



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

UTVÁŘENÍ MAZACÍHO FILMU U SPÉKANÝCH KOVOVÝCH DÍLŮ IMPREGNOVANÝCH OLEJEM

LUBRICANT FILM FORMATION IN OIL IMPREGNATED SINTERED METAL PARTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Látal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Roman Látal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

Utváření mazacího filmu u spékaných kovových dílů impregnovaných olejem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je stanovit pomocí optické interferometrie vliv provozních parametrů na tloušťku mazacího filmu u spékaných materiálů impregnovaných olejem.

Cíle diplomové práce:

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

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

Forma práce: průvodní zpráva

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace

Projekt: Specifický vysokoškolský výzkum

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

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

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

Seznam literatury:

Stachowiak, G. (2005) Engineering tribology. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, xxiv, 801 s. ISBN 07-506-7836-4.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním studiem utváření mazacího filmu u spékáných kovových dílů impregnovaných olejem. Tloušťka mazacího filmu v liniovém kontaktu je měřena pomocí metody optické interferometrie tenkých mazacích filmů. V této diplomové práci jsou popsány vlivy jednotlivých provozních parametrů na utváření mazacího filmu. Při využití impregnovaného maziva dochází k nedostatečnému zásobení kontaktu mazivem. Jednotlivé výsledky jsou výrazně ovlivněny mírou zaplavení kontaktní oblasti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tribologie, EHD mazání, porézní součásti, tloušťka mazacího filmu

ABSTRACT

This thesis deals with the experimental study of the formation of the lubricating film used for sintered metal parts impregnated with oil. The thickness of the lubricating film in a line contact is measured by the method of optical interferometry of thin lubricating films. In this thesis, the effects of various operating parameters on the formation of the lubricating film are described. The usage of impregnated lubricant leads to insufficient supply of lubricant to the contact. Individual results are significantly influenced by the degree of flooding of the contact area.

KEYWORDS

Tribology, EHL, porous parts, lubrication film thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LÁTAL, R. *Utváření mazacího filmu u spékáných kovových dílů impregnovaných olejem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Utváření mazacího filmu u spékavých kovových dílů impregnovaných olejem* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph. D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. května 2016

.....
vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Omastovi, Ph. D. za jeho odborné vedení, podnětné připomínky, pomoc při experimentech a další cenné rady, které mi pomohly k vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a všem, kteří mi byli oporou a přispěli ke zvládnutí náročných okamžiků, které se během studia vyskytly.

1	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
1.1	Mazání a režimy mazání	16
1.1.1	Mezné mazání	17
1.1.2	Smíšené mazání	17
1.1.3	Elastohydrodynamické mazání	18
1.1.4	Hydrodynamické mazání	23
1.2	Tribologické vlastnosti impregnovaných porézních součástí	24
1.2.1	Kontakt konformně zakřivených povrchů	24
1.2.2	Kontakt nekonformně zakřivených povrchů	26
1.3	Nedostatečné zásobení kontaktu mazivem	28
1.4	Shrnutí	31
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3	METODY A MATERIÁL	33
3.1	Metody	33
3.2	Materiál	34
3.3	Typy testů	35
3.3.1	Testy statického zatěžování	35
3.3.2	Testy za podmínek valení/ smýkání	36
4	VÝSLEDKY	37
4.1	Statické testy	37
4.1.1	Vliv zatížení	37
4.1.2	Vliv drsnosti povrchu	39
4.2	Vliv valivé rychlosti	40
4.3	Vliv prokluzu	42
4.4	Vliv času	46
4.4.1	Čisté valení	46
4.4.2	Valení s prokluzem	49
4.5	Vliv teploty	51
4.6	Vliv porézní struktury	52
4.6.1	Opotřebení	53
5	DISKUZE	55
5.1	Statické testy	55
5.2	Rozložení tloušťky mazacího filmu po délce kontaktu	55
5.3	Vliv valivé rychlosti	57
5.3.1	Vliv velikosti zaplavené oblasti	58
5.4	Vliv prokluzu	59
5.5	Vliv času	60
5.5.1	Postupné zaplavování kontaktu	61
5.6	Vliv teploty	62
5.7	Vliv porézní struktury	63
5.7.1	Predikce	63
6	ZÁVĚR	65
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	71
8.1	Seznam použitých zkratk	71
8.2	Seznam použitých symbolů	71
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	72
10	SEZNAM TABULEK	74

ÚVOD

Prášková metalurgie je technologie výroby součástí z práškových kovů, oxidů a karbidů kovů a nekovových materiálů. Často se využívá kombinace těchto materiálů. Mezi hlavní výhody patří míra využitelných materiálů, šetrnost k životnímu prostředí, ekonomičnost výroby (obzvláště u složitých geometrií) a možnost výroby lehčích komponent v porovnání s konvenčními technologiemi výroby. Součásti vyrobené pomocí práškové metalurgie mají rozdílné mechanické a únavové vlastnosti. Je to převážně z toho důvodu, že po lisování, slinování a tepelném ošetření jsou ve finálním výrobku vzduchové póry. Tyto póry mají vliv na mechanické vlastnosti součástí, který nemusí být nutně negativní. Dochází k redukci hmotnosti, tlumení vibrací a v neposlední řadě lze porézní strukturu využít pro uchování maziva.

Využití porů jako úložiště maziva u slinovaných součástí se hojně využívá u kluzných ložisek nebo kluzných vložek. Toto mazivo se při kontaktu ložiska (vložky) s hřídelí ze struktury postupně uvolňuje a zajišťuje mazání kontaktní oblasti. Tímto je zajištěna samomaznost tohoto systému, a tím i jeho bezúdržbovost. Mechanismy uvolňování maziva z porézní struktury a tím mazání kontaktu jsou známy pro případ konformních povrchů, čili kontaktu kluzné ložisko-hřídel. Popsání mechanismů, či ověření funkčnosti součástí impregnovaných mazivem v případě kontaktu nekonformních povrchů ale chybí.

Jedním z ideálních příkladů pro ověření funkčnosti s využitelností v praxi je kontakt dvou ozubených kol. Je to z toho důvodu, že mezi dvěma ozubenými koly dochází ke kontaktu nekonformně zakřivených povrchů a ve většině příkladů je tato soukolí nutno mazat. Mezi základní způsoby mazání patří: mazání plastickými mazivy, mazání olejovou lázní a oběhové mazání [26]. V případě oběhového mazání může docházet k jeho výpadkům, což může mít za následek poškození celého systému. Tomuto by se dalo předcházet v případě využití slinovaných ozubených kol impregnovaných mazivem, díky němuž by drobné výpadky v mazacím systému nemuseli mít za následek jeho destrukci, díky neustálé přítomnosti maziva v kontaktu, vlivem uvolňujícího se maziva z porů.

Největší využití impregnovaných ozubených soukolí by mohlo být v případě nízkých rychlostí. Tady by mazání impregnovaným olejem mohlo plně nahradit jakýkoliv konvenční způsob.

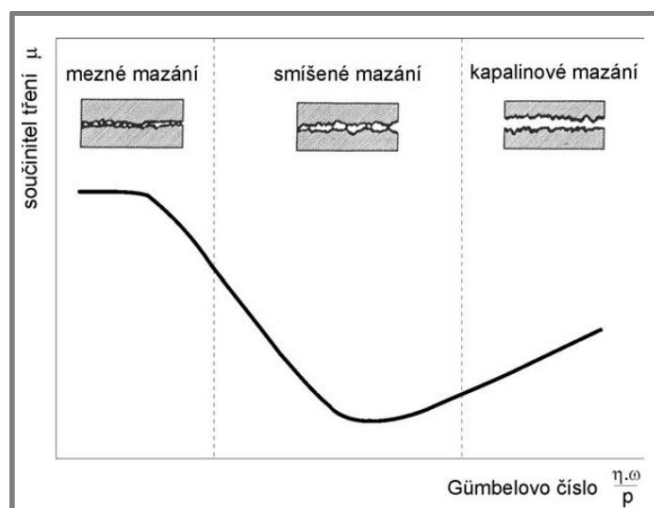
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešerše této práce se v první řadě zabývá režimy mazání se zaměřením na elastohydrodynamické mazání a predikci tloušťky mazacího filmu. Následně jsou zpracovány poznatky ze současného pole výzkumu zabývajícího se vlastnostmi porézních součástí impregnovaných olejem. Vzhledem k tomu, že zásobení kontaktu olejem uloženým v porézní součásti nemusí být dostatečné, je část rešerše zaměřena i na problematiku nedostatečného zásobení kontaktu mazivem. V Kap. 1.2.2 je zmíněna nejrelevantnější práce zabývající se touto problematikou, na kterou tato studie volně navazuje.

1.1 Mazání a režimy mazání

Úkolem mazacího filmu je snižování tření, opotřebení a odvod tepla od povrchů nacházejících se v kontaktu [2]. Jako mazivo může být použita kapalina, plyn nebo některé pevné látky, přičemž záleží na vhodnosti jednotlivých maziv pro konkrétní aplikaci. Např. filmy tvořené plyny jsou vhodné pro nízká kontaktní napětí, zatímco tuhé filmy jsou obvykle vhodné pro nízké relativní rychlosti. Obecně platí, že tloušťky mazacích filmů se většinou pohybují v rozmezí od 1 do 100 μm [1].

Mazací režimy se v zásadě dají rozdělit podle toho, zda (1) jsou třecí povrchy odděleny souvislým mazacím filmem, nebo (2) dochází k jejich bezprostřednímu styku. Mezi mazací režimy podle bodu (1) patří mazání hydrostatické, hydrodynamické, elastohydrodynamické a mazání vytlačovaným filmem. Mezi mazací režimy podle bodu (2) patří mazání mezní a mazání tuhými mazivy. Pro znázornění jednotlivých režimů mazání slouží Stribeckova křivka (Obr. 1-1), která ukazuje závislost mezi koeficientem tření a bezrozměrným parametrem známým jako Gümbelovo číslo. Tento parametr se vypočítá jako součin dynamické viskozity maziva a úhlové rychlosti čepu vydělené tlakem. Za pomoci Gümbelova čísla lze stanovit tři části Stribeckovy křivky, odpovídající třem základním režimům mazání, tj. mezní mazání, smíšené mazání a kapalinové mazání. [1-3]



Obr. 1-1 Stribeckova křivka [3]

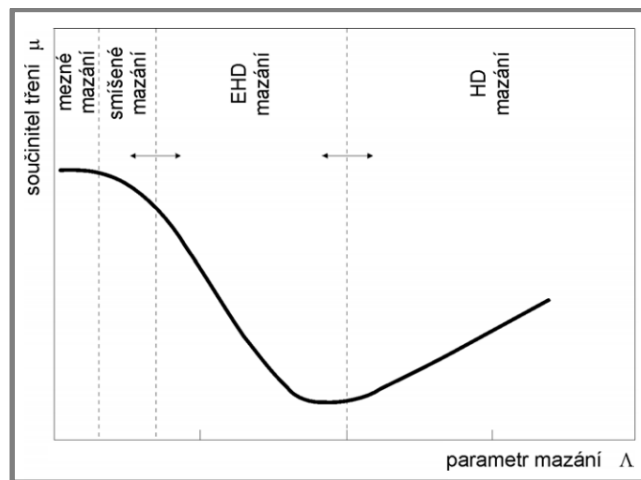
Režimy mazání ve Stribeckově křivce lze také znázornit podle parametru mazání Λ , což je redukovaná drsnost třecích povrchů, viz Obr. 1-2. Parametr mazání je poměr mezi minimální tloušťkou mazacího filmu, jež odděluje třecí povrchy,

a redukovanou drsností třecích povrchů kontaktních těles, definovaný jako [3]:

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_{red}} = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (1)$$

Kde:

- Λ 1 - bezrozměrný parametr mazání
- h_{min} μm - minimální tloušťka mazacího filmu
- R_{red} μm - redukováná drsnost třecích povrchů
- R_{a1} μm - střední aritmetická úchylka profilu třecího povrchu tělesa 1
- R_{a2} μm - střední aritmetická úchylka profilu třecího povrchu tělesa 2

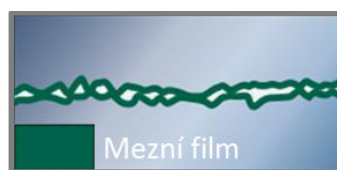


Obr. 1-2 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ [3]

1.1.1 Mezní mazání

1.1.1

Mezní mazání je režim mazání, při kterém dochází ke vzájemné interakci povrchových nerovností dvou povrchů, které jsou v bezprostřední blízkosti, viz Obr. 1-3. Zatížení je zde přenášeno prostřednictvím velmi tenkého (mezního) filmu. Tloušťka tohoto filmu se pohybuje v rozmezí 0,005 až 0,1 μm , kdy je jeho vznik zajištěn chemickými nebo fyzikálními reakcemi třecích povrchů a maziva. [27-28]



Obr. 1-3 Mezní mazání [29]

1.1.2 Smíšené mazání

1.1.2

K poklesu součinitele tření a následnému přechodu z mezního do kapalinového mazání, viz Obr. 1-1, dochází v případě zvyšujících se relativních rychlostí třecích povrchů a při klesajícím zatížení. Tento přechod se nazývá smíšeným mazáním. Třecí povrchy zde nejsou plně odděleny hydrostatickým mazacím filmem, a tak dochází ke vzájemnému kontaktu jejich povrchových nerovností. Zatížení je tedy přenášeno pomocí těchto nerovností a hydrostatického působení mazacího filmu. U deformujících se nerovností dochází k meznímu mazání a v ostatních

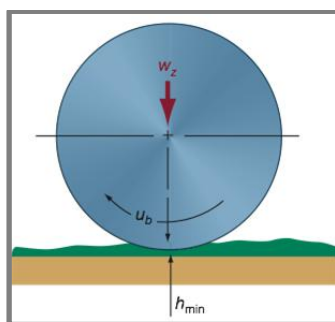
oblastech dochází ke kapalinovému mazání, viz Obr. 1-4. Tloušťka mazacího filmu se zde obvykle pohybuje v rozmezí 0,01 až 1 μm . [3, 28]



Obr. 1-4 Smíšené mazání [29]

1.1.3 Elastohydrodynamické mazání

Elastohydrodynamické mazání (EHD mazání, EHL), viz Obr. 1-5, je režim kapalinového mazání, při němž jsou elastické deformace v kontaktu řádově stejně velké jako tloušťka mazacího filmu, jehož chování ovlivňují. Dochází k němu v případech, kdy je mazivo vtahováno mezi třecí povrchy, jež se po sobě vzájemně odvalují. Je to např. u spolu zabírajících ozubených kol nebo valivých ložisek, čili u styku nekonformně zakřivených povrchů, které jsou v pohybu. Z elementární mechaniky je známo, že se tyto povrchy budou deformovat buďto plasticky, nebo elasticky, což je závislé na velikosti aplikovaného zatížení a tvrdosti materiálu. Výsledné kontaktní plochy jsou velmi malé a kontaktní tlaky velmi vysoké. Maximální tlak v kontaktu se pohybuje v rozmezí 1 až 4 GPa. Tato napětí mohou být stanovena analyticky, pomocí teorie pružnosti vyvinuté Hertzem v roce 1881 [4]. Minimální tloušťka mazacího filmu v případě EHD se pohybuje v rozmezí 0,01 až 10 μm . [1, 2, 27, 28,]



Obr. 1-5 Elastohydrodynamické mazání [29]

Při zjednodušení Hertzovy teorie je model kontaktního napětí založen na následujících předpokladech [4]:

- součásti ve styku jsou homogenní a není překročeno napětí na mezi kluzu,
- kontaktní napětí je způsobeno kolmou silou na tečnu kontaktní plochy (neexistují žádné tangenciální síly mezi tělesy),
- styčná plocha je velmi malá v porovnání s rozměry těles v kontaktu,
- tělesa v kontaktu jsou v klidu a v rovnováze,
- vliv drsnosti povrchu je zanedbatelný.

Postupným zpřesňováním Hertzova modelu byla většina z těchto předpokladů odstraněna a Hertzova teorie tvoří základ modelu EHL, při kterém je vytvářen EHD mazací film [1].

Elastohydrodynamický mazací film

Tento mazací film je v podstatě charakterizován pomocí oleje, který odděluje protilehlé povrchy těles v kontaktu. V případě EHD mazacího filmu hrají hlavní roli na jeho tvorbu tři základní jevy [1]:

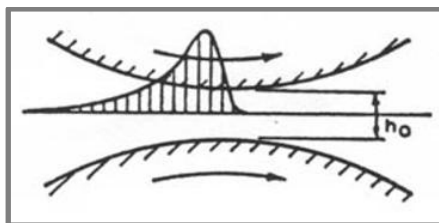
- vznik hydrodynamického filmu,
- úprava geometrie filmu pružnou deformací,
- transformace viskozity a reologie maziva pod tlakem.

Tyto tři jevy, které jsou popsány níže, působí současně a způsobují tvorbu EHD mazacích filmů.

Vznik hydrodynamického filmu

Pro vznik hydrodynamického filmu je vždy nutné splnit dvě základní podmínky:

- oba třecí povrchy se musí nacházet v relativním pohybu,
- musí vznikat konvergentní-divergentní mezera, viz Obr. 1-6.

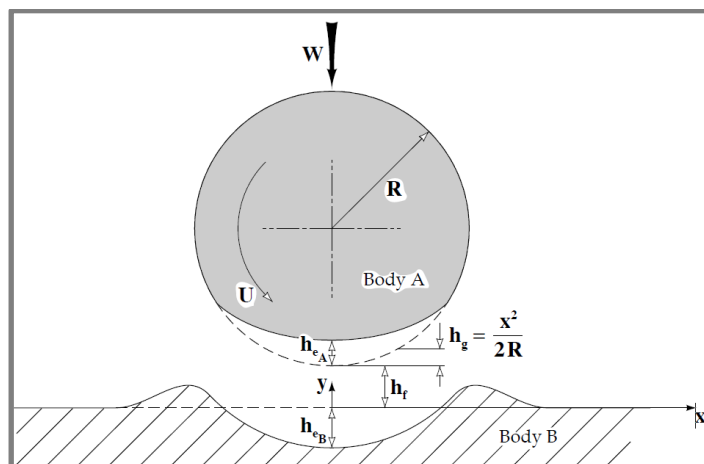


Obr. 1-6 Konvergentní-divergentní mezera podle Martin [30]

Na rozdíl od Reynoldsovy rovnice zde vstupuje viskozita maziva a geometrie kontaktní mezery jakožto funkce hydrodynamického tlaku. Tato skutečnost je rozdílná od klasického hydrodynamického mazání a proto tvar mazacího filmu není možné určit před řešením této rovnice [30].

Úprava geometrie filmu pružnou deformací

Pro všechny materiály, bez ohledu na jejich modul pružnosti, platí, že jejich povrchy jsou v Hertzově kontaktu elasticky deformované. Tento geometrický jev je znázorněn na Obr. 1-7, kde jako těleso A je uvažována koule o poloměru R a jako těleso B je uvažován válec o poloměru ∞ .



Obr. 1-7 Vliv lokálních elastických deformací na profil mazacího filmu [1]

Tloušťku mazacího filmu lze poté vypočítat [5]:

$$h = h_f + h_\varepsilon + h_e \quad (2)$$

Kde:

h_f mm - konstanta

h_ε mm - příspěvek geometrie nedeformovaných těles, (pro kouli: $x^2/2R$)

h_e mm - součet elastických deformací těles ($h_{eA} + h_{eB}$)

Elastické deformace třecích povrchů způsobí vznik centrální oblasti tvořené kvaziparalelními povrchy, jež spojuje vstupní (konvergentní) a výstupní (divergentní) klínová mezera [30].

Transformace viskozity a reologie maziva pod tlakem

Geometrie nekonformně zakřivených povrchů způsobuje intenzivní koncentraci napětí na malém prostoru, což způsobuje maximální kontaktní tlaky v rozmezí 1 až 4 GPa. Je známo, že s rostoucím tlakem výrazně roste i viskozita oleje a jiných maziv, což je nazýváno piezoviskozita. Závislost viskozita-tlak je popsána rovnicí známou jako Barusův zákon [1]:

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (3)$$

Kde:

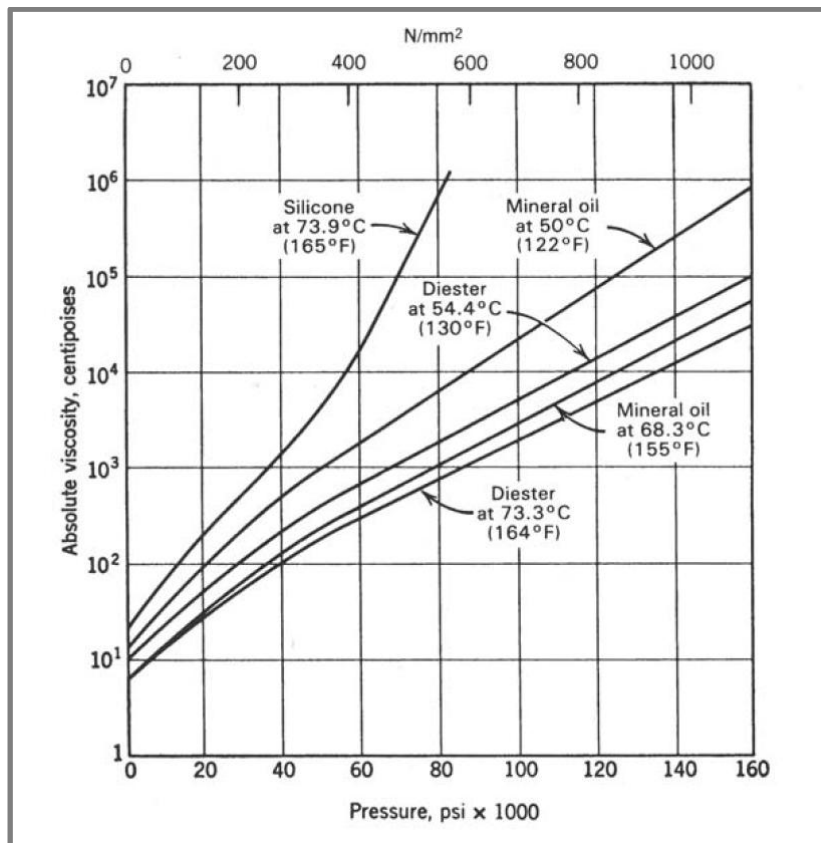
p Pa - tlak

η_p Pa·s - dynamická viskozita maziva při tlaku p a teplotě θ

η_0 Pa·s - dynamická viskozita při atmosférickém tlaku a teplotě θ

α m^2N^{-1} - tlakově-viskózní koeficient

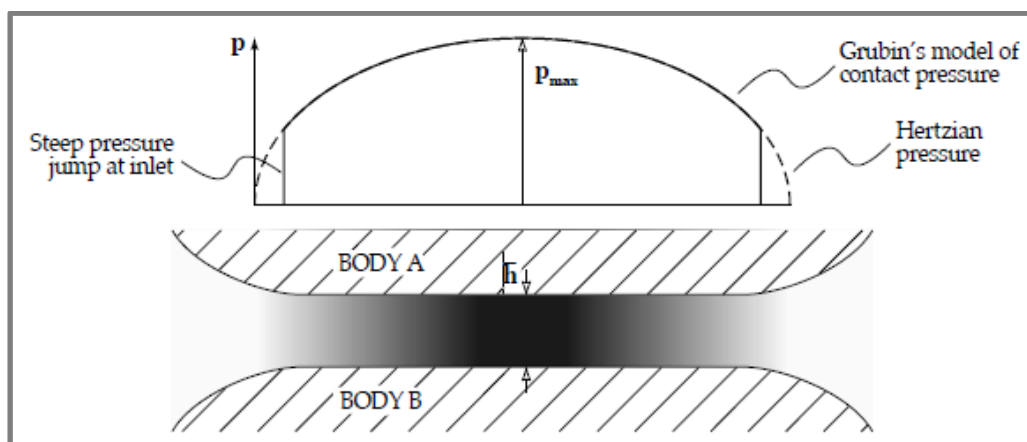
Příkladem výrazného vlivu tlaku na viskozitu je např. vzrůst kontaktního tlaku u minerálního oleje (při teplotě 50°C) z atmosférického (101 kPa) na hodnotu 1 GPa, kdy viskozita minerálního oleje vzroste téměř 10^5 krát proti jeho původní hodnotě, viz Obr. 1-8.



Obr. 1-8 Vliv tlaku na viskozitu různých maziv [30]

Tloušťka filmu v EHD kontaktu

Grubin vytvořil přibližné vyjádření tloušťky EHD filmu, jakožto funkce zatížení, rychlosti valení a dalších veličin. Tato formulace byla později nahrazena přesnějšími rovnicemi. Grubin pozoroval, že na vstupu do EHD kontaktu kontaktní tlak prudce stoupá, jak předpovídá Hertzova teorie. Pokud je prokázán vznik hydrodynamického mazacího filmu, tak by na vstupu měl vzrůst zároveň i hydrodynamický tlak. Tento prudký nárůst může být aproximován jako skokový a do určité hodnoty tlaku srovnatelný se špičkovým tlakem Hertzova kontaktu, viz Obr. 1-9.



Obr. 1-9 Grubinovo vyjádření tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu [1]

Grubinova rovnice pro tloušťku EHD filmu má podobu [1]:

$$\left(\frac{\bar{h}}{R'}\right) = 1,657 \left(\frac{U\eta_0\alpha}{R'}\right)^{0,7273} \left(\frac{W}{LE'R'}\right)^{-0,0909} \quad (4)$$

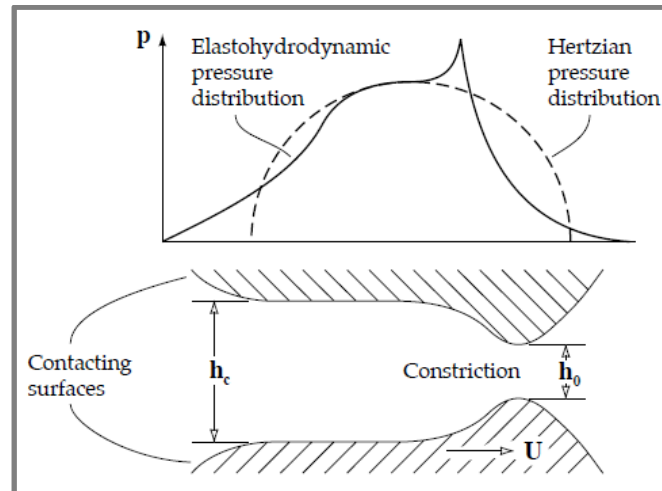
Kde:

- R' m - redukovaný poloměr křivosti
- E' Pa - redukovaný Youngův modul pružnosti
- L m - celá délka EHD kontaktu $L=2l$
- W N - kontaktní zatížení
- \bar{h} m - tloušťka EHD filmu v místě, kde tlakový gradient se rovná nule
- η_0 Pa·s - viskozita při atmosférickém tlaku a teplotě θ
- α m^2N^{-1} - viskózně tlakový koeficient
- U ms^{-1} - střední rychlost povrchů

Za předpokladu plně zaplavených podmínek jsou hodnoty tlouštěk filmů stanovené pomocí této rovnice poměrně přesné. Tohoto může být docíleno např. tehdy, pokud se elementy pohybují v olejové lázni. Později byla do Grubinova vztahu přidána další zpřesnění jako např. tepelné účinky při vysokých rychlostech.

Tlakové rozložení v EHD mazacím filmu

Ve statickém kontaktu je podle klasické Hertzovy teorie rozložení tlaku podle půlkulovitěho nebo elipsoidního profilu. V případě pohybu kontaktních ploch vzniká hydrodynamický mazací film, který mění rozložení kontaktního tlaku, viz Obr. 1-10. K největším změnám tlakového profilu pak dochází na vstupní a výstupní oblasti kontaktu. Vlivem valení těles a přítomnosti mazacího filmu dochází ke zvětšení kontaktní oblasti. V porovnání se suchým Hertzovým kontaktem dochází ke snížení hydrodynamického tlaku na vstupní oblasti. Protilehlé povrchy v kontaktu jsou téměř paralelní a rovinné. Tloušťka filmu v této oblasti je vyjádřena pomocí centrální tloušťky h_c . Mazivo v místě vstupu do kontaktu vykazuje strmý nárůst viskozity, což je následováno prudkým poklesem na úroveň okolní viskozity ve výstupní oblasti kontaktu. Aby byla zachována kontinuita toku a kompenzován pokles viskozity maziva, je na výstupu z kontaktu formováno zúžení. V této oblasti se poté nachází minimální tloušťka filmu h_0 , viz Obr. 1-10. Vlivem rychlého poklesu, do této doby rostoucího tlaku, je změna viskozity výraznější na výstupu kontaktu než na vstupu. V místě začátku poklesu tlaku je obvykle tlakové maximum větší v porovnání s maximálním Hertzovým tlakem a jeho strmost výrazně závisí na tlakově viskózní charakteristice maziva.



Obr. 1-10 Rozložení hydrodynamického tlaku v EHD kontaktu, kde h_c je centrální tloušťka filmu a h_0 je minimální tloušťka filmu [1]

Přesná analýza EHD mazání byla provedena Hamrock a Dowsonem [6]. Výsledkem této analýzy je vztah pro výpočet minimální nebo centrální tloušťky mazacího filmu pro bodový, liniový nebo eliptický EHD kontakt [1]:

$$\frac{h_c}{R'} = 2,69 \left(\frac{U\eta_0}{E'R'} \right)^{0,67} (\alpha E')^{0,53} \left(\frac{W}{E'R'^2} \right)^{-0,067} (1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (5)$$

$$\frac{h_0}{R'} = 3,63 \left(\frac{U\eta_0}{E'R'} \right)^{0,67} (\alpha E')^{0,49} \left(\frac{W}{E'R'^2} \right)^{-0,073} (1 - e^{-0,68k}) \quad (6)$$

Kde:

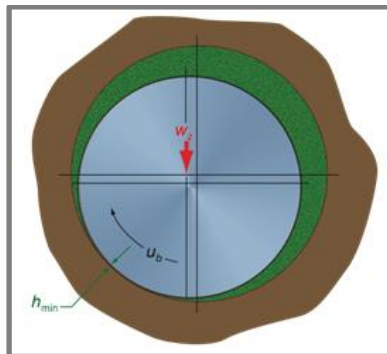
- h_c m - centrální tloušťka filmu
- h_0 m - minimální tloušťka filmu
- U ms^{-1} - střední rychlost povrchů, kde $U = (U_A + U_B)/2$
- η_0 Pa·s - viskozita při atmosférickém tlaku a teplotě θ
- E' Pa - redukovaný Youngův modul pružnosti
- R' m - redukovaný poloměr křivosti
- α m^2N^{-1} - viskózně tlakový koeficient
- W N - kontaktní zatížení
- k - bezrozměrný parametr elipticity definovaný jako: $k = a/b$, kde a je velikost poloosy kontaktní elipsy v příčném směru a b je velikost poloosy ve směru pohybu

Pro liniový kontakt je tedy $k = \infty$ a pro bodový kontakt je $k = 1$. Výše uvedená rovnice je platná pro hodnoty k v rozmezí 0,1 až ∞ [7].

1.1.4 Hydrodynamické mazání

Hydrodynamické mazání, viz Obr. 1-11, je režim kapalinového mazání, ke kterému dochází v případě, že mazivo v kontaktu je pod dostatečným tlakem a zajistí vzájemné oddělení stykových ploch relativně tlustým mazacím filmem. K hydrodynamickému mazání dochází mezi konformně zakřivenými povrchy,

kteřé jsou ve vzájemném pohybu. Minimální tloušťka mazacího filmu se pohybuje v rozmezí 1 až 100 μm a maximální tlak v kontaktu je okolo 5MPa. [2, 27, 28]



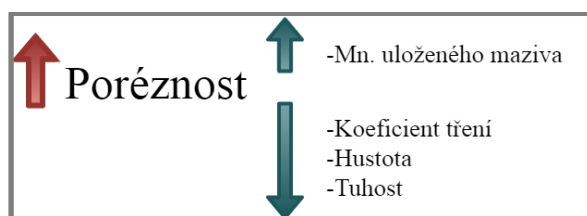
Obr. 1-11 Hydrodynamické mazání [29]

1.2 Tribologické vlastnosti impregnovaných porézních součástí

1.2.1 Kontakt konformně zakřivených povrchů

Obecně má poréznost dílu vliv na jeho hmotnost, a tím i jeho hustotu. Platí, že s rostoucí porézností dílu klesá jeho hmotnost a hustota. Pokud se zvýší hustota vzorku, vzroste tím i jeho tvrdost [8]. Se změnou hodnoty poréznosti se také mění tribologické vlastnosti dílů. Je to způsobeno tím, že vyšší poréznost ve vyrobeném dílu způsobí menší interakci mezi kontaktními povrchy, což vede ke snížení koeficientu tření [8-9]. Jednou z výhod je možnost využití této poréznosti pro uchování maziva. Jsou-li voleny správné parametry výroby, lze docílit vnitřního propojení pórů a uložení většího množství maziva v samotné součásti. Díky tomuto je možno docílit mazání kontaktu.

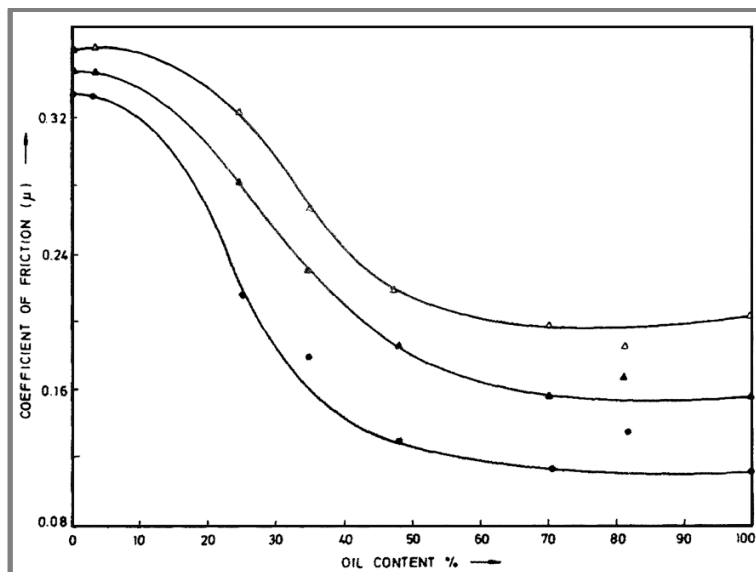
Využití poréznosti dílů pro impregnaci olejem a tím způsobené zlepšení jejich tribologických vlastností není přílišnou novinkou. Jedno z prvních využití této myšlenky bylo v roce 1925 u porézních kovových kluzných ložisek [10]. Od této doby se tato ložiska těší velké popularitě. Je to převážně proto, že díky mazivu uloženému v pórech je často zajištěno mazání po celou dobu životnosti stroje, ve kterém je ložisko použito. Díky tomuto může být zajištěna bezúdržbovost celého stroje. Předpokladem je tedy uvolnění maziva do oblasti kontaktu dvou těles, čímž dojde k jeho mazání [11-13]. Množství uchovaného maziva v pórech je závislé na poréznosti dané součástí [11-12]. Shrnutí vlivu rostoucí poréznosti na základní vlastnosti součástí je znázorněno na Obr. 1-12.



Obr. 1-12 Vliv poréznosti na další vlastnosti dílu

Jak bylo zmíněno, mazivo má tendenci z pórů unikat a tím zajistit mazání součástí. Z dlouhodobého hlediska je tedy nutné počítat se ztrátou maziva během pracovního cyklu. K tomuto jevu může docházet v případě vypařování maziva

ze součástí [14]. Taktéž může docházet k výtoku maziva ze součástí vlivem nerovnováhy u povrchového napětí na rozhraní olej vzduch s externími silami působícími na olej [12-13], což nemusí mít nutně negativní vliv. Vždy záleží na tom, jaké množství maziva uniká ze součástí, a na tom do jaké oblasti toto mazivo uniká. Nejvíce kritickou oblastí pro nechtěný únik maziva ze součástí mohou být nefunkční povrchy. Bylo zjištěno, že například u slinovaných ložisek kluzných nemusí mít tato ztráta maziva (v podobě bočního výtoku nebo vypařování) nutně výrazný vliv na vzrůst koeficientu tření [14]. Z Obr. 1-13 je patrné, že k výraznému vzrůstu koeficientu tření docházelo až v případě poklesu procentuálního množství oleje v ložiskách pod hranici 50%.



Obr. 1-13 Vliv procentuálního množství oleje na koeficient tření [14]

Obsah maziva v součásti může ovlivnit velikost koeficientu tření a tím následně snížit životnost těles, která jsou v kontaktu. Tomuto může být částečně zabráněno správnou volbou maziva, protože oleje s nižší viskozitou mají v porovnání s oleji o vyšší viskozitě tendenci rychleji unikat z pórů [13]. Je totiž jistá souvislost mezi viskozitou maziva a velikostí pórů, kdy je nutné, aby mazivo unikalo do kontaktu, ale ne v příliš velkém množství, aby nedocházelo k jeho velkým permanentním ztrátám. Podle těchto parametrů je proto nutná správná volba maziva, aby byla zajištěna co nejvyšší životnost součástí. Další možností pro zamezení nechtěného výtoku většího množství maziva může být uzavření pórů na nefunkčních površích. V případě úzkých porézních radiálních ložisek bylo zjištěno, že tímto může být zabráněno nechtěnému výtoku maziva [15]. Při zkoumání drsnosti povrchů u porézních součástí impregnovaných olejem bylo zjištěno, že její nízká hodnota vede k menším olejovým ztrátám [13]. Je to z toho důvodu, že v případě vyšší drsnosti povrchu je poskytnuto více cest pro únik oleje. Na druhou stranu v případě dosažení režimu smíšeného nebo mezného mazání vlivem nižší tloušťky mazacího filmu v porovnání s velikostí povrchových nerovností může docházet k redukci drsnosti povrchu. Tento jev je způsoben plastickými deformacemi povrchových nerovností nebo jejich odlamováním. V tomto případě může docházet k nežádoucímu zamezení výtoku maziva z pórů vlivem ucpání funkčních povrchů těmito odlomky [13]. Tento jev je převážně způsoben absencí cirkulujícího maziva,

kteřé tyto částice obvykle odnáší z místa kontaktu. Kombinace zanášení pórů s postupnou redukcí drsnosti povrchu vlivem opotřebení má za následek nižší rychlost výtoku maziva ze součásti, což může mít výrazný vliv na její životnost. Při zkoumání porézních ložisek z různých materiálů a s různou propustností bylo zjištěno, že jejich životnost je přímo úměrná velikosti pórů [16].

Dosažení hranice životnosti by se obecně dalo charakterizovat jako výrazná ztráta funkčních vlastností v porovnání s původním stavem součásti. V případě porézních kluzných ložisek impregnovaných olejem to může být chvíle, kdy trvalá ztráta maziva došla do kritické hodnoty a/nebo funkční povrch je vlivem opotřebení znehodnocen (ucpání pórů, výrazná změna drsnosti povrchu, změna rozměru součásti). Životnost součásti zničené vlivem výrazné ztráty maziva z její struktury lze prodloužit přidáním pár kapek oleje na její funkční plochy [14].

1.2.2 Kontakt nekonformně zakřivených povrchů

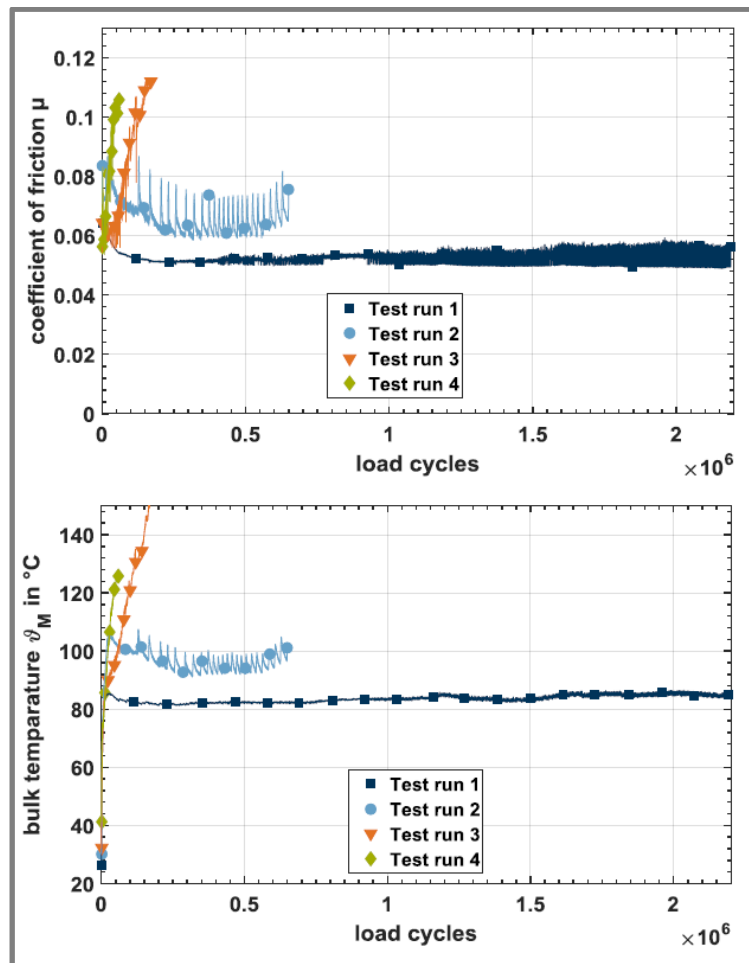
Oblast porézních dílů impregnovaných olejem s nekonformně zakřivenými kontaktními plochami není příliš prozkoumána. Jediným relevantním zdrojem je práce německého týmu z Výzkumného centra Ozubených Kol na Technické Univerzitě v Mnichově (FZG), se kterým se v průběhu řešení této problematiky spolupracovalo. FZG v této oblasti publikovali již jednu studii.

[17] **EBNER, M., T. LOHNER, K. MICHAELIS, J.-P. STEPLINGER, B.-R. HÖHN, K. STAHL.** Self-Lubricated Elastohydrodynamic (EHL) Contacts with Oil-Impregnated Sintered Materials.

Autor v této práci předkládá v první řadě předběžné výpočty pro zjištění teoretického vlivu Hertzova tlaku na tloušťku filmu. Následně je zmíněno, že výpočty jsou dostatečné v případě dostatečného množství maziva vytlačeného do kontaktní oblasti. V případě nedostatečného zásobení maziva kontaktem není možné pomocí těchto jednoduchých kalkulací předpovědět chování kontaktu.

Experimenty byly provedeny na dvoudiskovém zařízení, které se od optického tribometru (Kap. 3.3.2) primárně liší tím, že jsou proti sobě přitlačeny dva kovové disky s rovnoběžnými osami. Toto zařízení neumožňuje sledovat v reálném čase průběh tloušťky mazacího filmu.

Studie byla primárně zaměřena na nastínění chování slinovaných vzorků v závislosti koeficientu tření a teploty těles na množství zatěžovacích cyklů. Z prvních testů bylo patrné, že není možné pozorovat logické chování kontaktu, a bylo poukázáno na možnou špatnou opakovatelnost experimentů. Z tohoto důvodu byla provedena série testů pro její ověření, viz Obr. 1-14.

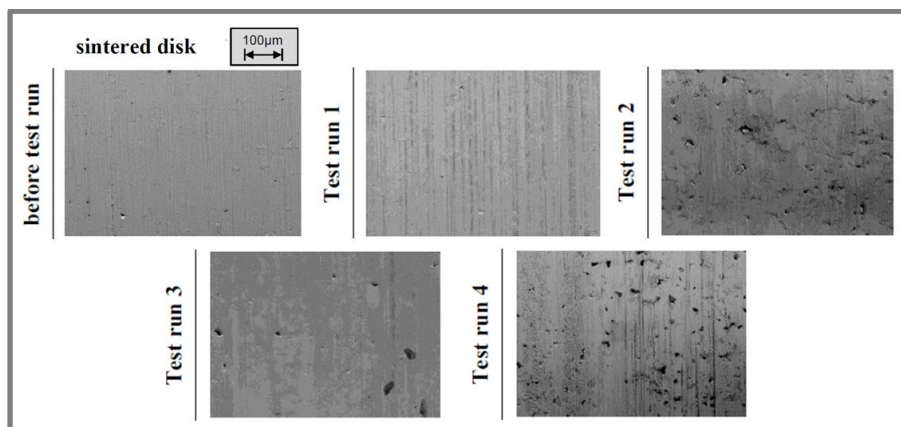


Obr. 1-14 Závislost koeficientu tření a teploty vzorků na množství zatěžovacích cyklech [17]

V případě testu 1 bylo dosaženo jakési tribologické rovnováhy, která je vyvozena ze stabilní hodnoty koeficientu tření a teploty těles. S rostoucím množstvím zatěžovacích cyklů průběh koeficientu tření podléhá cyklické oscilaci. Profil teploty těles kopíruje profil koeficientu tření v jeho odlehčené formě. Test byl zastaven po $2,2 \cdot 10^6$ množství zatěžovacích cyklů bez žádného viditelného poškození vzorků, viz Obr. 1-14.

U testu 2 bylo pozorováno výraznější cyklické chování v porovnání s testem 1. Docházelo vždy k prudkému nárůstu koeficientu tření a k jeho následnému prudkému poklesu. Porovnání mezi profilem teploty těles a koeficientem tření ukazuje jasnou souvislost v chování.

V testech 3 a 4 byl pozorován prudký nárůst koeficientu tření a zároveň i teploty těles. V určité fázi museli být testy předčasně ukončeny.



Obr. 1-15 Náhled na povrchy vzorků před a po testech [17]

Při bližším zkoumání povrchů před a po provedených testech autor poukazuje na opotřebení vzorků v podobě rýhování, což potvrzuje jeho predikci vzniku mezného a smíšeného mazání v průběhu experimentů. Výjimkou byl test číslo 1, který vykazoval relativně konstantní průběh a nedocházelo k velkým výkyvům koeficientu tření a teploty těles. Zároveň je patrné, že vlivem opotřebení dochází k otevření většího množství pórů.

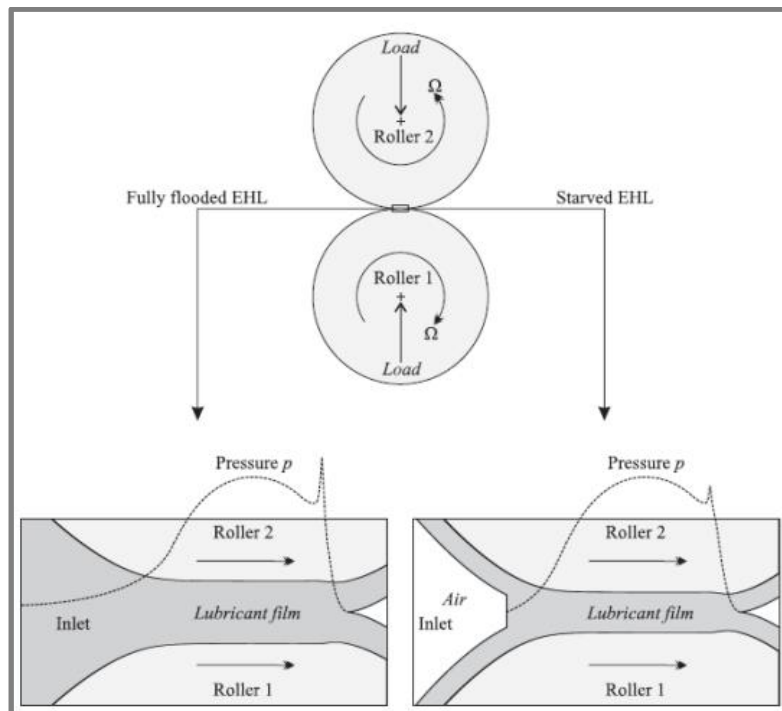
Závěrem autor předkládá, že testy probíhaly za stejných podmínek a že lze vyloučit to, že by výsledky byly ovlivněny různým množstvím impregnovaného oleje ve vzorcích.

1.3 Nedostatečné zásobení kontaktu mazivem

Nedostatečně zásobený (hladovějící) EHD kontakt je kontakt s nižší tloušťkou mazacího filmu v porovnání s kontaktem, který má k dispozici dostatečné množství maziva (plně zaplavený) [18].

Využitím oleje, který je uložen pouze v pórech u spékaných součástí, nemusí být zajištěno dostatečné zásobování kontaktu, viz Kap. 1.2.2. V případě ozubených kol může mít nedostatečné mazání za následek poškození kontaktních povrchů [19].

Na Obr. 1-16 je znázorněn rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a nedostatečně zásobeném kontaktu.

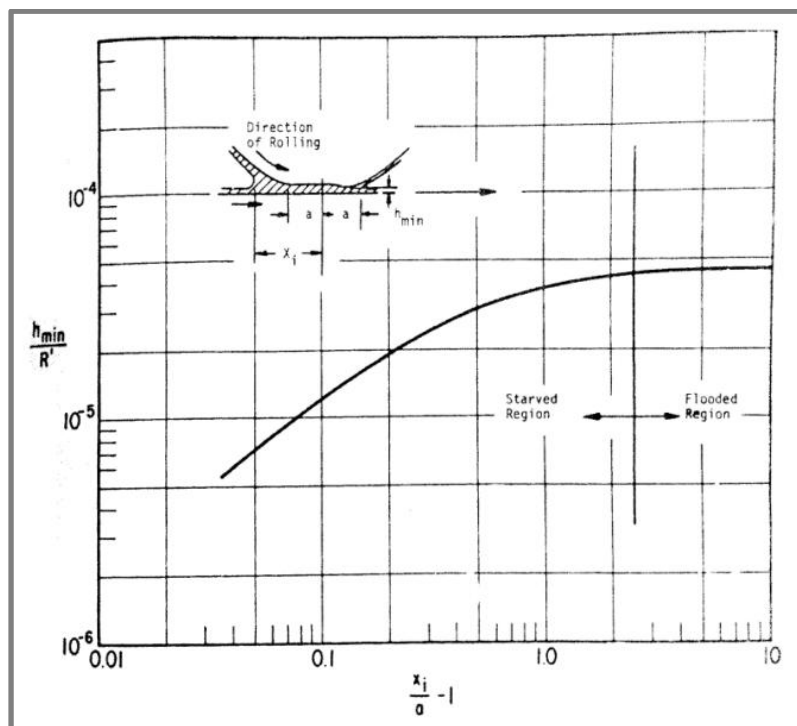


Obr. 1-16 Rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a nedostatečně zásobeném kontaktu mazivem [6]

U plně zaplaveného kontaktu (Obr. 1-16 levý detail) je prostor mezi dvěma tělesy plně zásobován mazivem [6, 20]. Je to z důvodu konvergující mezery, jež je vytvářena geometrií těles a zároveň jejich deformacemi. Současně s pohybem je mazivo vtahováno do kontaktu a vlivem geometrie mezery dochází k nárůstu tlaku v mazivu, což má za následek výrazné zvýšení viskozity, díky čemuž se vytvoří vrstva maziva plně oddělující kontaktní tělesa [21].

U hladovějícího kontaktu (Obr. 1-16 pravý detail), ke kterému může docházet při nadměrném zatížení či při příliš vysoké provozní rychlosti, nemusí být kontaktní plochy plně odděleny, čili může docházet ke střetu povrchových nerovností a následnému poškození povrchů [22]. V porovnání s plně zaplaveným kontaktem je tlakové maximum v hladovějícím kontaktu výrazně nižší [23]. Je to z toho důvodu, že ve chvíli kdy by tlak v kontaktu ještě narůstal, by zde nebylo dostatečné množství maziva pro zajištění této skutečnosti.

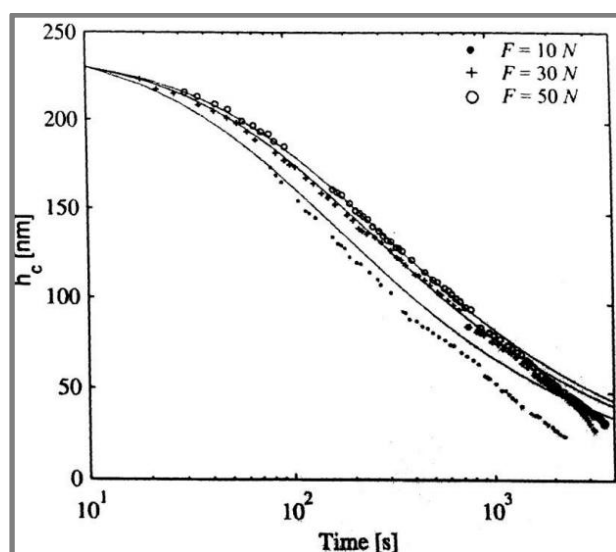
Při studiu nedostatečně zásobeného kontaktu v přístrojových ložiscích [24] byl zjištěn vliv polohy vstupní oblasti (velikost zaplavené oblasti) na tvorbu mazacího filmu, viz Obr. 1-17.



Obr. 1-17 Vliv polohy vzdálenosti menisku na minimální tloušťku mazacího filmu [24]

Z obrázku je patrné, že s klesající vzdáleností vstupní oblasti (X_i) lze dosáhnout limity, která tvoří hranici přechodu mezi plně zaplavenými podmínkami a hladovějícími podmínkami. Jakmile dojde k hladovění, je vlivem klesajícího tlaku snižována tloušťka mazacího filmu v kontaktu. S klesající tloušťkou filmu může dojít ke styku povrchových nerovností, což má konkrétně u přístrojových ložisek za následek snížení životnosti.

Během testování konfigurací simulující hladovějící kontakt byl pozorován průběžný pokles tloušťky mazacího filmu, kdy byl tento jev způsoben bočním výtokem [23]. Bylo zjištěno, že pro vyšší zatížení se centrální tloušťka snižuje pomaleji, než pro nižší, viz Obr. 1-18.



Obr. 1-18 Rychlost poklesu tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase pro různá zatížení [25]

To může být způsobeno vyšší viskozitou maziva, vlivem vyššího tlaku v kontaktní oblasti a tím pádem snížením bočního výtoku.

1.4 Shrnutí

1.4

Využití porézności vznikající při slinování materiálu jako úložiště maziva není přílišnou novinkou, ovšem současné pole výzkumu je spíše zaměřeno na studium konformních povrchů nikoli nekonformních. V případě kontaktu konformně zakřivených povrchů, například při kontaktu kluzné ložisko-hřídel, dochází k hydrodynamickému režimu mazání. Naopak kontakt dvou ozubených kol je kontakt nekonformně zakřivených povrchů. Za předpokladu dostatečného zásobení kontaktu mazivem dochází ke kapalinovému EHD režimu mazání. Dá se ovšem předpokládat, že bude docházet k nedostatečnému zásobení kontaktu mazivem a tloušťka mazacího filmu bude nižší než v případě plného zaplavení. Pro určení toho, zda dochází k hladovění kontaktu a jak výrazný tento jev bude, je důležitá velikost zaplavení, neboli vzdálenost menisku maziva od hranice Hertzova kontaktu, viz Kap. 3.3.1.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Z dat, která byla získána pomocí rešerše, se dá se předpokládat, že v případě kontaktu tělesa s porézním vzorkem impregnovaným olejem dojde k vytlačení maziva do kontaktní oblasti. Toto mazivo zajistí vytvoření mazacího filmu mezi oběma tělesy, který ovšem nemusí být dostatečný v porovnání s konvenčními druhy mazání a může docházet k tzv. hladovění kontaktu. Dá se předpokládat, že vlivem nedostatečného zásobení kontaktu mazivem bude docházet k meznému mazání a tím i k rychlejšímu opotřebením vzorků. Z dlouhodobého hlediska může docházet k větším ztrátám maziva ze součásti a tím i k postupné snižování životnosti celého systému. Z výsledků [17] vyplývá, že opakovatelnost chování celého systému nemusí být příliš vysoká a dají se očekávat velké rozptyly v jednotlivých měřeních.

Cílem této práce je stanovit pomocí optické interferometrie vliv provozních parametrů na tloušťku mazacího filmu u spékáných materiálů impregnovaných olejem se zaměřením na studium nekonformních kontaktů pro aplikaci na samomazná ozubená kola vyrobená pomocí spékání práškového materiálu.

Přínosem této práce je ověření samomazných schopností slinovaných součástí impregnovaných olejem u nekonformních kontaktů.

Tato práce probíhá ve spolupráci s Výzkumným centrem Ozubených Kol na Technické Univerzitě v Mnichově (FZG). Výstupem této práce je publikace, respektive její relevantní část, vytvořená z výsledků této studie a připravená ke společné publikaci s FZG v časopisu s impact faktorem.

3 METODY A MATERIÁL

Hlavní část práce se zabývá experimentálním pozorováním modelové situace, analýzou výsledků a vyvozením obecných závěrů. Jsou hledány odpovědi na dílčí otázky nebo ověřovány základní předpoklady.

Zejména:

- (1) Jak jednotlivé parametry ovlivňují utváření mazacího filmu (uvolňování maziva)
 - Valivá rychlost
 - Prokluz
 - Čas
 - Teplota
- (2) Ovlivňuje porézní struktura utváření mazacího filmu?

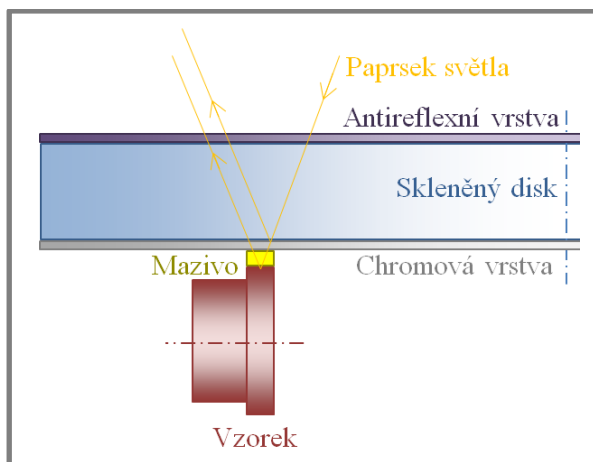
Při experimentu jsou aplikovány empirické metody zkoumání, při nichž je pozorován živý obraz reality. Empirickému rozboru je vlastní deskriptivní přístup, který ukazuje skutečnou podstatu věci.

Při vyvozování obecných závěrů na základě poznatků o jednotlivostech je použit proces indukce. Článkem myšlenkového řetězce je i dedukce, která umožňuje testovat hypotézy vyslovené v úvodu práce a hypotézy nově formulované na základě indukce.

V této diplomové práci je zkoumání prováděno na modelu reálné situace, proto jsou při vyvozování obecných závěrů zvažována možná modelová zkrácení.

3.1 Metody

Pro zobrazení kontaktu těles bylo využito metody optické interferometrie, viz Obr. 3-1. Při použití této metody se využívá skleněného (případně safírového) disku a lesklého ocelového vzorku. Jako zdroj světla se používá bílé světlo, které má široké spektrum vlnových délek, čili se jedná o interferenci světla s nízkou koherencí.

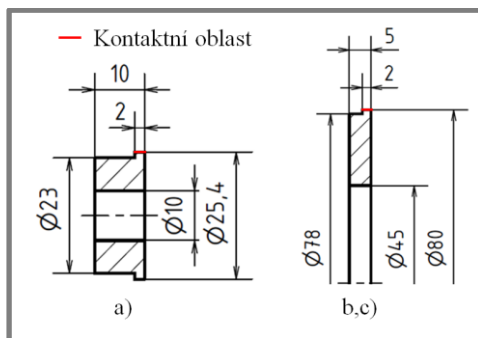


Obr. 3-1 Princip optické interferometrie

K samotné interferenci dochází díky tomu, že paprsek dopadající na tenkou chromovou vrstvu, která leží na spodní straně disku, se dělí na dvě části. První svazek tohoto světelného paprsku se odrazí od chromové vrstvy a druhý svazek se odrazí až od lesklého ocelového vzorku. Oba tyto svazky se pak vrací do objektivu mikroskopu, přičemž každý z nich urazí jinou optickou vzdálenost, čili dojde k posunu jejich fáze. Tento posun se ve výsledném obrazu (interferogramu) projeví interferencí, čili změnou intenzity barvy světla. Při provedení kalibrace lze pomocí analýzy RGB spektra přiřadit konkrétní barvě konkrétní tloušťku mazacího filmu. K zaznamenání obrazu je využita vysokorychlostní digitální CMOS kamera (Vision research Phantom v710). Získané interferogramy jsou pak zpracovány v softwaru Achilles.

3.2 Materiál

K dispozici byly 3 typy vzorků, viz Obr. 3-2. (a) Vzorek o funkčním průměru 1 palec, délce kontaktní oblasti 2 mm s leštěným funkčním povrchem. (b) Vzorek o funkčním průměru 80 mm, délce kontaktní oblasti 2 mm s leštěným funkčním povrchem. (c) Vzorek o funkčním průměru 80 mm, délce kontaktní oblasti 2 mm s broušeným funkčním povrchem.



Obr. 3-2 Typy vzorků

Tyto vzorky byly vyrobeny pomocí práškové metalurgie z uhlíkové oceli. Porozita vzorků nepřesahuje 10 %, kdy se předpokládá, že veškeré póry jsou vzájemně propojeny, čili by se zde neměly vyskytovat slepé póry. V Tab. 1 jsou zaznamenány mechanické vlastnosti těchto slinovaných vzorků.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vzorků

Slinovaný vzorek	
Youngův modul pružnosti (GPa)	130
Poissonův poměr (1)	0,27

Volný prostor, který ve vzorcích vznikl, byl poté impregnován referenčním olejem FVA 2, kdy procentuální vyplnění tohoto volného prostoru je okolo 90 %. V Tab. 2 jsou zaznamenány vlastnosti tohoto oleje při pokojové teplotě.

Tab. 2 Vlastnosti referenčního oleje FVA 2

Referenční olej FVA 2	
*Tlakově viskózní koeficient (GPa ⁻¹)	21
Kinematická viskozita (mm ² /s)	65
Dynamická viskozita (Pa·s)	55,5·10 ⁻³

* Hodnota tlakově viskózního koeficientu byla získána odhadem z hodnoty pro základové minerální oleje

Jako kontaktní protikus byly použity dva druhy průhledných disků: skleněný a safírový. Pro zjištění Hertzova tlaku bylo nutné znát jejich mechanické vlastnosti, viz Tab. 3.

Tab. 3 Mechanické vlastnosti průhledných disků

Skleněný disk	
Youngův modul pružnosti (GPa)	81
Poissonův poměr (1)	0,208
Safírový disk	
Youngův modul pružnosti (GPa)	420
Poissonův poměr (1)	0,29

3.3 Typy testů

K simulaci reálných podmínek byly provedeny dva druhy testů, při různých provozních parametrech: testy statického zatěžování a testy za podmínek valení/ smýkání. V případě těchto testů byl kontakt vytvářen pomocí (1) slinovaného vzorku a (2) průhledného disku. Tyto součásti byly vůči sobě přitlačovány, díky čemuž se vytvořilo kontaktní zatížení.

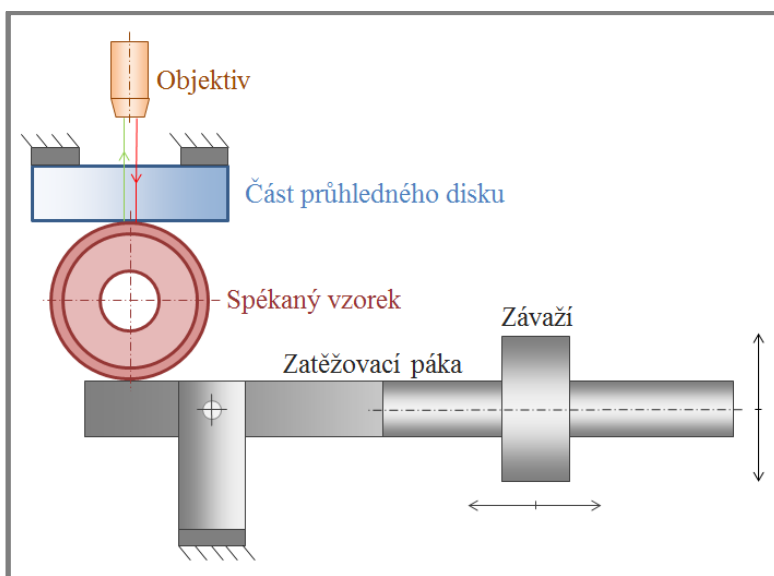
3.3

3.3.1 Testy statického zatěžování

Principem statických testů je přitlačení nepohybujícího se vzorku na nepohybující se průhledný disk. Vytvořený kontakt je poté snímán pomocí mikroskopu.

3.3.1

Test statického zatěžování byl v podstatě vstupním testem do řešení problematiky. Snahou bylo zjistit, zda je mazivo do kontaktu vůbec uvolňováno a jaké parametry tento proces ovlivňují. Tyto testy byly provedeny na dvou zařízeních: pomocí jednoduchého přípravku pro vzorky funkčního průměru 80 mm (Obr. 3-3) a na optickém tribometru pro vzorky průměru 1 palec (Obr. 3-5).



Obr. 3-3 Simulátor statického kontaktu pro 80 mm vzorek

Výstupem těchto testů byla série snímků, znázorňující vzrůst zaplavené oblasti neboli vzdálenosti menisku od hranice Hertzova kontaktu (Obr. 3-4) v závislosti na čase.

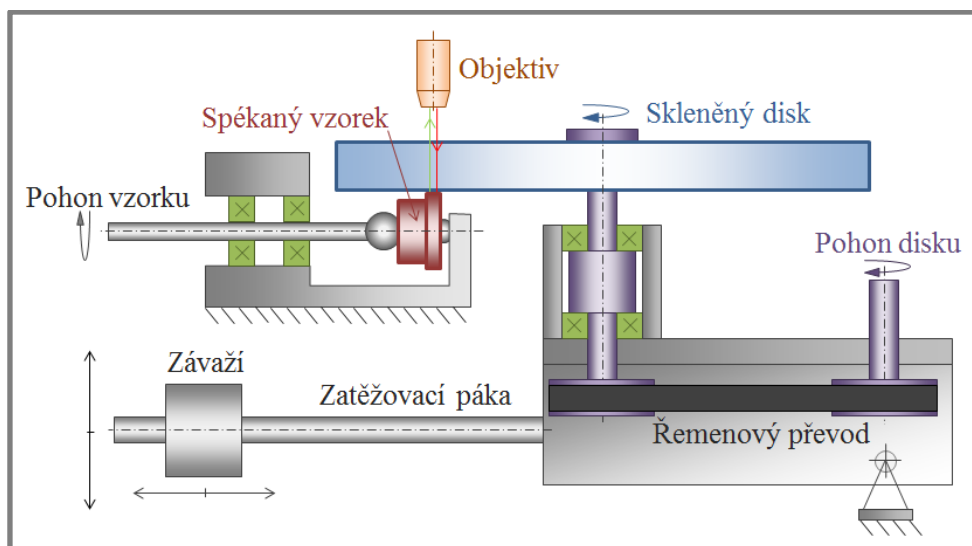


Obr. 3-4 Zobrazení statického kontaktu

3.3.2 Testy za podmínek valení/ smýkání

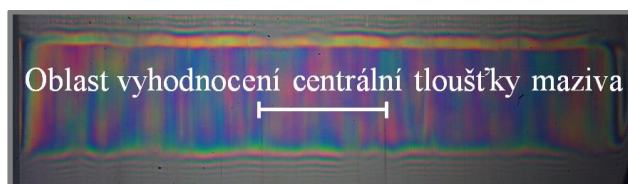
Principem dynamických testů je přitlačení rotujícího skleněného (safiřového) disku na rotující vzorek. Vytvořený kontakt je poté snímán pomocí mikroskopu.

Pomocí těchto testů se simulovaly reálné podmínky, za kterých jsou v ideálním případě dvě ozubená kola po sobě odvalována, případně odvalována s prokluzem. V případě těchto testů již bylo známo, že se mazivo do kontaktní oblasti uvolňuje. Bylo ovšem důležité zjistit, jaké parametry toto uvolňování ovlivňují, případně jaký je jejich vliv na utváření mazacího filmu u porézních vzorků. Pro simulaci těchto podmínek bylo využito optického tribometru, viz Obr. 3-5.



Obr. 3-5 Schéma optického tribometru

Výstupem těchto testů pak byla série snímků, kdy pomocí RGB spektra byla vyhodnocena (pokud není řečeno jinak) průměrná centrální tloušťka v oblasti kontaktu, která je průměrem cca 200 dílčích hodnot z horizontálního řezu kontaktu o délce pětiny celého kontaktu, viz Obr. 3-6



Obr. 3-6 Znárodnění oblasti vyhodnocení centrální tloušťky maziva

4 VÝSLEDKY

4

4.1 Statické testy

4.1

Z rešerše (Kap. 1.2) bylo zjištěno, že mazivo má tendenci unikat z pórů. Hlavním předpokladem je, že díky unikajícímu oleji může být zajištěno mazání kontaktu. Je ovšem nutné správně volit viskozitu maziva pro zajištění mazání, avšak zamezit přílišný únik maziva, což může výrazně snížit životnost impregnované součásti.

Z testů statického zatěžování byla snaha zjistit, zda je mazivo do kontaktní oblasti uvolňováno a čím je tento jev ovlivněn. Dá se předpokládat, že při těchto testech se bude mazivo hromadit v oblasti mimo Hertzův kontakt a bude utvářet olejovou vrstvu, jež se označuje jako oblast zaplavení, viz Obr. 3-4. V případě pohybu kontaktních ploch umožňuje olej z této oblasti vytvářet mazací film.

Testy statického zatěžování byly provedeny na dvou různých typech vzorků, viz Kap. 3.3.1, na vzorcích o průměru 80 mm a délce kontaktní plochy 2 mm a na vzorcích o průměru 1 palec a délce kontaktní plochy 2 mm.

4.1.1 Vliv zatížení

4.1.1

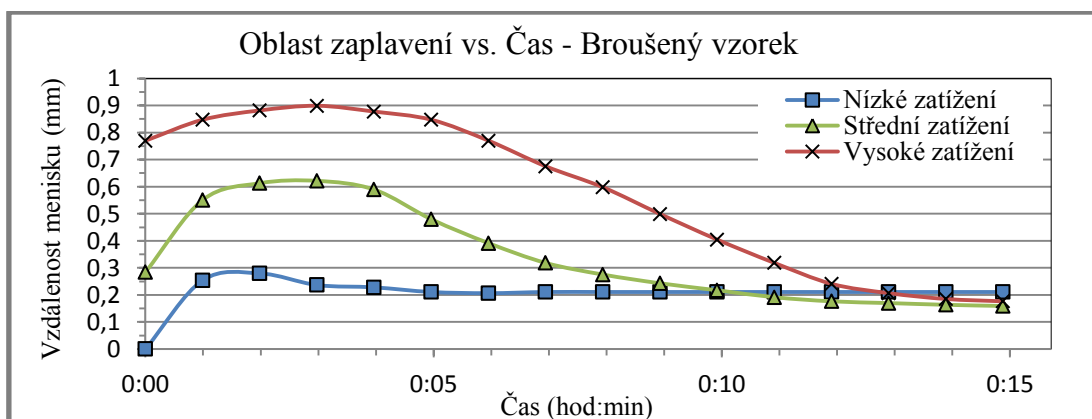
Testy vlivu zatížení byly provedeny na větších vzorcích při různých režimech zatížení, viz Tab. 4.

Tab. 4 Velikosti Hertz. tlaku a kontakt. zatížení pro různé režimy (větší vzorky, statický kontakt)

Režim zatížení	Hertzův tlak (MPa)	Zatížení (N)
Nízké	140	82
Střední	280	323
Vysoké	450	948

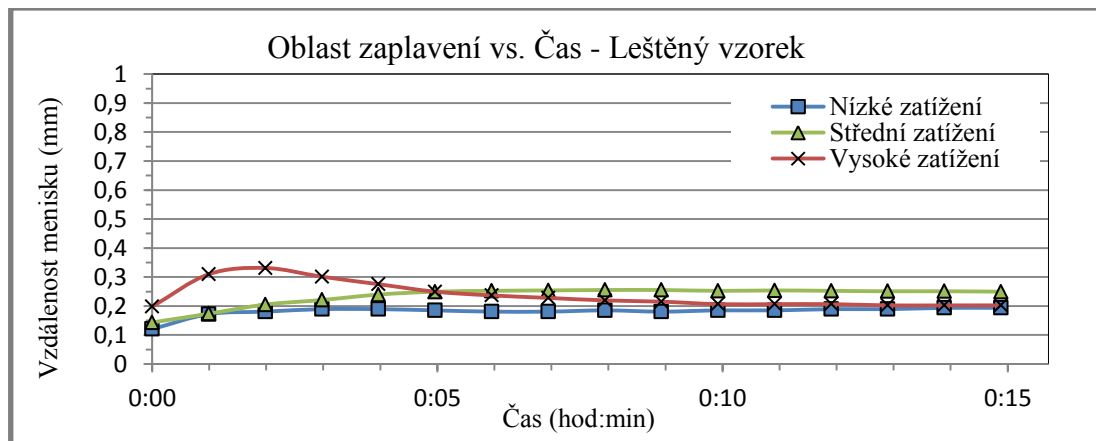
Maximální hodnoty zaplavení byly různé v závislosti na aplikovaném zatížení, viz Obr. 4-1 a Obr. 4-2. Z výsledků vyplývá, že při počátečních fázích testu je vyšším tlakem možné docílit větší oblasti zaplavení. Tento jev ovšem není trvalý a v průběhu času se vzdálenost menisku od hranice Hertzova kontaktu stabilizuje do hodnoty okolo 0,2 mm.

V případě broušených vzorků (Obr. 4-1) je vliv tlaku výraznější, ale po časové stabilizaci nelze deklarovat jeho přínos.



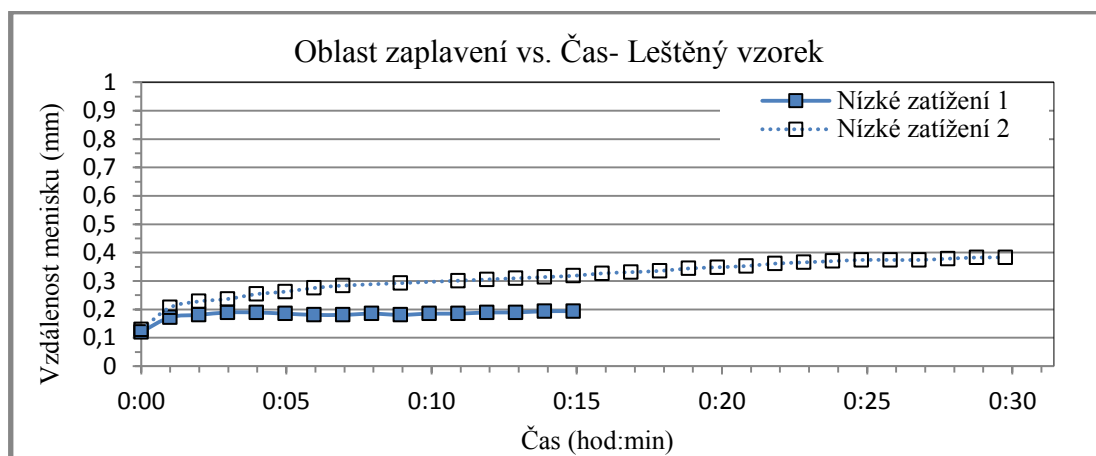
Obr. 4-1 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení u broušených vzorků

U leštěných vzorků (Obr. 4-2) je jev, který poukazuje na možný přínos vzrůstu tlakového gradientu po celou dobu testu. Tento přínos je ale patrný pouze při porovnání testů s nízkým a středním zatížením. Při těchto dvou testech nedocházelo k rychlému nárůstu vzdálenosti menisku v počátečních fázích testu, a k jeho následnému rychlému poklesu.



Obr. 4-2 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení u leštěných vzorků

V případě nízkého zatížení u větších leštěných vzorků došlo v jednom z testů ke změně trendu vzdálenosti menisku na čase. Zatímco při předchozích testech docházelo ke stabilizaci oblasti menisku v maximálním čase 15 min, v tomto případě byl patrný neustálý nárůst velikosti oblasti zaplavení, viz Obr. 4-3 (Nízké zatížení 2).



Obr. 4-3 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro nízké zatížení u leštěných vzorků (změna trendu)

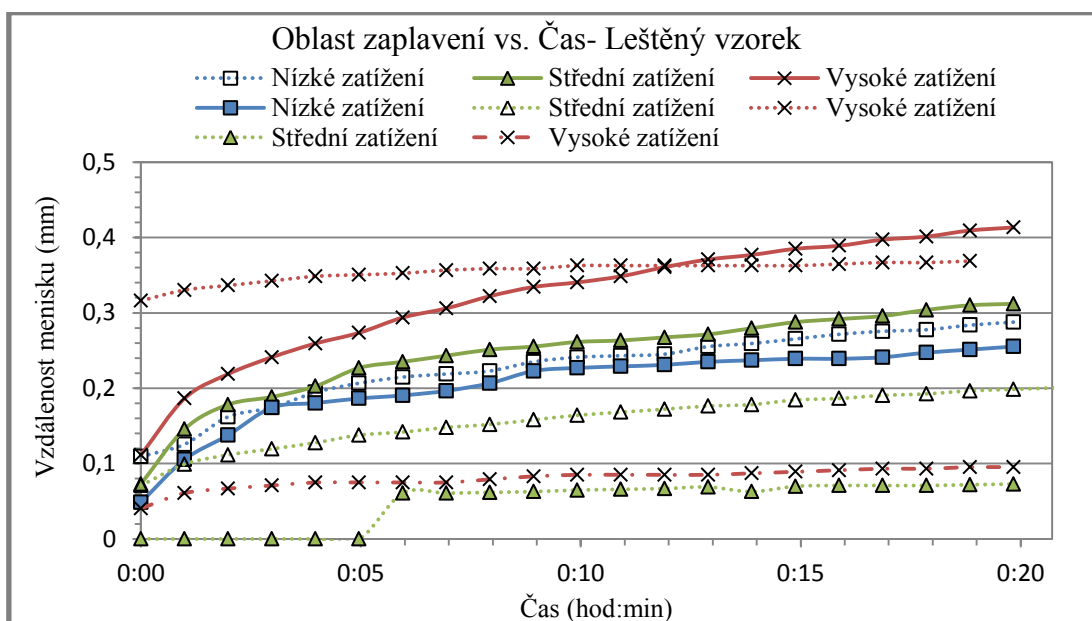
Z tohoto důvodu byla provedena série testů pro ověření opakovatelnosti naměřených dat. Tyto experimenty byly provedeny na menších, leštěných, 1 palcových vzorcích při různých režimech zatížení, viz Tab. 5.

Tab. 5 Velikosti Hertz. tlaku a kont. zatížení pro různé režimy (menší vzorky, statický kontakt)

Režim zatížení	Hertzův tlak (MPa)	Zatížení (N)
Nízké	250	94
Střední	400	241
Vysoké	450	325

Z výsledků (Obr. 4-4) vyplývá, že trend dlouhodobě rostoucí oblasti zaplavení je častější než v případě testů s větším vzorkem o průměru 80 mm. V případě vysokého zatížení byl zaznamenán nejvyšší a zároveň i nejnižší průměrný vzrůst vzdálenosti menisku po jedné minutě. Zároveň zde byl pozorován maximální rozptyl hodnot při stejném zatížení. Pro srovnání: maximální hodnota vzdálenosti menisku od hranice Hertzova kontaktu u vysokého zatížení v jednom testu byla 0,41 mm, v druhém případě pak 0,10 mm, což vykazuje více jak čtyřnásobný rozdíl jejich hodnot.

U nízkého zatížení se sobě křivky závislosti vzdálenosti menisku na čase nejvíce blížily a rozptyl jejich hodnot byl nejnižší. Tuto podobnost lze pozorovat i v případě jedné z křivek při středním zatížení, kdy v porovnání s nízkým zatížení je rozdíl Hertzova tlaku 220 MPa.



Obr. 4-4 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení menších u leštěných vzorků

Je patrné, že vliv aplikovaného zatížení na vzrůst oblasti zaplavení může být náhodný a nemusí nutně platit, že s vyšším kontaktním tlakem bude zajištěna větší vzdálenost menisku. Tento jev poukazuje i na možnou nahodilost chování kontaktu při testech za dynamických podmínek.

Pokud porovnáme výsledky testů s většími, leštěnými 80 mm vzorky (Obr. 4-2 a Obr. 4-3) jsou patrné rozdíly trendů v růstu oblasti zaplavení. V případě větších vzorků se vyskytl trend neustálého vzrůstu vzdálenosti menisku pouze jednou, zatímco u menších vzorků výrazně převažuje. Tyto výsledky poukazují na možný vliv poloměru křivosti vzorků na vytlačení mazacího filmu. Menší poloměr křivosti se v tomto případě jeví jako vhodnější.

4.1.2 Vliv drsnosti povrchu

Testy vlivu drsnosti povrchu byly provedeny na větších vzorcích při různých režimech zatížení, viz Tab. 4.

Pokud porovnáme broušené vzorky (Obr. 4-1) se vzorky leštěnými (Obr. 4-2), u broušených docházelo v počátečních fázích testu k rychlejšímu nárůstu oblasti

zaplavení. Maximálně do tří minut však bylo dosaženo jejího maxima, přičemž následně docházelo k jejímu rychlému poklesu. V případě broušených vzorků byla oblast zaplavení ve všech případech relativně stabilní v čase 15 min, kdy se vzdálenost menisku od hranice Hertzova kontaktu pohybovala v rozmezí od 0,16 do 0,21 mm. U leštěných vzorků byl nárůst maziva pomalejší, ale stabilnější. Při vysokém zatížení nedocházelo v počátku testu k tak výraznému nárůstu oblasti zaplavení v porovnání s testy na broušených vzorcích a maxima bylo dosaženo v prvních dvou minutách. Ve všech případech byla vzdálenost menisku od hranice Hertzova kontaktu relativně stabilní v čase 15 min, kdy se její hodnota pohybovala v rozmezí od 0,19 do 0,25 mm, čili vyšší než v případě broušených vzorků.

4.2 Vliv valivé rychlosti

Pro hlubší pochopení vlivu jednotlivých provozních parametrů na utváření mazacího filmu byly provedeny série krátkodobých testů. Snahou bylo zjistit, jaký je vliv valivé rychlosti a zatížení na utváření mazacího filmu při podmínkách čistého valení. Jako referenční porovnávací parametr byla tloušťka mazacího filmu v případě plně zaplavených podmínek. Snahou bylo zjistit, zda dochází k hladovění kontaktu nebo zda je kontakt plně zaplavený, když vzrůst vzdálenosti menisku od hranice Hertzova tlaku již nezpůsobí vzrůst tloušťky mazacího filmu.

Tyto testy byly provedeny pro režimy nízkého a středního zatížení při plném zaplavení a při využití impregnovaného maziva. Konkrétní hodnota Hertzova tlaku a zatížení pro různé režimy jsou znázorněny v Tab. 6.

Tab. 6 Velikosti Hertz. tlaku a kont. zatížení pro různé režimy (menší vzorky, dynamický kont.)

Režim zatížení	Hertzův tlak (MPa)	Zatížení (N)
Nízké	250	94
Střední	400	241
Vysoké	520	221

Experimenty v této kapitole byly provedeny pomocí jednoduchého algoritmu, kdy byla zaznamenána 16 sekundová sekvence, během které docházelo ke skokovému vzrůstu rychlostí z 0,05 – 2 m/s, kdy pro každou z rychlostí byla vyhrazena sekvence 2 s. Z těchto dvousekundových sekvencí pak byly uloženy snímky, které byly dále vyhodnocovány.

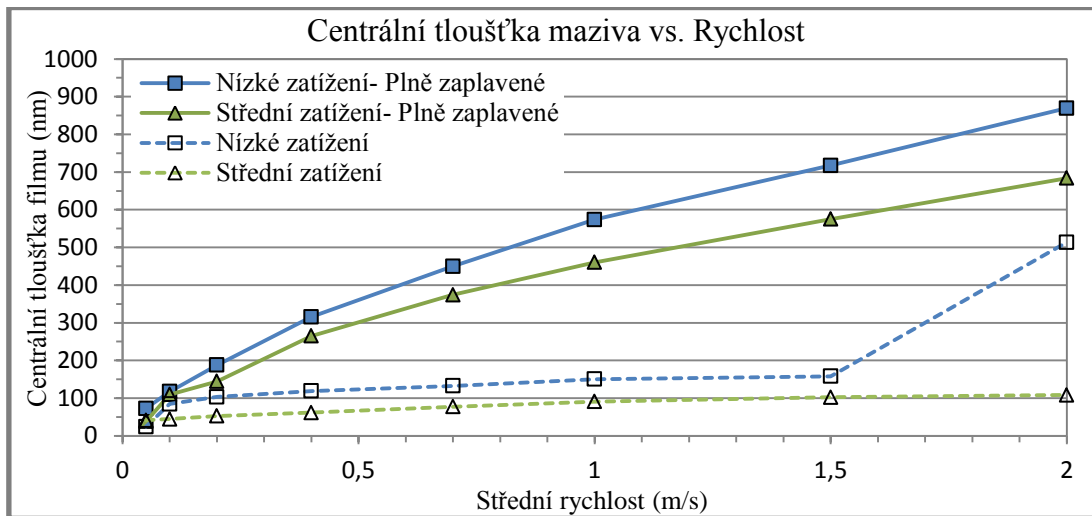
Z výsledků (Tab. 7) vyplývá jasný vliv rychlosti povrchů a zatížení kontaktu na utváření mazacího filmu.

Tab. 7 Centrální tloušťky filmu pro jednotlivé režimy zatížení a různé střední rychlosti

		Střední rychlost (m/s)		0,05	0,1	0,2	0,4	0,7	1	1,5	2
Centrální tloušťka filmu (nm)	Nízké zatížení- Plně zaplavené	73	117	188	316	450	574	718	870		
	Střední zatížení- Plně zaplavené	38	110	145	216	374	460	575	684		
	Nízké zatížení	24	84	103	119	132	150	158	514		
	Střední zatížení	41	44	53	62	77	91	103	108		

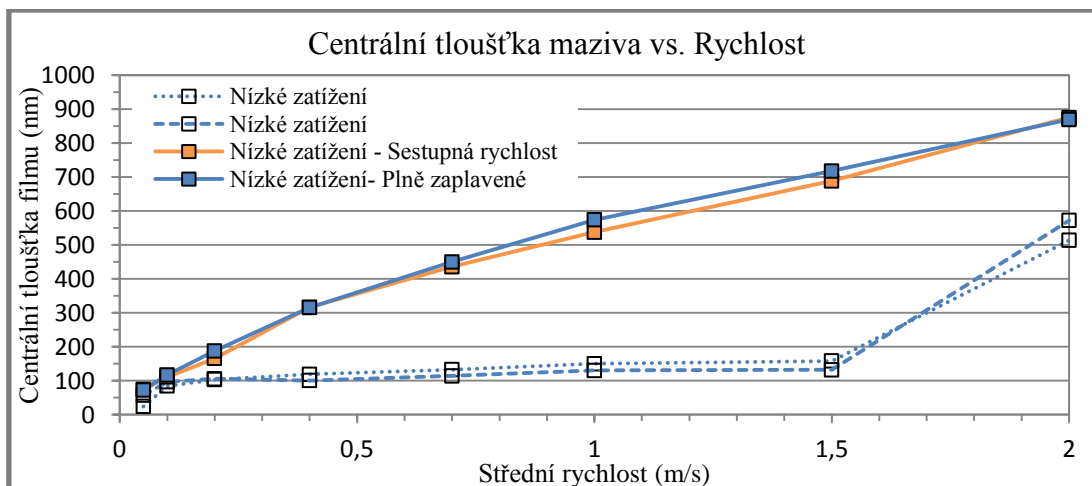
Obecně platí, že se zvyšujícím se tlakem klesá tloušťka mazacího filmu a taktéž, že se zvyšující se valivou rychlostí roste i tloušťka mazacího filmu. Tento jev byl v experimentech potvrzen. Z výsledků (Obr. 4-5) je patrné, že v případě využití impregnovaného maziva, dochází k nedostatečnému zásobení kontaktu mazivem. Je zde patrný rozdíl hodnot za podmínek plně zaplavených v porovnání

s podmínkami hladovění, kdy rozdíl hodnot centrálních tloušťek filmů se ze zvyšující rychlostí zvětšuje.

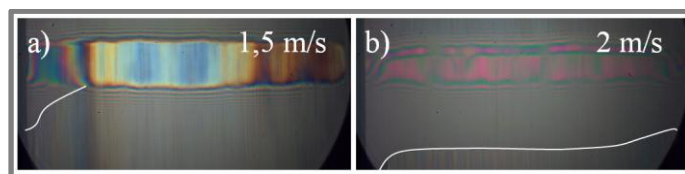


Obr. 4-5 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro různé režimy zatížení

U nízkého zatížení za podmínek hladovění (Obr. 4-5, Nízké zatížení) došlo k prudkému nárůstu tloušťky mazacího filmu při přechodu z rychlosti 1,5 m/s na 2 m/s. Z tohoto důvodu byly provedeny další experimenty při stejných podmínkách pro ověření opakovatelnosti. Tento jev se projevil i při dalších experimentech, viz Obr. 4-6. Pro ověření, zda dochází ke stejnému jevu i při středním zatížení, byl proveden experiment s rozsahem rychlostí 0,05 – 3 m/s, viz Obr. 4-8. Ke stejnému chování došlo i v případě středního zatížení při přechodu z rychlosti 2 m/s na 2,5 m/s. Dá se tedy předpokládat, že existuje určitá rychlostní hranice při konkrétním tlaku, za kterou dojde k prolomení výtoku maziva. Díky tomuto jevu dojde k výraznému nárůstu zaplavení kontaktní oblasti (Obr. 4-7), což způsobí výrazné zvýšení tloušťky mazacího filmu.



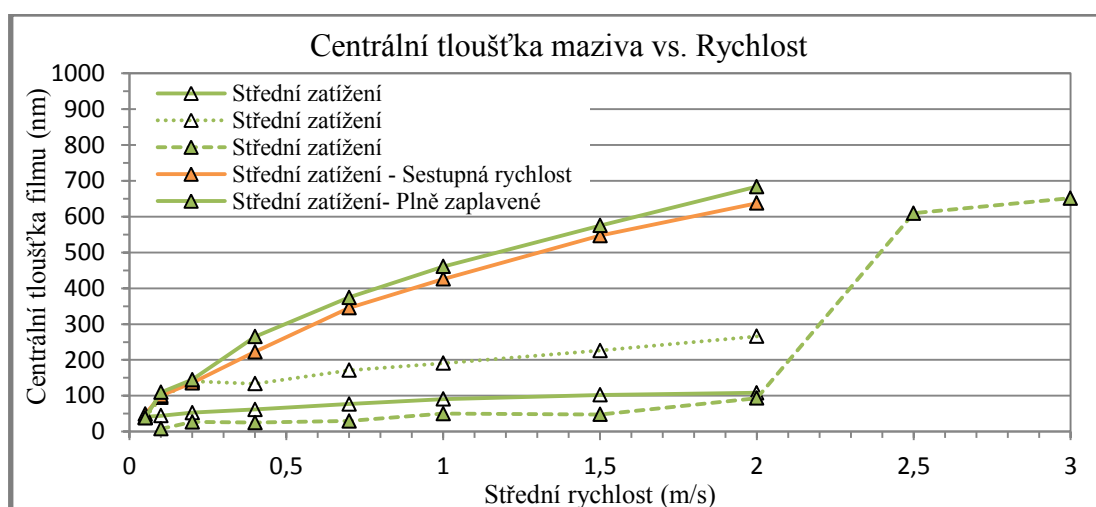
Obr. 4-6 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro nízké zatížení



Obr. 4-7 Nárůst zaplavení oblasti při nízkém zatížení

Vzhledem k tomu, že veškeré experimenty byly provedeny pro skokově vzrůstající rychlost. Byly provedeny také dva experimenty ověřující, zda bude dosaženo stejných výsledků pomocí skokově sestupného pořadí rychlostí, viz Obr. 4-6 a Obr. 4-8 (oranžové křivky).

Průběhy tloušťek filmů pro sestupné pořadí rychlostí (oranžové křivky) se spíše podobají výsledkům z experimentů při plně zaplavených podmínkách. Popisem tohoto jevu se zabývá Kap. 5.3.



Obr. 4-8 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro střední zatížení

S využitím impregnovaného maziva byla maximální odchylka při stejných typech testů 180 nm. Největšího rozdílu bylo dosaženo v případě testů se středním zatížením.

4.3 Vliv prokluzu

Dalším zkoumaným parametrem byl prokluz součástí. Snahou bylo zjistit, jaký je vliv střední rychlosti v kombinaci s prokluzem na utváření mazacího filmu. Referenčním porovnávacím parametrem pak byla tloušťka mazacího filmu v případě plně zaplavených podmínek.

Tyto testy byly provedeny pro režim středního zatížení při plném zaplavení a při využití impregnovaného maziva. Konkrétní hodnota Hertzova tlaku a zatížení pro režim středního zatížení je znázorněna v Tab. 6.

Pro vyjádření prokluzu byl použitý parametr zvaný skluzový poměr nebo hodnota prokluzu (SRR).

$$SRR = \frac{2(u_a - u_b)}{u_a + u_b} \quad (7)$$

Kde:

u_a m/s - obvodová rychlost skleněného disku

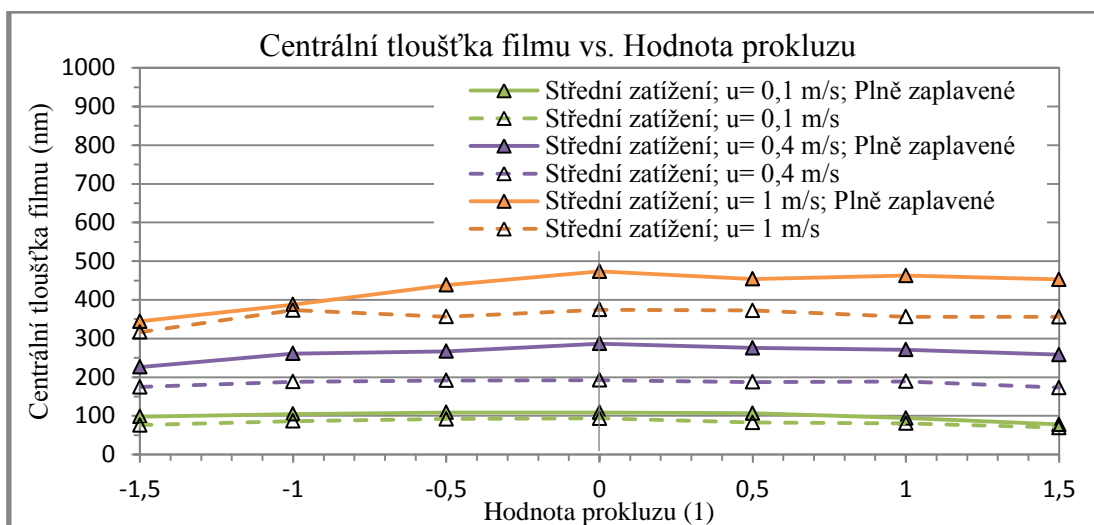
u_b m/s - obvodová rychlost slinovaného vzorku

$SRR1$ - skluzový poměr (hodnota prokluzu)

V případě kladného skluzového poměru je rychlejší průhledný disk, v případě záporného slinovaný vzorek. Velikost SRR se pohybuje v rozmezí $-2 - 2$, kdy krajní hodnoty znamenají 100% skluz. V případě $SRR = -2$ je to 100% skluz slinovaného vzorku po skleněném disku. V případě $SRR = 2$ je to 100% skluz průhledného disku po slinovaném vzorku.

U těchto experimentů bylo měření každé závislosti provedeno pomocí jednoduchého algoritmu, kdy byla naměřena 14 sekundová sekvence, při níž se skokově měnila hodnota prokluzu. Jednotlivé závislosti tedy byly naměřeny jako jeden celek a pokud není řečeno jinak, tak v sestupném pořadí hodnot prokluzu (SRR), kdy pro každou hodnotu byla vyhrazena dvou sekundová sekvence. Nejedná se tedy o vliv SRR na utváření mazacího filmu jako samostatné jednotky, ale vliv SRR na změnu tloušťky filmu při jeho měnící se hodnotě. Každý bod průběhů je tedy ovlivněn body předchozími. Ovlivnění je převážně způsobeno již vytvořenou vrstvou maziva na skleněném a slinovaném disku testovacího aparátu.

V první řadě byly provedeny experimenty porovnávající centrální tloušťky filmu při různých středních rychlostech u plně zaplavených a hladovějících podmínek, viz Obr. 4-9.



Obr. 4-9 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro různé střední rychlosti a střední zatížení

Z výsledků je patrné, že s rostoucí hodnotou prokluzu dochází k poklesu centrální tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Kladné hodnoty prokluzu (rychlejší skleněný disk) při plně zaplavených podmínkách většinou vykazovaly vyšší centrální tloušťku filmu v porovnání se stejnými hodnotami, ale zápornými (rychlejší slinovaný vzorek). Maximální rozdíl těchto hodnot, v porovnání s podmínkami plně zaplaveného kontaktu, byl u střední rychlosti 0,1 m/s téměř 10%, u střední rychlosti 0,4 m/s více jak 21% a u střední rychlosti 1 m/s více jak 27%. Je patrné, že v případě

rostoucí střední rychlosti dochází k výraznějšímu projevu vlivu prokluzu na centrální tloušťku mazacího filmu. Dále byl pozorován rozdíl mezi plně zaplavenými podmínkami a podmínkami za nedostatečného zásobení kontaktu mazivem. Tento rozdíl ovšem není tak výrazný jako v případě experimentů vlivu valivé rychlosti. V Tab. 8 je porovnání hodnot pro podmínky čistého valení, čili v případě, že $SRR=0$. První dva řádky dat jsou získány z testů za podmínek čistého valení, viz Kap. 4.2. Poslední dva řádky dat jsou získány z experimentů této kapitoly, kdy jsou vybrány hodnoty s $SRR=0$.

Tab. 8 Centrální tloušťka filmu při středním zatížení pro různé experimenty a různé střední rychlosti

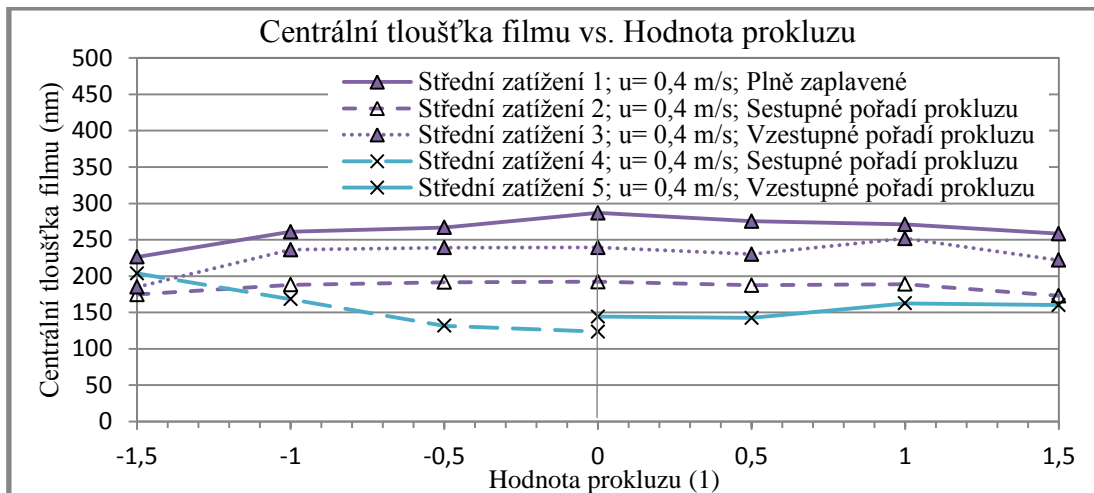
	Střední rychlost (m/s)	0,1	0,4	1
Centrální tloušťka filmu při středním zatížení (nm)	Valení; Plně zaplavený kontakt	110	265	460
	Valení; Hladovění kontakt	95	134	191
	Valení s prokluzem; Plně zaplavený kontakt	109	287	474
	Valení s prokluzem; Hladovění kontakt	93	192	374

Dá se předpokládat, že při plně zaplavených podmínkách se výsledky budou velice podobat, protože nedochází k jejich ovlivnění různým množstvím obtisknutého maziva na skleněném disku nebo slinovaném vzorku. Hodnoty centrálních tlouštěk filmu se pro plně zaplavené podmínky liší maximálně o 22 nm. To je patrně způsobeno rozdílným množstvím pórů v měřeném místě.

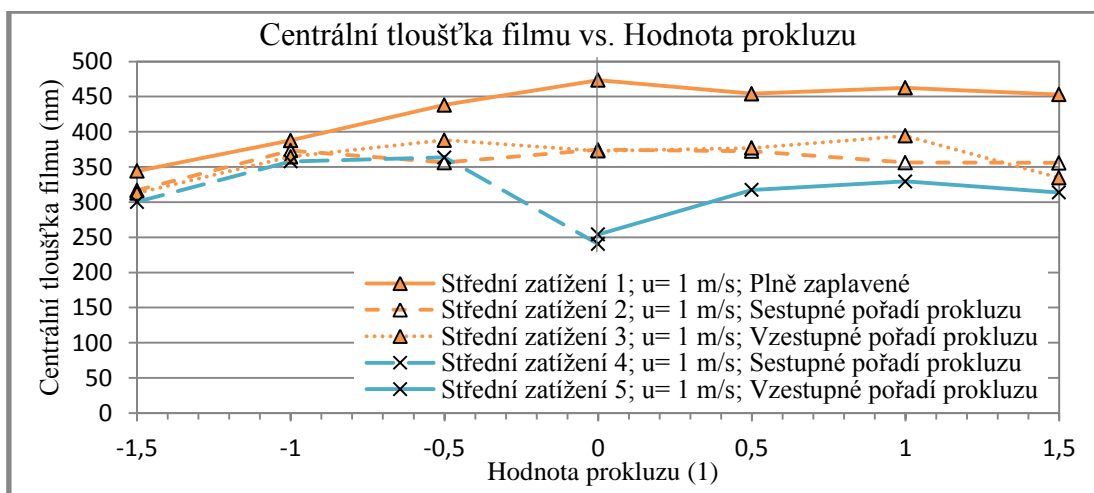
Hodnoty centrálních tlouštěk filmu pro hladovějící podmínky se ovšem lišily maximálně o 183 nm. Tento jev by mohl být způsoben pozitivním vlivem prokluzu na utvoření mazacího filmu v porovnání s podmínkami čistého valení. V tomto případě se díky prokluzu vytvořila souvislá vrstva maziva na skleněném disku. Jakmile bylo dosaženo podmínek čistého valení, umožnila tato vrstva vytvoření vyšší centrální tloušťku mazacího filmu v kontaktu.

Z důvodu ovlivnění jednotlivých dílčích výsledků a pro bližší popsání vlivu prokluzu na utváření mazacího filmu byly provedeny experimenty při různém pořadí hodnot prokluzu, viz Obr. 4-10 a Obr. 4-11. Jak již bylo zmíněno, tak veškeré závislosti byly získány pomocí jednoduché sekvence, ve které se skokově střídaly jednotlivé hodnoty prokluzu, kdy pro každou hodnotu byly vyhrazeny dvě sekundy. Pokud není řečeno jinak, pořadí jednotlivých hodnot prokluzu je měřeno v sestupném pořadí, čili od hodnoty $SRR=1,5$ po $SRR=-1,5$. Tento postup byl zvolen pro podmínky nedostatečného zásobení kontaktu mazivem a plně zaplavené podmínky, viz Obr. 4-10 a Obr. 4-11. Pro lepší pochopení byla naměřena i závislost s měnícím se SRR ve vzestupném pořadí, čili od $-1,5$ do $1,5$. Nakonec byly naměřeny sekvence měnícího se SRR od 0 po $-1,5$ (sestupné) a od 0 po $1,5$ (vzestupné). Tyto závislosti jsou znázorněny v Obr. 4-10 a Obr. 4-11 modrou barvou.

Tyto experimenty byly provedeny pro prokázání ovlivnění výsledků díky vrstvě zbytkového maziva na skleněném disku. V případě plně zaplavených podmínek je v kontaktu dostatečné množství maziva za všech okolností, čili měnit pořadí hodnot prokluzu by zde bylo bezúčelné.

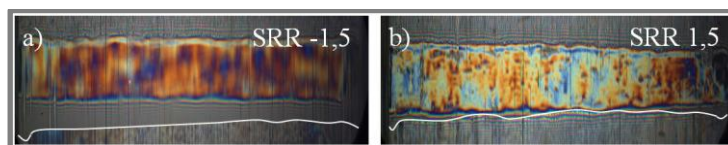


Obr. 4-10 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro střední zatížení a různé pořadí hodnot prokluzů (střední rychlost 0,4 m/s)



Obr. 4-11 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro střední zatížení a různé pořadí hodnot prokluzů (střední rychlost 1 m/s)

V případě záporných hodnot SRR dochází k prokazatelné konvergenci výsledků. K největší shodě výsledků došlo v případě $SRR = -1,5$, kdy se hodnoty centrálních tloušťek lišily maximálně o 52 nm (střední rychlost 0,4 m/s), což je rozdíl téměř 23% v porovnání s plně zaplavenými podmínkami. Je to z toho důvodu, že v případě záporného prokluzu bylo ve většině případů pozorováno výrazně větší zaplavení kontaktní oblasti, což zajistilo téměř plně zaplavené podmínky, viz Obr. 4-12.



Obr. 4-12 Zobrazení kontaktu při střední rychlosti 0,4 m/s a různých SRR

Při porovnání experimentů se sestupným (SRR od 1,5 do -1,5) a vzestupným (SRR od -1,5 do 1,5) pořadím prokluzů vykazovaly ty se vzestupným pořadím bližší korelaci s hodnotami pro plně zaplavené podmínky. U testů začínajících od $SRR = 0$ je patrná postupná změna centrální tloušťky filmu na hodnoty podobající se testům

předchozím. Je patrné, že v počátcích není zajištěno dostatečné zásobení kontaktu mazivem, což se zlepšuje se zvyšující hodnotou prokluzu. Jako faktor zde může působit i čas, kdy pro každou hodnotu v dané závislosti jsou vyměřeny dvě sekundy. V případě vyšší střední rychlosti (1 m/s) dochází k rychlejšímu zpodobnění výsledků s testy 2 a 3, kdy dojde k více jak dvojnásobnému množství otáček testovacího aparátu v porovnání s nižší střední rychlosti (0,4 m/s).

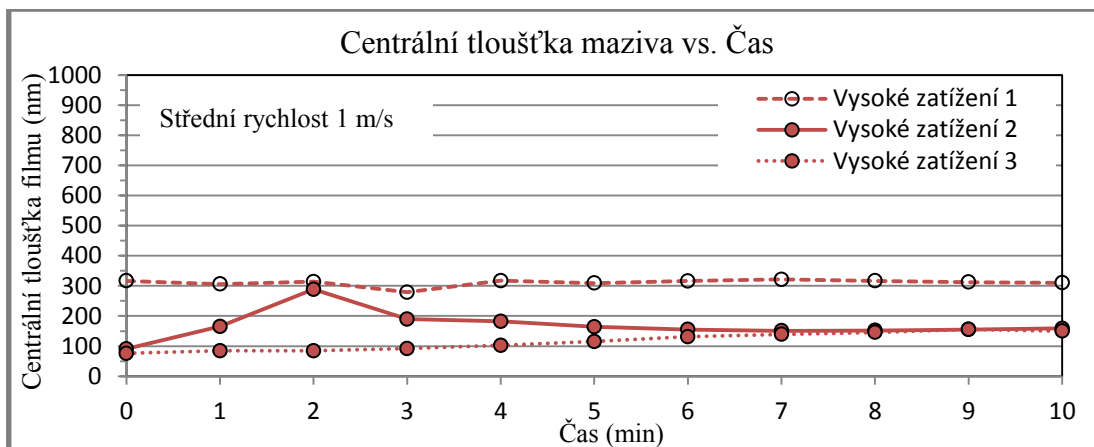
4.4 Vliv času

Pro pochopení dlouhodobého chování kontaktu za podmínek valení a prokluzu byly provedeny série dlouhodobých testů při různých středních rychlostech a při různém zatížení. Snahou bylo zjistit, zda z dlouhodobého hlediska dochází k opakujícímu se chování a zda je možné nalézt souvislosti mezi jednotlivými provozními parametry.

Tyto testy byly provedeny pro režimy nízkého, středního a vysokého zatížení při využití impregnovaného maziva. Konkrétní hodnoty Hertzova tlaku a zatížení pro různé režimy jsou znázorněny v Tab. 6.

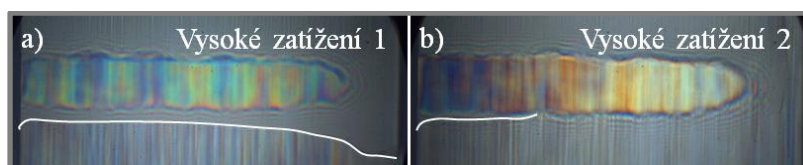
4.4.1 Čisté valení

Z výsledků experimentu pro nižší střední rychlost (1 m/s, Obr. 4-13) je patrné, že v počátečních fázích experimentu dochází k určité stabilizaci centrální tloušťky filmu. Je patrné, že v místě relativně ustálené oblasti (na konci testu) se výsledky dvou testů velice podobají s rozdílem testu třetího, který vykazuje téměř dvojnásobnou tloušťku filmu.



Obr. 4-13 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení a stf. rychlost 1 m/s

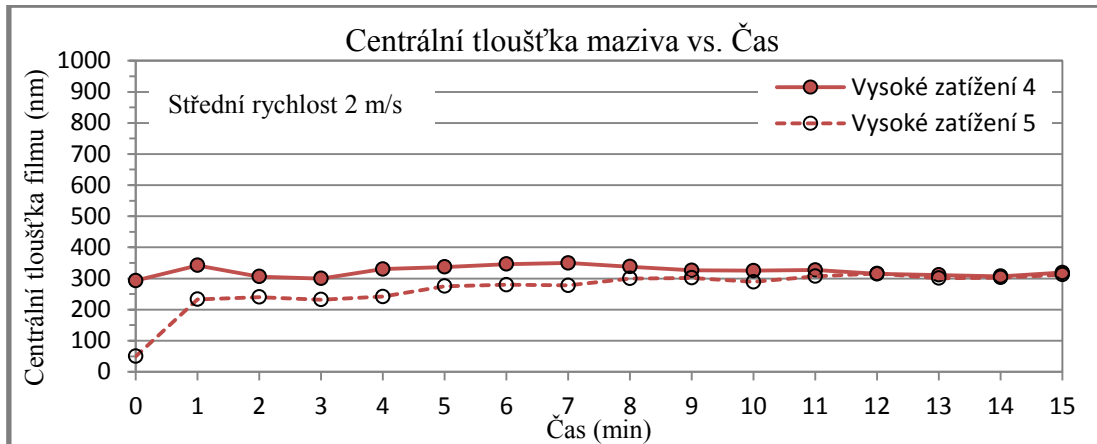
Tento jev je způsobený rozdílně zaplavenými oblastmi, viz Obr. 4-14. Na tomto obrázku jsou znázorněny dva testy při stejných podmínkách, ovšem s rozdílně zformovaným mazacím filmem.



Obr. 4-14 Zobrazení kontaktu pro různé testy vysokého zatížení (střední rychlost 1 m/s)

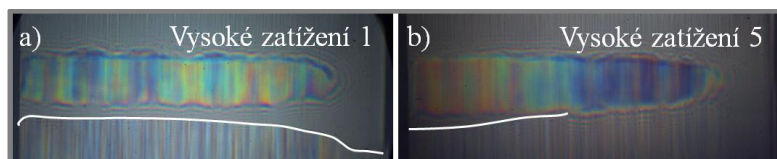
Centrální tloušťka mazacího filmu v ustálené oblasti byla v rozmezí 149 nm (Obr. 4-14, (a)) – 310 nm (Obr. 4-14, (b)).

U výsledků pro vyšší střední rychlost (2 m/s, Obr. 4-15) je patrná konvergence centrálních tloušťek filmů, kdy k jejich relativní stabilizaci dochází okolo 15. minuty.



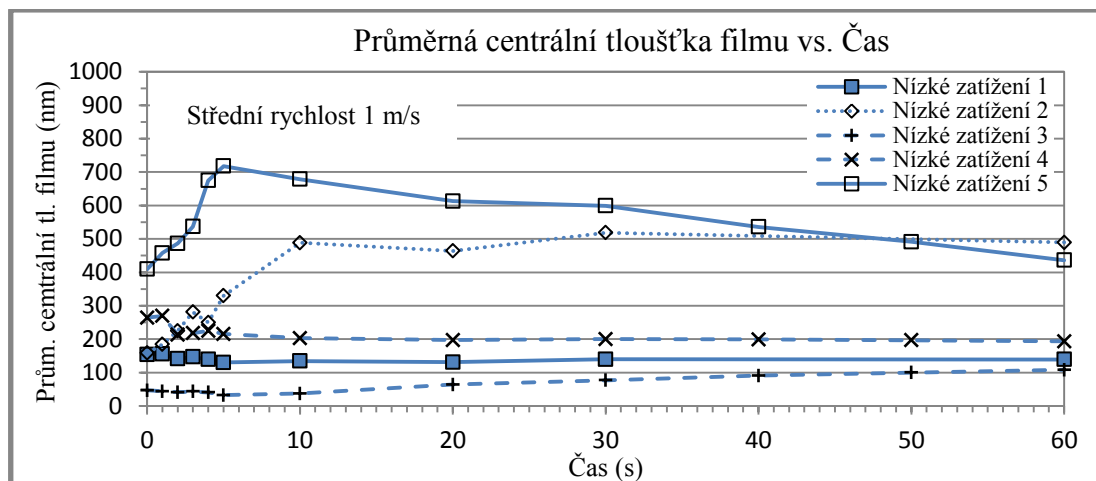
Obr. 4-15 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení a stř. rychlost 2 m/s

Tyto výsledky spolu poměrně konvergovaly v případě, že centrální tloušťka mazacího filmu v ustálené oblasti byla v rozmezí 307- 312 nm. Velikost centrální tloušťky mazacího filmu byla velice podobná hodnotám z testu „Vysoké zatížení 1“ na Obr. 4-13. Rozdíl byl pouze v zaplavení kontaktní oblasti, viz Obr. 4-16.



Obr. 4-16 Zobrazení kontaktu pro různé testy vysokého zatížení a různé střední rychlosti

Z dlouhodobých testů bylo patrné, že v první minutě může docházet k nejvýraznějším změnám centrální tloušťky mazacího filmu. Z tohoto důvodu byly provedeny tzv. rozběhové testy, které měly za úkol tyto jevy blíže popsat, viz Obr. 4-17.

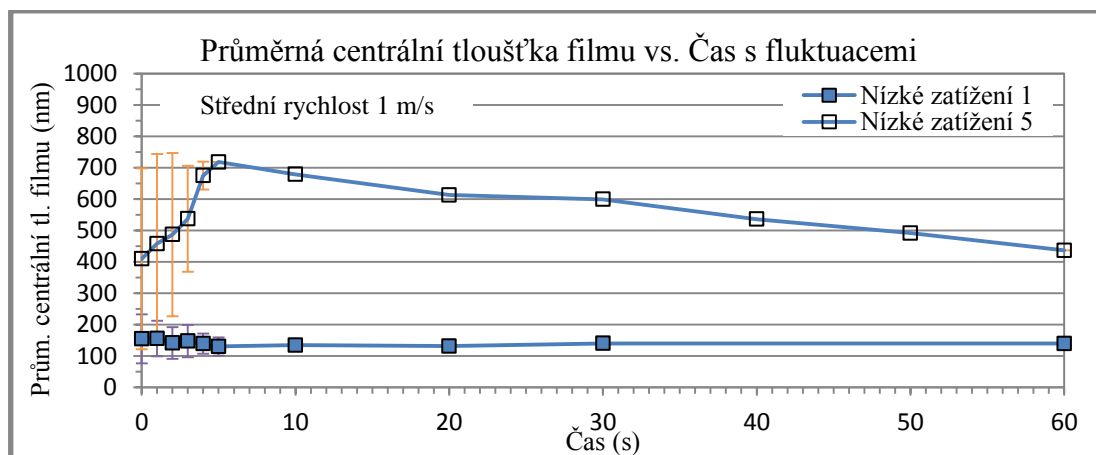


Obr. 4-17 Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 1 m/s

Vzhledem k tomu, že docházelo k velkým fluktuacím centrální tloušťky filmu, a to převážně v počátcích experimentu, je zde vynesena závislost průměrné centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase. Průměrnou centrální tloušťkou mazacího filmu se myslí aritmetický průměr z maximální a minimální hodnoty centrální tloušťky filmu.

Z výsledků je patrné, že v průběhu testu docházelo k výraznému rozdílu hodnot centrálních tlouštěk filmů. Maximální hodnota se vyskytla v testu „Nízké zatížení 5“, a to 718 nm, minimální pak v testu „Nízké zatížení 3“, a to 33 nm. Rozdíl mezi těmito hodnotami je 685 nm, což je téměř 21násobek minimální hodnoty. Tento rozdíl se s postupujícím časem zmenšoval, takže hodnoty centrálních tlouštěk filmů se na konci testu pohybovaly v rozmezí 108 – 490 nm.

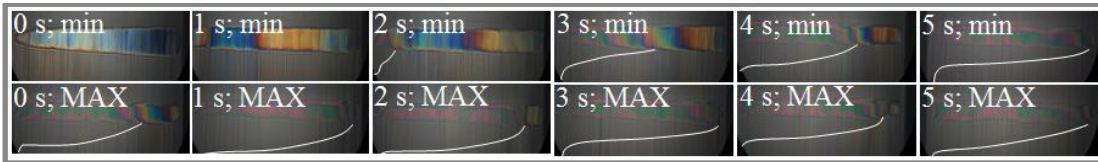
Důvodem těchto výrazných rozdílů jsou rozdílné trendy průběhu průměrné centrální tloušťky filmu v závislosti na čase. V zásadě zde docházelo ke dvěma trendům, viz Obr. 4-17 a Obr. 4-18



Obr. 4-18 Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 1 m/s (trendy)

Na Obr. 4-18 jsou znázorněny dva reprezentativní trendy s odchylkami od aritmetického průměru centrálních tlouštěk filmu. Je zde patrné, že v případě testu „Nízké zatížení 1“ docházelo ke stabilizaci trendu, kdy rozdíly od maximálních

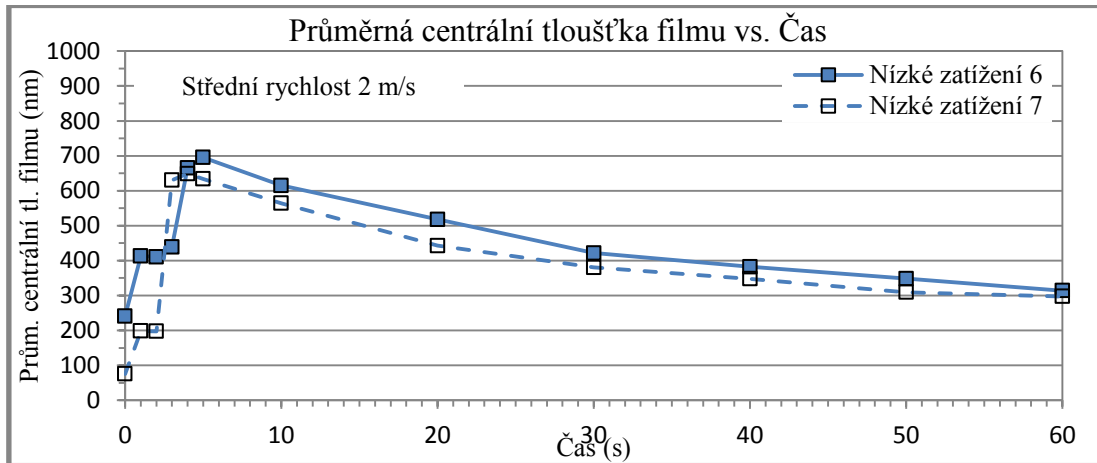
a minimálních hodnot centrálních tloušťek filmu nebyly až tak výrazné v porovnání s testem „Nízké zatížení 5“. V tomto případě docházelo k obrovským fluktuacím, které byly způsobeny výraznou oblastí zaplavení v případě maximálních hodnot v porovnání se minimální oblastí zaplavení v případě minimálních hodnot, viz Obr. 4-19



Obr. 4-19 Detail průběhu prvních pěti sekund pro test „Nízké zatížení 5“

Tento rozdíl s postupem času snižoval, až došlo ke stabilizaci kontaktu (5s), co se fluktuací týče, a poté k postupnému poklesu centrální tloušťky mazacího filmu.

Tytéž testy byly poté provedeny pro střední rychlost 2 m/s, viz Obr. 4-20. Bylo dosaženo podobných výsledků jako v případě testu „Nízké zatížení 5“ s rozdílem strmosti poklesu hodnoty centrální tloušťky filmu.



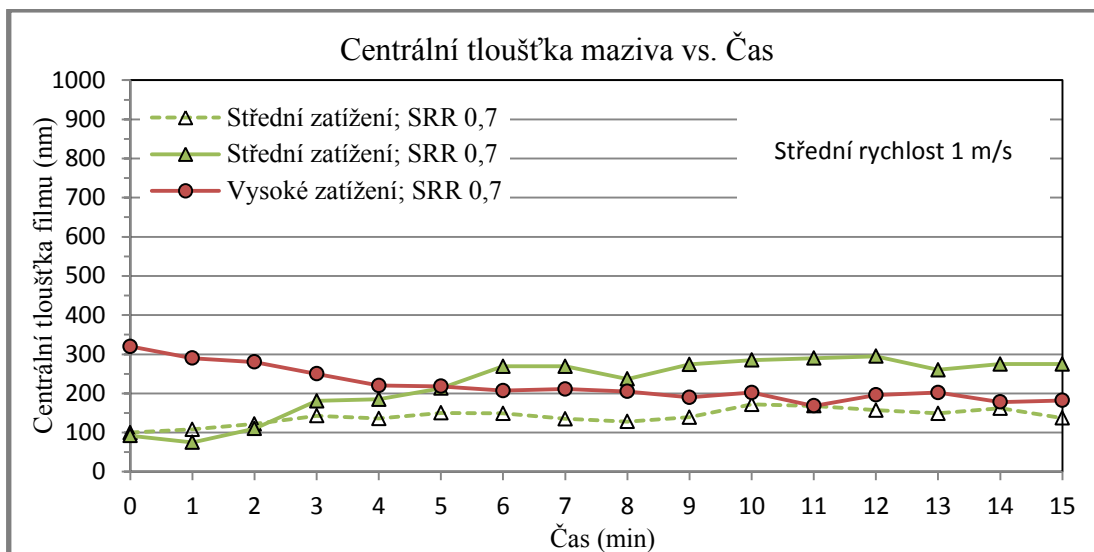
Obr. 4-20 Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 2 m/s

4.4.2 Valení s prokluzem

4.4.2

Z výsledků experimentů pro zjištění vlivu zatížení v případě přítomnosti skluzu (Obr. 4-21) není možné určit, zda velikost zatížení při přítomnosti skluzu má vliv na utváření mazacího filmu. Dá se ovšem předpokládat, že vliv bude podobný jako v případě čistého valení, viz Kap. 4.2.

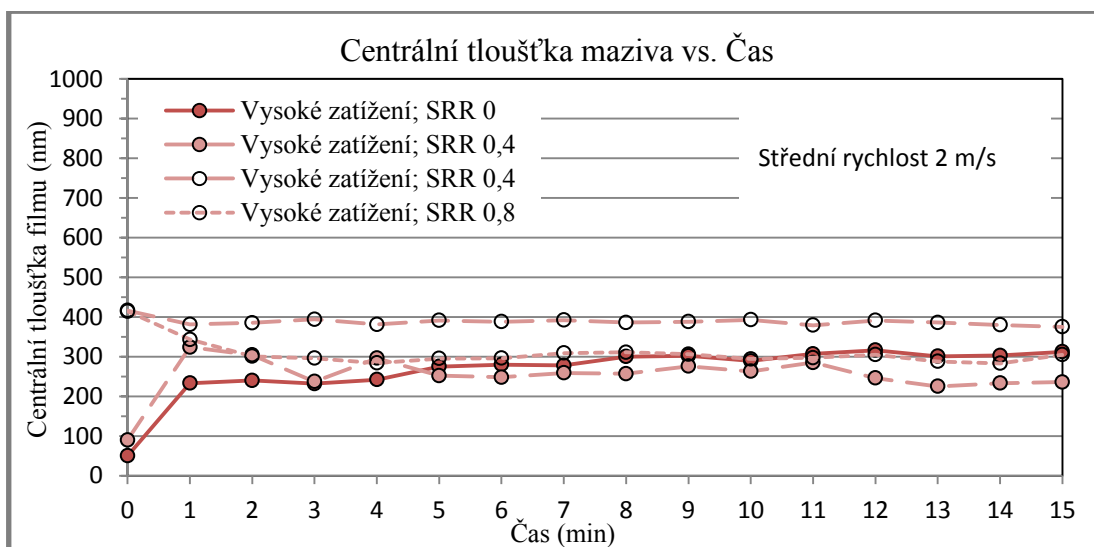
Samotná centrální tloušťka filmu narůstala v počátečních fázích testu a docházelo k její poměrné stabilizaci v čase cca 6 min. Poté velikost centrální tloušťky mazacího filmu sice stále fluktovala, ale vzhledem k tomu, že hodnoty vykazují jasný trend, je možné to považovat za stabilní oblast s rozptylem hodnot ± 36 nm.



Obr. 4-21 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení, střední rychlost 1 m/s a SRR 0,7

Centrální tloušťka mazacího filmu v ustálené oblasti byla v rozmezí 128- 295 nm.

Při experimentech o vlivu samotné velikosti prokluzu (Obr. 4-22) v tomto počtu měření taktéž nebylo možné stanovit vliv smyku na tvorbu mazacího filmu. Průběh centrální tloušťky mazacího filmu můžeme považovat za relativně stabilní ve všech měřeních od cca 4. Minuty.

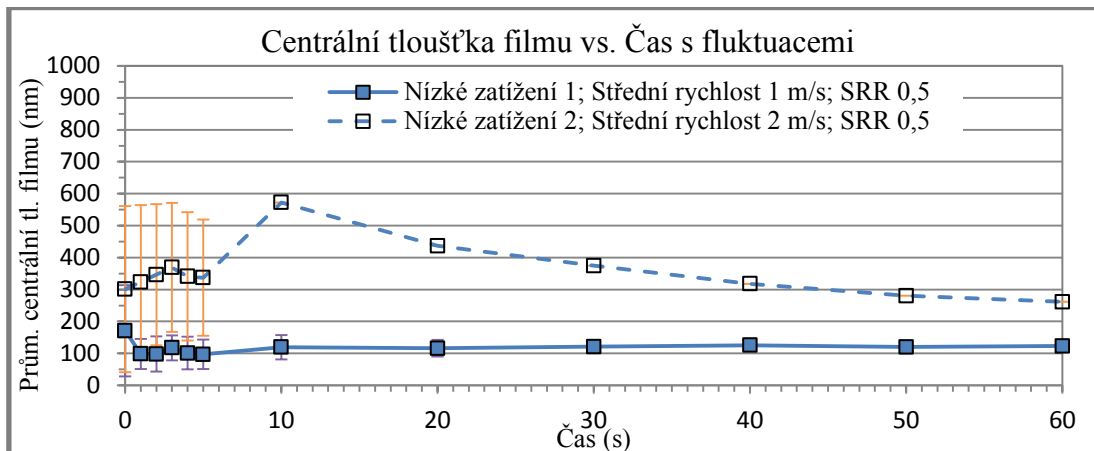


Obr. 4-22 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení, střední rychlost 2 m/s a různé SRR

Centrální tloušťka mazacího filmu v ustálené oblasti byla v rozmezí 225 – 393 nm.

Stejně jako u čistého valení byly provedeny tzv. rozběhové testy. Vzhledem k tomu, že ve výsledcích docházelo k velkým fluktuacím centrální tloušťky filmu, byla vynesena závislost průměrné centrální tloušťky mazacího filmu na čase,

viz Obr. 4-23. Průměrnou centrální tloušťkou mazacího filmu je myšlen aritmetický průměr z maximálních a minimálních hodnot.



Obr. 4-23 Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení, různé stř. rychlost a SRR 0,5 (trendy)

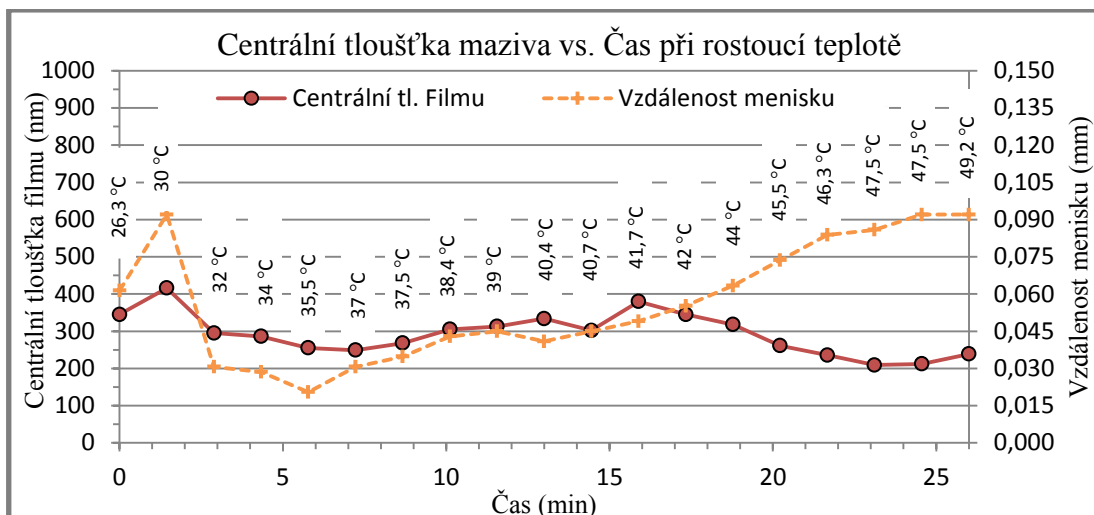
Stejně jako v případě testů dle Kap. 4.4.1 (Obr. 4-18) docházelo ke dvěma základním trendům. V případě testu nižší střední rychlosti „Nízké zatížení 1“ většinou docházelo k trendu postupné stabilizace, kdy před kontaktem nedocházelo k výraznému zaplavení. Pro vyšší střední rychlost (Nízké zatížení 2) byl charakteristický trend velkých fluktuací. Rozdíl oproti testům za podmínek valení je převážně v delší době stabilizace

4.5 Vliv teploty

4.5

Pro znázornění vlivu okolní teploty na utváření mazacího filmu byl proveden experiment s rostoucí teplotou od 26 °C po 49 °C, viz Obr. 4-24. Okolí kontaktní oblasti bylo zahříváno pomocí horkovzdušné pistole a byly zaznamenávány hodnoty centrální tloušťky filmu při rostoucí teplotě. Časový interval mezi jednotlivými body závislosti byl cca 1,4 min.

S rostoucí teplotou okolí docházelo i k zahřívání vzorku a oleje v něm uloženém. Současně docházelo i k nárůstu tloušťky mazacího filmu současně s rostoucí velikostí zaplavené oblasti. Tento efekt byl způsobený snižující se viskozitou maziva vlivem teploty, což způsobuje větší množství vytlačeného oleje do kontaktní oblasti [13]. Obecně platí, že se snižující se viskozitou maziva klesá i velikost mazacího filmu v kontaktu. Tento jev v prvních 2/3 experimentu není patrný. Je to způsobeno rostoucí zaplavenou oblastí kontaktu, kdy její pozitivní vliv na utváření mazacího filmu je větší než negativní vliv klesající viskozity maziva. V poslední 1/3 experimentu ale dojde změně majoritního vlivu a z důvodu příliš nízké viskozity dochází i k poklesu tloušťky mazacího filmu.

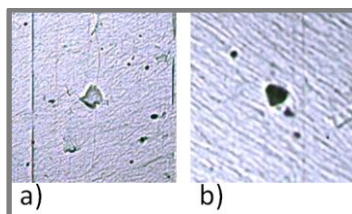


Obr. 4-24 Vliv okolní teploty na utváření mazacího filmu při vysokém zatížení (520 MPa)

Hraniční teplotou, při níž došlo ke změně majoritního vlivu, zde bylo 42 °C v 17. minutě testu, viz Obr. 4-24.

4.6 Vliv porézní struktury

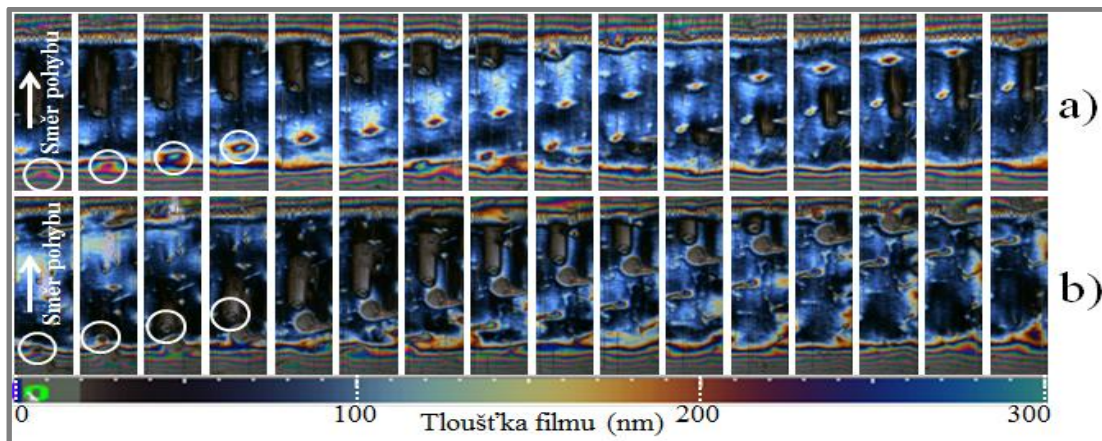
Při bližším zkoumání povrchu součásti byly pozorovány dva druhy povrchových nerovností, viz Obr. 4-25.



Obr. 4-25 Povrchové nerovnosti: (a) důlek, (b) pór

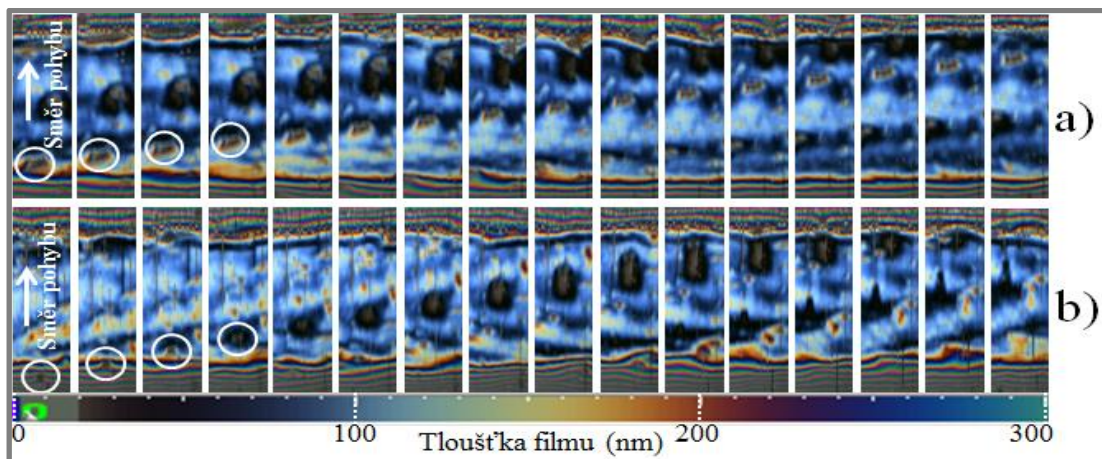
Jedná se o důlky (detail a) a póry (detail b). Póry jsou způsobeny technologií výroby a umožňují uložení maziva do samotné součásti. Porozita vzorků nepřesahuje hodnotu 10% a předpokládá se, že póry jsou propojeny s povrchem, čili vzniká tzn. otevřená porozita. Důlky jsou způsobeny vlivem smykového napětí, kdy dochází k odlamování částic materiálu.

Při bližším zkoumání byla snaha zjistit, jak důlky a póry ovlivňují tvorbu mazacího filmu. Experimenty byly provedeny za střední rychlosti 0,1 m/s při SRR 1 (Obr. 4-26) a SRR -1 (Obr. 4-27).



Obr. 4-26 Postupný průběh nerovností kontaktem při SRR 1: (a) důlky, (b) póry

Při pozitivním prokluzu je vyšší obvodová rychlost průhledného disku v porovnání s čistým valením. V případě důlku dochází k pozitivnímu ovlivnění utváření mazacího filmu. Při vstupu do kontaktu obsahuje důlek určité množství maziva, které se postupně uvolňuje do kontaktní oblasti. Vliv póru je ale přesně opačný. Při vstupu do kontaktu lze vidět malé množství maziva, které se nachází v jeho okolí. Postupem času se mazivo rychle rozptýlí a dochází k rozrušení mazacího filmu a tím k jeho téměř nulové tloušťce ve směru pohybu.

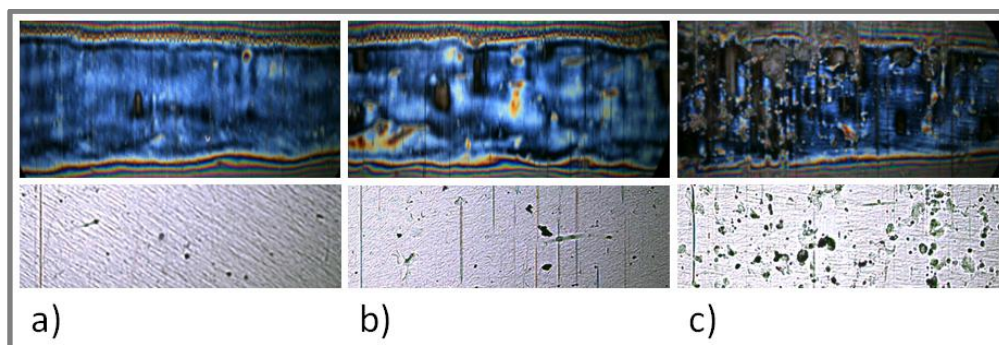


Obr. 4-27 Postupný průběh nerovností kontaktem při SRR -1: (a) důlky, (b) póry

Při negativním prokluzu je v porovnání s čistým valením vyšší obvodová rychlost slinovaného vzorku. Na Obr. 4-27 je znázorněn postupný pohyb (a) důlku a (b) póru kontaktem. Stejně jako v předchozím případě dochází k pozitivnímu vlivu důlku a negativnímu vlivu póru na utváření mazacího filmu.

4.6.1 Opatření

Z dlouhodobého hlediska docházelo k opotřebení vzorku. Na Obr. 4-28 je znázorněno postupné opotřebení vzorků a jeho vliv na utváření mazacího filmu.



Obr. 4-28 Opotřebení vzorků: (a) nízké, (b) střední, (c) vysoké

U (a) vzorku s nízkým opotřebením byla velikost pórů a důlků velice malá. Nepředpokládá se, že velikost pórů by se měla s opotřebením zvětšovat. Velikostí pórů je myšlena jejich viditelná část, čili vstupní oblast. Na základě malé velikosti těchto prvků nebyly v souvislosti s tloušťkou mazacího filmu v kontaktní oblasti příliš znatelné. Je ovšem patrný jejich lokální vliv.

U (b) vzorku se středním opotřebením vzrostlo vlivem vylamování částic materiálu množství obnažených pórů, velikost jejich vstupní oblasti a zároveň se začaly častěji objevovat i důlky. Tento jev nemusí být nutně brán jako negativní, protože větší množství důlků může zajistit lepší podporu kontaktu mazivem.

U (c) vzorku s vysokým opotřebením je patrné, že vzrostlo množství obnažených pórů, ale zároveň výrazně stoupl počet důlků. Zvýšené množství důlků je zapříčiněno odlamováním materiálu, ale může být zároveň odůvodněno ucpáváním pórů těmito úlomky. Je patrné, že tato úroveň opotřebení má na utváření mazacího filmu prokazatelně negativní vliv, kdy ve velké oblasti kontaktu je silně rozrušená jeho kontinuita.

5 DISKUZE

5

5.1 Statické testy

5.1

Z testů statického zatěžování bylo zjištěno, že mazivo ze součásti uniká. To je způsobeno kontaktním tlakem, kdy má mazivo tendenci se přesouvat do oblasti nižšího tlaku, čili do oblasti mimo Hertzův kontakt.

Z výsledků zároveň vyplynul výrazný vliv drsnosti povrchu na rychlost uvolňování maziva. Díky vyšší drsnosti povrchu má mazivo k dispozici větší množství únikových cest, vlivem tlakových poklesů v okolí výstupů z pórů [13]. V případě větších broušených vzorků docházelo k rychlému nárůstu vzdálenosti menisku, následnému rychlému poklesu a stabilizaci této vzdálenosti okolo hodnoty 0,2 mm. V případě leštěných větších vzorků byl nárůst stabilnější, ale finální vzdálenost menisku byla též okolo hodnoty 0,2 mm. Dá se tedy předpokládat, že větší drsnost sice napomůže rychlejšímu výtoku maziva, avšak toto mazivo stejně později z kontaktní oblasti unikne, ať už vlivem gravitační síly póry zpět do součásti nebo vyteče boky kontaktu. Při dosažení vzdálenosti menisku na hodnotě 0,2 mm je zřejmě dosaženo rovnováhy mezi vnitřními silami maziva a vnějšími silami působícími na mazivo.

U menších leštěných vzorků byl spíše pozorován trend neustálého vzrůstu vzdálenosti menisku. Dá se předpokládat, že to může být způsobeno rozdílným průměrem slinovaného vzorku. Vlivem nižšího průměru vzorku je vytvořena větší klínová mezera, čili prostor pro vytékající mazivo, viz Obr. 5-1.



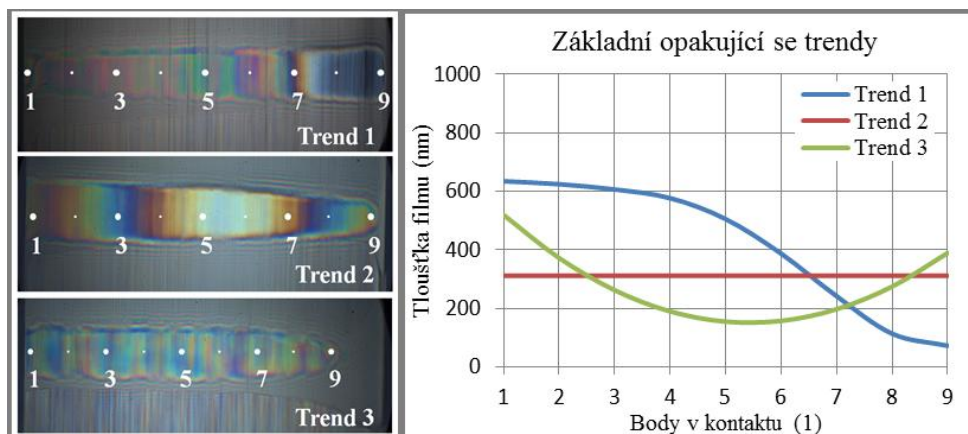
Obr. 5-1 Klínová mezera

U většiny testů s menšími vzorky byla v čase 15 min, který byl stabilizační pro větší vzorky, pozorována větší vzdálenost menisku s dále rostoucí tendencí. Dá se předpokládat, že vzrůst menisku se v určité hodnotě musí zastavit a bude docházet k reverzaci celého procesu. Stabilní vzdálenost menisku, při které dojde k rovnováze externích sil působících na olej (gravitační síla) se silami vnitřními (vnitřní tření, povrchové napětí), by logicky měla být menší.

5.2 Rozložení tloušťky mazacího filmu po délce kontaktu

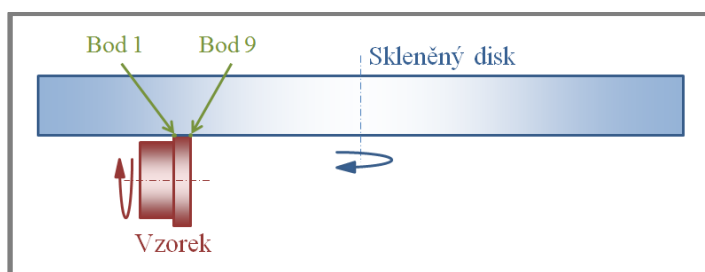
5.2

V případě dynamických testů byly pozorovány v zásadě tři opakující se trendy rozložení tloušťky mazacího filmu: klesající (trend 1), stabilní (trend 2) a parabolický (trend 3). Na Obr. 5-2 jsou znázorněny interferogramy kontaktů při různých trendech rozložení tloušťky mazacího filmu s označením bodů, na které se následně odkazuje graf závislosti tloušťky mazacího filmu v jednotlivých bodech. Dynamické testy byly prováděny na menších leštěných jednopalcových vzorcích.



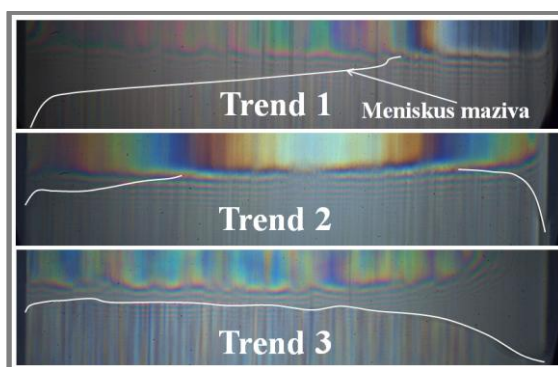
Obr. 5-2 Jednotlivé trendy rozložení tloušťky mazacího filmu

Zobrazení kontaktu v kontextu celého systému je znázorněno na Obr. 5-3, kde bod 1 je bod nejvzdálenější od středu otáčení skleněného disku.



Obr. 5-3 Zobrazení bodů v kontextu celého kontaktu

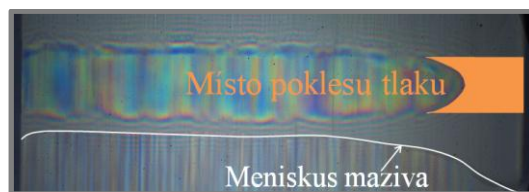
Tyto trendy jsou primárně závislé na tom, jaké množství maziva je možné do kontaktu dodávat, čili v jak velké oblasti dojde k zaplavení mazivem, viz Obr. 5-4.



Obr. 5-4 Zvýraznění menisku při jednotlivých trendech rozložení tl. mazacího filmu

Je zde patrné, že rostoucí množství maziva v kontaktu je primárně způsobeno rostoucí vzdáleností menisku maziva od hranice Hertzova kontaktu. Největší velikost zaplavené oblasti byla pozorována vždy na hranicích kontaktu.

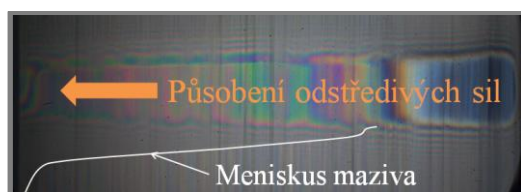
Pokud bylo v oblasti bodu 9 pozorováno vysoké zaplavení, vykazoval kontakt v této části jasný elipsoidní tvar, viz Obr. 5-5.



Obr. 5-5 Kontakt s elipsoidním tvarem v jedné části

Hromadění maziva v této části poté může být způsobeno prudkým poklesem tlaku v místě, které je mimo Hertzovu kontaktní oblast (Obr. 5-5, oranžová oblast). Je to způsobeno tím, že mazivo má tendenci unikat do místa s co nejnižším tlakem.

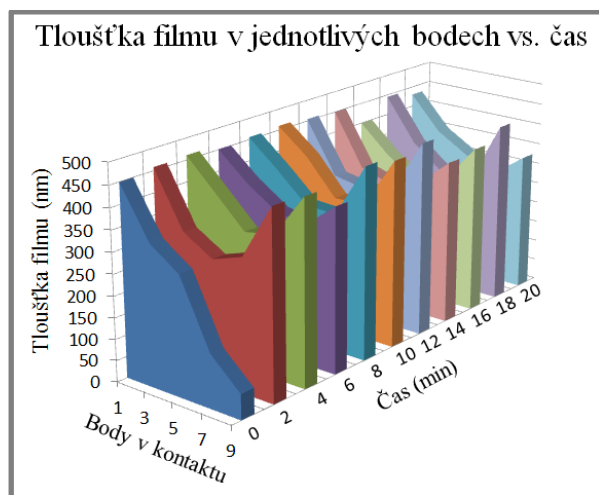
Kontakt v žádném případě nevykazoval elipsoidní tvar v místě bodu 1. Hromadění maziva v této oblasti může být způsobeno vlivem odstředivých sil. Mazivo, které se postupně zachytává na rotující skleněný disk má totiž tendenci postupně unikat co nejdál od středu otáčení, viz Obr. 5-6.



Obr. 5-6 Působení odstředivých sil

Jednotlivé trendy jsou pak způsobeny kombinací jednotlivých vlivů, kdy záleží na množství maziva umožňující jejich projevení.

Z dlouhodobého hlediska platilo pravidlo, že každý z testů většinou vykazoval jeden z trendů (Obr. 5-7), kdy jednotlivé průběhy se od sebe lišily pouze strmostí daných křivek. V záběhových částech testů byl většinou patrný trend 1.



Obr. 5-7 Rozložení tloušťky maziva v jednotlivých bodech kontaktu v závislosti na čase

5.3 Vliv valivé rychlosti

5.3

Poměrně jasný vliv valivé rychlosti na utváření tloušťky mazacího filmu byl popsán v Kap. 4.2. Byly provedeny experimenty porovnávající plně zaplavené podmínky a podmínky nedostatečného zásobení kontaktu mazivem. Součástí

experimentů bylo porovnání vlivu velikosti Hertzova tlaku na utváření mazacího filmu.

Z výsledků vyplynulo, že s rostoucí velikostí kontaktního tlaku klesá tloušťka filmu.

Při plně zaplavených podmínkách byly naměřeny závislosti velikosti mazacího filmu na střední rychlosti. Výsledky prokázaly, že s rostoucí střední rychlostí vzroste i tloušťka mazacího filmu, kdy daná závislost má logaritmický průběh.

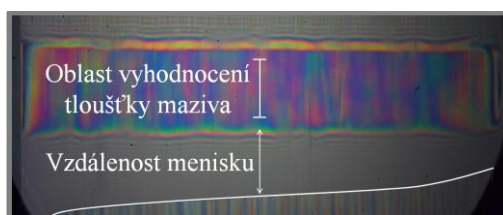
V případě využití maziva impregnovaného docházelo v současti k výraznému hladovění kontaktu. Tloušťka mazacího filmu se většinou pohybovala okolo 100 nm. Znamená to, že množství maziva vytlačované ze současti není dostatečné pro vytvoření dostatečného mazacího filmu. Tento jev ovšem nebyl trvalý. V případě nízkého zatížení při přechodu ze střední rychlosti 1,5 na 2 m/s docházelo k výraznému vzrůstu tloušťky mazacího filmu. Je to způsobeno výrazným zvětšením vzdálenosti menisku od hranice Hertzova kontaktu. Stejný jev se projevil v případě středního zatížení při přechodu ze střední rychlosti 2 na 2,5 m/s. Při dalším zvyšování střední rychlosti docházelo ke stabilizaci, kdy křivka tvarově kopírovala teoretický průběh při plně zaplavených podmínkách, viz Obr. 4-8. Dá se předpokládat, že existuje určitá rychlostní hranice pro dané zatížení, při které dojde k výraznému zvýšení množství maziva v kontaktu. Tloušťka mazacího filmu se pak velice podobá tloušťce při plně zaplavených podmínkách. Tento jev může být způsobený odstředivými silami působícími na slinovaný vzorek. Otázkou je, jestli je tento jev trvalý nebo zda dojde během určitého času k výraznému poklesu.

Další experimenty byly provedeny pro zpřesnění daných výsledků. Závislosti byly naměřeny při postupné skokové změně středních rychlostí. Celé měření trvalo cca 16 sekund a pro každý bod závislosti byla vyhrazena dvou sekundová sekvence. Dá se předpokládat, že jednotlivé dílčí výsledky mohou být ovlivněny předchozími body měření. Primárně se ovlivnění předpokládá v množství maziva, které zůstává v aparátu z předchozího bodu závislosti. Z tohoto důvodu byly naměřeny stejné závislosti pouze v sestupném pořadí rychlostí, viz Obr. 4-8 a Obr. 4-6. Průběhy tlouštěk filmů pro sestupné pořadí rychlostí (oranžové křivky) se spíše podobaly výsledkům z experimentů při plně zaplavených podmínkách. Tento jev může být způsobený rychlým uvolněním maziva do oblasti kontaktu vlivem vysoké rychlosti, kdy jeho množství pokryje skleněný disk souvislou vrstvou, která následně zásobuje kontakt mazivem během celého testu. Rozdíl může být hlavně ve vlivu bočního výtoku. Při vyšších rychlostech se olej ze zaplavené oblasti rozetře rychle na skleněný disk a vytvoří souvislou vrstvu mazacího filmu. Při následném snižování rychlostí postupný boční výtok maziva z kontaktní oblasti nemusí mít výrazný vliv. Se snižující rychlostí klesá totiž tloušťka filmu a zároveň klesá i množství potřebného maziva. V opačném případě se vzrůstající rychlostí nedojde u nízkých rychlostí k tak rychlému rozetření maziva na skleněný disk a jeho hromadící množství v kontaktní oblasti způsobí rychlejší boční výtok. Při následném vzrůstu střední rychlosti toto mazivo v kontaktní oblasti chybí a ze zbylého množství není možné vytvořit tak tlustý mazací film. Dochází tedy k hladovění kontaktu.

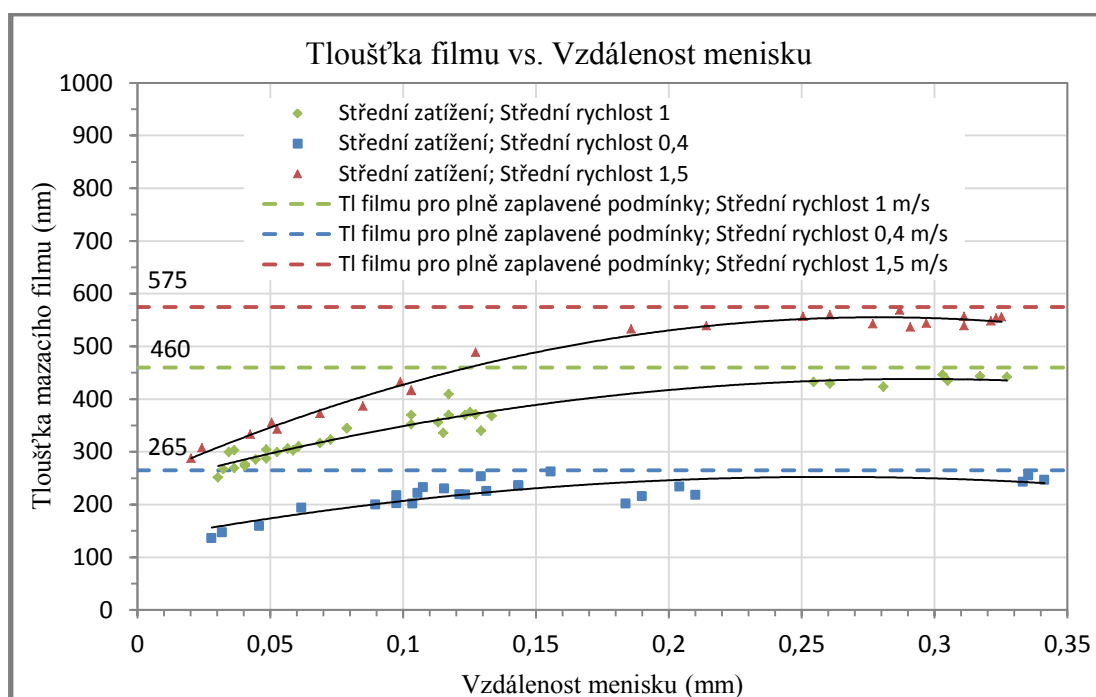
5.3.1 Vliv velikosti zaplavené oblasti

Ze snímků, které byly získány pro jednotlivé střední rychlosti a konkrétní zatížení, byla vyexportována data týkající se tloušťky mazacího filmu v závislosti

na vzdálenosti menisku maziva od hranice Hertzova kontaktu, viz Obr. 5-9. Místo vyhodnocení tloušťky filmu pro konkrétní vzdálenost menisku je znázorněno na Obr. 5-8.



Obr. 5-8 Místo vyhodnocení tloušťky filmu pro konkrétní vzdálenost menisku



Obr. 5-9 Závislost tloušťky mazacího filmu pro konkrétní vzdálenost menisku pro různé střední rychlosti

Výsledné závislosti mají logaritmický průběh, kdy z dostupných dat nebylo možné získat větší množství bodů pro přesnější vykreslení. Je to převážně z toho důvodu, že byly vyřazeny body, které mohou být ovlivněny hranovým efektem. V daných bodech mohou být velké rozptyly, což je způsobeno přítomností pórů, které minimálně na lokální úrovni mohou výrazně ovlivnit výsledky.

5.4 Vliv prokluzu

5.4

Z výsledků pro vliv prokluzu (Kap. 4.3) bylo potvrzeno jasné ovlivnění tloušťky mazacího filmu valivou rychlostí. Obecně platilo (při využití maziva impregnovaného ve vzorku), že díky prokluzu byla vytvořena vyšší tloušťka mazacího filmu, v porovnání s podmínkami čistého valení. To může být způsobeno generovaným teplem, které zapříčiní pokles viskozity maziva a tím jeho rychlejší únik do oblasti kontaktu, čili větší zaplavení kontaktní oblasti.

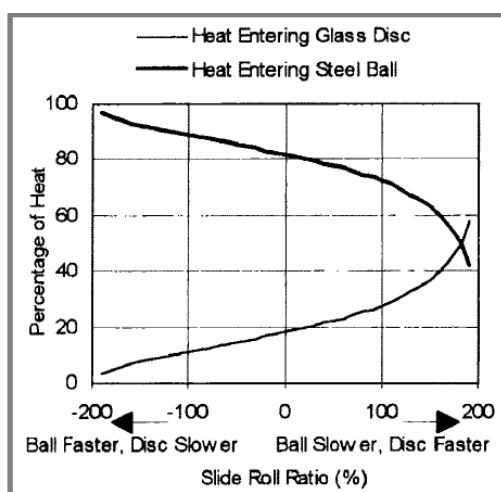
Dále bylo zjištěno, že v případě záporného SRR (rychlejší slinovaný vzorek) bylo dosaženo nižší tloušťky mazacího filmu v porovnání se stejnou hodnotou

při kladném SRR. Tento jev je způsobený množstvím přijatého tepla rotujícím vzorkem [26] a následnou změnou viskozity maziva. Smeeth zjistil, že v případě prokluzu většina generovaného tepla prochází do rychleji pohybujícího se tělesa, kdy zároveň závisí na teplotních vlastnostech těles, jako je tepelná kapacita a vodivost (Tab. 9).

Tab. 9 Teplotní vlastnosti materiálu [26]

	Thermal Conductivity (J/msK)	Specific heat capacity (J/KgK)
Glass	1.5	837
Steel	50	420

Kombinací těchto vlivů vyšla závislost procentuálně přijímaného tepla skleněného disku a (v případě Smeetha) ocelové kuličky, pro různé SRR, viz Obr. 5-10.



Obr. 5-10 Teplotní rozdělení pro ocelovou kuličku na kontaktu se skleněným diskem [26]

Z Obr. 5-10 vyplývá, že v případě rychleji se pohybující ocelové kuličky přijímá tato kulička výrazně větší množství tepla. Tento jev je pak výraznější s rostoucí hodnotou SRR.

Dá se předpokládat, že teplotní vlastnosti vzorku s impregnovaným olejem se budou lišit od čisté oceli, ale vliv přijímaného tepla bude podobný.

V případě experimentů (Kap. 4.3) klesla díky tomuto přijatému teplu viskozita maziva, čímž v kontaktní oblasti docházelo k výrazně většímu zaplavení. V porovnání kladného SRR se záporným docházelo u záporného k většímu zaplavení.

Při experimentech prokluz, jako takový, umožňoval lepší uvolňování maziva ze součástí. Nižší viskozita zase částečně snižovala tloušťku mazacího filmu. V případě slinovaných vzorků impregnovaných olejem bylo majoritním pozitivním vlivem zvýšení zaplavení oblasti. Dá se tedy předpokládat, že prokluz, jako takový, má na slinované díly impregnované olejem spíše pozitivní vliv.

5.5 Vliv času

Časové testy by se daly v zásadě rozdělit na dva druhy. (1) Testy minutové, při kterých byl podrobně zkoumán postupný průběh formace mazacího filmu při první

minutě v záběhu. (2) Testy patnáctiminutové, při kterých byl zkoumán dlouhodobější průběh formace mazacího filmu.

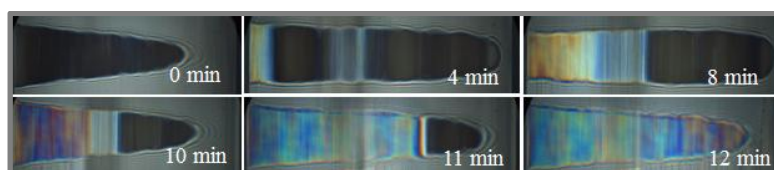
U testů podle bodu 1 byly v zásadě sledovány dva trendy: (1a) Trend stabilní a (1b) trend fluktuální. Trend podle bodu 1a vykazoval poměrně stabilní průběh, kdy rozdíly maxima a minima centrální tloušťky mazacího filmu nebyly příliš velké. Samotná centrální tloušťka mazacího filmu v měřítku 60-ti sekund udržovala relativně konstantní hodnotu. Trend podle bodu 1b vykazoval velice nestabilní průběh, kdy v počátečních fázích testu docházelo k výrazným fluktuacím. Jakmile se kontakt ustálil, docházelo k výraznému poklesu centrální tloušťky mazacího filmu, kdy průběh naznačuje, že výsledná hodnota tloušťky by mohla být velice podobná trendu podle bodu 1a.

U testů podle bodu 2 jsou pozorovány změny v tloušťkách mazacího filmu. Při shrnutí jednotlivých závislostí není možné stanovit žádné ovlivnění konkrétním parametrem. Pokud z experimentů vyjme jejich záběhovou část, tloušťky mazacího filmu se v průběhu drží na stejné hodnotě. V měřítku 15 minut není možné pozorovat prokazatelně rostoucí nebo klesající tendenci. Dále z daného počtu měření nebylo možné určit prokazatelný vliv prokluzu, valivé rychlosti nebo Hertzova tlaku na utváření mazacího filmu.

5.5.1 Postupné zaplavování kontaktu

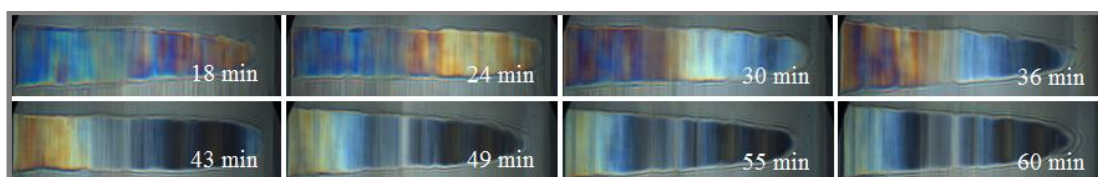
5.5.1

V jednom z testů byl pozorován nárůst mazacího filmu v závislosti na čase. Kontakt byl pozorován po dobu jedné hodiny při středním zatížení, podle Tab. 6. Byla zde vyhodnocena závislost průměrné (nikoli centrální) tloušťky mazacího filmu v horizontálním průřezu celým kontaktem v závislosti na čase, viz Obr. 5-13. Do této závislosti je též zaneseno procentuální obsazení oblasti s tloušťkou filmu vyšší než 65 nm, čili oblasti, ve které se formuje větší množství filmu v porovnání s počátečním stavem testu. Je zde patrný výrazný nárůst průměrné tloušťky maziva po dobu 12 min, viz Obr. 5-11 a Obr. 5-13. Daný nárůst je způsoben postupným zaplavováním kontaktní oblasti od bodu 1 postupně k bodu 9, viz Kap. 5.1. Postupné zaplavování kontaktní oblasti od bodu nejvzdálenějšího od středu otáčení skleněného disku byl jev opakující se ve většině testů v případě, že kontakt vykazoval rozložení maziva podle trendu 1, viz Kap. 5.2.



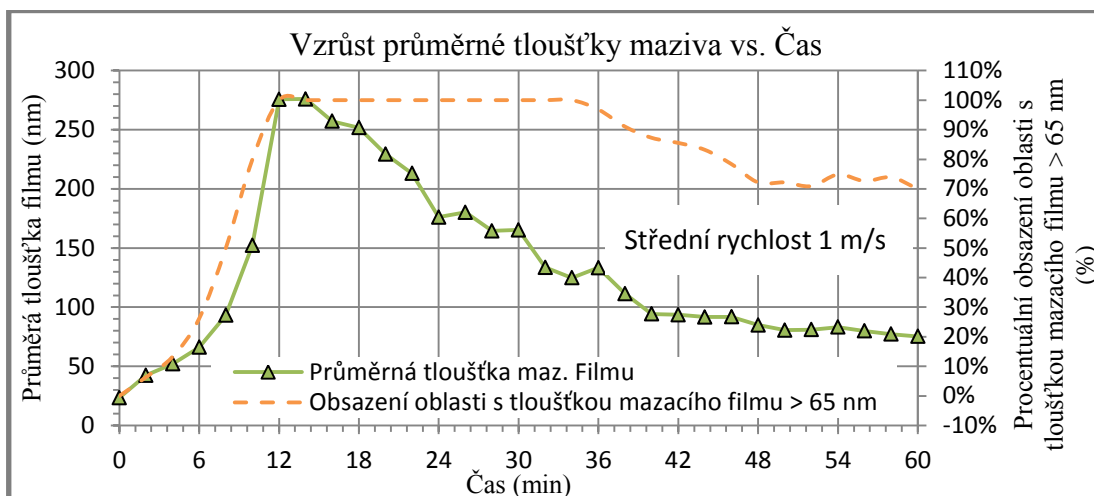
Obr. 5-11 Postupný nárůst maziva

Jakmile bylo dosaženo maxima průměrné tloušťky filmu, docházelo k reverzaci celého procesu a ke zpětnému poklesu, viz Obr. 5-12 a Obr. 5-13.



Obr. 5-12 Postupný pokles maziva

Jev zpětného poklesu množství maziva v kontaktu může být způsoben postupným bočním výtokem maziva z kontaktu [23], čili jeho odvodem z kontaktní oblasti.



Obr. 5-13 Závislost průměrné tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase

Maximální průměrná tloušťka maziva v ustálené oblasti (12 – 14 min) byla 276 nm, následně docházelo k poklesu maziva, kdy na konci testu (60 min) byla průměrná tloušťka mazacího filmu 75 nm.

Tento test poukázal na průběžnou globální změnu tloušťky mazacího filmu při průběžném zaplavování kontaktu.

Po dosažení poměrně konstantní tloušťky mazacího filmu (maxima) v průřezu celého kontaktu začalo docházet k reverzaci celého procesu a k postupnému poklesu průměrné tloušťky mazacího filmu. Tento jev poukazuje na to, že i když se lokálně tloušťka mazacího filmu může jevit konstantní, v širším úhlu pohledu může docházet k výrazným změnám. Přesto, že časové testy se v centrální oblasti jevíly poměrně stabilně, dá se předpokládat, že postupné malé globální změny způsobí i změny na lokální úrovni. K tomuto jevu zřejmě dochází po delším časovém intervalu. Tyto výsledky poukazují na to, zda je vůbec vhodné daný systém využívat dlouhodoběji.

5.6 Vliv teploty

Z testu (Kap. 4.5) vyplýval jasný vliv teploty na velikost zaplavení popř. centrální tloušťku mazacího filmu.

S rostoucí teplotou vzrůstala i oblast zaplavení kontaktní oblasti. Je to způsobeno poklesem viskozity maziva, díky čemuž má tendenci lépe unikat z pórů součástí. Současně s tím postupně rostla centrální tloušťka mazacího filmu. Tento jev byl způsobený převažujícím pozitivním vlivem zaplavení kontaktní oblasti v porovnání s negativním vlivem poklesu viskozity maziva na utváření mazacího filmu. Při dosažení teploty 42 °C, začal negativní význam viskozity, jakožto vlivu degradující tloušťku filmu, převažovat nad pozitivním významem viskozity, jakožto vlivu zajišťujícího větší oblast zaplavení, a tloušťka mazacího filmu začala klesat.

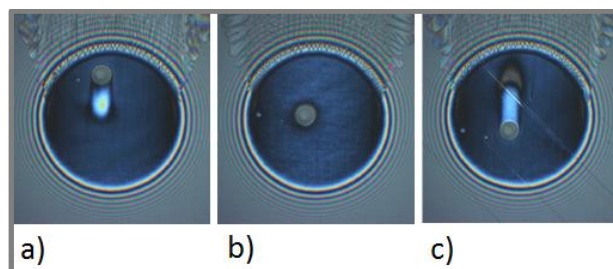
Dá se tedy předpokládat, že teplota může mít pozitivní vliv na utváření mazacího filmu u porézních součástí impregnovaných olejem, avšak existuje určitá teplotní hranice, kdy se tento vliv mění na negativní.

5.7 Vliv porézní struktury

Při zkoumání povrchu vzorků, byly pozorovány dva typy povrchových nerovností: (1) póry a (2) důlky. Póry působí jako úložiště maziva a vznikají technologií výroby. Důlky vznikají odlamováním částeczek materiálu a případným zanášením pórů.

Při bližším pohledu na póry (Kap. 4.6) je patrné, že docházelo k prolomení kontinuity vytvořeného mazacího filmu. V okolí vstupu do póru je patrná téměř nulová tloušťka filmu, kdy při postupném posunu kontaktu dochází k vysávání maziva. Za pórem je pak viditelná stopa téměř nulové tloušťky mazacího filmu. Tento jev je způsoben nízkým tlakem v místě pórů v porovnání s okolním Hertzovým tlakem. Z tohoto důvodu dochází k přesunu maziva k tomuto nižšímu tlaku, čili jeho úniku z bezprostřední blízkosti póru do jeho vnitřní struktury.

U důlků je efekt přesně opačný. Malé množství maziva, které se v nich uchytí, se při průchodu kontaktem pozvolně uvolňuje a zajišťuje lokální nárůst tloušťky mazacího filmu. Díky tomuto je zajištěno vyšší množství maziva v kontaktu. Stejný jev byl pozorován v interní studii, viz Obr. 5-14



Obr. 5-14 Vliv důlku na utváření mazacího filmu v bodovém kontaktu a) SRR = -1, b) SRR = 0, c) SRR = 1 [31]

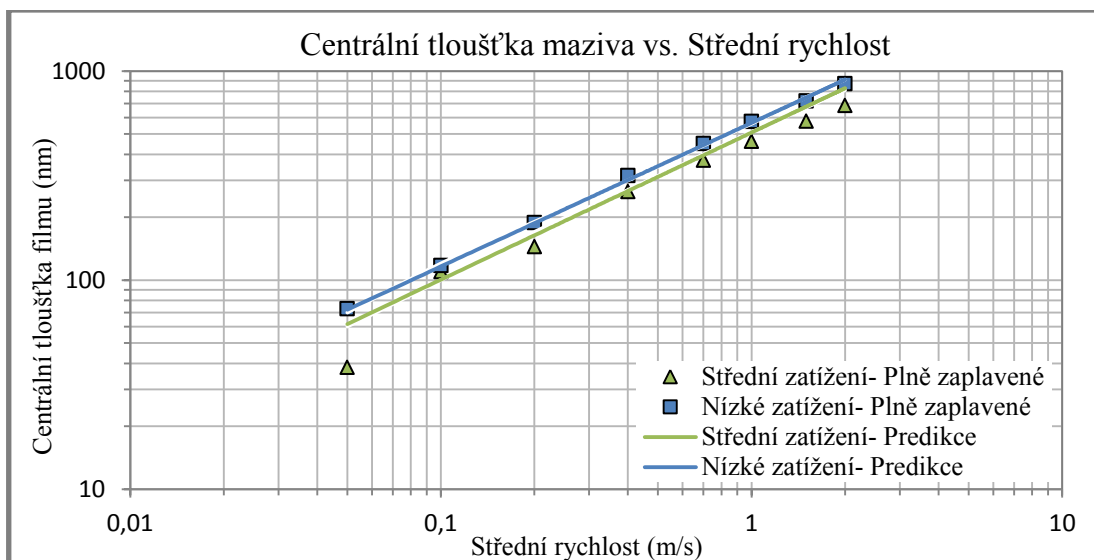
S ohledem na tyto skutečnosti je jasné, že mazivo se z pórů součásti neuvolňuje přesně v místě kontaktu, ale mimo něj.

V průběhu času dochází k opotřebení součásti, viz Kap. 4.6.1. To se projevuje třemi způsoby: (a) poškrábání součásti, (b) otevření většího množství pórů a (c) tvorbou důlků. Toto opotřebení nemusí mít nutně negativní efekt. Logicky vyšší množství otevřených pórů zajistí rychlejší podporu kontaktu mazivem a větší množství důlků zajistí lokální nárůsty v tloušťce filmu. Existuje ale určitá hranice v tom, kdy je přínos pórů v uvolňování maziva mimo kontakt nahrazen jejich negativním efektem, a to prolomením kontinuity mazacího filmu v kontaktu, viz Obr. 4-28 detail c.

5.7.1 Predikce

Pro porovnání formace maziva u porézních vzorků, při plně zaplavených podmínkách, s plným materiálem, byl použit teoretický model, který je popsán v Kap. 1.1.3 (rovnice 5). K výpočtu byl použit online kalkulačtor na webu tribology-abc.com. Z výsledků pak byla vynesena závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti a byla porovnána s naměřenou závislostí pro plně zaplavené podmínky.

Porovnání teoretického modelu s naměřenými daty bylo provedeno pro dva případy: nízké a střední zatížení, podle Tab. 6. Na Obr. 5-15 jsou pak znázorněny přímky reprezentující výsledky z teoretického modelu pro plný materiál, jež jsou porovnávány s body reprezentujícími naměřené hodnoty pro porézní vzorky.



Obr. 5-15 Porovnání teoretického modelu s naměřenými hodnotami vlivu střední rychlosti na centrální tloušťku mazacího filmu

Z výsledků je patrné, že v případě nízkého zatížení se naměřené hodnoty příliš nelišili od hodnot teoretického modelu. V některých případech je ale patrný mírný nárůst centrální tloušťky maziva v porovnání s teoretickým modelem. To může být způsobeno pozitivním vlivem důlků na utváření mazacího filmu. V případě středního zatížení je však rozdíl hodnot výraznější, hodnoty centrálních tlouštěk filmu jsou nižší v porovnání s teoretickým modelem. To může být způsobeno větším rozdílem tlaku mezi oblastí Hertzova kontaktu a tlakem v místě pórů. Vlivem toho může docházet k rychlejšímu „nasávání“ maziva do oblasti póru v porovnání s kontaktem o nízkém zatížení.

Tento rozdíl se postupně zvětšuje s rostoucí střední rychlostí. Tento jev může být způsoben tím, že teoretický model předpokládá izotermické podmínky, které nejsme schopni potvrdit, protože nebyla kontrolována teplota v průběhu testu. Zároveň teoretický model nezohledňuje možné neneutronovské chování maziva.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá studiem chování spékaných porézních dílů impregnovaných olejem v EHD kontaktu. Předpokládá se, že díky impregnovanému oleji dojde k samomazným vlastnostem, podobně jako v případě kluzných ložisek. Cílem této práce bylo zjistit vliv jednotlivých provozních parametrů na utváření mazacího filmu.

Ve většině případů docházelo k nedostatečnému zásobení kontaktu mazivem. Tento jev není způsobený nízkým množstvím maziva ve vzorcích, ale jeho nedostatečným výtokem. Hlavním parametrem ovlivňující výtok maziva je změna viskozity vlivem teploty. Při plně zaplavených podmínkách platí, že s klesající viskozitou klesá i tloušťka mazacího filmu. V případě této studie klesající viskozita zároveň způsobuje lepší uvolnění maziva ze součásti a tím pozitivně působí na utváření mazacího filmu. Existuje ale určitá teplotní hranice, při které pozitivní vliv rostoucí teploty, jakožto vlivu na vyšší výtok maziva ze součásti, zaniká negativním vlivem klesající viskozity. Z dlouhodobého hlediska se dá předpokládat, že vyšší výtok maziva způsobí zároveň výrazné snížení životnosti celého systému, přičemž bude docházet k permanentním ztrátám způsobeným bočním výtokem.

Ze získaných výsledků vyplývá, že jedním z hlavních parametrů ovlivňujících formaci mazacího filmu je míra zaplavení kontaktní oblasti, čili vzdálenost menisku maziva od hranice Hertzova kontaktu.

Vlivem měnící se velikosti zaplavené oblasti není chování celého systému příliš předvídatelné. Dochází k výrazným výkyvům, převážně mezi jednotlivými testy se stejnými podmínkami. Z výsledků není možné určit, co přesně způsobuje rozdílnou míru zaplavení kontaktní oblasti a tím velké výkyvy hodnot tloušťek mazacího filmu při stejných typech měření.

Při porovnání teoretického modelu pro plný materiál s naměřenými závislostmi pro porézní vzorky při plně zaplavených podmínkách jsou patrné určité rozdíly hodnot. Tyto rozdíly jsou výraznější s rostoucím tlakem a zároveň rostoucí střední rychlosti. Z výsledků je možné usoudit, že samotná porézní struktura ovlivňuje utváření mazacího filmu. U nižšího zatížení je při plně zaplavených podmínkách a nízkých a středních rychlostech patrný pozitivní vliv důlků na utváření mazacího filmu, což se projevuje mírně zvýšenou centrální tloušťkou mazacího filmu v porovnání s teoretickým modelem. U středního zatížení a plně zaplavených podmínkách je pozorován negativní vliv pórů na utváření mazacího filmu, což se projevuje sníženou tloušťkou mazacího filmu v porovnání s teoretickým modelem.

Obecně je dlouhodobá funkčnost celého systému při využití impregnovaného maziva neprůkazná. Dá se předpokládat, že by mělo být zajištěno dostatečné zásobení kontaktu mazivem při nízkých i velice vysokých rychlostech. Při nízkých rychlostech z toho důvodu, že množství vytlačeného maziva je dostatečné na podobné podmínky jako při plném zaplavení. Při velice vysokých rychlostech z toho důvodu, že dochází k výraznému zvětšení oblasti zaplavení, viz Kap. 5.3 a 4.2. Rychlostní hranice tohoto jevu roste s velikostí aplikovaného tlaku. Z dlouhodobého hlediska však není možné deklarovat udržení oblasti zaplavení v tak vysoké míře.

V případě dalšího výzkumu by bylo vhodné zjistit konkrétní hraniční rychlosti pro konkrétní tlaky, při kterých se jev zvýšené oblasti zaplavení projevuje. Další částí by mohly být testy trvanlivosti, čili jak dlouho zvýšená oblast zaplavení vydrží. Dále by bylo vhodné se více zaměřit na konkrétní zaplavení kontaktní oblasti při různých ovlivňujících parametrech s podrobným pozorováním teplotních změn. Pro bližší pochopení jednotlivých vlivů by bylo přínosné stírat, v průběhu krátkodobých testů, vytvořenou vrstvu maziva na skleněném disku, čímž by se mělo dosáhnout jasnějšího pohledu na jednotlivé ovlivňující parametry bez zkreslení obtisknutým zbytkovým mazivem na skleněném disku.

Využitelnost těchto výsledků by měla přispět k výzkumu samomazných ozubených kol, již publikované studie Výzkumným centrem Ozubených Kol na Technické Univerzitě v Mnichově (FZG).

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering Tribology*. 4. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Miloš Vlk. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] HARTL, M. *Studium a měření velmi tenkých mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 104 s. Habilitační práce
- [4] HERTZ, H. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle's Journal)*. 1882, vol. 1882, no. 92, pp. 156-171. DOI 10.1515/crll.1882.92.156.
Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/crll.1882.issue-92/crll.1882.92.156/crll.1882.92.156.xml>
- [5] CHRISTENSEN, H. The Oil Film in a Closing Gap. *Proc. Roy. Soc.*. 1962, vol. 266, pp. 312-328.
- [6] HAMROCK, B.J. a D. DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic lubrication of point contact, Part III – Fully flooded results. *Journal of Tribology*. 1977, no. 99, pp. 264-276
Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770004457.pdf>
- [7] KAYE, K.A, W.O. WINTER. An experimental evaluation of the Hamrock and Dowson minimum film thickness equation for fully flooded EHD point contact. *Journal of Lubrication Technology*. 1981, vol. 103, pp. 284-294.
- [8] RAMESH, C.S. a C.K. SRINIVAS. Friction and wear behavior of laser-sintered iron–silicon carbide composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, no. 14, pp. 5429-5436. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.018.
- [9] TSOUKNIDAS, A. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: a review. *Advances in Tribology*. 2011, vol. 2011, pp. 1-7. DOI: 10.1155/2011/746270. ISSN 1687-5915
Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/at/2011/746270/>
- [10] TSUKERMAN, S. A. *Powder Metallurgy*. Oxford: Pergamon Press, 1965. ISBN 9781483185347.
- [11] AKHLAGHI, F. a A. ZARE-BIDAKI. Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wearbehavior of Al 2024–graphite

- composites produced by in situ powder metallurgy method. *Wear*. 2009, vol. 266, no.1-2, pp. 37-45. DOI: 10.1016/j.wear.2008.05.013.
- [12] DU, Hao, Jianzhong QI, Yuanxia LAO a Tianying XIONG. Oil retaining capability and sliding friction behaviour of porous copper with elongated cylindrical pores. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, vol. 212, no. 8, pp. 1796-1801. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.03.024.
- [13] GNANARAJ, S.Darius a R. RAMAN. Experimental studies on wear in oil-impregnated sintered bearings. *Wear*. 1992. roč. 155, č. 1, s. 73-81. ISSN 00431648. DOI:10.1016/0043-1648(92)90110-T.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004316489290110T>
- [14] RAMAN, R. a L. Vinod BABU. Tests on sintered bearings with reduced oil contents. *Wear*. 1984, vol. 95, no. 3, pp. 263-269. DOI: doi:10.1016/0043-1648(84)90141-8.
Dostupné z:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164884901418>
- [15] RHODES, C.A. a W.T. ROULEAU. Hydrodynamic lubrication of narrow porous metal bearings with sealed ends. *Wear*. 1965, vol. 8, no. 6, pp. 474-486. DOI:10.1016/0043-1648(65)90140-7.
Dostupné z:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164865901407>
- [16] ZHILINSKII, V.A. a V.D. ZOZULYA. Performance of porous bearings in electric motors. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 1977, vol. 16, no. 1, pp. 70-73. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBBF01129719>
- [17] EBNER, M., T. LOHNER, K. MICHAELIS, J.-P. STEMLINGER, B.-R. HÖHN, K. STAHL. Self-lubricated elastohydrodynamic (EHL) contact with oil-impregnated sintered materials. *Tribology- Industrial and Automotive Lubrication*. Stuttgart/Ostfildern. 2016.
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/292147728_Self-Lubricated_Elastohydrodynamic_EHL_Contacts_with_Oil-Impregnated_Sintered_Materials
- [18] KOŠTÁL, D. Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. 49 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce
- [19] SNIDLE, R.W. a H. P. EVANS. Some aspects of gear tribology. Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2009, vol. 223, no. 1, pp. 103-141. DOI: 10.1243/09544062JMES1168.
Dostupné z: <http://pic.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/09544062JMES1168>

- [20] DOWSON, D. a G.R. HIGGINSON. A numerical solution to the elasto-hydrodynamic problem. *ARCHIVE: Journal of Mechanical Engineering Science* 1959-1982 (vols 1-23). 1959-6-1, vol. 1, no. 1, pp. 6-15. DOI: 10.1243/JMES_JOUR_1959_001_004_02.
Dostupné z: http://jms.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/JMES_JOUR_1959_001_004_02
- [21] ZOELLEN, M.T. van. *Thin layer flow in rolling element bearings*. Netherlands: University of Twente, 2009. pp. 172 Ph. D. thesis
- [22] CANN, P. a A.A. LUBRECHT. Analysis of the mechanisms of grease lubrication in rolling element bearings. *Lubricat Science*. 1999, vol. 11, no. 3, pp. 227-245. DOI: 10.1002/ls.3010110303.
- [23] CHEVALIER, F., A.A. LUBRECHT, P.M.E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ. Film thickness in starved EHL point contact. *Journal of Tribology*. 1998, vol. 120, no. 1, pp. 126-133. DOI:10.1115/1.2834175.
Dostupné z: <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1465695>
- [24] ORCUTT, F.K. a H.S. CHENG. Lubrication of rolling contact instrument bearing. *Gryo-Spi Axis Hydrodynamic Bearing Symposium*. 1966, no. 2.
- [25] ZOELLEN, M.T. VAN, C.H. VENNER a P.M. LUGT. Prediction of film thickness decay in starved elasto-hydrodynamically lubricated contacts using a thin layer flow model. *Journal of Engineering Tribology*. 2009, vol. 223, no. 3, pp. 541-552. DOI: 10.1243/13506501JET524.
Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/content/223/3/541.abstract>
- [26] SMEETH, M. a H.A SPIKES. The influence of slide/roll ratio on the film thickness of an EHD contact operating within the mixed lubrication regime. pp. 695. DOI 10.1016/S0167-8922(08)70831-9.
Dostupé z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167892208708319>
- [26] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. Základní typy poruch ozubených kol. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska4_6c2.pdf
- [27] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. Tření, mazání, opotřebení. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>
- [28] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. Tribologické aspekty kontaktních povrchů. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/prednaska2.pdf>

- [29] HAMROCK, B.J., S.R. SCHMID, B.O. JACOBSON. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. [online]. ISBN No. 0-8247-5371-2 Dostupné z: https://www3.nd.edu/~manufact/FFFL_Powerpoint_files/FFFL_1-6.ppt
- [30] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. Elastohydrodynamické mazání. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/tribologie/prednasky/prednaska7.pdf>
- [31] ŠPERKA, P. *A role of surface grooves and transition from full to mixed lubricaiton*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016, [interní dokument].

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**8****8.1 Seznam použitých zkratk****8.1**

EHD	-	Elastohydrodynamický
EHL	-	Elastohydrodynamické mazání
RGB	-	Red, green and blue
SRR	-	Slip to roll ratio (skluzový poměr nebo hodnota prokluzu)

8.2 Seznam použitých symbolů**8.2**

E'	Pa	- redukovaný Youngův modul pružnosti
\bar{h}	m	- tloušťka EHD filmu v místě, kde tlakový gradient se rovná nule
h_0	m	- minimální tloušťka filmu
h_c	m	- centrální tloušťka filmu
h_e	mm	- součet elastických deformací těles ($h_{e_A} + h_{e_B}$)
h_f	mm	- konstanta
h_{min}	μm	- minimální tloušťka mazacího filmu
h_ε	mm	- příspěvek geometrie nedeformovaných těles
k	1	- bezrozměrný parametr elipticity
L	m	- celá délka EHD kontaktu $L=2l$
p	Pa	- tlak
R'	m	- redukovaný poloměr křivosti
R_{a1}	μm	- střední aritmetická úchylka profilu třecího povrchu tělesa 1
R_{a2}	μm	- střední aritmetická úchylka profilu třecího povrchu tělesa 2
R_{red}	μm	- redukovaná drsnost třecích povrchů
U	ms^{-1}	- střední rychlost povrchů
W	N	- kontaktní zatížení
α	m^2N^{-1}	- viskózně tlakový koeficient
η_0	Pa·s	- dynamická viskozita při atmosférickém tlaku a teplotě θ
η_p	Pa·s	- dynamická viskozita maziva při tlaku p a teplotě θ
λ	1	- bezrozměrný parametr mazání

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Stribeckova křivka [3]	16
Obr. 1-2 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ [3]	17
Obr. 1-3 Mezné mazání [29]	17
Obr. 1-4 Smíšené mazání [29]	18
Obr. 1-5 Elastohydrodynamické mazání [29]	18
Obr. 1-6 Konvergentní-divergetní mezera podle Martin [30]	19
Obr. 1-7 Vliv lokálních elastických deformací na profil mazacího filmu [1]	19
Obr. 1-8 Vliv tlaku na viskozitu různých maziv [30]	21
Obr. 1-9 Grubinovo vyjádření tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu [1]	21
Obr. 1-10 Rozložení hydrodynamického tlaku v EHD kontaktu [1]	23
Obr. 1-11 Hydrodynamické mazání [29]	24
Obr. 1-12 Vliv porézности na další vlastnosti dílu	24
Obr. 1-13 Vliv procentuálního množství oleje na koeficient tření [14]	25
Obr. 1-14 Závislost koef. tření a tep. vzorků na mn. zatěžovacích cyklech [17]	27
Obr. 1-15 Náhled na povrchy vzorků před a po testech [17]	28
Obr. 1-16 Rozdíl distribuce maziva v plně zaplaveném a nedostatečně zásobeném kontaktu mazivem [6]	29
Obr. 1-17 Vliv polohy vzdálenosti menisku na minimální tl. mazacího filmu [24]	30
Obr. 1-18 Rych. poklesu tl. maz. filmu v závislosti na čase pro různá zatížení [25]	30
Obr. 3-1 Princip optické interferometrie	33
Obr. 3-2 Typy vzorků	34
Obr. 3-3 Simulátor statického kontaktu pro 80 mm vzorek	35
Obr. 3-4 Zobrazení statického kontaktu	36
Obr. 3-5 Schéma optického tribometru	36
Obr. 3-6 Znázornění oblasti vyhodnocení centrální tloušťky maziva	36
Obr. 4-1 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení u broušených vzorků	37
Obr. 4-2 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení u leštěných vzorků	38
Obr. 4-3 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro nízké zatížení u leštěných vzorků (změna trendu)	38
Obr. 4-4 Závislost vzdálenosti menisku na čase pro různé režimy zatížení menších u leštěných vzorků	39
Obr. 4-5 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro různé režimy zatížení	41
Obr. 4-6 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro nízké zatížení	41
Obr. 4-7 Nárůst zaplavení oblasti při nízkém zatížení	42
Obr. 4-8 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na střední rychlosti pro střední zatížení	42
Obr. 4-9 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro různé střední rychlosti a střední zatížení	43
Obr. 4-10 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro střední zatížení a různé pořadí hodnot prokluzů (střední rychlost 0,4 m/s)	45
Obr. 4-11 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na hodnotě prokluzu pro střední zatížení a různé pořadí hodnot prokluzů (střední rychlost 1 m/s)	45

Obr. 4-12	Zobrazení kontaktu při střední rychlosti 0,4 m/s a různých SRR	45
Obr. 4-13	Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení a stř. rychlost 1 m/s	46
Obr. 4-14	Zobrazení kont. pro různé testy vysokého zatížení (střední rych. 1 m/s)	46
Obr. 4-15	Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení a stř. rychlost 2 m/s	47
Obr. 4-16	Zobrazení kontaktu pro různé testy vysokého zatížení a různé střední rychlosti	47
Obr. 4-17	Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 1 m/s	48
Obr. 4-18	Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 1 m/s (trendy)	48
Obr. 4-19	Detail průběhu prvních pěti sekund pro test „Nízké zatížení 5“	49
Obr. 4-20	Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení a stř. rychlost 2 m/s	49
Obr. 4-21	Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení, střední rychlost 1 m/s a SRR 0,7	50
Obr. 4-22	Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na čase pro vysoké zatížení, střední rychlost 2 m/s a různé SRR	50
Obr. 4-23	Závislost prům. centrální tl. mazacího filmu na čase pro nízké zatížení, různé stř. rychlost a SRR 0,5 (trendy)	51
Obr. 4-24	Vliv okolní tep. na utváření maz. filmu při vysokém zat. (520 MPa)	52
Obr. 4-25	Povrchové nerovnosti	52
Obr. 4-26	Postupný průběh nerovností kontaktem při SRR 1	53
Obr. 4-27	Postupný průběh nerovností kontaktem při SRR -1	53
Obr. 4-28	Opotřebení vzorků	54
Obr. 5-1	Klínová mezera	55
Obr. 5-2	Jednotlivé trendy rozložení tloušťky mazacího filmu	56
Obr. 5-3	Zobrazení bodů v kontextu celého kontaktu	56
Obr. 5-4	Meniskus při jednotlivých trendech rozložení tl. mazacího filmu	56
Obr. 5-5	Kontakt s elipsoidním tvarem v jedné části	57
Obr. 5-6	Působení odstředivých sil	57
Obr. 5-7	Rozložení tl. maziva v jednotlivých bodech kontaktu v závislosti na čase	57
Obr. 5-8	Místo vyhodnocení tloušťky filmu pro konkrétní vzdálenost menisku	59
Obr. 5-9	Závislost tloušťky mazacího filmu pro konkrétní vzdálenost menisku pro různé střední rychlosti	59
Obr. 5-10	Tep. rozdělení pro ocelovou kuličku na kont. se skleněným diskem [26]	60
Obr. 5-11	Postupný nárůst maziva	61
Obr. 5-12	Postupný pokles maziva	61
Obr. 5-13	Závislost průměrné tloušťky mazacího filmu v závislosti na čase	62
Obr. 5-14	Vliv důlku na utváření mazacího filmu v bodovém kontaktu [31]	63
Obr. 5-15	Porovnání teoretického modelu s naměřenými hodnotami vlivu střední rychlosti na centrální tloušťku mazacího filmu	64

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vzorků	34
Tab. 2 Vlastnosti referenčního oleje FVA 2	34
Tab. 3 Mechanické vlastnosti průhledných disků	35
Tab. 4 Velikosti Hertz. tlaku a kontakt. zatížení pro různé režimy (větší vzorky, statický kontakt)	37
Tab. 5 Velikosti Hertz. tlaku a kont. zatížení pro různé režimy (menší vzorky, statický kontakt)	38
Tab. 6 Velikosti Hertz. tlaku a kont. zatížení pro různé režimy (menší vzorky, dynamický kont.)	40
Tab. 7 Centrální tloušťky filmu pro jednotlivé režimy zatížení a různé střední rychlosti	40
Tab. 8 Centrální tloušťka filmu při středním zatížení pro různé experimenty a různé střední rychlosti	44
Tab. 9 Teplotní vlastnosti materiálu [26]	60