉHO MAZIVA V HLADOVĚJÍCÍM ELASTOHYDRODYNAMICKY MAZANÉM KONTAKTU

STUDY OF STARVATION IN A GREASE-LUBRICATED ELASTOHYDRODYNAMIC CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ KUŇÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR SVOBODA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Kuňák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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:

Studium chování plastického maziva v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném kontaktu

v anglickém jazyce:

Study of starvation in a grease-lubricated elastohydrodynamic contact

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je analýza chování plastického maziva v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném kontaktu užitím tribologických simulátorů.

Cíle diplomové práce:

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

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

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace; Projekt: GAČR

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

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

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

Seznam odborné literatury:

LUGT, Piet M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. Tribology Transactions. 2009-06-30, vol. 52, issue 4, s. 470-480.

VENNER, C.H., M.T. VAN ZOELLEN a P.M. LUGT. Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. Tribology International. 2012, vol. 47, s. 175-187.

LUGT, PIET M., SLAVCO VELICKOV a JOHN H. TRIPP. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. Tribology Transactions. 2009-09-08, vol. 52, issue 5, s. 581-590.

CANN, P. M. Starved Grease Lubrication of Rolling Contacts. Tribology Transactions. 1999, vol. 42, issue 4, s. 867-873.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je experimentální studií plastických maziv v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném (EHD) kontaktu. Tloušťka mazacího filmu je měřena pomocí experimentálního tribometru ložiskového kontaktu s využitím optické interferometrie a vysokorychlostní kamery. Experiment je zaměřen na studium vlivu počtu valivých elementů a porovnání výsledků získaných na jednokontaktním tribometru a na modelu reálného ložiska.

KLÍČOVÁ SLOVA

plastické mazivo, hladovění, elastohydrodynamický kontakt

ABSTRAKT

This diploma thesis is an experimental study of grease lubrication in a starved elastohydrodynamic lubricated (EHL) contact. Lubricating film thickness is measured with tribological experimental device ball-on-disc using optical interferometry and high speed camera. The experiment is aimed at a comparison of results acquired by ball-on-disc device and full scale axial bearing. In addition, this paper also investigates the influence of number of the rolling elements (overrolling time) on the resulting film thickness.

KEYWORDS

grease, starvation, elastohydrodynamic contact

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

KUŇÁK, J. *Studium chování plastického maziva v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném kontaktu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Studium chování plastického maziva v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném kontaktu vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Svobody, Ph.D. a uvedl v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 23. května 2014

.....
vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení, Ing. Davidu Košťálovi, který mi pomáhal při experimentálních studiích a vyhodnocování výsledků a všem, kteří se podíleli na zdárném splnění podmínek studia a realizace diplomové práce.

OBSAH

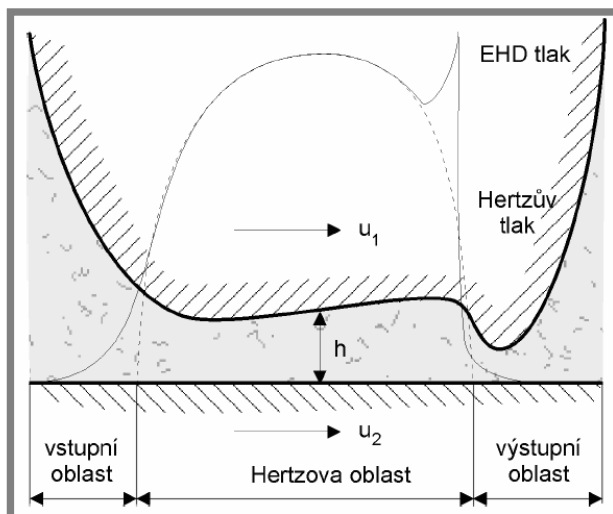
1	ÚVOD	12
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Hladovějící režim mazání	14
2.2	Experimentální měření hladovějícího kontaktu	14
2.3	Postupná degradace tloušťky filmu v kontaktu	18
2.4	Vliv provozních parametrů na tloušťku filmu v kontaktu	19
2.4.1	Vliv rychlosti	19
2.4.2	Vliv teploty	20
2.4.3	Vliv periodického zatěžování kontaktu	21
2.5	Vliv parametrů ložiska na centrální tloušťku filmu v kontaktu	22
2.5.1	Vliv geometrie valivých elementů	22
2.5.2	Efekt spinu kuličky	22
2.5.3	Vliv konstrukce klece ložiska	23
2.6	Vliv obsahu zhušťovadla	24
2.7	Chaotické chování tloušťky filmu plastických maziv	26
2.8	Výpočet tloušťky filmu v EHD mazaném kontaktu	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	31
3.1	Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	31
3.2	Cíl diplomové práce	32
4	MATERIÁL A METODY	33
4.1	Optická interferometrie	33
4.2	Měřicí aparatura	33
4.3	Metodika a podmínky měření	34
5	VÝSLEDKY	36
5.1	Vstupní měření s oleji	36
5.2	Vstupní měření s plastickým mazivem	38
5.3	Experimenty na jednokontaktním simulátoru kontaktu	43
5.4	Experimenty na modelu reálného axiálního ložiska	46
6	DISKUZE	51
7	ZÁVĚR	56
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58

1 ÚVOD

Tribologie je vědní obor zabývající se studiem tření, opotřebení a mazání s cílem využívat získané poznatky při řešení technologických problémů. Tato práce se zabývá právě problematikou mazání, konkrétně mazání plastickými mazivy za režimu hladovění (nedostatku maziva v kontaktu) v elastohydrodynamickém (EHD) kontaktu.

Ve valivém ložisku vždy dochází k mírnému prokluzu mezi valivými elementy a kroužkem ložiska. Valivý element je pomocí maziva oddělen od ložiskového kroužku, což výrazně zmenšuje tlak, tření, opotřebení a životnost ložiska. Maziva nejsou limitována jen na minerální oleje, ale používají se také například pevná nebo plastická maziva. Právě plastická maziva se používají ve více než 80% všech ložisek [1].

Hlavní nevýhodou minerálních olejů je potřeba reserváru nebo olejové lázně pro neustálé doplňování maziva do kontaktu. To sebou nese potřebu těsnění a údržby a většinou také větší spotřebu energie (kvůli vyššímu tření). Naproti tomu hlavní výhodou použití plastického maziva je jeho jednoduché použití (nebude snadno vytékat z ložiska díky jeho konzistenci), dobré těsnicí účinky, ochrana proti korozi, malé tření [2]. Použití plastických maziv proto představuje elegantnější řešení. Plastické mazivo se skládá ze základového oleje, zahušťovadla a přísad, a projevuje silnou ne-newtonskou reologii [1]. Pro zjištění tloušťky filmu plastického maziva u EHD kontaktu, často nelze použít stejný výpočtový model jako u kapalinových maziv.



Obr.1 Schéma elastohydrodynamicky mazaného kontaktu [3]

EHD je typ mazání, který se objevuje v mazaných nekomfortních kontaktech, kde se generují vysoké tlaky, při kterých vznikají elastické deformace mazaného povrchu. Schéma elastohydrodynamicky mazaného kontaktu je na Obr.1 [3]. Tento režim převládá ve většině valivých ložisek. [2]

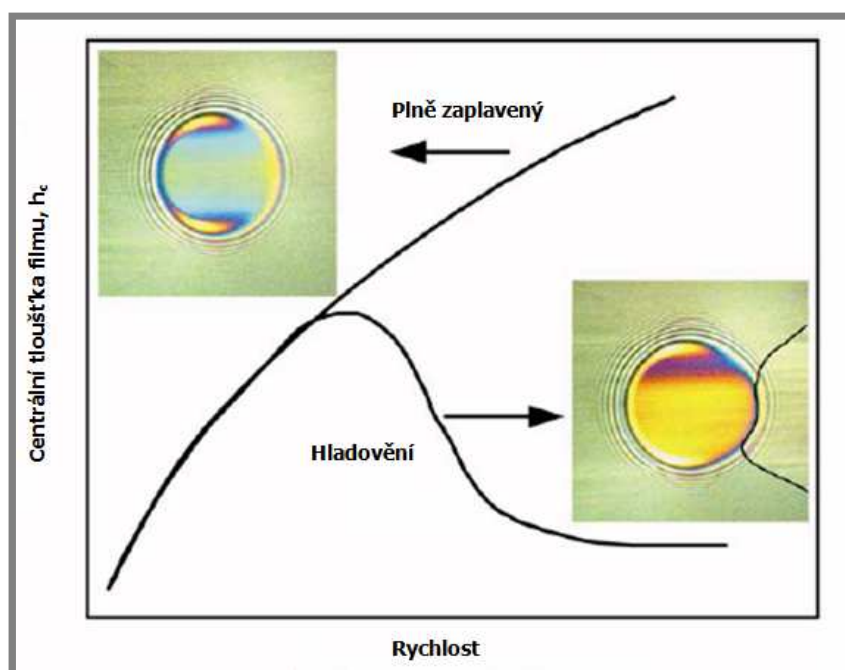
Za posledních 50 let se výzkum intenzivně věnoval problematice chování tloušťky filmu v EHD kontaktu. Bylo dosaženo vynikající korelace mezi experimenty a teoretickými výpočty, díky čemuž je dnes možno s velkou přesností použít příručku pravidel pro předvídání tloušťky filmu maziva [4]. Tento model je však omezen pouze na ustálený stav, hladký povrch a newtonské kapaliny. Proto

dalším krokem je implementace dynamických efektů, povrchové textury a newtonských kapalin. Nicméně jedny z nejnáročnějších problémů jsou spojeny s mazáním plastickými mazivy, protože v sobě kombinují hladovějící mazání a velmi komplexní reologii maziva.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Hladovějící režim mazání

Jestli-že vstup do kontaktu není plně zaplaven, jsou vytvořeny dvě vrstvy maziva na povrchu obou kontaktních těles. Spojením těchto dvou vrstev maziva v oblasti vstupu do kontaktu vznikne meniskus. Režim hladovění je charakteristický polohou menisku blízko Hertzově oblasti a projevuje se výrazně nižší tloušťkou mazacího filmu v kontaktu, než v případě plně zaplaveného režimu [2]. Na Obr.2 je vynesena typická křivka závislosti tloušťky filmu na rychlosti pro plně zaplavený i hladovějící režim. Také jsou zde vidět obrázky pořízené pomocí optické interferometrie pro oba režimy. Na obrázku plně zaplaveného režimu můžeme pozorovat tvar podobný podkově s konstantní tloušťkou centrálního filmu a zúžení na stranách a vzadu. V plně zaplaveném režimu se tloušťka filmu zvětšuje s rostoucí rychlostí. Hladovění, které se objeví při určité kritické rychlosti, však zapříčiní mnohem menší tloušťku filmu [5].

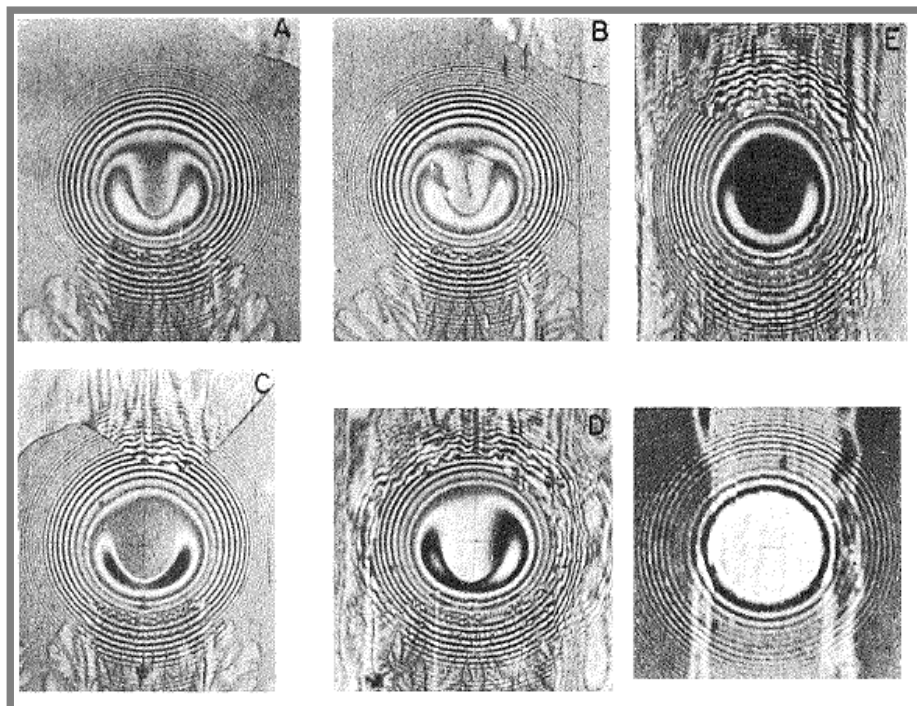


Obr.2 Typická EHD závislost tloušťky filmu na rychlosti pro plně zaplavený a hladovějící režim. Obrázky z optické interferometrie pro oba režimy. Vtok maziva je vpravo [5]

2.2 Experimentální měření hladovějícího kontaktu

Poprvé se problematikou hladovění EHD kontaktu zabývali roku 1971 Wedeven a Cameron [6]. Postupným snižováním maziva (oleje) do kontaktu bylo docíleno hladovějícího režimu. Vizualizace projevu hladovění z tohoto experimentu jsou zobrazeny na Obr.3. Na Obr.3a je vidět, že počáteční meniskus je poměrně hodně vzdálen od středu kontaktu (Hertzově oblasti) a představuje proto tzv. zcela zaplavený režim mazání. Na Obr.3b je již patrné postupné přibližování menisku k Hertzově oblasti a snižování centrální tloušťky mazacího filmu. V režimu hladovění je centrální tloušťka mazacího filmu funkcí vzdálenosti vstupního menisku od Hertzové oblasti.

Výsledky této studie ukazují, že počátky hladovění jsou doprovázeny snižováním tlaku v Hertzově oblasti a centrální tloušťky mazacího filmu. V případě olejových maziv byla tedy potvrzena téměř lineární závislost mezi polohou menisku a tloušťkou filmu. Poloha menisku je navíc měřitelná snadněji než přímé měření tloušťky filmu pomocí interferometrie.

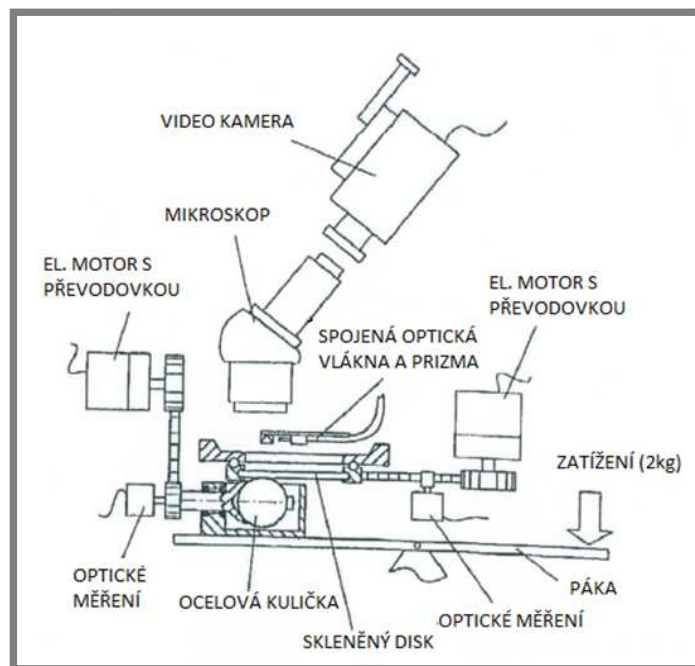


Obr.3 Mikrosnímky vývoje hladovějícího mazání [6]

Na tuto práci navázali, Rasteger a Winer [7], kteří provedli podobná měření, ovšem již pro plastické mazivo. Změřili tloušťku filmu EHD hladovějícího kontaktu pro sérii plastických maziv a zjistili, že tloušťka filmu je výrazně nižší než při plně zaplaveném režimu a dosahuje hodnot v rozmezí od 140 nm do 80 nm. Přičemž 80 nm byla hraniční hodnota tehdejších používaných technik měření, takže skutečná hodnota byla pravděpodobně mnohem menší.

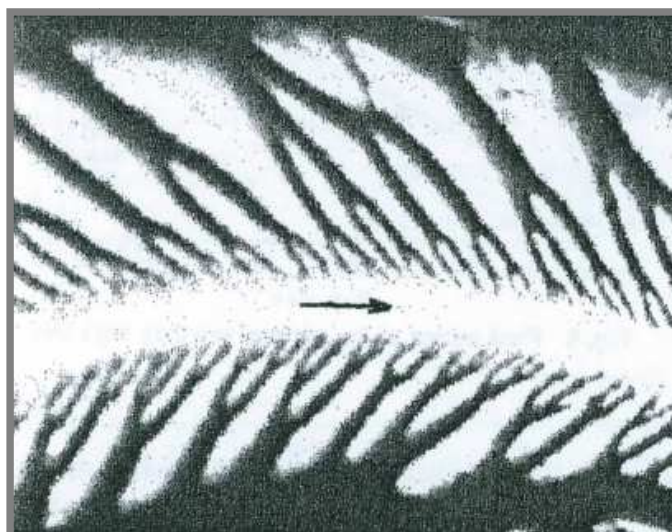
Pozdější měření provedené přesnějšími metodami již naměřilo tloušťku filmu 20-40 nm [8]. Mimo jiné bylo v této práci zjištěno, že se tloušťka filmu v kontaktu skládá ze dvou fází: zbytkové pevné vrstvy, která udržuje separaci a klasické hydrodynamické složky pravděpodobně ze základového oleje.

Jednu z dalších studií zabývajících se plastickými mazivy vypracoval Åström [9] roku 1993. Provedl experiment, ve kterém již bylo použito zařízení s konstrukcí „ball-on-disk“, tedy kontakt kuličky se skleněným diskem. Toto zařízení je zobrazeno na Obr.4. Pro měření byla opět využita metoda optické interferometrie. Místo běžného měření tloušťky filmu v kontaktu, zde byl pozorován tok maziva kolem kontaktu.



Obr.4 Zařízení kontaktu kuličky s diskem doplněného mikroskopem a kamerou [9]

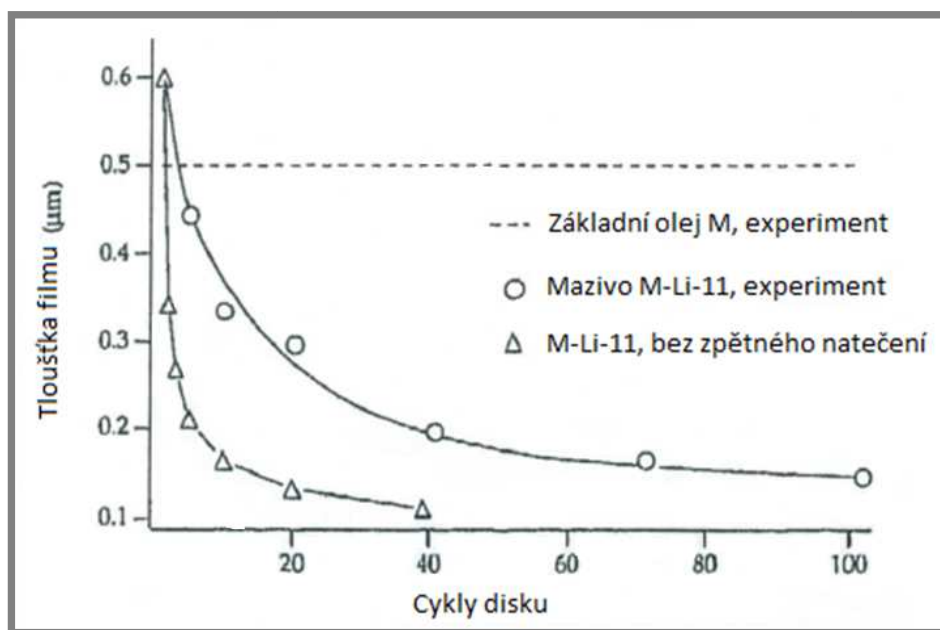
Åström [9] si všiml, že plastické mazivo na vstupu v plně zaplaveném kontaktu je rozděleno po první otáčce valivého elementu na dvě pásma, která jsou vytlačena daleko od kontaktní oblasti. V praxi tyto dvě pásma fungují jako těsnění ložiska před nečistotami a vodou. V oblasti vstupní zóny, kde se rozchází mezera mezi kuličkou a skleněným diskem mazivo kavituje. Kavitační vzor ve tvaru stromu na Obr.5. U mazacích olejů se větve mimo trať rozprostírou a mizí, ale u plastických maziv si zachovávají svůj tvar.



Obr.5 Kavitační vzor vytvořený na výstupu u plně zaplaveného kontaktu [9]

Åström [9] zkoumal také vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu a jeho výsledky jsou znázorněny na Obr.6. Je zde vidět, že se zvyšujícím se počtem otáček

disku, klesá tloušťka filmu až na kritickou hodnotu, kdy hrozí poškození ložiska. Tato degradace tloušťky filmu je hlavním problémem plastických maziv, protože k ní dochází mnohem dříve, než skončí životnost ložiska. Rychlost degradace maziva je zásadně ovlivněna mechanismem samovolné obnovy maziva do kontaktu (tzv. Replenishment). Srovnání vypočtené tloušťky filmu (bez uvažování samovolného doplňování maziva) s naměřeným poklesem tloušťky filmu Åström dokázal, že opravdu dochází k některému ze způsobů samovolného doplňování maziva do kontaktu. Toto samovolné doplňování odůvodnil vytékáním základového oleje z rezervoárů plastického maziva, které byly kuličkou vytlačeny na obě strany dráhy kontaktu.



Obr.6 Centrální tloušťka filmu mezi kuličkou a diskem [9]

V následujících letech byla vypracována řada vědeckých prací, které měly za cíl přesně určit mechanismy samovolného doplňování maziva do kontaktu a vytvoření numerického modelu pro predikování jejich chování, v závislosti na různých provozních parametrech, protože dosavadní porozumění mechanismů plastických maziv bylo velmi nedostatečné. Běžné užívané mechanismy pro formování filmu a obnovy plastického maziva ve stopě kontaktu jsou [10]:

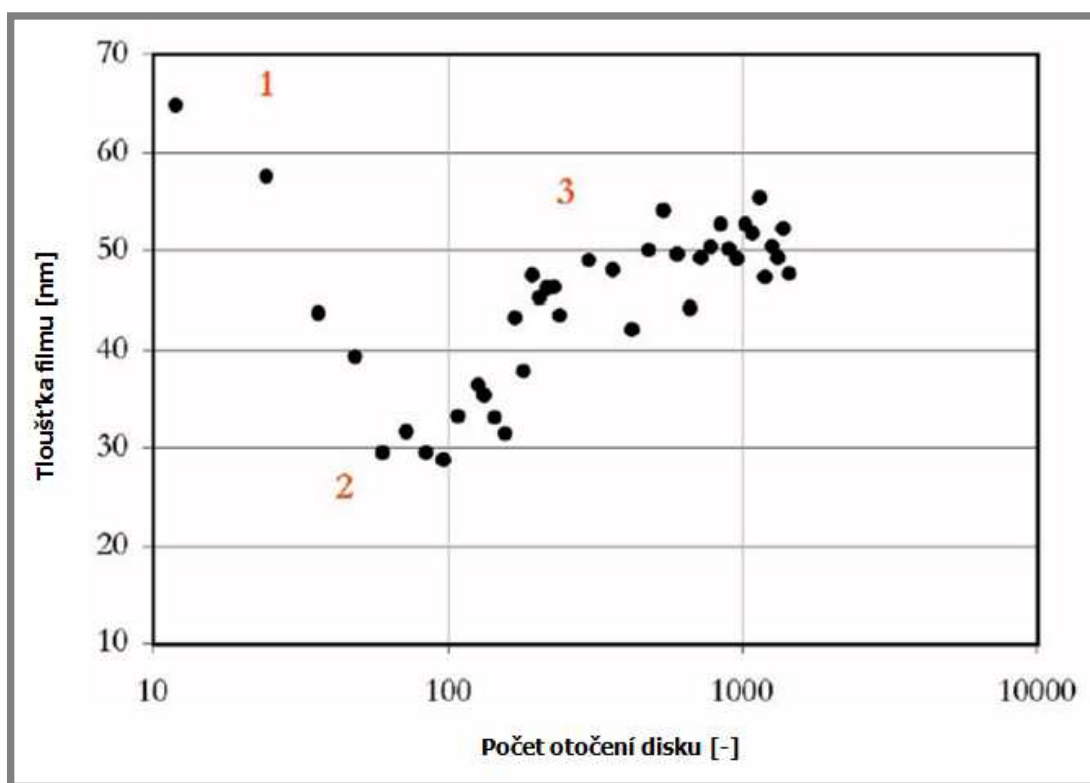
1. Mazací vrstva filmu se skládá z obou komponent, zhušťovadla i základového oleje.
2. Plastické mazivo funguje jako zásobník oleje, který vytéká do zóny kontaktu a udržuje tak mazací vrstvu v kontaktu.
3. V průběhu prvních několika hodin je mazací film tvořen tenkou vrstvou opotřebovaného plastického maziva

Důkazy podporující tyto teorie však byly dosud nedostačující. [10] Pokud není použito externí doplňování maziva, je mazivo rychle odtlačováno na strany tratě kontaktu a tím je zajištěno hladovění na straně vtoku maziva do kontaktu, což vyústí

ke značnému snížení tloušťky filmu, a to až pod limitní hodnoty tehdejších technik měření pomocí interferometrie a je tedy velmi obtížné ji studovat.

2.3 Postupná degradace tloušťky filmu v kontaktu

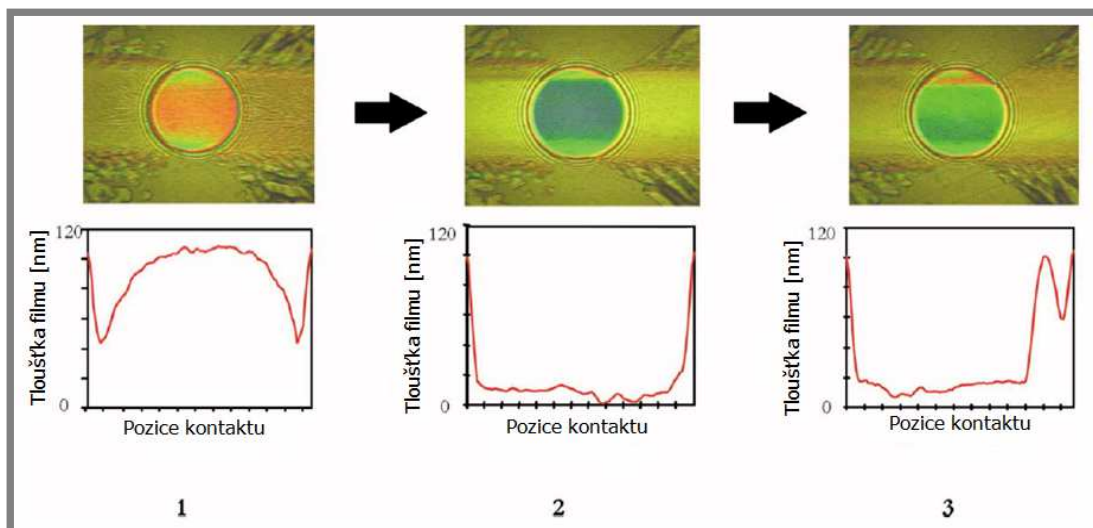
Díky rozvoji experimentálních technik a obzvláště optické interferometrie, bylo jednou z novějších studií [5] Åströmovo měření [9] zopakováno a zpřesněno. Bylo zjištěno, že plastická maziva v hladovějícím EHD kontaktu často vykazují snižující se a poté opět zvyšující se tloušťku filmu. Tento jev ukázán na Obr.7, který představuje postupnou degradaci centrální tloušťky filmu, tedy tloušťku filmu ve vztahu k počtu otočení disku (ujeté dráhy kontaktu).



Obr.7 Pokles a obnova tloušťky filmu v kontaktu mazaném plastickými mazivy [5]

S tímto grafem koresponduje Obr.8, kde jsou obrázky z interferometrie a profil povrchu. V první fázi má mazací film klasický EHD tvar s nejsilnějším filmem uprostřed kontaktu. Avšak jak test pokračuje, zmenšuje se tloušťka filmu (fáze 2), jak je plastické mazivo stále více vytlačováno z dráhy kontaktu. První samovolné doplňování maziva do kontaktu se objevuje na stranách kontaktu, a to se projevuje jako lokální zvýšení tloušťky filmu.

V některých případech může být efekt samovolné obnovy mazacího filmu tak výrazný, že se tloušťka filmu začne opět zvyšovat (fáze 3). Tento opětovný nárůst tloušťky vrstvy maziva je nejčastěji spojován se zvýšenou teplotou, která výrazně pomáhá samovolné obnově mazacího filmu.



Obr.8 Obrázky kontaktů mazaných plastickým mazivem z optické interferometrie a profily tloušťky filmu [5]

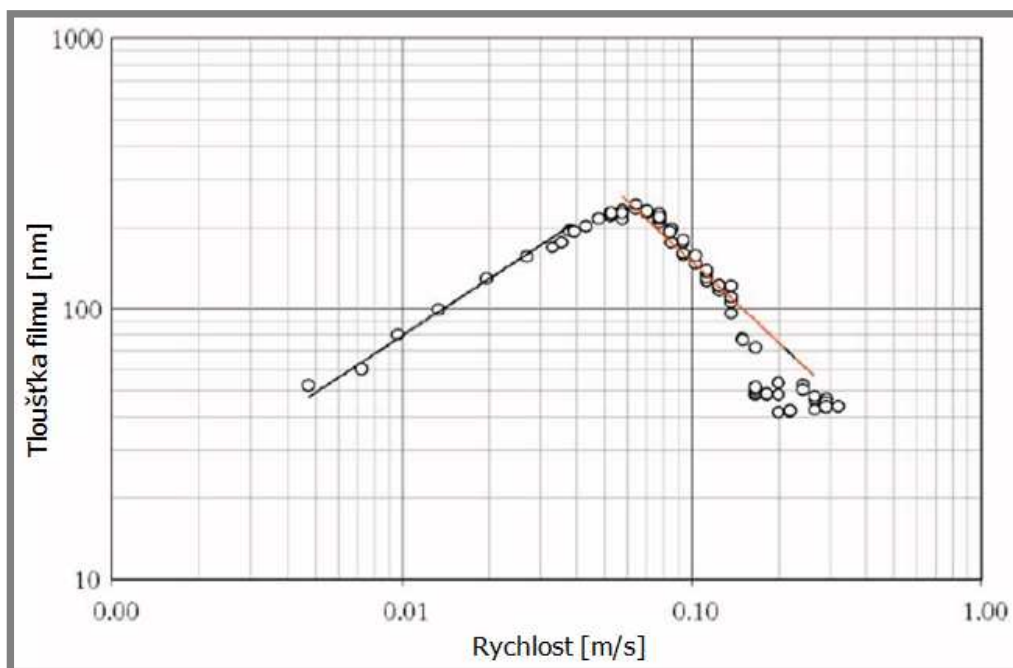
2.4 Vliv provozních parametrů na tloušťku filmu v kontaktu

2.4

2.4.1 Vliv rychlosti

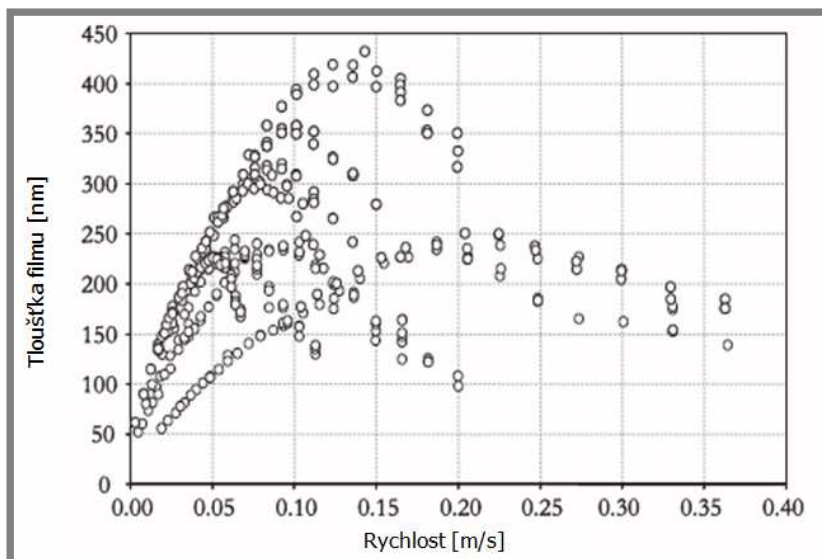
2.4.1

Jedním z parametrů nejvíce ovlivňujících tloušťku filmu je rychlost. Obr.9 ukazuje vývoj tloušťky filmu jako funkci rychlosti (tzv. křivka hladovění). Při nižších rychlostech se tloušťka filmu zvětšuje s rostoucí rychlostí (plně zaplavený režim). Při vyšších rychlostech se objevuje hladovění a tloušťka filmu se začíná zmenšovat s rostoucí rychlostí. Rychlost, při které začíná kontakt hladovět, je označena jako bod hladovění [5].



Obr.9 Křivka hladovění znázorňující přechod z plně zaplaveného do hladovějícího režimu [5]

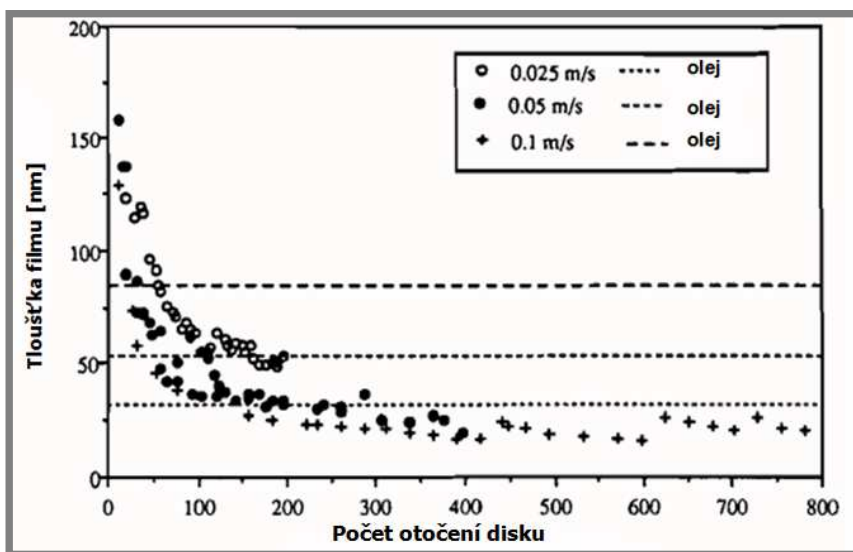
Například Cann [11] studovala vztah mezi tloušťkou filmu a vlastnostmi maziva, přičemž se měnily 4 parametry: objem oleje, rychlost, zatížení a viskozita. Změřená tloušťka filmu jako funkce rychlosti pro různě nastavené parametry je vykreslena na Obr.10. Tento graf jasně ukazuje širokou škálu rychlostí hladovění a tloušťky filmů pro danou rychlost.



Obr.10 Tloušťka filmu jako funkce rychlosti pro různě nastavené parametry kontaktu [11]

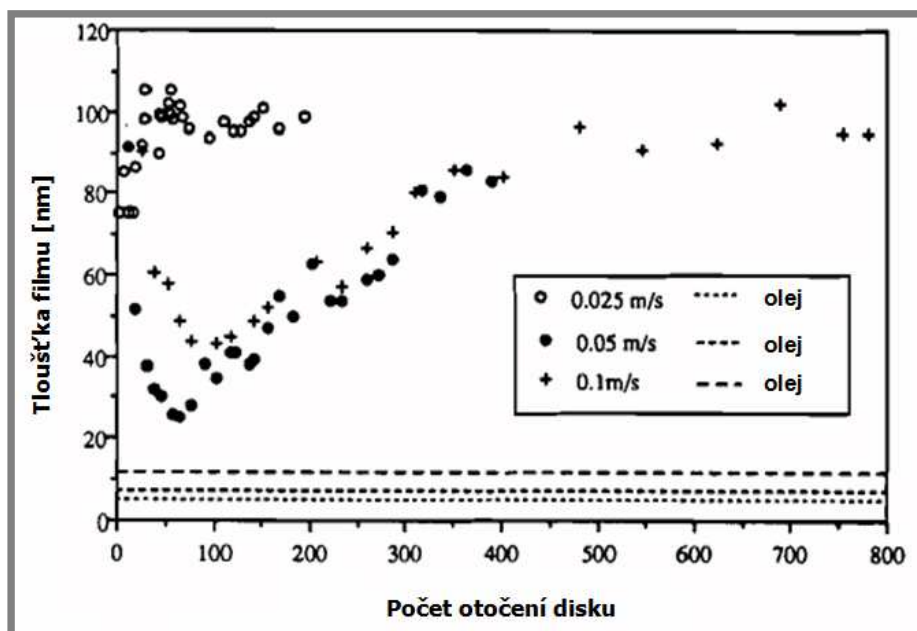
2.4.2 Vliv teploty

Teplotní vliv je velmi důležitým faktorem ovlivňujícím nejen mechanismus obnovy maziva v kontaktu, ale i celkovou životnost ložiska. Životnost plastického maziva se musí specifikovat pro danou teplotu, protože je na ní silně závislá. Zkoumání vlivu různých provozních podmínek (teploty a rychlosti) na tloušťku filmu v hladovějícím EHD kontaktu mazaném plastickými mazivy se věnovala Cann [12]. Graf na Obr.11 ukazuje tloušťku filmu v závislosti na počtu otáček disku při teplotě 20 °C.



Obr.11 Výsledky tloušťka filmu pro plastické mazivo i olej při 20 °C [12]

Hladovění kontaktu nastává kolem 150 otočení disku, kde nastává stabilizace hladovění a tloušťka filmu dále klesá jen mírně. Výsledky na Obr.12 při teplotě 80 °C jasně dokazují efekt zvýšení samovolné obnovy maziva v kontaktu při zvýšené teplotě. Ukázalo se tedy, že při vyšší teplotě (80 °C) je velmi obtížné docílit hladovějícího režimu při nízkých rychlostech.

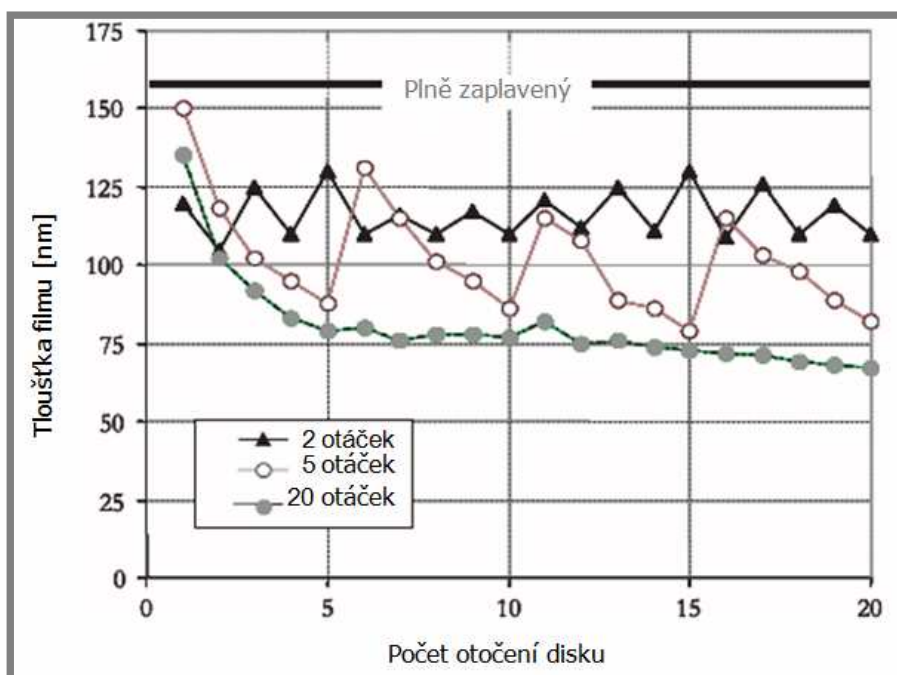


Obr.12 Výsledky tloušťky filmu pro plastické mazivo i olej při 80 °C [12]

2.4.3 Vliv periodického zatěžování kontaktu

2.4.3

Cann se ve své práci [11] také věnovala vlivu periodického zatěžování na tloušťku filmu v hladovějícím režimu. Výsledky jeho měření jsou ukázány na Obr.13.



Obr.13 Efekt periodického zatěžování na tloušťku filmu v kontaktu [11]

Jsou zde ukázány tři různé testy, kde je zatížení periodicky odlehčeno po 2, 5 a 20 otočení disku.

Po opětovném zatížení se tloušťka filmu ve všech případech postupně snižuje s rostoucím počtem otočení disku. Rozdílné periody zatěžování vykazují rozdílné průměrné tloušťky filmu.

Ačkoliv se dynamické zatěžování může považovat za nahodilý děj, v případě radiálně zatíženého ložiska se tak děje každou otáčku ložiska. Je jasné, že efektivnost periodického zatěžování záleží na jeho četnosti, vzdálenosti od kontaktu a viskozitě dostupného maziva.

2.5 Vliv parametrů ložiska na centrální tloušťku filmu v kontaktu

Parametry ložiska, které mohou ovlivnit chování tloušťky filmu v kontaktu, zahrnují velikost a typ valivého elementu, konstrukce klece a také velikost vůle mezi klecí a valivým elementem.

Velikost ložiska určuje vzdálenost mezi mazivem na okraji dráhy kontaktu a středem kontaktu a tím i ovlivňuje výslednou tloušťku maziva. S větší velikostí ložiska se zvětšuje i tato vzdálenost, která negativně ovlivňuje samovolnou obnovu maziva v kontaktu [11]. Větší ložiska budou mít tedy povolenou menší maximální rychlost než ložiska menších rozměrů.

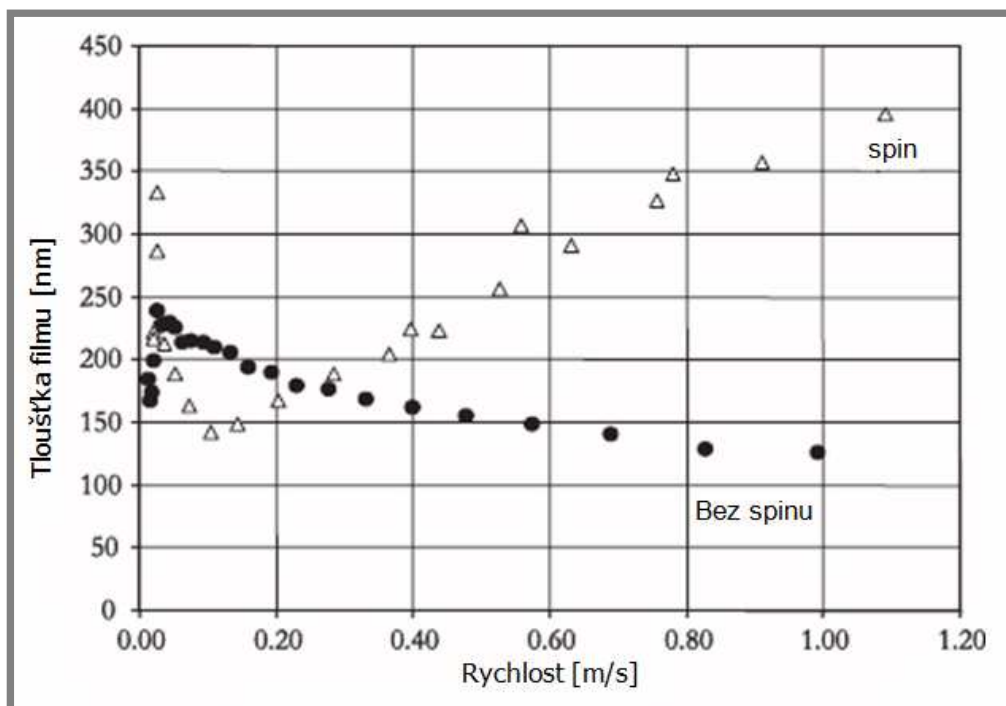
2.5.1 Vliv geometrie valivých elementů

Typ ložiska se určuje podle geometrie valivých elementů. Soudečkové, jehlové a kuželíkové valivé elementy mají velmi podlouhlou oblast kontaktu. Aby mohlo v případě těchto typů valivých elementů dojít k samovolné obnově maziva v kontaktu, musí mazivo překonat větší vzdálenost [11]. Výsledkem je nižší vrstva filmu v kontaktu. Na druhou stranu kuličkové valivé elementy mají jen mírně podlouhlý nebo dokonce kruhový kontakt, který je příznivější pro samovolnou obnovu mazacího filmu.

2.5.2 Efekt spinu kuličky

Kuličkové valivé elementy mohou také provádět rotaci kolem osy kolmé k mazanému povrchu, takzvaný spin. Spinový pohyb způsobuje menší posunutí dráhy kontaktu a poskytuje podstatný přísun maziva do kontaktu.

Na Obr.14 jsou výsledky dvou testů [11] měřených se spinem a bez spinu kuličky. V případě měření provedeného bez spinu kuličky se v kontaktu objevuje vážné hladovění. Spinový pohyb pomáhá vnášet mazivo (olej i zhušťovadlo) zpět do kontaktu [11].

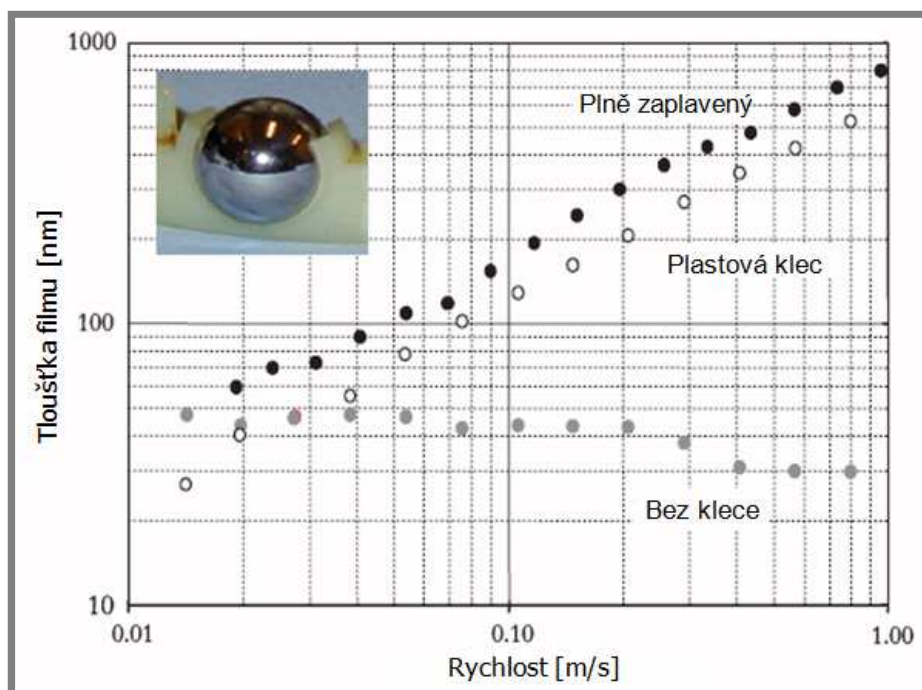


Obr.14 Efekt spinu kuličky na tloušťku filmu plastického maziva v kontaktu [11]

2.5.3 Vliv konstrukce klece ložiska

2.5.3

Konstrukce klece má také vliv na redistribuci maziva uvnitř ložiska; tento vliv může být jak prospěšný tak i škodlivý. V nejhorším případě klec funguje jako stěrač: odstraňuje mazivo z již vyčerpané dráhy kontaktu. V nejlepším případě pak klec redistribuuje mazivo uložené po stranách zpět do dráhy kontaktu. Experimentální měření tloušťky filmu na Obr.15 ukázalo, že klec s malou vůlí poskytuje nejefektivnější redistribuci maziva.

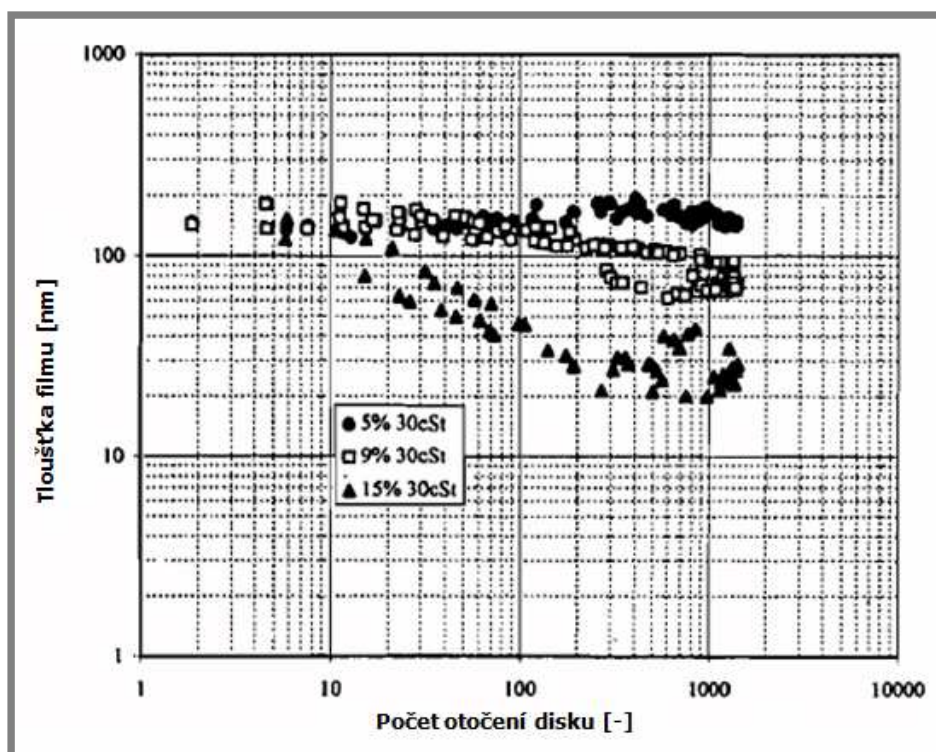


Obr.15 Efekt klece na rychlost hladování plastického maziva [11]

Je-li vůle mezi klecí a kuličkou příliš malá, je mazivo z dráhy kontaktu klecí stíráno a kontakt hladový [13]. Je také třeba zvážit volbu materiálu klece ložiska. Kovová klec je potencionálním zdrojem opotřebovaných částic, které se mohou chovat jako katalyzátor pro degradaci a oxidaci plastického maziva [14]. Toto předčasné zestárnutí maziva může vyústit ve snížení schopnosti samovolné obnovy maziva v kontaktu.

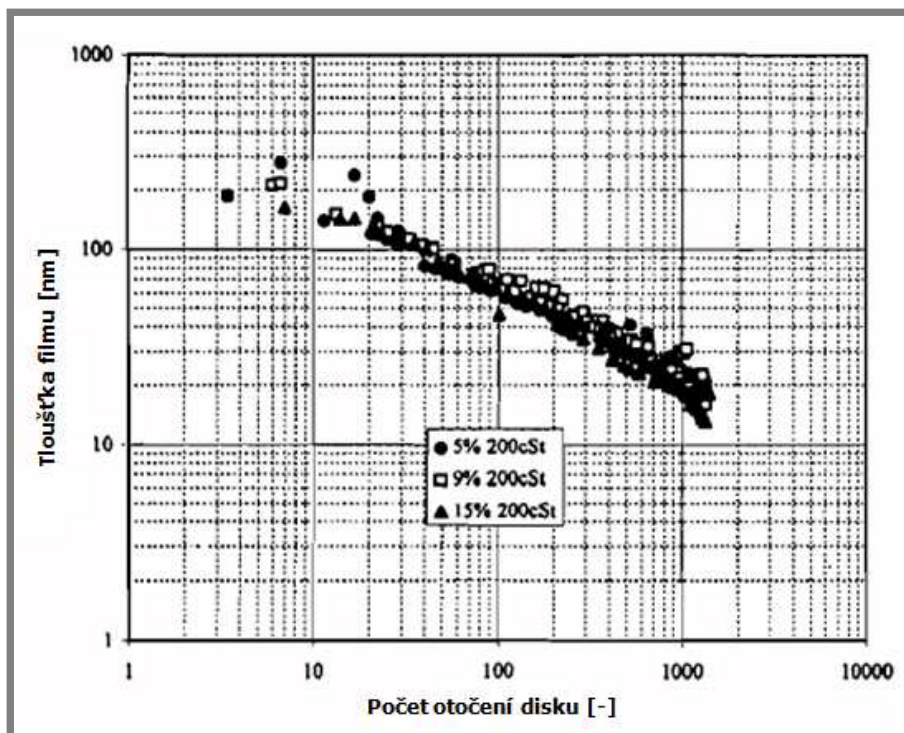
2.6 Vliv obsahu zhušťovačů

Mechanismus obnovy maziva v kontaktu je ovlivněn nejen provozními podmínkami jako teplota nebo rychlost, ale také vlastnostmi samotného maziva. Pro viskozitu plastického maziva, která především ovlivňuje obnovu maziva v kontaktu, je rozhodující obsah zhušťovačů. Čím víc zhušťovačů, tím větší viskozita. Zhodnocení vlivu viskozity se zabývala Cann ve svém článku [12], kde srovnávala dvě maziva (30 cSt, 200 cSt) s různým obsahem zhušťovačů. Výsledky experimentu na Obr.16 pro 5 % obsah tužidla jsou velmi podobné výsledkům naměřených pro plně zaplavený kontakt. To indukují, že viskozita plastického maziva je dostatečně nízká k tomu, aby docházelo k samovolnému doplňování maziva do dráhy kontaktu. Jakmile se však obsah tužidla zvýší, začíná kontakt hladovět mnohem víc.



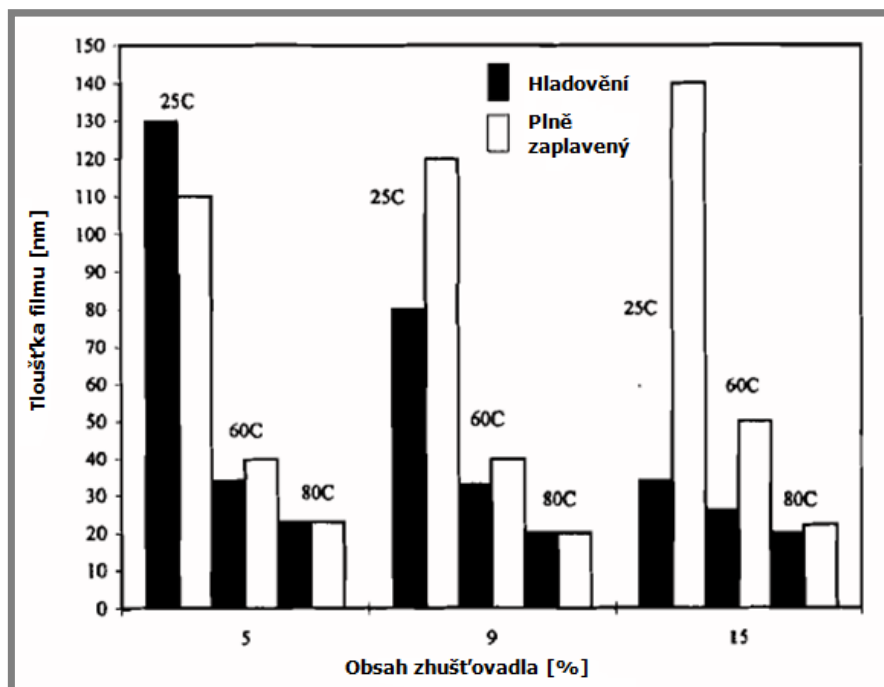
Obr.16 Závislost tloušťky filmu a počtu otáček disku pro mazivo 30 cSt s různým obsahem zhušťovačů [12]

Výsledky pro mazivo 200 cSt na Obr.17 jsou velmi podobné pro všechny obsahy tužidel. Na grafu lze vidět, že tloušťka filmu neustále klesá a není vidět žádný náznak rovnovážného stavu. Obecně byla tloušťka filmu menší než tloušťka filmu maziva 30 cSt.



Obr.17 Závislost tloušťky filmu a počtu otáček disku pro mazivo 200 cSt s různým obsahem zhušťovadla [12]

Porovnání tloušťky filmu při plně zaplaveném a hladovějícím režimu je zobrazeno na Obr.18. Tloušťka filmu v hladovějícím režimu je mnohem nižší pro obsahy tužidla 9 % a 15 %. Avšak s rostoucí teplotou se tloušťka filmu v hladovějícím režimu blíží hodnotám v plně zaplaveném režimu.

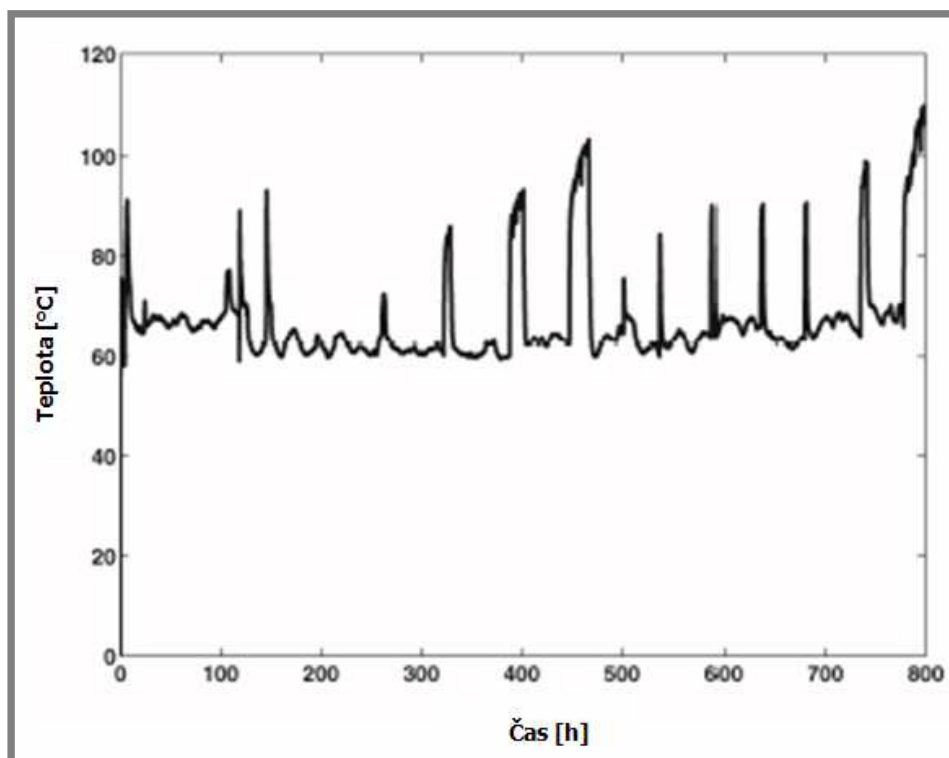


Obr.18 Srovnání tloušťky filmu při plně zaplaveném a hladovějícím režimu [12]

Cann dospěla k závěru, že při režimu hladovění se tloušťka filmu neřídí podle známých pravidel EHD a v některých případech byl vliv viskozity základového oleje a rychlosti opačný, než bychom očekávali od teorie plně zaplaveného režimu.

2.7 Chaotické chování tloušťky filmu plastických maziv

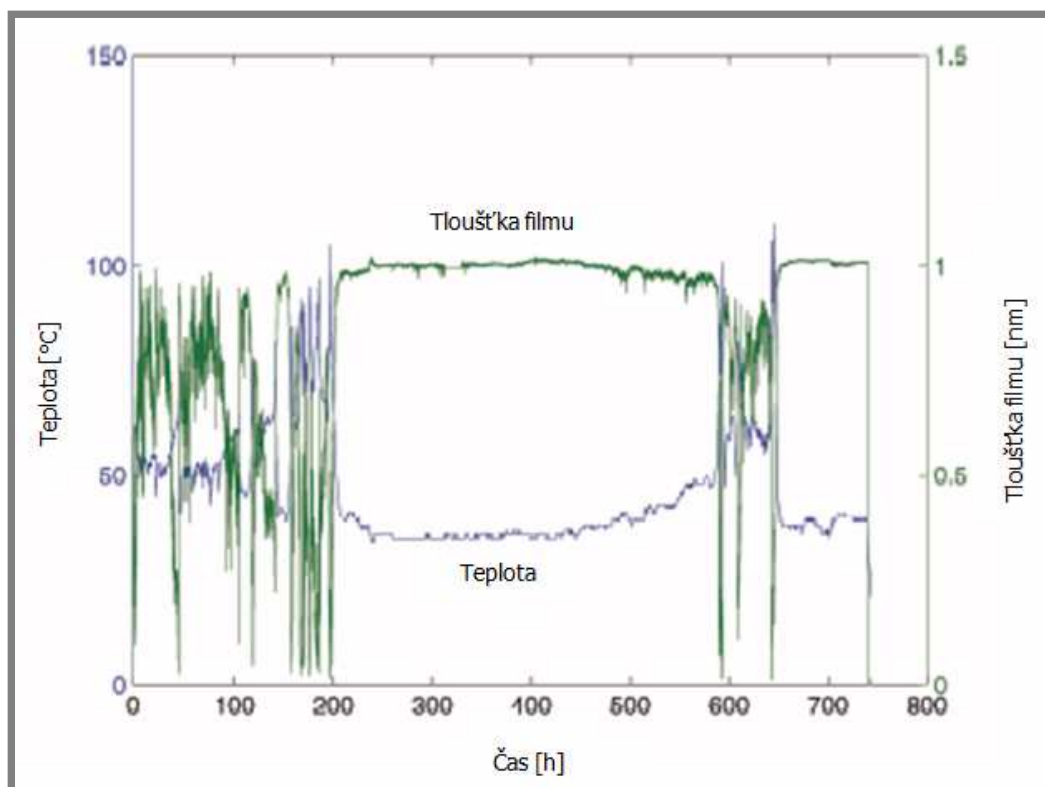
Teplotním chováním plastického maziva se zabýval Lugt [1] a provedl testy bez kontroly teploty. Výsledná teplotní závislost je ukázána na Obr.19.



Obr.19 Naměřená teplotní závislost na čase [1]

Naměřené výsledky dokazují, že provozní teplota nezůstává konstantní a má chaotický charakter.

Pro lepší pochopení vztahu mezi teplotou a tloušťkou filmu maziva byl vytvořen graf na Obr.20, kde jsou vykresleny dva signály jako funkce času. Se zmenšující se tloušťkou filmu roste adekvátně i teplota, a to způsobuje měknutí plastického maziva uloženého uvnitř v ložisku. Toto měknutí maziva má za následek větší uvolňování maziva do stopy kontaktu, a tím obnovu mazacího filmu [1]. Následně vzroste tloušťka filmu natolik, že opět převládne plně zaplavený režim, následovaný hladověním a selháním filmu. Toto náhlé obnovení mazacího filmu je děj, který se může mnohokrát opakovat, než opravdu dojde na stav příliš tenkého mazacího filmu a následné selhání ložiska [1].



Obr.20 Teplota ve srovnání s tloušťkou filmu v kontaktu [1]

2.8 Výpočet tloušťky filmu v EHD mazaném kontaktu

2.8

Přesná analýza hydrodynamického mazání provedená Hamrockem a Dowsnem [15] poskytla velmi užitečné informace. Výsledkem této analýzy bylo vytvoření vzorců pro výpočet minimální tloušťky filmu v elastohydrodynamicky mazaném kontaktu. Tyto vzorce odvozené Hamrockem a Dowsnem lze použít pro jakýkoliv typ kontaktu jako je lineární, bodový, eliptický a jsou běžně využívány při výpočtech tloušťky filmu v EHD kontaktu. Mohou být spolehlivě použity pro různé kombinace materiálů, včetně kombinace ocel na ocel a kontaktních tlaků až 3-4 GPa. Numericky odvozené vzorce pro centrální a minimální tloušťku filmu mají následující tvar:

- Centrální tloušťka filmu

$$\frac{h_c}{R} = 2,69 \left(\frac{U\eta_0}{E'R} \right)^{0,67} (\alpha E')^{0,53} \left(\frac{W}{E'R^2} \right)^{-0,67} (1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (1)$$

- Minimální tloušťka filmu

$$\frac{h_0}{R} = 3,63 \left(\frac{U\eta_0}{E'R} \right)^{0,68} (\alpha E')^{0,49} \left(\frac{W}{E'R^2} \right)^{-0,073} (1 - e^{-0,68k}) \quad (2)$$

Kde:

h_c [m] - centrální tloušťka filmu

h_0 [m]	- minimální tloušťka filmu
U [m/s]	- vstupní rychlost povrchu
η_0 [Pas]	- viskozita maziva při atmosférickém tlaku
E^* [Pas]	- redukovaný Youngův modul
R^* [m]	- redukovaný rádius křivosti
α [m ² /N]	- viskózně tlakový koeficient
W [N]	- zatížení kontaktu
k [m]	- eliptický parametr

Eliptický parametr k je závislý na typu kontaktu a vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$k = \frac{a}{b} \quad (3)$$

Kde:

a [m]	- délka poloosy eliptického kontaktu v příčném směru
b [m]	- délka poloosy eliptického kontaktu ve směru pohybu

Redukovaný Youngův modul je definovaný jako:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left[\frac{1+\nu_A^2}{E_A} + \frac{1+\nu_B^2}{E_B} \right] \quad (4)$$

Kde:

ν_A [-]	- Poissonova konstanta kontaktního tělesa A
ν_B [-]	- Poissonova konstanta kontaktního tělesa B
E_A [Pa]	- Youngův modul kontaktního tělesa A
E_B [Pa]	- Youngův modul kontaktního tělesa B

Redukovaný rádius křivosti se vypočítá dle vztahu:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (5)$$

Kde:

R_x [m]	- redukovaný rádius ve směru osy x
R_y [m]	- redukovaný rádius ve směru osy y

Redukovaný rádius křivosti ve směru osy x a y:

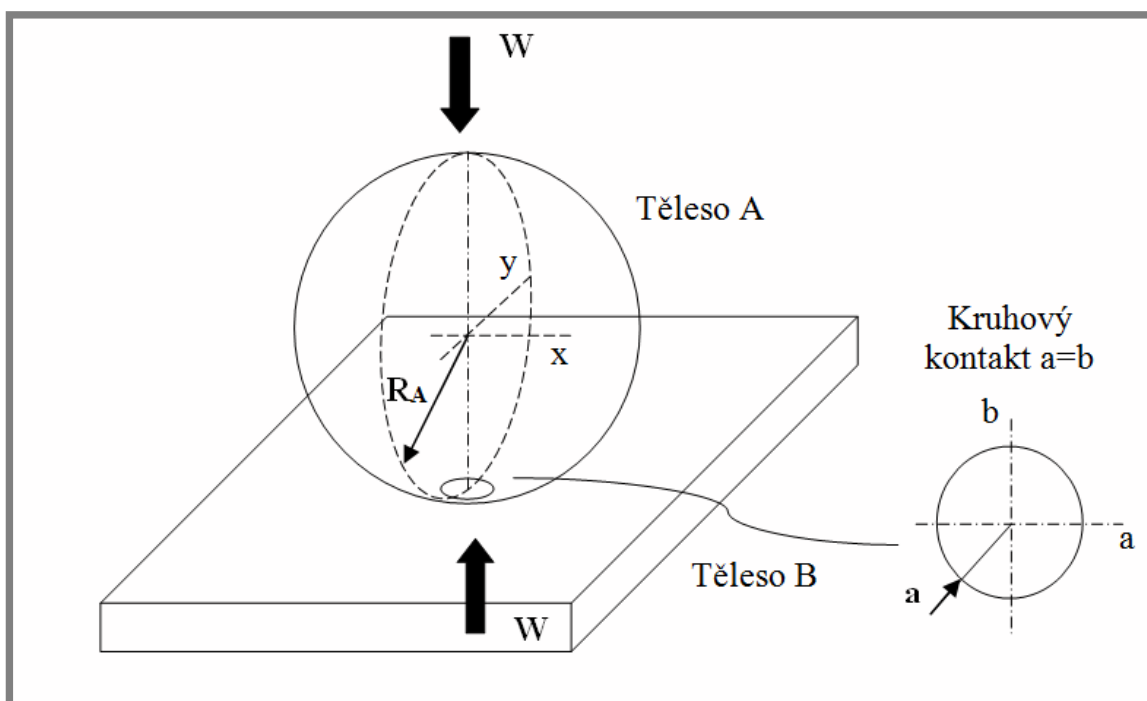
$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}} \quad (7)$$

Kde:

R_{ax} [m]	- rádius tělesa A ve směru osy x
R_{bx} [m]	- rádius tělesa B ve směru osy x
R_{ay} [m]	- rádius tělesa A ve směru osy y
R_{by} [m]	- rádius tělesa B ve směru osy y

V tribologických měřeních se ve většině případů používá zjednodušený simulátor kontaktu ball-on-disk, který představuje typ kontaktu kulička – deska (nebo disk), viz. obr.21.



Obr.21 Kontakt mezi kuličkou a deskou [15]

Tento typ kontaktu byl použit v experimentálních měření publikovaných v této práci a platí pro něj následovné zjednodušení:

$$\begin{aligned} R_{ax} &= R_{ay} = R_A \\ R_{bx} &= R_{by} = R_B = \infty \\ k &= \frac{a}{b} = 1 \end{aligned}$$

Výpočet redukovaného rádia křivosti (5) pak lze následovně zjednodušit:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{bx}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{\infty} \rightarrow R_x = R_A \quad (8)$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{by}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{\infty} \rightarrow R_y = R_A \quad (9)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_A} \quad (10)$$

Tyto vzorce (1,2) pro centrální a minimální tloušťku filmu však nepočítají s komplexní reologií plastických maziv a režimem hladovění. Lze je tedy použít pro výpočty centrální tloušťky filmu olejů v plně zaplaveném režimu.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1

3.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

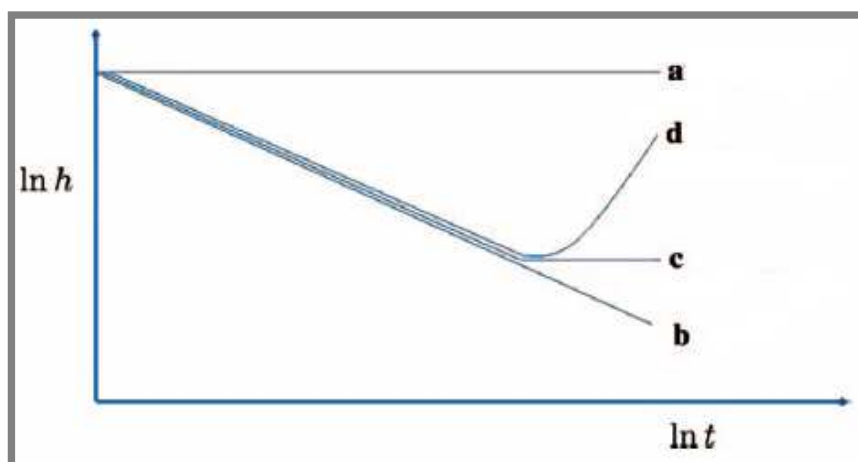
Většina dosavadního výzkumu zabývajícího se EHD mazáním se věnuje mazacím olejům, ale plastickým mazivům v hladovějícím režimu se výzkum nevěnoval dostatečně. Přitom k hladovění dochází v 90 % případů právě při mazání plastickými mazivy [16]. V hladovějícím režimu klesá tloušťka filmu maziva na zlomek původní hodnoty. Tato tenká vrstva filmu je namáhána vysokými tlaky a může způsobit povrchové poškození nebo snížení životnosti ložiska. V tomto těžce hladovějícím režimu, se již tloušťka filmu nedá dostatečně přesně predikovat podle standardní EHD teorie, a je tedy třeba vytvořit úplně nové numerické a experimentální modely pro simulaci chování plastického maziva [2].

V současné době jsou předepsané životnosti plastických maziv značně poddimenzované právě z důvodu nepřesných metod pro jeho predikci. Zpřesnění simulačních modelů pro určování životnosti plastického maziva by vedlo ke značným ekonomickým úsporám a porozumění mechanismů, které životnost ovlivňují, by značně usnadnilo vývoj nových maziv [2].

Ze shrnutí současného stavu poznání vyplývá, že v případě plastických maziv dochází k samovolné obnově maziva do kontaktu. Tento obnovovací mechanismus má za následek stabilizaci hladovění na určité hodnotě tloušťky filmu, pod kterou již neklesne, nebo dokonce opětovné zvýšení tloušťky filmu. Je tedy jasné, že mechanismus samovolné obnovy maziva v kontaktu je klíčovým faktorem ovlivňujícím tloušťku maziva v režimu hladovění plastických maziv. Mechanismus obnovy maziva v kontaktu je závislý na celé řadě faktorů, jako je rychlost, teplota, geometrie ložiska, obsah zhušťovadla v mazivu a v neposlední řadě složité reologické vlastnosti plastických maziv.

Z provedené rešerše vyplývá, že hladovění maziv obecně, lze rozdělit podle jejich schopnosti opětovného doplňování maziva do stopy kontaktu (Obr.22):

- a) Plně zaplavené
- b) Hladovějící
- c) Hladovějící se stabilizací
- d) Hladovějící s obnovou



Obr.22 Znáznornění jednotlivých typů hladovění [2]

Na základě poznatků získaných z experimentálních měření byly vypracovány studie [3, 17], které měly za cíl vytvořit numerické modely chování tloušťky filmu maziva v ložisku, avšak bylo dosaženo pouze dílčích úspěchů. Pro stanovení vhodných provozních podmínek pro dané mazivo je stále potřeba dalších dlouhodobých testů za reálných provozních podmínek.

[2, 16] Většina těchto tribologických experimentů zabývajících se měřením tloušťky filmu plastických maziv nebo olejů byla prováděna na laboratorních simulátorech kontaktu kuličky s diskem. Tento simulátor zjednodušuje reálné provozní podmínky ložiska na jediný kontakt valivého elementu, který tak může být snadněji pozorován. Zatímco v případě olejů je vliv počtu valivých elementů již dobře popsáný, a je známo, že toto zjednodušení výrazně neovlivňuje získané výsledky, v případě plastických maziv toto zatím nebylo zodpovězeno. Také je tu otázka korelace výsledků pořízených na laboratorních simulátorech s výsledky získanými testy za reálných provozních podmínek s použitím modelu reálného ložiska.

3.2 Cíl diplomové práce

„Cílem diplomové práce je analýza chování plastického maziva v hladovějším elastohydrodynamicky mazaném kontaktu užitím tribologických simulátorů.“

Jedná se o dva typy simulátorů, které představují dva různé přístupy měření: měření pomocí standardního simulátoru tvořícího kontakt jediné kuličky s diskem a měření provedené za reálných provozních podmínek, tedy za použití plnohodnotného axiálního kuličkového ložiska. Dílčím cílem je také popsání vlivu počtu valivých elementů. Pro splnění tohoto cíle je nutné provést následující kroky:

- *Stanovení metodiky měření na základě experimentů s oleji i plastickými mazivy*
- *Ověření postupné degradace tloušťky filmu*
- *Experimenty pro zjištění vlivu rychlosti*
- *Experimenty pro zjištění vlivu množství maziva*
- *Experimenty pro zjištění vlivu počtu valivých elementů*
- *Srovnání výsledků obou přístupů měření*

Výstupem této diplomové práce je také publikace v recenzovaném časopise (typu J_{REC}) MM Science Journal s názvem:

„Study of grease behaviour in a starved Elastohydrodynamically lubricated contact,“

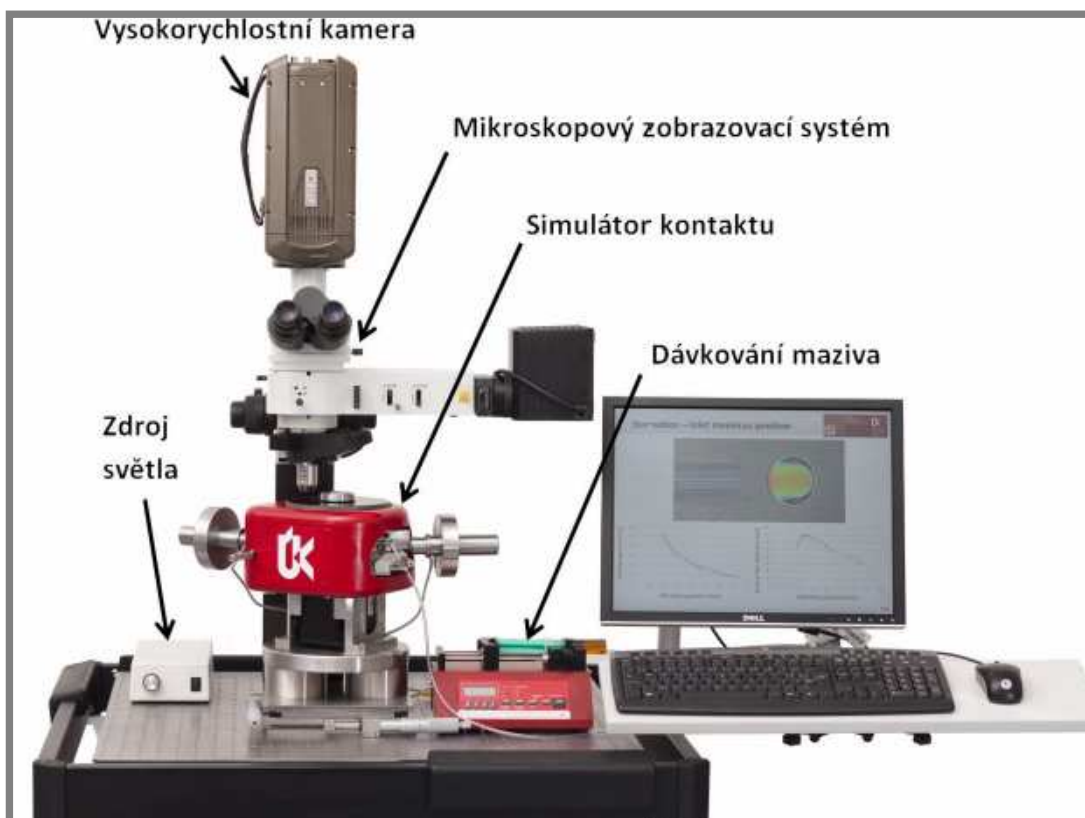
4 MATERIÁL A METODY

4

4.1 Optická interferometrie

4.1

Paralelně s teoretickým vývojem studie EHD kontaktů, se objevil výrazný postup experimentálních technik, obzvláště v optické interferometrii. Díky vývoji procedur analýzy obrazu a použití vysokorychlostní kamery, bylo možno pomocí této metody dosáhnout velmi přesných informací. Výsledky těchto experimentálních technik jsou také často používány k ověření teoretických modelů. V dnešní době je technika interferometrie nejpreciznější a nejpoužívanější pro měření tloušťky filmu. Nevýhodou je potřeba průhledného povrchu, který nemůže reprezentovat kontakt povrchu ocel na ocel, který je v praxi používán nejčastěji. Nicméně, i přes tento nedostatek, použití této metody výrazně přispělo k pochopení mechanismů spojených s mazáním s plastickými mazivy i oleji. Při řešení této diplomové práce byly použity dva typy tribologických simulátorů. V první řadě to byl v tribologii standardně používaný simulátor tvořícího kontakt jediné kuličky s diskem, určený k výzkumu mazacích filmů, který je v Ústavu konstruování Obr.16.



Obr.23 Zařízení pro měření tloušťky filmu maziva pomocí optické interferometrie.

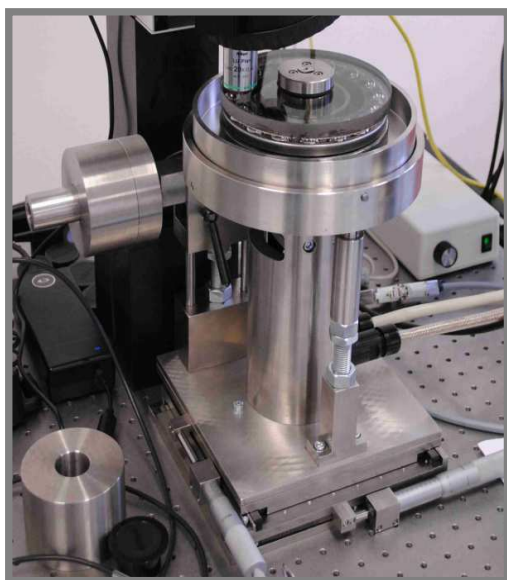
4.2 Měřicí aparatura

4.2

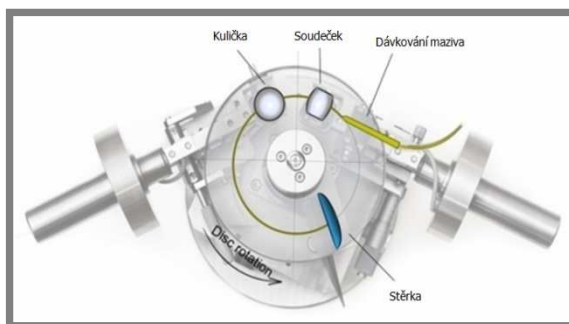
V simulátoru je kontakt vytvořen ve styku ocelové kuličky s rotujícím skleněným diskem. Osy obou třecích těles jsou vzájemně kolmé. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak vrstvou chromu. Oblast kontaktu snímá vysokorychlostní kamera Manta G146 IRC. Tento tribologický simulátor používaný při experimentech je možné vybavit i druhým kontaktem, tvořeným soudečkem. Oba kontakty jsou zatěžovány přes pákový mechanismus pomocí závaží na obou

kontaktech a velikost zatěžující síly je měřena pomocí tenzometrů na páce. Je tedy možno ovládat a měřit každý kontakt zvlášť. Disk je poháněn servomotorem, který je řízen programovatelnými měniči frekvence. To umožňuje vhodně simulovat provozní podmínky vyskytující se v reálném ložisku. Tato experimentální aparatura měří tloušťku filmu v kontaktu v intervalu od 1 do 800 nm s přesností ± 1 nm.

Cílem této práce bylo porovnat výsledky získané pomocí jednokontaktního simulátoru (Obr.24a) s výsledky pořízenými při měření na modelu reálného ložiska zařízení (Obr.24b), které tvoří axiální kuličkové ložisko. V tomto případě je ložisková klec s 16 nebo s 8 kuličkami zatížena proti skleněnému disku. Princip je stejný jako v případě jednokontaktního simulátoru, avšak k zajištění rovnoběžnosti disku s klecí ložiska při zatěžování, bylo potřeba zkonstruovat speciální zatěžovací přípravek [18]. Porovnání obou konfigurací měřícího simulátoru kontaktu je na Obr.24.



a)



b)

Obr.24 Experimentální aparatura a) Model reálného axiálního ložiska b) Laboratorní simulátor kontaktu [18, 19]

4.3 Metodika a podmínky měření

V případě modelu reálného ložiska byly provedeny dvě série testů. V první sérii bylo použito axiální ložisko 51220 ZVL s plným počtem 16 kuliček. Ložisko bylo rovnoměrně zatíženo proti skleněnému disku silou 5 N na jednu kuličku, přes pákový mechanismus. Malé množství maziva (0,1 g) bylo aplikováno na disk do dráhy kontaktu. V další sérii testů bylo použito stejné ložisko 51220 ZVL tentokrát s 8 kuličkami uvnitř klece ložiska. Zatížení bylo znovu upraveno na 5 N na jednu kuličku. Menší množství maziva bylo aplikováno na disk s ohledem na menší počet kuliček a tím i menší dráhu kontaktu, na kterou musí být mazivo rozprostřeno. Cílem bylo popsat vliv počtu valivých elementů, tedy doby mezi jednotlivými přejetími kuličkou po stejném místě. Podmínky měření byly totožné jako v případě měření s 16 kuličkami.

V měření s modelem plnohodnotného ložiska, byla použita vysokorychlostní kamera Phantom V710, která v kombinaci s xenonovým zdrojem bílého světla

umožňuje zaznamenat 7530 snímků za sekundu v rozlišení 1280 x 800 pixelů. V průběhu experimentu jsou zaznamenávány chromatické interferogramy v okamžiku, kdy jednotlivá kulička axiálního ložiska prochází pozorovaným místem.

V obou konfiguracích byly interferogramy zpracovány v softwaru Achilles a pomocí metody kolorimetrické interferometrie byla vyhodnocena centrální tloušťka filmu v kontaktu.

Pro experimenty byly použity tři typy různých komerčně dostupných plastických maziv, jejichž popis a vlastnosti jsou shrnuty v Tab.1. Skleněný disk, kulička nebo celá klec s kuličkami byly před každým testem náležitě očištěny. Malé množství maziva (0,5 pro jednokontaktní simulátor; 0,1 pro model plnohodnotného ložiska) bylo rovnoměrně aplikováno na disk do dráhy kontaktu. Měření tloušťky filmu pro různé rychlosti vždy začínalo 10-ti minutovým intervalem záběhu, aby bylo docíleno rovnoměrného rozprostření maziva a byl dosažen rovnovážný stav.

Tab.1: Shrnutí vlastností použitých vzorků plastických maziv [20, 21, 22]

Označení	Komerční značka	Kinematická viskozita při 25 °C [mm ² /s]	Konsistence - NLGI	Základový olej / aditiva	Zhušťovadlo
A	LA 2	130	2	Minerální olej / EP	Li mýdlo
B	Ekolube Grease Teflon	200	2	Minerální olej / PTFE	Li mýdlo
C	A 00	350	00	Minerální olej / adhesivní aditiva	Al mýdlo

Mazivo A: MOGUL LA2 je plastické víceúčelové mazivo s krátkovláknitou strukturou obsahující lithium, poloměkké až střední konzistence, s dobrou odolností proti vodě. Používá se mj. k mazání dynamicky namáhaných valivých ložisek mobilních strojů. Vyvinuto s firmou ŠKODA pro automobily. Teplotní rozsah použití od -30 do 120 °C. Obsahuje přísady proti stárnutí, ke zlepšení protikorozi ochrany a mazacích vlastností. [20]

Mazivo B: Ekolube Grease Teflon je speciální mazivo měkké až střední konzistence, světle žluté barvy, bez mechanických nečistot, odolné vůči vodě a vysokým tlakům. Je vyrobeno na bázi minerálního oleje. Jako zpevňovadlo je použito krátkovláknité lithné mýdlo. Mazivo obsahuje pevné teflonové částice pro zajištění chodu i v nouzových situacích. Tepelný rozsah použitelnosti -30 až +120 °C. Používá pro mazání valivých a kluzných ložisek, především při vysokém dynamickém namáhání a zvýšených tlacích. Nenapadá plasty. [21]

Mazivo C: MOGUL A00 je plastické mazivo vyrobené z olejových základů o vysoké viskozitě zpevněných hlinitým mýdlem, má dlouhovláknitou strukturu, vysokou přilnavost, vysokou tažnost a odolnost proti vodě. Použitelnost -15 až +75 °C. Vhodné pro mazání svislých a kulových čepů a dalších kluzných uložení, podvozku automobilů a mobilních strojů. Průmyslové využití: mazání zatížených kluzných uložení mazaných centrálně dlouhými tukovody v hutích, válcovnách, Vhodné i jako náplň pomaluběžných uzavřených převodovek. [22]

5 VÝSLEDKY

5

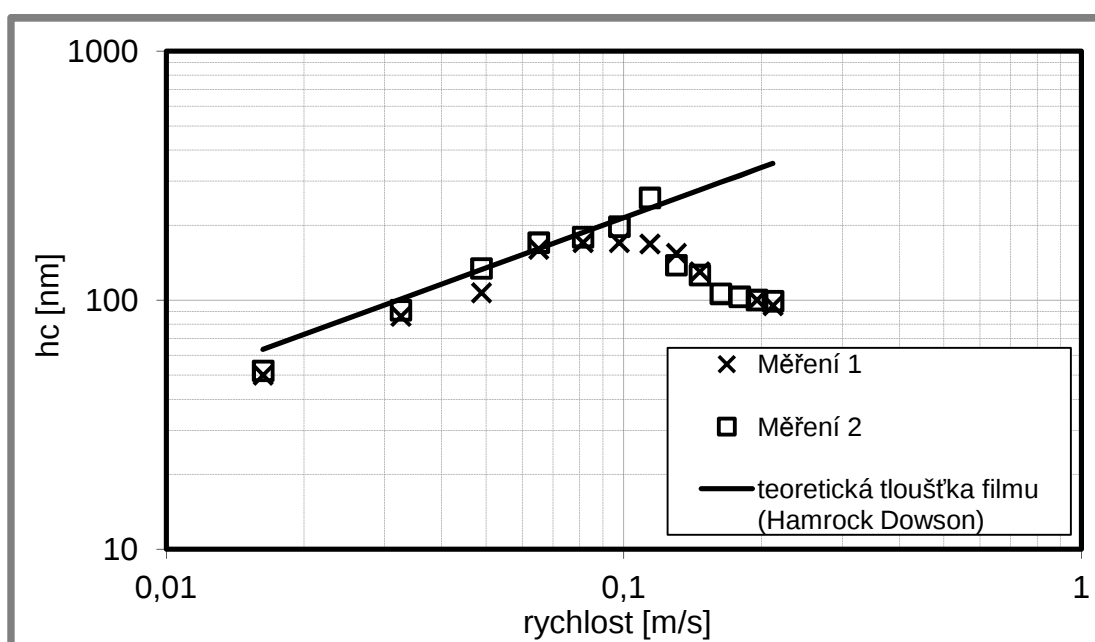
5.1 Vstupní měření s oleji

Metodika experimentů a měření tloušťky mazacího filmu, je v případě olejových maziv obecně velmi dobře popsána a je známa a široce používána i v Ústavu konstruování. Vzhledem k tomu, že tato metodika měření byla výchozím bodem pro stanovení postupu měření při experimentech s plastickými mazivy, bylo nejdříve potřeba začít vstupními měřeními s oleji.

Jako vzorek maziva byl použit olej R 834/80 o kinematické viskozitě $669,3 \text{ mm}^2/\text{s}$ při teplotě 20°C . $2 \mu\text{l}$ jeho objemu byly pomocí mikropipety aplikovány na disk do dráhy kontaktu. Měření probíhalo za konstantní teploty v rozsahu 23°C až 24°C na jednokontaktním simulátoru ball-on-disc. Pro simulaci kontaktu byla tedy použita jediná ocelová kulička o průměru $25,4 \text{ mm}$. Měření závislosti tloušťky mazacího filmu na zvyšující se rychlosti je základní charakteristikou

u všech olejů. Určuje se z ní tzv. rychlost hladovění, což představuje výchozí hodnotu, podle které se stanovují vhodné provozní podmínky (především rozsah rychlosti a teplot) pro daný olej. Jak již bylo zmíněno dříve, nad touto rychlostí již neplatí teorie plně zaplaveného kontaktu a objevuje se hladovění a s tím spojený nežádoucí pokles tloušťky mazacího filmu.

Výsledky vlastního měření tloušťky filmu olejového maziva v závislosti na zvyšující se rychlosti jsou ukázány na Obr.25.

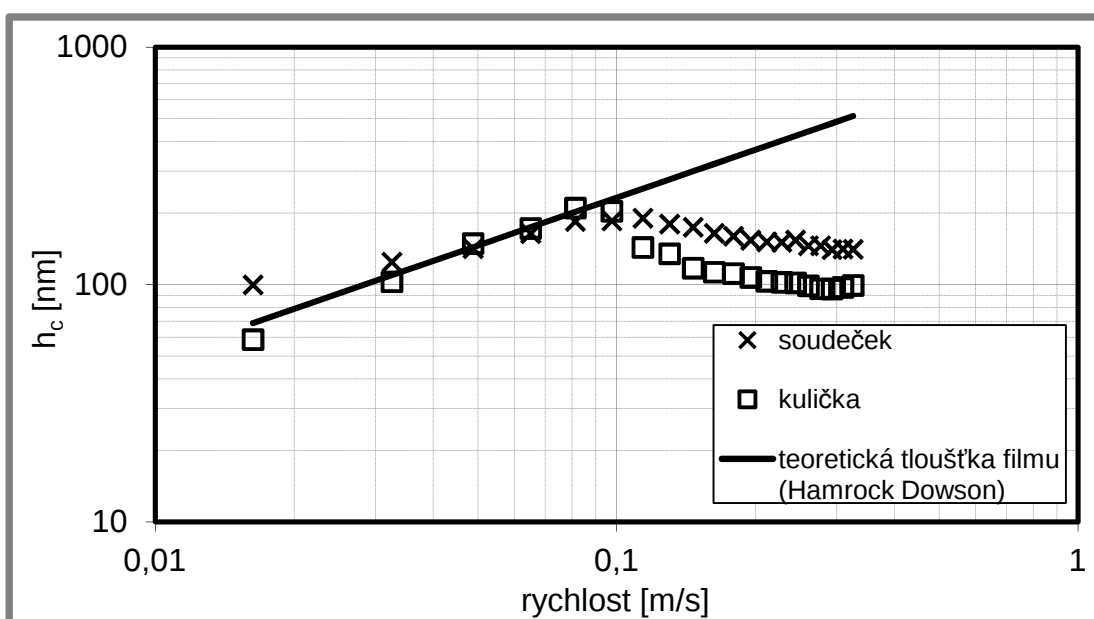


Obr.25 Olej – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu kuličky; srovnání dvou měření a teoretických hodnot

Pro zajištění opakovatelnosti měření, byl celý test proveden dvakrát. V grafu jsou vyneseny hodnoty z obou těchto samostatných měření. Odchylka naměřených hodnot při dodržení stejných podmínek byla velmi malá, řádově v jednotkách nanometrů, což je téměř na hranici rozlišitelnosti použité měřící aparatury. Pro porovnání jsou do grafu také vyneseny vypočítané hodnoty podle teorie, kterou publikoval Hamrock

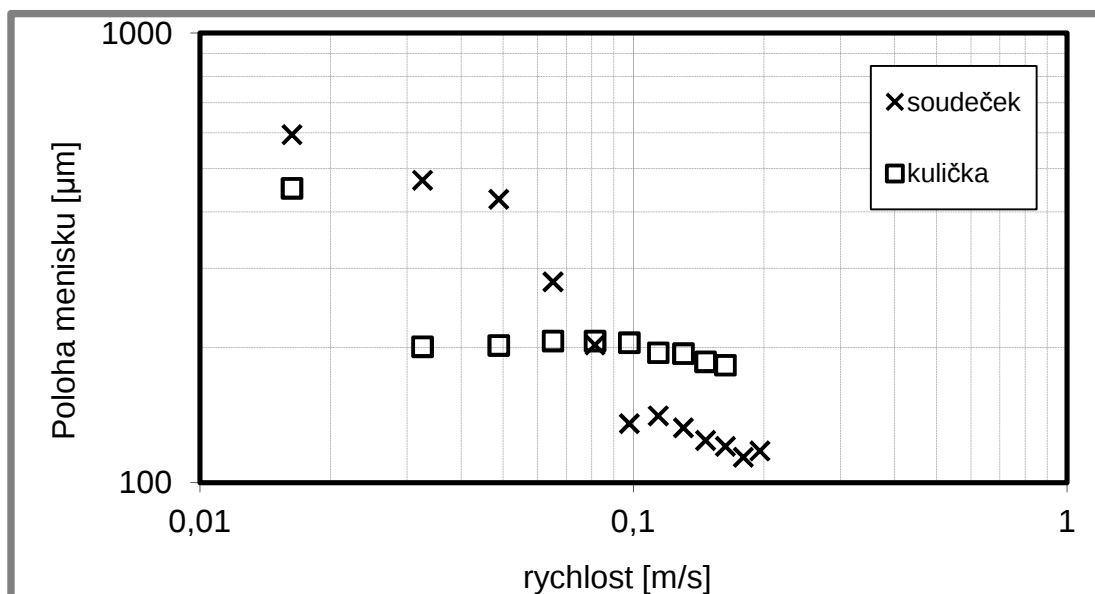
a Dowson [15], které odpovídají plně zaplavenému režimu v celém rozsahu rychlosti. Zatímco do rychlosti 0,1 m/s, se naměřené hodnoty shodují s teoretickými, nad touto rychlostí je patrný značný odklon od teoretické přímky a postupný pokles centrální tloušťky filmu.

Pro další měření byl využit i druhý kontakt, který využívá jako valivý element soudeček a byl zařazený před valivý element kuličky. Odlišná geometrie oblasti kontaktu způsobuje odlišné chování tloušťky mazacího filmu. Vzhledem k celkově větší ploše kontaktu je známo, že tloušťka mazacího filmu v kontaktu soudečku bývá vyšší přibližně o 20 % [2]. Pro ověření byly provedeny testy, kde byla měřena závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti pro oba kontakty zvlášť. Naměřené hodnoty centrální tloušťky filmu jsou vyneseny v následujícím grafu na Obr.26. Soudeček vykazuje nejen celkově vyšší tloušťku mazacího filmu, ale také posun v rychlosti hladovění.

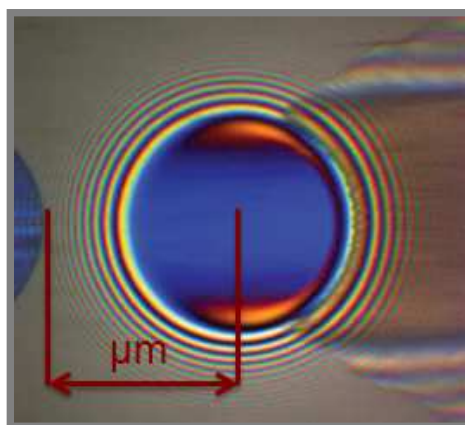


Obr.26 Olej – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu soudečku; srovnání dvou měření a teoretických hodnot

Jedním z dalších možných způsobů popsání chování maziva v hladovějícím kontaktu je měření vzdálenosti menisku od oblasti kontaktu (Hertzové oblasti). V rešeršní části bylo ukázáno, že postupné přibližování menisku k oblasti kontaktu je jedním z projevů začínajícího hladovění. Výsledky měření vzdálenosti polohy menisku (schéma na Obr.28) v závislosti na zvyšující se rychlosti jsou ukázány v grafu na Obr.27. Hodnoty v grafech na Obr.25 a 26 pocházejí ze stejného měření a jsou tedy porovnatelné. Lze si povšimnout, že plně zaplavený režim je přítomen, jestliže je vzdálenost menisku větší jak jednonásobek průměru kontaktu. Jestliže je vzdálenost menší, kontakt mírně hladoví, tloušťka filmu se zvyšující se rychlostí stále roste, avšak dosahuje nižších hodnot než podle teorie plně zaplaveného kontaktu. Jestliže se meniskus přiblíží natolik, že je prolomena hranice oblasti kontaktu, kontakt je již zcela vyhladověn a tloušťka filmu se zvyšující rychlostí dále klesá. Tyto naměřené výsledky se shodují se závěry publikovanými v [2, 5].



Obr.27 Olej – vliv rychlosti na polohu menisku; srovnání naměřených hodnot pro valivý element kuličky a soudečku



Obr.28 Schéma měření polohy menisku vůči středu kontaktu [2]

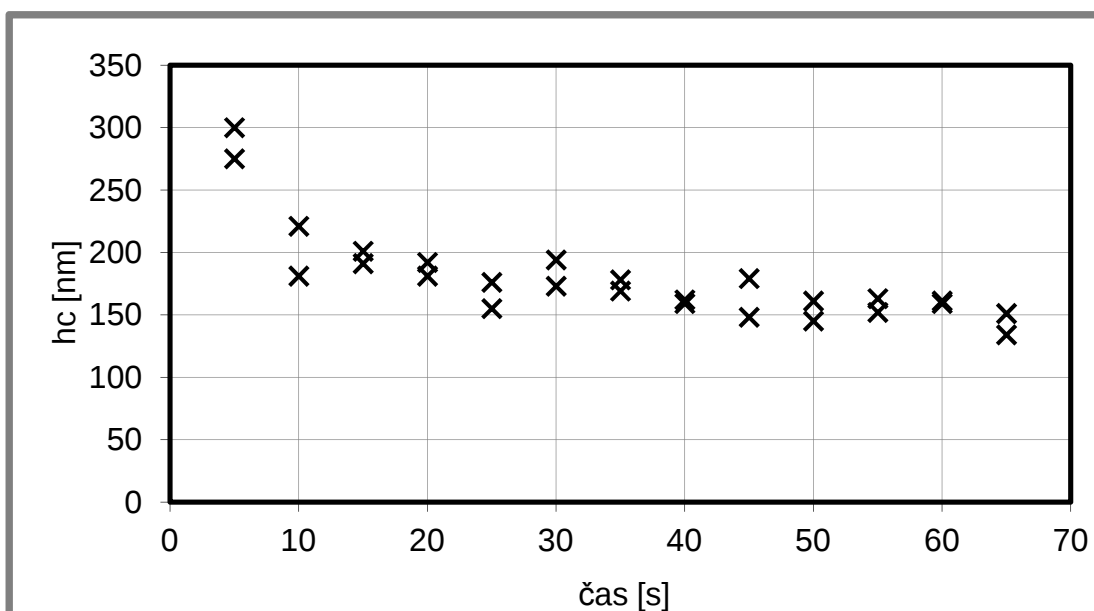
5.2 Vstupní měření s plastickým mazivem

První experimenty s plastickými mazivy vycházely ze znalostí metodiky měření získaných na předchozích ověřovacích testech s oleji a na základě teoretických znalostí z rešeršní části. Prvotní snahou bylo změřit stejné závislosti jako s oleji a vzájemně je porovnat a popsat jednotlivé rozdíly. Avšak na rozdíl od olejů, plastické mazivo má velmi odlišný průběh tloušťky filmu v čase i za konstantních podmínek. Zatímco tloušťka filmu oleje se v relativně krátkém čase trvání celého měření prakticky nemění, je jasné, že v případě plastických maziv bude alespoň v počáteční fázi vznikat prudký pokles tloušťky mazacího filmu, způsobený postupným vytlačováním objemu maziva pryč z dráhy kontaktu. Jestliže tedy chceme naměřit závislost tloušťky filmu na rychlosti, je třeba jako první nalézt stabilní oblast, kde se tloušťka filmu v čase již nemění nebo je její pokles lineární, aby výsledné hodnoty nebyly touto postupnou degradací ovlivněny. Proto bylo určující provést měření tloušťky filmu v závislosti na čase.

Pro vlastní měření byl využit standardní tribometr s jediným kontaktem tvořeným valivým elementem – kuličkou. Obecně pro všechny vstupní měření

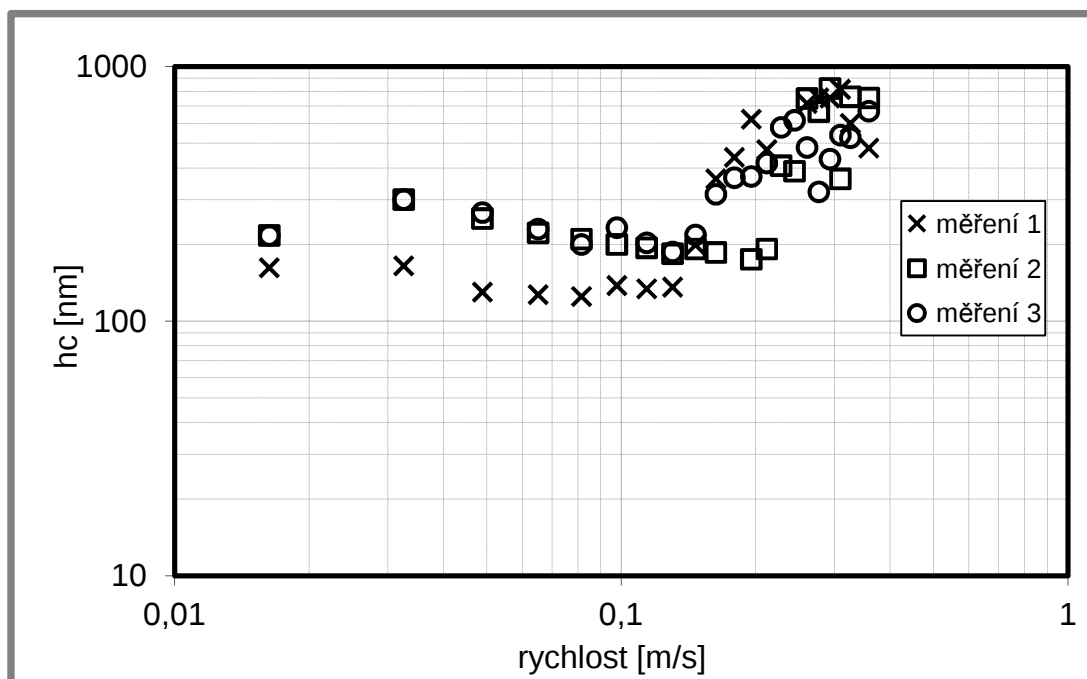
s plastickými mazivy bylo použito mazivo A (viz Tab.1). Z rešeršní části vyplývá, že přísun základového oleje, který se samovolně vylučuje a znovu zaplavuje dráhu kontaktu, je zásadně ovlivněn přítomností reservoárů plastického maziva. Tyto reservoáry jsou objemy maziva vytlačeného na okraje dráhy kontaktu, nebo například zachycené na kleci ložiska. Velká péče musela být tedy věnována distribuci maziva po dráze kontaktu na disku, pro zajištění rovnoměrné tvorby těchto reservoárů po disku.

První měření (Obr.29) mělo pouze orientační význam, nebyly proto prováděny další testy pro zajištění opakovatelnosti. Z grafu na Obr.29 vyplývá, že mazivo je velmi rychle vytlačeno pryč z dráhy kontaktu a tloušťka filmu téměř ihned klesne na hodnoty kolem 190 nm. S přibývajícím časem se tloušťka filmu dále pomalu snižuje. Byla také zaznamenána velká odchylka naměřených hodnot (± 20 nm), avšak v případě plastických maziv je to obvyklý jev. Výsledky tedy korespondují se závěry z rešeršní části.



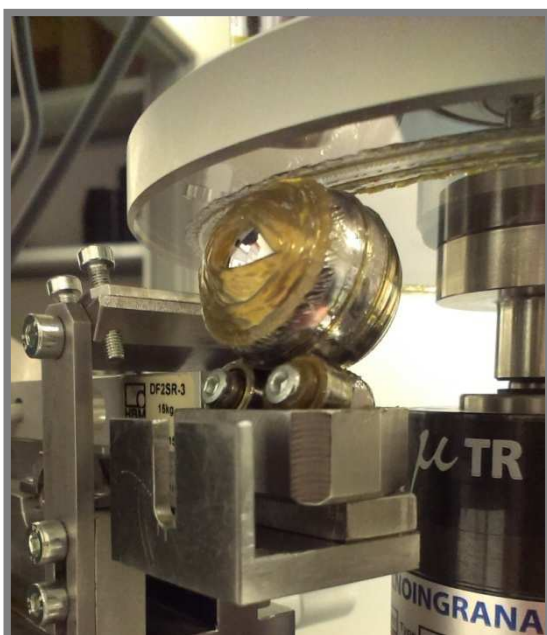
Obr.29 Plastické mazivo A – postupná degradace centrální tloušťky filmu v čase; konfigurace s volným uložením valivého elementu

Dalším krokem bylo ověření chování plastického maziva v závislosti na zvyšující se rychlosti. Odpovídající graf je na Obr.30. Byla provedena tři samostatná měření s různými intervaly mezi jednotlivými kroky zvýšení rychlosti, avšak se stejným výsledkem. Při překročení rychlosti 0,15 m/s nastalo prudké kolísání tloušťky filmu, a to téměř v celém spektru měřených hodnot. Ani po 30 minutovém záběhu při rychlosti 0,3 m/s se tloušťka filmu neustálila. Z vizuálního pozorování valivého elementu bylo zjištěno, že toto kolísání je způsobeno pravděpodobně malým spinem kuličky, který v kontaktu vzniká. Valivý element kuličky je volně podepírán třemi valivými ložisky, která zajišťují volnou rotaci kuličky ve všech směrech, toto uložení je zobrazeno na Obr.31. Kousky pevného plastického maziva byly tímto spinem nepravidelně strhávány zpět do oblasti kontaktu a vytvářely tak místa s velmi vysokou tloušťkou filmu.



Obr.30 Plastické mazivo A – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu; konfigurace s volným uložením valivého elementu

Efekt spinu valivého elementu na centrální tloušťku filmu byl již potvrzen jinými studiemi prezentovanými v rešeršní práci [11]. A také vzhledem k tomu, že studium vlivu spinu na chování plastických maziv v hladovějícím kontaktu přesahuje objem této práce, bylo rozhodnuto změnit konfiguraci tribometru a spin tak odstranit. Toho bylo docíleno pevným spojením kuličky s hřídelí, která byla pomocí ložisek uložena k páce tribometru (viz Obr.31 a 32).

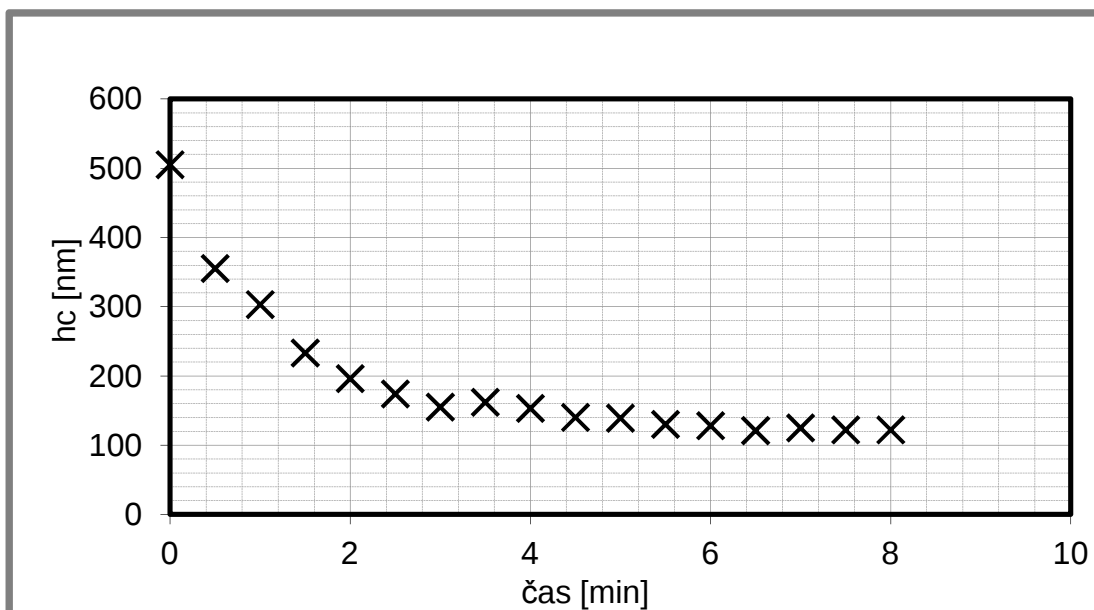


Obr.31 Konfigurace s volným uložením



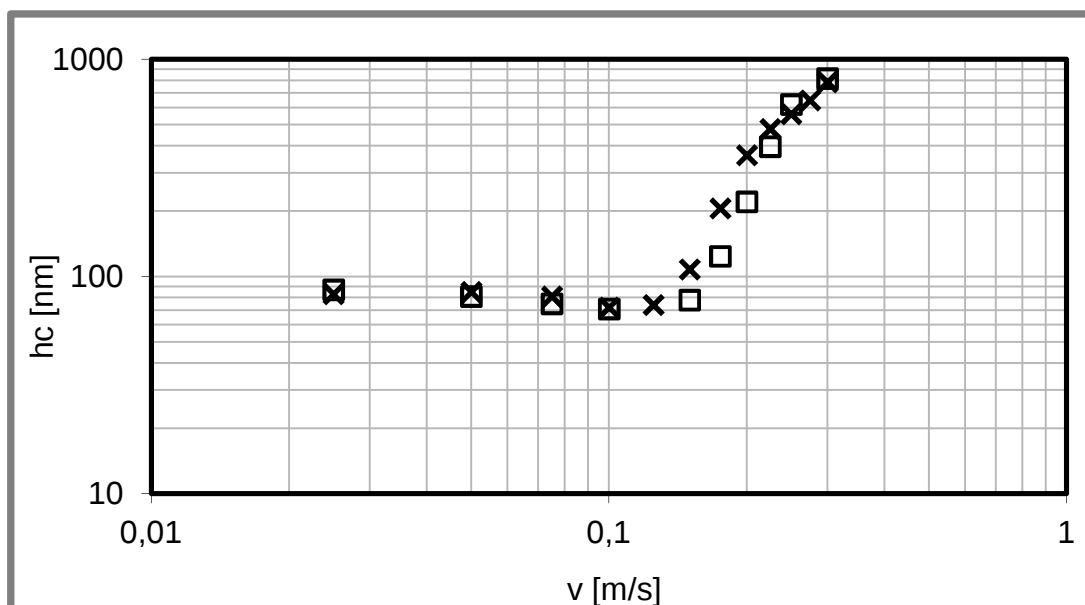
Obr.32 Konfigurace s omezením na jedinou osu rotace

Po změně konfigurace byly předchozí experimenty znovu zopakovány. Postupná degradace centrální tloušťky filmu plastického maziva, tedy jeho závislost na počtu otočení disku je ukázána na Obr.33. Počáteční pokles centrální tloušťky filmu je stále poměrně rychlý, jak by se u plastických maziv dalo očekávat, avšak celkový průběh má plynulejší charakter a rozptyl naměřených hodnot při stejné rychlosti je také menší (± 10 nm). Lze pozorovat, jak se tloušťka filmu postupně stabilizuje na hodnotě kolem 150 nm, pod kterou již neklesne. Ve všech následujících testech byla použita konfigurace s uložením kuličky bez spinu.



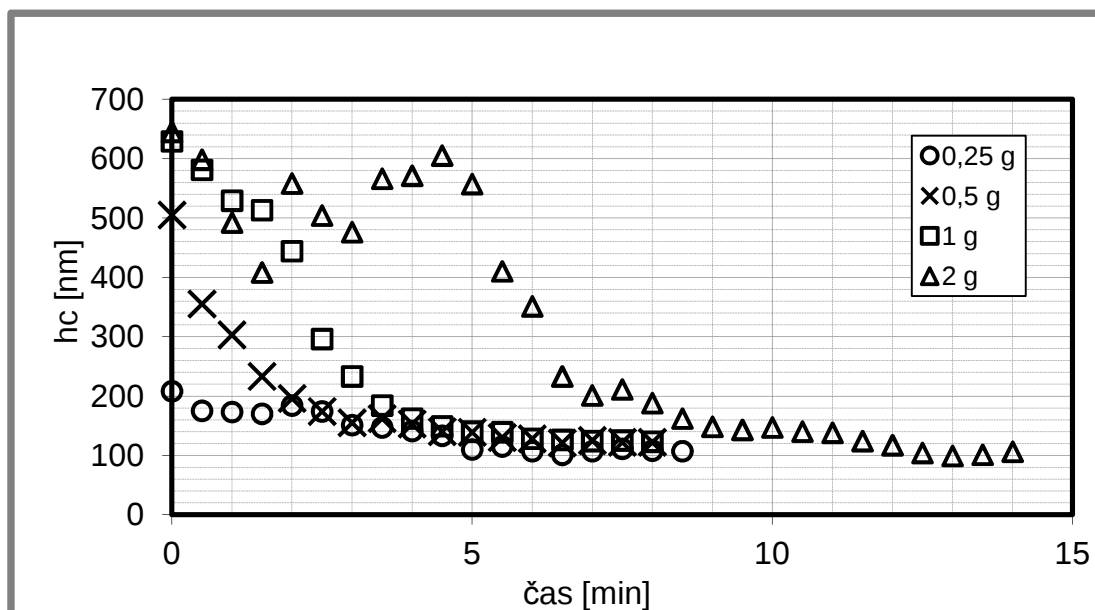
Obr.33 Plastické mazivo A – postupná degradace centrální tloušťky filmu v čase; konfigurace uložení kuličky bez spinu

Dále byla na nově konfigurovaném tribometru znovu měřena závislost tloušťky filmu maziva na rychlosti. Po aplikaci maziva následoval záběh 10 minut při konstantní rychlosti. Takto dlouhá doba záběhu byla zvolena na základě předešlého měření, tak aby se tloušťka filmu již stabilizovala a do naměřených hodnot tak nezasahovala samovolná degradace tloušťky filmu v čase. Výsledná tloušťka filmu v kontaktu, však v celém rozsahu měřených rychlostí dosahovala stabilně nízkých hodnot a žádný vliv rychlosti zaznamenán nebyl. Změna rychlosti zřejmě již na takto vyhladovělý kontakt nemá v případě plastických maziv vliv. Tyto výsledky se však neshodovaly s poznatky získanými s rešerše a experiment byl proto zopakován tentokrát s menším časem záběhu, kde bylo cílem zjistit, jestli se stejně chová i jen mírněji vyhladovělý kontakt, což podle grafu na Obr.33 odpovídá přibližně 5 minutám záběhu. Výsledky tohoto experimentu jsou vyneseny na Obr.34. Je zde vidět, že do rychlosti 0,15 m/s se tloušťka filmu v kontaktu mírně snižuje a kontakt se nachází v režimu hladovění. Toto však může být také jev samovolného poklesu za čas měření. Nad tuto rychlost se tloušťka filmu zvyšuje až do velmi vysokých hodnot a kontakt tak přechází do plně zaplaveného režimu. Je zde tedy patrný opačný postup než v případě kontaktu mazaného oleji, kde naopak se zvyšující se rychlostí kontakt postupně přechází z plně zaplaveného do hladovějícího režimu. Tento jev bude podrobněji popsán v následující kapitole této práce.



Obr.34 Plastické mazivo A – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu; konfigurace uložení kuličky bez spinu

Neznámým faktorem také bylo množství aplikovaného maziva a to, jak ovlivní výslednou centrální tloušťku filmu. Následující graf tedy tvoří čtyři měření, každé pro jiný objem maziva. Tloušťka filmu je zde ukázána v závislosti na počet otočení disku. Podle vzoru již citovaných prací [5, 12], kde byly podobné experimenty prováděny, se ukázalo jako vhodnější tloušťku filmu nevztahovat na čas, ale raději na počet otáček (otočení) disku. Tím zajistíme, že lze porovnat hodnoty dvou měření při dvou různých konstantních rychlostech. Zajistíme tak, že kontakt „ujede“ stejnou dráhu i při různé rychlosti. Výsledky experimentu ukazují, že ve všech případech se centrální tloušťka filmu nakonec ustálila na hodnotě kolem 100 nm. Rozdílná byla pouze doba potřebná k dosažení stabilizace tloušťky filmu.



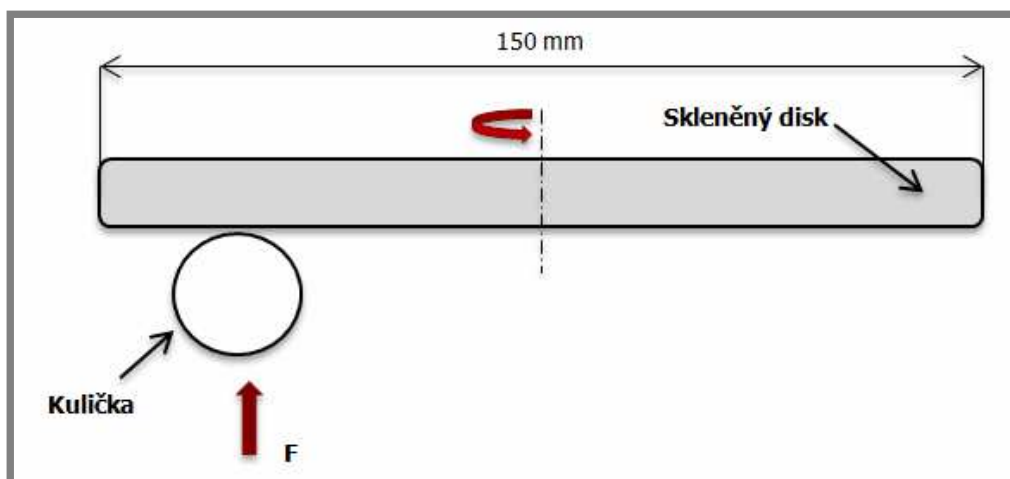
Obr.35 Plastické mazivo A – vliv množství aplikovaného maziva na centrální tloušťku filmu v kontaktu v čase

Výsledky všech vstupních měření v kombinaci s provedenou rešerší byly velmi důležité pro stanovení, optimalizaci a ověření správné metodiky měření a vyhodnocování získaných výsledků.

5.3 Experimenty na jednokontaktním simulátoru kontaktu

5.3

Většina tribologických experimentů zabývajících se měřením tloušťky filmu plastických maziv nebo olejů se provádí na laboratorních simulátorech tvořených jediným kontaktem valivého elementu s diskem. V první fázi byl použit stejný přístup měření a proběhly experimenty na stejném typu tribometru (schéma na obr.36).



Obr.36 Schéma jednokontaktního simulátoru kontaktu

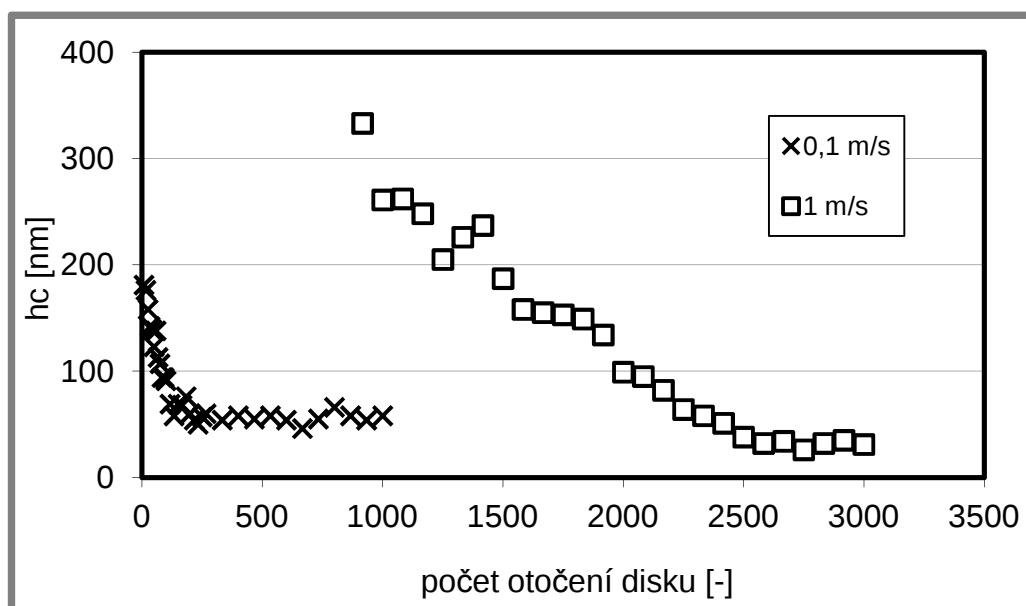
Metodika měření a vyhodnocování byla stanovena na základě provedené rešerše a následně upravena na základě výsledků získaných vstupními měřeními, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Podmínky a metodika měření postupné degradace centrální tloušťky filmu plastického maziva byly následovné:

Ocelová kulička byla zatížena proti skleněnému disku přes pákový mechanismus silou 10 N. Na disk bylo aplikováno malé množství maziva (0,5 g) a velký důraz byl kladen na jeho rovnoměrné rozložení po disku. Měření tloušťky filmu v závislosti na počtu otáček disku probíhalo okamžitě po dosažení požadované rychlosti. Naměřené hodnoty pro různé maziva se velmi výrazně lišily, a proto byly i odlišné doby měření. Měření bylo ukončeno po dosažení rovnovážného stavu, kdy se již tloušťka filmu s dalšími otáčkami dále neměnila. Pro zajištění opakovatelnosti měření byl každý experiment třikrát zopakován. Vynesené hodnoty v grafech představují průměr z těchto tří měření.

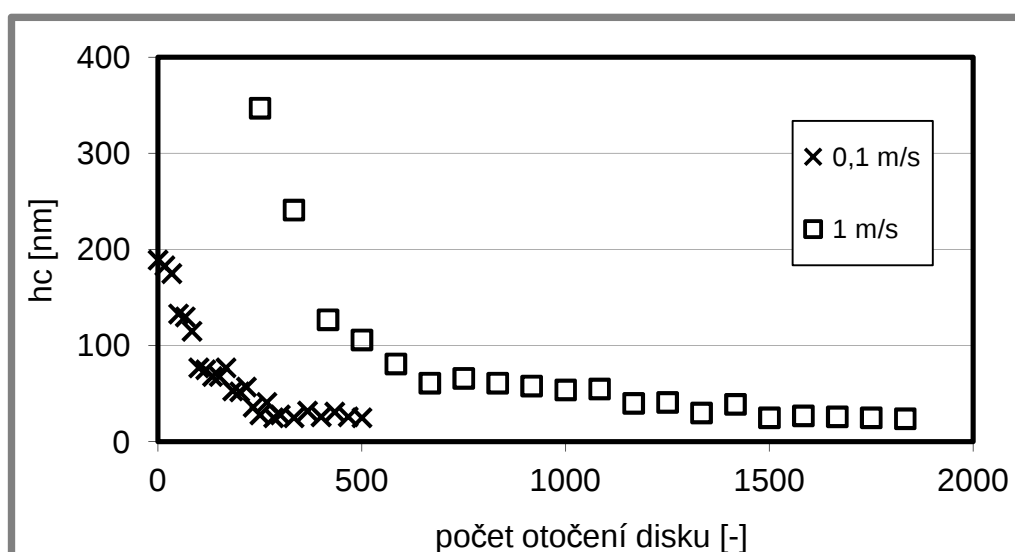
Výsledky jsou vyneseny do grafů na Obr.37-39, kde je tloušťka filmu vztažena na počet otočení disku. Rychlost degradace tloušťky filmu je pro každé mazivo porovnávána pro konstantní rychlosti 0,1 m/s a 1 m/s.

Ve všech případech tloušťka filmu z počátku velmi rychle klesá. Tento pokles je způsoben vytlačováním plastického maziva ze stopy kontaktu. Tloušťka filmu se následně ustálí na hodnotách v rozpětí 40 až 120 nm, v závislosti na typu použitého maziva. V této fázi mazací film tvoří již pouze základový olej, který se uvolňuje z plastického maziva vytlačeného na kraj dráhy kontaktu. Vliv postupné degradace tloušťky filmu a samovolná obnova mazacího filmu se zdají být v rovnováze a proto

se tloušťka filmu ustálila na konstantních hodnotách. (Nastává rovnováha mezi degradací a samovolnou obnovou mazacího filmu.)

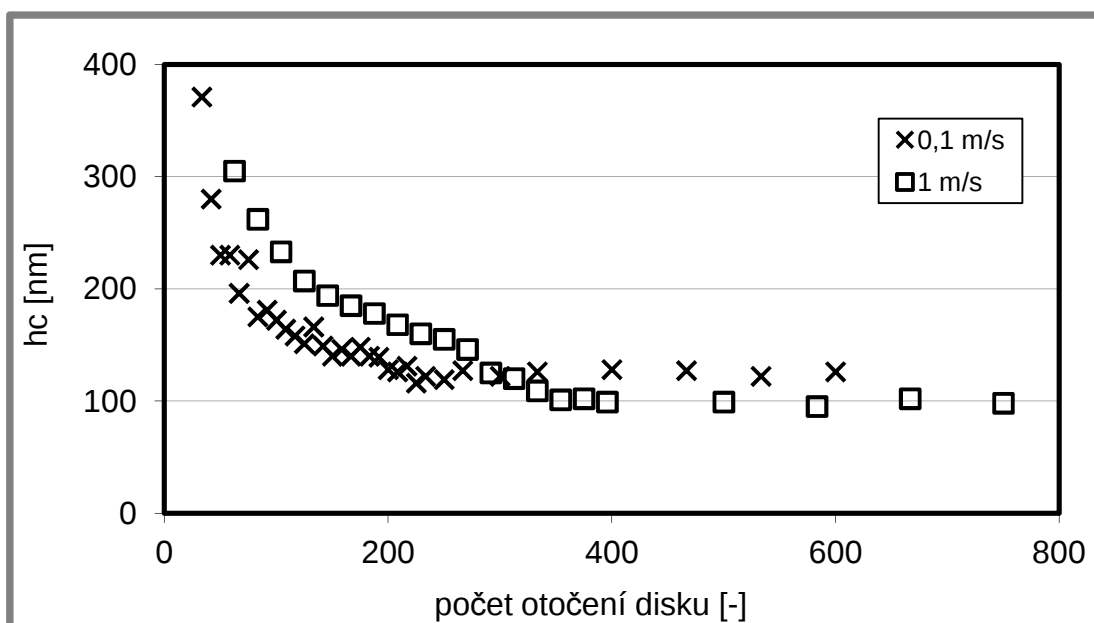


Obr.37 Plastické mazivo A – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s



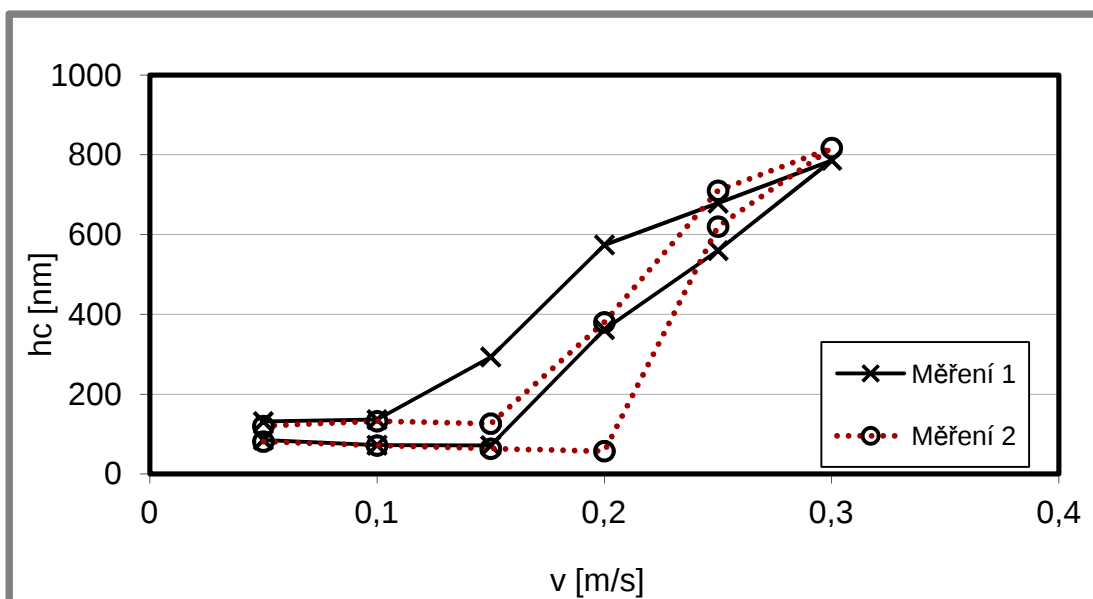
Obr.38 Plastické mazivo B – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s

Z grafů je také vidět, že doba dosažení rovnovážného stavu i výsledná tloušťka jsou výrazně ovlivněny rychlostí. V první fázi, kdy je v kontaktu velké množství maziva, nastává plně zaplavený režim a tloušťka filmu je tedy větší při vyšší rychlosti. Se zvyšujícím se počtem otáček přechází kontakt postupně do režimu hladovění, kde naopak při vyšší rychlosti tloušťka filmu klesá na nižší hodnoty.



Obr.39 Plastické mazivo C – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s

Zajímavých výsledků bylo dosaženo při měření tloušťky filmu v závislosti na změně rychlosti. Před začátkem měření proběhl 5 minutový záběh pro rovnoměrné rozložení maziva a pro překonání první fáze nejrychlejšího poklesu tloušťky filmu. Při dosažení požadované rychlosti, byly hodnoty zaznamenány až po ustálení tloušťky filmu v kontaktu. Poté byla rychlost znovu zvýšena. Po dosažení maximální rychlosti, měření pokračovalo v opačném sledu, kdy se rychlost postupně snižovala. Byla tak naměřena hysterezní smyčka vlivu rychlosti na centrální tloušťku mazacího filmu. Pro každou rychlost byly zaznamenány 3 hodnoty a jejich průměrné hodnoty jsou vyneseny do grafu. Na Obr.40 jsou vyneseny dvě měření pořízená bezprostředně po sobě.

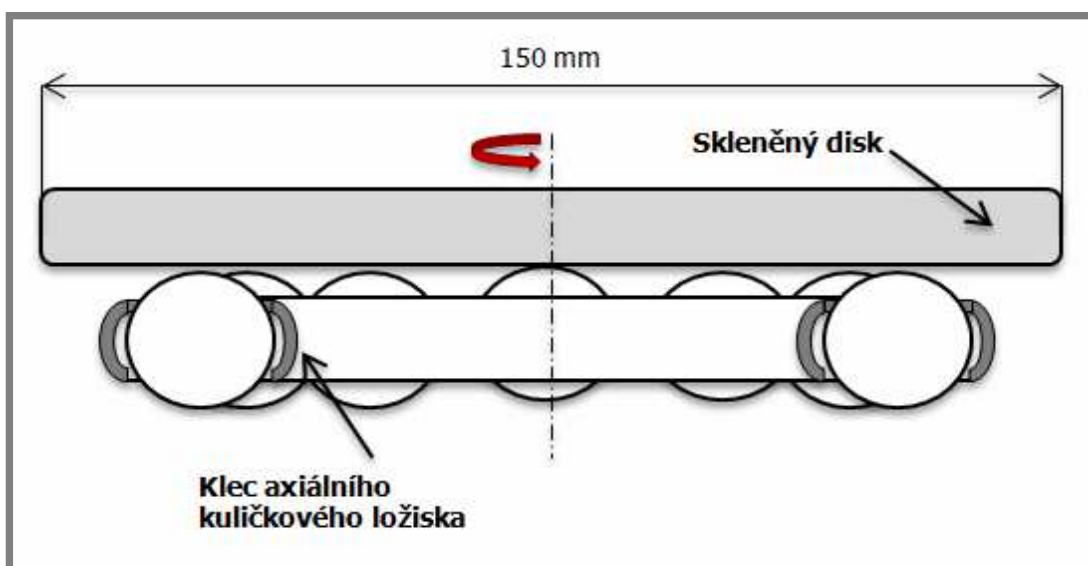


Obr.40 Plastické mazivo A – hysterezní smyčka vlivu rychlosti na centrální tloušťku filmu v kontaktu; dvě měření provedená bezprostředně po sobě

Je vidět že při nižších rychlostech kontakt vážně hladoví a tloušťka filmu se pohybuje pod hranicí 100 nm. Se zvyšující se rychlostí tloušťka filmu dále mírně klesá. V prvním měření nastává zvrát při rychlosti 0,2 m/s a tloušťka filmu je výrazně vyšší. S dalším zvyšováním rychlosti tloušťka filmu dále roste až na velmi vysoké hodnoty nad 800 nm. Avšak při opětovném postupném snižování rychlosti jsou hodnoty tloušťky filmu vyšší o 20 až 50 nm. A to navzdory celkové degradaci tloušťky filmu v průběhu celého měření, které je patrné z porovnání prvního a druhého měření, pořízených bezprostředně po sobě. Je zde vidět posun v rychlosti, kdy se tloušťka filmu začne zvyšovat. (potřebné ke spuštění dynamických efektů pomáhajících samovolné obnově maziva v kontaktu)

5.4 Experimenty na modelu reálného axiálního ložiska

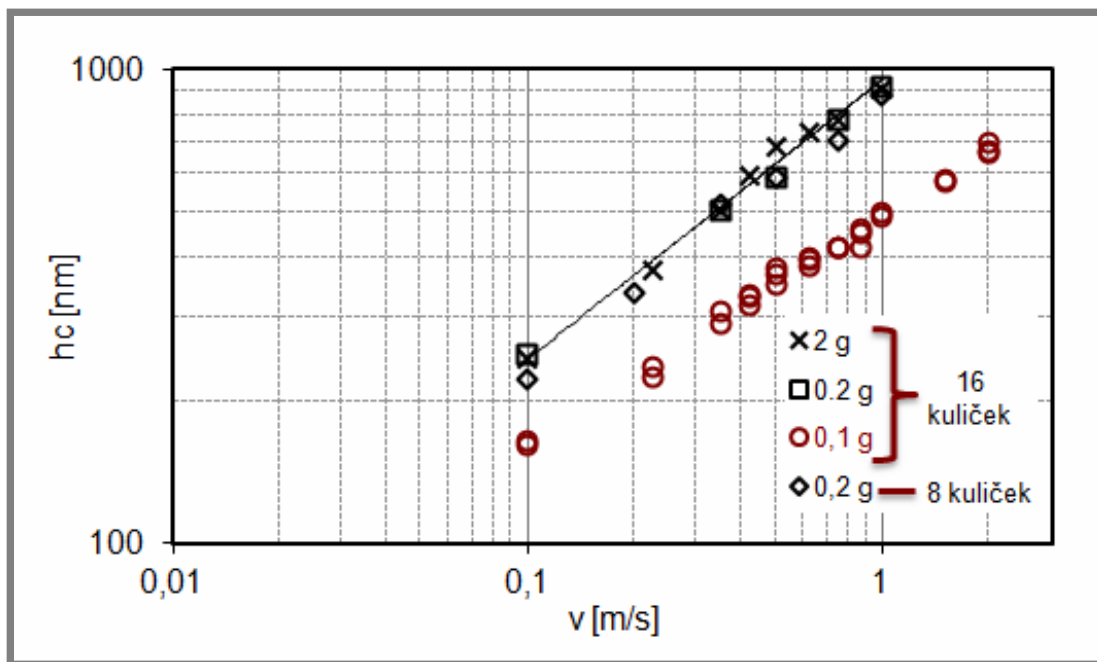
Další experimenty probíhaly na modelu reálného ložiska (schéma na Obr.41). V první sérii testů bylo použito axiální ložisko s plným počtem 16 kuliček. Ložisko bylo rovnoměrně zatíženo proti disku pákovým mechanismem o síle 5 N na jednu kuličku. Malé množství maziva 0,1 g bylo aplikováno na disk a byla měřena závislost tloušťky filmu na rychlosti.



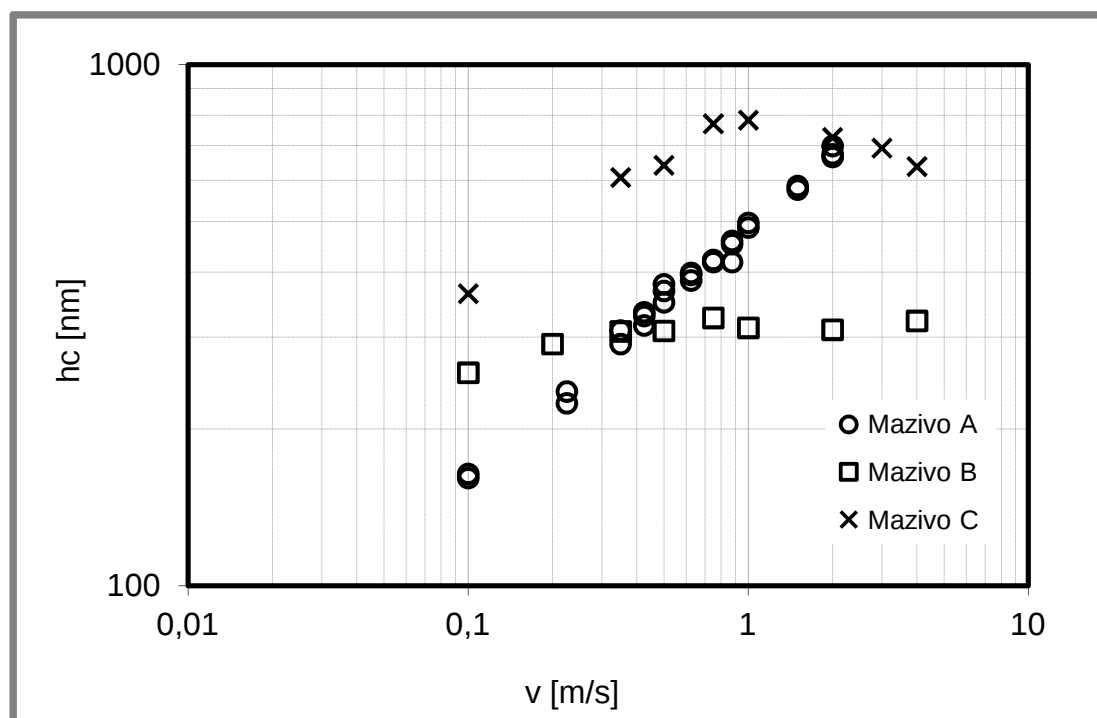
Obr.41 Schéma modelu reálného ložiska

Vliv aplikovaného množství maziva je patrný z Obr.42. Při aplikaci 0,2 g a více maziva nastává plně zaplavený režim a další zvýšení množství aplikovaného maziva, nemá na výslednou centrální tloušťku filmu vliv. Aplikováním menšího množství maziva nastává v kontaktu režim hladovění. Toto hladovění se v případě maziva A projevuje celkově menší tloušťkou filmu a odklonění od přímkové charakteristiky plně zaplaveného režimu.

Porovnání různých maziv a jejich závislost na rychlosti je ukázáno na Obr.43. Zatímco mazivo A vykazuje zvyšující tloušťku filmu v celém rozsahu rychlosti, mazivo C vykazuje typickou křivku s přechodem plně zaplaveného na hladovějící režim kolem rychlosti 1 m/s. Tloušťka filmu maziva B obsahujícího pevné teflonové přísady, se v závislosti na rychlosti zvyšuje jen nepatrně. To je pravděpodobně zapříčiněno právě těmito pevnými přísadami, které mají stabilizující účinek na tloušťku filmu v kontaktu.



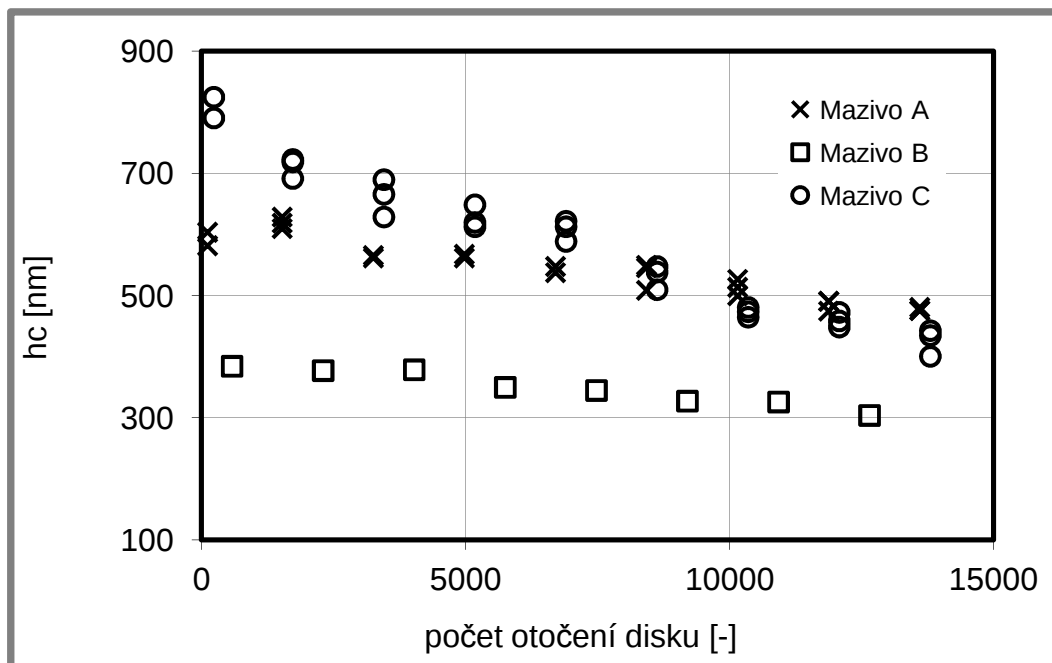
Obr.42 Model reálného ložiska; plastické mazivo A – vliv množství maziva na centrální tloušťku filmu v závislosti na rychlosti



Obr.43 Model reálného ložiska – vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu; srovnání tří maziv

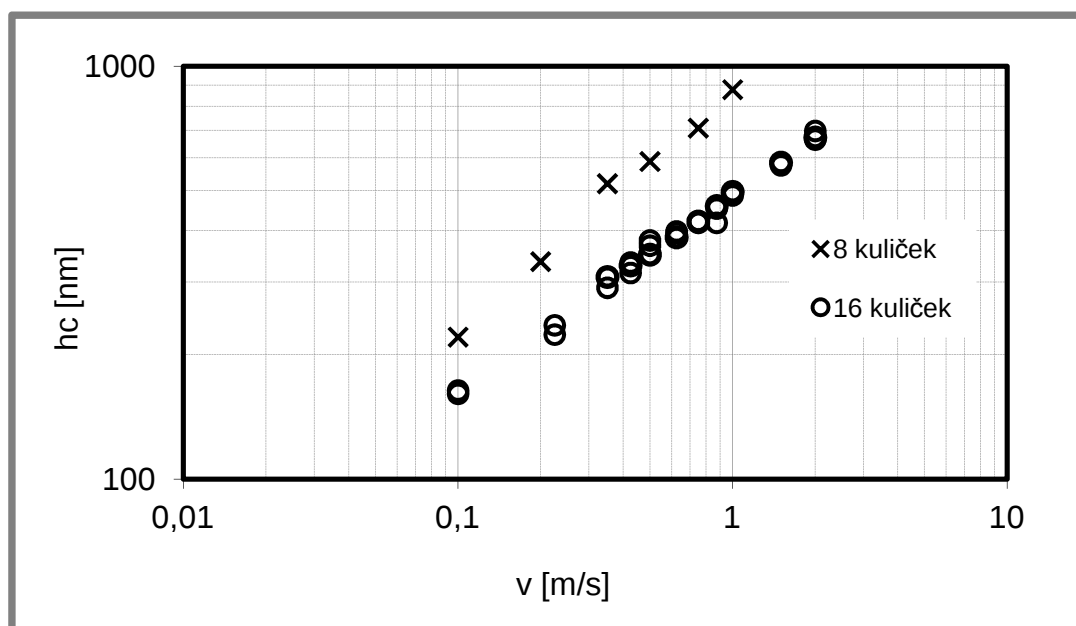
Na Obr.44 je ukázána naměřená závislost tloušťky filmu na počtu otočení disku pro všechny maziva při konstantní rychlosti 1 m/s. Všechny tři maziva vykazují postupnou degradaci tloušťky filmu po celou dobu měření. Rychlost této degradace se pro různá maziva liší. Při aplikování stejného množství maziva má mazivo C z počátku nejvyšší tloušťku filmu, avšak degradace tloušťky maziva je velmi rychlá.

Mazivo B opět vykazuje nejmenší změny v průběhu celého měření. Celkově nejvyšší tloušťka filmu a relativně pomalá degradace byla naměřena pro mazivo A.



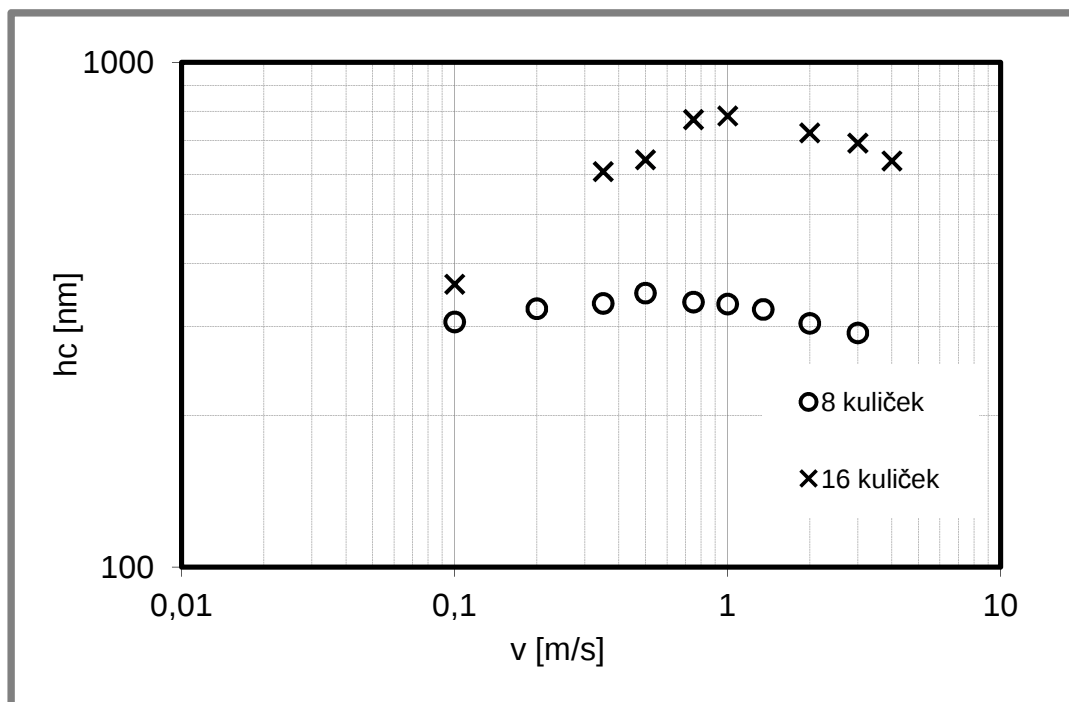
Obr.44 Model reálného ložiska – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu; srovnání tří maziv

V další sérii testů bylo použito rozměrově stejné axiální ložisko, ale s 8 kuličkami. Zatížení bylo opět upraveno na 5 N na kuličku. Bylo aplikováno menší množství maziva s ohledem na menší počet kuliček a tím i menší dráhu, na kterou musí být mazivo rozprostřeno. Cílem bylo popsat vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu. Podmínky měření byly totožné jako v případě s 16 kuličkami.

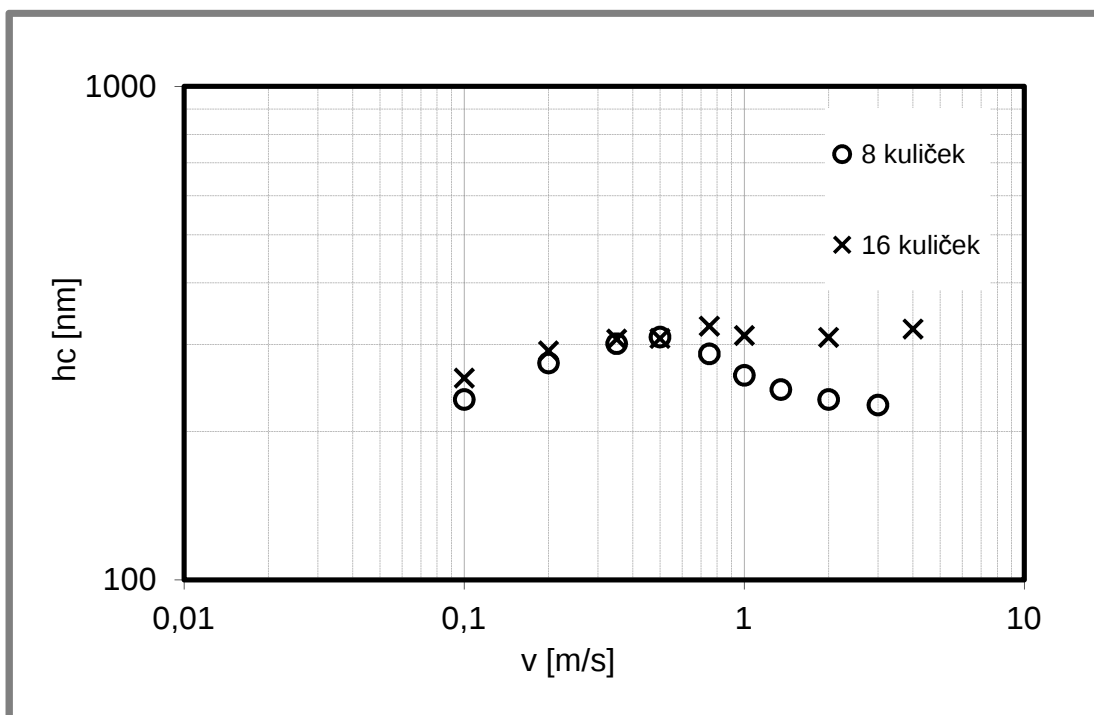


Obr.45 Model reálného ložiska; plastické mazivo A – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu

Na Obr.45-47 je srovnání měření s 8 a 16 kuličkami pro jednotlivá maziva v závislosti na rychlosti. Vliv počtu valivých elementů je pro jednotlivá maziva různý.



Obr.46 Model reálného ložiska; plastické mazivo B – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu



Obr.47 Model reálného ložiska; plastické mazivo C – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu

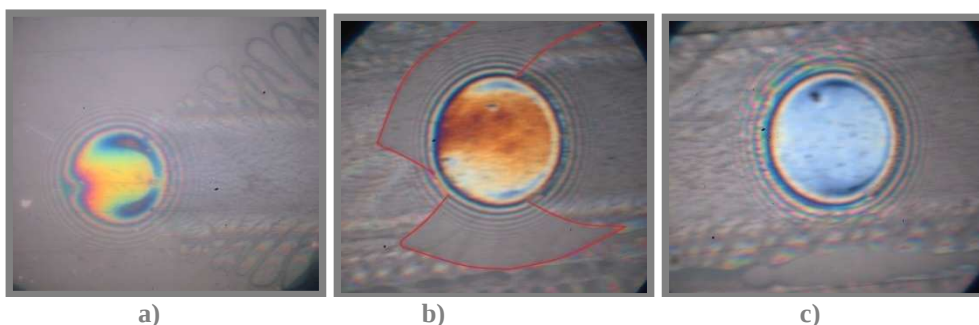
Mazivo A má v případě 8 kuliček vyšší tloušťku filmu. V grafu na Obr.42 jsou přidané naměřené hodnoty v případě 8 kuliček, kde je zřejmé, že opět nastal plně zaplavený režim.

Mazivo C má v případě 8 kuliček naopak menší tloušťku filmu. To napovídá, že vzniklé kapilární síly mají převládající vliv na samovolnou obnovu vrstvy filmu maziva v kontaktu. Větší frekvence přejezdu jednotlivých kuliček tedy pomáhá znovu zaplavovat kontakt. V menší míře je tento efekt pozorován také v případě maziva B. V případě 8 kuliček vykazuje tloušťka filmu již typickou křivku hladovění. Je tedy zřejmé, že v tomto případě od rychlosti 0,5 m/s začíná tloušťka filmu pomalu klesat. Celkově toto mazivo opět vykazuje malou náchylnost na změnu tloušťky filmu.

6 DISKUZE

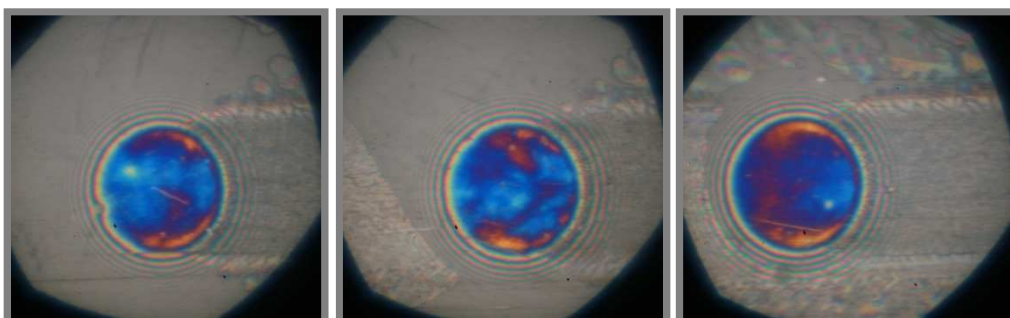
6

Pomocí vstupních měření, popsaných v předchozí kapitole, byla stanovena metodika měření a vyhodnocování výsledků. Zaznamenávat a měřit polohu menisku vůči středu kontaktu se ukázalo jako velmi obtížné. Stejně jako v případě olejů [2] lze rozlišit plně zaplavený režim od režimu hladovění pomocí polohy menisku. Plně zaplavený režim se objevuje, jestliže je meniskus dostatečně vzdálen od kontaktu a není vidět žádná stopa po předchozím kontaktu Obr.48a. Přiblížení menisku a prolomení hranice kontaktu je znakem počátku hladovění. Mírné hladovění je provázeno oblastí zvýšené tloušťky filmu ve tvaru motýlích křídel Obr.48b. V režimu vážného hladovění již není ani stopa po menisku a je vidět výrazná dráha po předchozím kontaktu Obr.48c. Přestože lze tyto režimy snadno rozpoznat, kvůli dvousložkové povaze plastických maziv dochází k silnému kolísání a znovuobjevování menisku při stejných podmínkách měření. Na rozdíl od olejů, plastické maziva vykazují jen pomalou změnu tloušťky filmu v závislosti na poloze menisku.



Obr.48 Interferogramy plastického maziva A pořízené na modelu reálného ložiska při konstantní rychlosti a) po 2 000 otočení disku; plně zaplavený režim b) po 7 000 otočení disku; mírné hladovění c) po 12 000 otočení disku; vážně vyhladovělý kontakt

Na Obr.49 jsou vidět interferogramy pořízené za stejných podmínek, během stejného měření bezprostředně po sobě. Zatímco tloušťka filmu se téměř nezměnila, poloha menisku prošla všemi třemi režimy. Sledovat začátek hladovění pomocí polohy menisku se tedy v případě plastických maziv nejeví jako vhodný způsob.

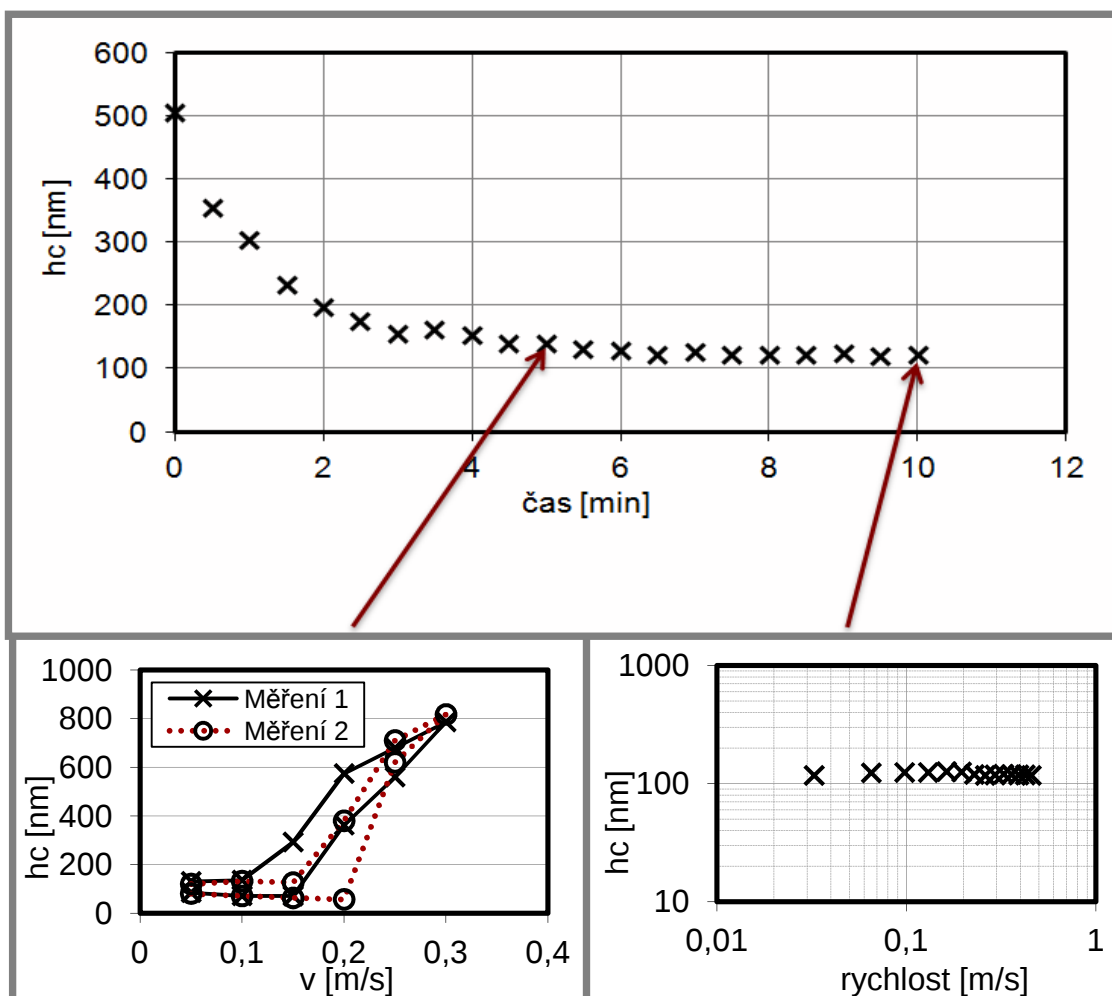


Obr.49 Interferogramy plastického maziva A pořízené na modelu reálného ložiska při konstantní rychlosti a ve stejném testu bezprostředně po sobě

Na Obr.48a je vidět postupné znovu zaplavování dráhy kontaktu kapilárními silami typické pro plastická maziva. Na Obr.48b je vidět asymetricky zformovaný meniskus. Tento jev se v případě všech měření vyskytoval velmi často a to z důvodu

odstředivých sil, které na straně menšího průměru (horní okraj obrázku) pomáhají znovu zaplavovat kontakt a na straně většího průměru (dolní okraj obrázku) naopak znovu zaplavení brání.

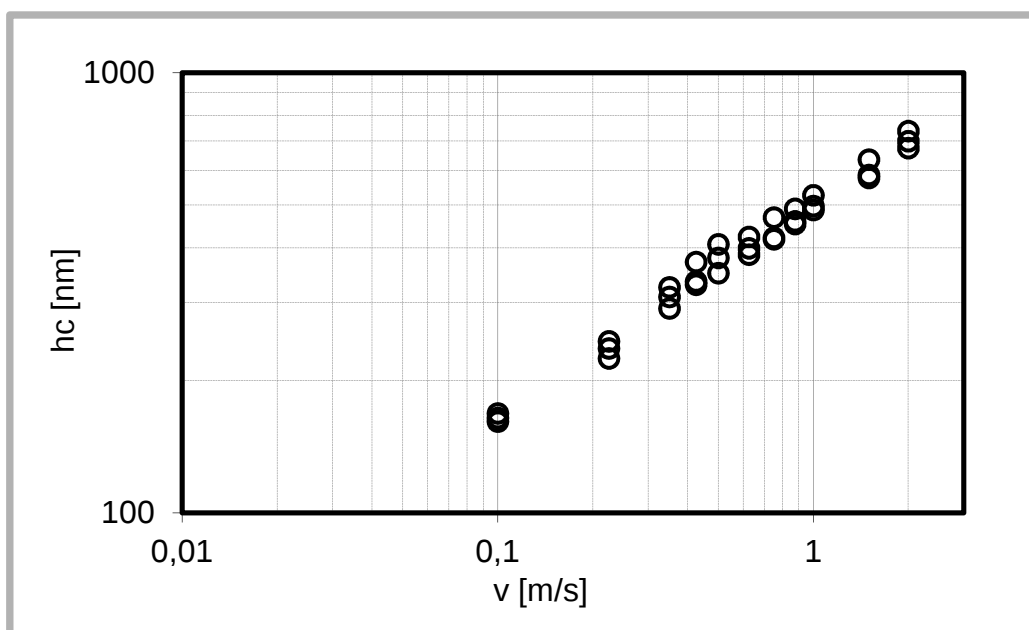
V případě jednokontaktního simulátoru, dynamický efekt změny rychlosti má výrazný pozitivní vliv na tloušťku filmu v kontaktu, jak je vidět z grafu na Obr.40 prezentovaného v předchozí kapitole. Je tedy třeba mezi každým zvýšením rychlosti počkat dostatečnou dobu pro stabilizaci tloušťky filmu. Délka této doby se značně liší podle množství aplikovaného maziva (Obr.35 a 42) i podle typu použitého maziva (Obr.43 a 44). Z provedeného experimentu vyplývá, že po dosažení stabilizace tloušťky filmu při konstantní rychlosti (Obr.50a), je již kontakt natolik vyhladověn, že následující změna rychlosti nemá již na tloušťku filmu vliv. Aby tedy bylo možno naměřit závislost tloušťky filmu na rychlosti, bylo měření prezentované v předchozí kapitole na Obr.40 provedeno po překonání počátečního prudkého poklesu tloušťky filmu, avšak dříve než bylo dosaženo konečné stabilizace. Proto je potřeba brát v potaz postupnou degradaci, která ovlivní měření a je tedy nutné naměřit hysterezní smyčku. Tuto situaci lépe popisují grafy na Obr.50. Interval kdy je možné provést měření, se nachází v oblasti, kdy je změna tloušťky filmu v závislosti na počtu otáček nejmenší, avšak před dosažením stabilizace.



Obr.50 a) Jednokontaktní simulátor; mazivo A – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu b) Vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu naměřený po 10 minutách záběhu c) Vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu naměřený po 5 minutách záběhu

Z těchto důvodů se jeví jako nejvhodnější hodnotit plastické maziva podle samovolné degradace tloušťky filmu při konstantní rychlosti. Přestože z těchto grafů nelze vyčíst přechod plně zaplaveného režimu do režimu hladovění, lze zde srovnávat výslednou centrální tloušťku filmu při různých podmínkách a zjistit tak jaké mazivo je vhodné pro dané podmínky.

Opakovatelnost měření je ukázána na grafu rychlostní závislosti Obr.51 při měření pomocí modelu reálného ložiska s 16 kuličkami. Ve všech provedených experimentech s plastickými mazivy se objevuje mnohem větší rozptyl naměřených hodnot, než v případě olejů. To je dáno silnou závislostí samovolné obnovy mazací vrstvy na tvorbě reservoárů plastického maziva na okraji dráhy kontaktu nebo na ložiskové kleci. Dynamické efekty ovlivňují rozmístění těchto reservoárů, a tím i samovolnou obnovu mazací vrstvy i výslednou tloušťku maziva v kontaktu. Rozptyl hodnot je tedy vyšší při vyšších rychlostech.



Obr.51 Model reálného ložiska; 16 kuliček, mazivo A – vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu

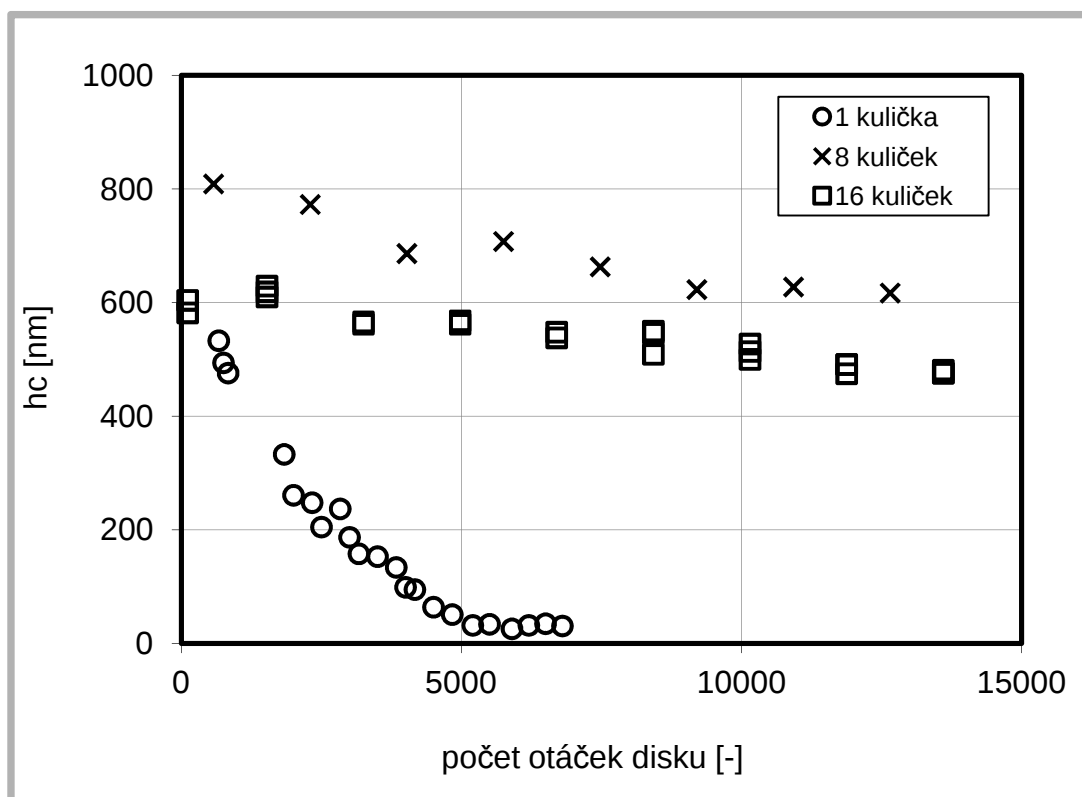
V Tab.2 jsou ukázány naměřené hodnoty ze tří měření odpovídající grafu na Obr.51. Při nejnižší rychlosti 0,1 m/s se centrální tloušťka pohybuje kolem hodnoty 166 nm s odchylkou měřených hodnot 4 nm. Se zvyšující se rychlostí roste jak tloušťka filmu, tak i odchylka naměřených hodnot. Při maximální měřené rychlosti 2 m/s se tloušťka filmu pohybuje kolem hodnoty 700 nm, s odchylkou 71 nm. Taktéž při měření za konstantní rychlosti se s přibývajícím počtem otáček disku postupně tloušťka filmu snižuje a stabilizuje. S poklesem tloušťky filmu se také snižuje rozptyl naměřených hodnot. Zatímco na začátku měření je rozptyl hodnot řádově desítky nanometrů, na konci měření kdy se tloušťka filmu pohybovala pod 100 nm, se již rozptyl naměřených hodnot snížil na 1 až 3 nm. Z těchto důvodů je třeba vždy provést více měření pro ověření každého experimentu.

Pro podrobnější ověření postupné degradace, a stabilizace tloušťky filmu, by byly dále potřeba provést dlouhodobé testy, které jsou však mimo rozsah této práce.

Tab.2: Naměřené hodnoty centrální tloušťky filmu ze tří měření a jejich odchylka při stejných podmínkách měření

Rychlost [m/s]	hc ₁ [nm]	hc ₂ [nm]	hc ₃ [nm]	Odchylka hodnot [nm]
0,1	168	161	164	4
0,225	245	236	224	21
0,35	325	291	309	34
0,425	371	335	338	36
0,5	407	379	371	36
0,625	423	398	389	34
0,75	468	418	421	30
0,875	490	447	459	50
1	526	477	497	49
1,5	634	576	581	53
2	736	698	665	71

Na Obr.52 je porovnání výsledků z obou přístupů měření (standardní jednokontaktní simulátor a model reálného ložiska). Je zřejmé, že naměřené výsledky se výrazně liší. Tento rozdíl je způsoben nejen počtem valivých elementů, ale především i přítomností ložiskové klece.



Obr.52 Mazivo A; vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu – porovnání výsledků měření na jednokontaktním simulátoru a modelu reálného ložiska

Vhodným navázáním na tuto práci by mohla být studie zabývající se vylepšením stávajícího jednokontaktního tribometru tak, aby více odpovídal reálnému prostředí a měl tedy srovnatelné výsledky s měřeními na modelu reálného ložiska. Tedy navrhnout pro jednokontaktní tribometr segment ložiskové klece s nastavitelnou vůlí a změřit jeho vliv na centrální tloušťku filmu a míru hladovění.

7 ZÁVĚR

7

V rámci této diplomové práce byla provedena řada experimentálních měření, jejichž účelem byla studie chování plastického maziva v hladovějícím elastohydrodynamicky mazaném kontaktu. Na základě provedené rešerše a vstupních experimentů byla stanovena metodika měření pro standardní jednokontaktní simulátor a následně upravena i pro měření na modelu reálného ložiska. Byly zkoumány provozní i konstrukční parametry, které ovlivňují výslednou centrální tloušťku filmu v kontaktu mazaného plastickými mazivy. Z výsledků popisovaných v předchozích kapitolách je možno vyvodit následující závěry:

Byla ověřena postupná degradace tloušťky filmu maziva. Měření na jednokontaktním simulátoru při konstantní rychlosti ukázalo, že se tloušťka filmu rapidně snižuje již po několika málo otočení disku. Následně se tloušťka filmu stabilizuje na velmi nízkých hodnotách. Výsledky těchto experimentů tedy potvrzují přítomnost mechanismu samovolné obnovy mazacího filmu v kontaktu („replenishment“) publikovaného v [10]. Tato samovolná obnova je způsobena vzájemným pohybem třecích povrchů, který generuje zpětný tok základového oleje do dráhy kontaktu.

Experimenty pro zjištění vlivu rychlosti na standardním jednokontaktním simulátoru kontaktu ukazují velmi výrazný vliv změny rychlosti na centrální tloušťku filmu. Výsledky měření s mazivem A ukazují dokonce opačný průběh než v případě olejových maziv a tedy zvyšující se tloušťku filmu se zvyšující se rychlosti. Je tedy zřejmé, že dynamický efekt změny rychlosti má velmi výrazný pozitivní vliv na centrální tloušťku filmu. Výsledky naměřené na modelu reálného ložiska ukazují rozdílné chování v závislosti na typu maziva. Maziva s nižší viskozitou dosahují při vyšších rychlostech vyšší centrální tloušťky filmu. Maziva s vyšší viskozitou mají již klasickou křivku hladovění s bodem zlomu, kdy se zvyšující rychlostí začíná tloušťka filmu naopak pomalu klesat.

Byly také provedeny experimenty pro zjištění vlivu množství maziva. Zatímco v případě jednokontaktního simulátoru, nehledě na množství aplikovaného maziva, se tloušťka filmu nakonec ustálila na hodnotě kolem 100 nm, v případě modelu reálného ložiska mělo i mírné zvýšení množství maziva za následek přechod do plně zaplaveného režimu. Lze tedy vyvodit závěr, že ložisková klec, přítomná v modelu reálného ložiska, přerozděluje mazivo mnohem efektivněji a výrazně tak přispívá samovolné obnově maziva v kontaktu.

Dále byly provedeny experimenty s vlivem počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu. Výsledky těchto experimentů ukazují, že zatímco tloušťka filmu maziva A byla v případě 6 kuliček vyšší, tloušťka filmu maziva B a C byla naopak nižší. Je jasné, že počet valivých elementů má různý vliv na různé druhy plastických maziv. V případě maziva B a C převládá vliv kapilárních sil a tudíž zvyšující se frekvence jednotlivých přejezdů kuličky po stejném místě dráhy na disku, pomáhá znovu zaplavovat kontakt a obnovovat mazací film. V případě maziva A však tento jev nenastal. Pravděpodobně z důvodu jeho nižší viskozity nebyly kapilární síly dostatečně silné na docílení dostatečné obnovy maziva v kontaktu. Tyto výsledky

znovu potvrzují přítomnost mechanismu samovolné obnovy mazacího filmu v kontaktu („replenishment“) publikovaného v [10].

Přestože, bylo zjištěno, že výsledky z obou přístupů měření nejsou porovnatelné, stále poskytují velmi cenné informace o chování mazacího filmu v ložisku. Výhodou laboratorního simulátoru kontaktu je možnost skrz přímé pozorování jednotlivých dějů detailně studovat všechny mechanismy ovlivňující chování ložiska. Naproti tomu měření pomocí modelu reálného ložiska nám dá všeobecné informace o chování ložiska v reálných provozních podmínkách. Proto tyto dvě metody nejsou alternativami, ale jsou komplementární. Bez laboratorních testů na jednokontaktním simulátoru není možné porozumět jednotlivým mechanismům ovlivňujícím chování plastického maziva v EHD mazaném kontaktu. Také měření pomocí modelu reálného ložiska je stále potřeba pro generování průmyslových dat.

Výstupem této práce je recenzovaný článek [Příloha č.2] v časopise MM Science Journal s názvem „Study of grease behaviour in a starved Elastohydrodynamically lubricated contact“ shrnující tuto diplomovou práci.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LUGT, P. M., S. VELICKOV a J. H. TRIPP. On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*, 2009, č. 52(5), s. 581-590.
- [2] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. *Tribology Transactions*, 2011, č. 54(3), s. 470-496.
- [3] VENNER, C. H., M. T. VAN ZOELLEN a P. M. LUGT. Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings. *Tribology International*, Mar 2012, č. 47, s. 175-187.
- [4] BALY, H., G. POLL, P. M. CANN a A. A. LUBRECHT. Correlation between model test devices and full bearing tests under grease lubricated conditions. *IUTAM Symposium on Elastohydrodynamics and Micro-Elastohydrodynamics*, 2006, č. 134, s. 229-240.
- [5] LUBRECHT, T., D. MAZUYER a P. CANN. Starved elastohydrodynamic lubrication theory: application to emulsions and greases. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iv Physique Astrophysique*, Jul 2001, č. 2(5), s. 717-728.
- [6] WEDEVEN, L.D., EVANS, D. a CAMERON, A. Optical analysis of ball bearing starvation. *Mechanical Engineering*, 1971, č. 93 (1), s. 44-50.
- [7] RASTEGER, F. a WINER, W. O. On the traction and film thickness behavior of grease in concentrated contact. *NLGI Spokesman*, 1989, č. 50, s. 162-174.
- [8] CANN, P. M. a SPIKES, H. A. Film Thickness Measurements of Greases Under Normally Starved Conditions, *NLGI Spokesman*, 1992, č. 56, s. 21-31.
- [9] ASTROM, H., OSTENSEN, J.O., a HOGLUND, E. Lubricating Grease Replenishment in an Elastohydrodynamic Point Contact, *Journal of Tribology*, 1993, č. 115(3), s. 501-506.
- [10] CANN, P. M. Starvation and reflow in grease-lubricated elastohydrodynamic contact. *Tribology Transactions*, Jul 1996, č. 39(3), s. 698-704.
- [11] CANN, P. M. 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*, Sep 2007, č. 40(18), s. 5446-5451.
- [12] CANN, P. M. Starved grease lubrication of rolling contacts. *Tribology Transactions*, Oct 1999, č. 42(4), s. 867-873.
- [13] DAMIENS B., CANN P. M. a LUBRECHT A. A. Influence of cage clearance on bearing lubrication. *Tribology Transactions*. 2004, č. 47, s. 2-6
- [14] HURLEY S., CANN P. M. a SPIKES H. A. Lubrication and reflow properties of thermally aged greases, *Tribology Transactions*, 2000, č. 43, s. 221-8
- [15] STACHOWIAK, G. a A. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. Third edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.
- [16] LUGT, P. M. A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*, 2009, č. 52(4), s. 470-480.
- [17] GERSHUNI, L., M. G. LARSON AND P. M. LUGT. Lubricant Replenishment in Rolling Bearing Contacts. *Tribology Transactions*, 2008, č. 51(5), s. 643-651.

- [18] VRBKA, M., SPERKA, P. a I. KRUPKA. Optical tribometer with multiple rolling contact (thrust rolling bearing) Functional sample, *Brno university of technology*, 2011.
- [19] SVOBODA, P., KOSTAL D. a KRUPKA, I. Experimental Study of Lubrication Film Formation in Multiple Contacts Device under Starved Conditions 2011, *International Joint Tribology Conference*, Oct 2012, Denver, Colorado, USA
- [20] MOGUL LA2. SK SERVIS s.r.o. [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.skservis-eshop.cz/Plasticke-mazivo-%28vazelina%29-MOGUL-LA-2--8-kg,257.html>
- [21] Technická informace Ekolube grease teflon. Ekolube [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.ekolube.cz/imgs/articles/559-33_EKOLUBE_GREASE_TEFLON.pdf
- [22] Technické informace Mogul A00. MOGUL [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_a00.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma elastohydrodynamicky mazaného kontaktu [3]	12
Obr. 2 Typická EHD závislost tloušťky filmu na rychlosti pro plně zaplavený a hladovějící režim. Obrázky z optické interferometrie pro oba režimy. Vtok maziva je vpravo [5]	14
Obr. 3 Mikrosnímky vývoje hladovějícího mazání [6]	15
Obr. 4 Zařízení kontaktu kuličky s diskem doplněného mikroskopem a kamerou [9]	16
Obr. 5 Kavitační vzor vytvořený na výstupu u plně zaplaveného kontaktu [9]	16
Obr. 6 Centrální tloušťka filmu mezi kuličkou a diskem [9]	17
Obr. 7 Pokles a obnova tloušťky filmu v kontaktu mazaném plastickými mazivy [5]	18
Obr. 8 Obrázky kontaktů mazaných plastickým mazivem z optické interferometrie a profily tloušťky filmu [5]	19
Obr. 9 Křivka hladovění znázorňující přechod z plně zaplaveného do hladovějícího režimu [5]	19
Obr. 10 Tloušťka filmu jako funkce rychlosti pro různě nastavené parametry kontaktu [11]	20
Obr. 11 Výsledky tloušťky filmu pro plastické mazivo i olej při 20 °C [12]	20
Obr. 12 Výsledky tloušťky filmu pro plastické mazivo i olej při 80 °C [12]	21
Obr. 13 Efekt periodického zatěžování na tloušťku filmu v kontaktu [11]	21
Obr. 14 Efekt spinu kuličky na tloušťku filmu plastického maziva v kontaktu [11]	23
Obr. 15 Efekt klece na rychlost hladovění plastického maziva [11]	23
Obr. 16 Závislost tloušťky filmu a počtu otáček disku pro mazivo 30cSt s různým obsahem zhušťovadla [12]	24
Obr. 17 Závislost tloušťky filmu a počtu otáček disku pro mazivo 200 cSt s různým obsahem zhušťovadla [12]	25
Obr. 18 Srovnání tloušťky filmu při plně zaplaveném a hladovějícím režimu [12]	25
Obr. 19 Naměřená teplotní závislost na čase [1]	26
Obr. 20 Teplota ve srovnání s tloušťkou filmu v kontaktu [1]	27
Obr. 21 Kontakt mezi kuličkou a deskou [15]	29
Obr. 22 Znázornění jednotlivých typů hladovění [2]	31
Obr. 23 Zařízení pro měření tloušťky filmu maziva pomocí optické interferometrie	34
Obr. 24 Experimentální aparatura a) Model reálného axiálního ložiska b) Laboratorní simulátor kontaktu [18, 19]	34
Obr. 25 Olej – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu kuličky; srovnání dvou měření a teoretických hodnot	36
Obr. 26 Olej – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu soudečku; srovnání dvou měření a teoretických hodnot	37
Obr. 27 Olej – vliv rychlosti na polohu menisku; srovnání naměřených hodnot pro valivý element kuličky a soudečku	38
Obr. 28 Schéma měření polohy menisku vůči středu kontaktu	38
Obr. 29 Plastické mazivo A – postupná degradace centrální tloušťky filmu v čase; konfigurace s volným uložením valivého elementu	39
Obr. 30 Plastické mazivo A – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu; konfigurace s volným uložením valivého elementu	40

Obr. 31 Konfigurace s volným uložením	40
Obr. 32 Konfigurace s omezením na jedinou osu rotace	40
Obr. 33 Plastické mazivo A – postupná degradace centrální tloušťky filmu v čase; konfigurace uložení kuličky bez spinu	41
Obr. 34 Plastické mazivo A – vliv rychlosti na tloušťku filmu v kontaktu; konfigurace uložení kuličky bez spinu	42
Obr. 35 Plastické mazivo A – vliv množství aplikovaného maziva na centrální tloušťku filmu v kontaktu v čase	42
Obr. 36 Schéma jednokontaktního simulátoru kontaktu	43
Obr. 37 Plastické mazivo A – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s	44
Obr. 38 Plastické mazivo B – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s	44
Obr. 39 Plastické mazivo C – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu pro rychlost 0,1 a 1 m/s	45
Obr. 40 Plastické mazivo A – hysterezní smyčka vlivu rychlosti na centrální tloušťku filmu v kontaktu; dvě měření provedená bezprostředně po sobě	45
Obr. 41 Schéma modelu reálného ložiska	46
Obr. 42 Model reálného ložiska; plastické mazivo A – vliv množství maziva na centrální tloušťku filmu v závislosti na rychlosti	47
Obr. 43 Model reálného ložiska – vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu; srovnání tří maziv	47
Obr. 44 Model reálného ložiska – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu; srovnání tří maziv	48
Obr. 45 Model reálného ložiska; plastické mazivo A – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu	48
Obr. 46 Model reálného ložiska; plastické mazivo B – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu	49
Obr. 47 Model reálného ložiska; plastické mazivo C – vliv počtu valivých elementů na centrální tloušťku filmu	49
Obr. 48 Interferogramy plastického maziva A pořízené na modelu reálného ložiska při konstantní rychlosti a) po 2 000 otočení disku; plně zaplavený režim b) po 7 000 otočení disku; mírné hladovění c) po 12 000 otočení disku; vážně vyhladovělý kontakt	51
Obr. 49 Interferogramy plastického maziva A pořízené na modelu reálného ložiska při konstantní rychlosti a ve stejném testu bezprostředně po sobě	51
Obr. 50 a) Jednokontaktní simulátor; mazivo A – vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu b) Vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu naměřený po 10 minutách záběhu c) Vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu naměřený po 5 minutách záběhu	52
Obr. 51 Model reálného ložiska; 16 kuliček, mazivo A – vliv rychlosti na centrální tloušťku filmu	53
Obr. 52 Mazivo A; vliv počtu otočení disku na centrální tloušťku filmu – porovnání výsledků měření na jednokontaktním simulátoru a modelu reálného ložiska	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Shrnutí vlastností použitých vzorků plastických maziv [20, 21, 22]	35
Tab. 2 Naměřené hodnoty centrální tloušťky filmu ze tří měření a jejich odchylka při stejných podmínkách měření.	54

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

h_c [m]	- centrální tloušťka filmu
h_0 [m]	- minimální tloušťka filmu
U [m/s]	- vstupní rychlost povrchu
η_0 [Pas]	- viskozita maziva při atmosférickém tlaku
E^* [Pa]	- redukovaný Youngův modul
R^* [m]	- redukovaný rádius křivosti
α [m ² /N]	- viskózně tlakový koeficient
W [N]	- zatížení kontaktu
k [m]	- eliptický parametr
a [m]	- délka poloosy eliptického kontaktu v příčném směru
b [m]	- délka poloosy eliptického kontaktu ve směru pohybu
ν_A [-]	- Poissonova konstanta kontaktního tělesa A
ν_B [-]	- Poissonova konstanta kontaktního tělesa B
E_A [Pa]	- Youngův modul kontaktního tělesa A
E_B [Pa]	- Youngův modul kontaktního tělesa B
R_x [m]	- redukovaný rádius ve směru osy x
R_y [m]	- redukovaný rádius ve směru osy y
R_{ax} [m]	- rádius tělesa A ve směru osy x
R_{bx} [m]	- rádius tělesa B ve směru osy x
R_{ay} [m]	- rádius tělesa A ve směru osy y
R_{by} [m]	- rádius tělesa B ve směru osy y
EHD	-elastohydrodynamické mazání
cSt	-jednotka kinematické viskozity (centistokes)
EP	-vysokotlaké přísady
PTFE	-polytetrafluorethylen (teflon)

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1:** Článek: Study of grease behaviour in a starved elastohydrodynamically lubricated contact
- Příloha č.2:** Potvrzení o podání článku