



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VLIV GEOMETRIE TEXTUR NA TŘENÍ A UTVÁŘENÍ
MAZACÍHO FILMU V RADIÁLNÍM KLUZNÉM LOŽISKU**

THE EFFECT OF TEXTURE GEOMETRY ON FRICTION AND LUBRICATING FILM FORMATION IN RADIAL
JOURNAL BEARING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Katrincová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Ústav: | Ústav konstruování |
| Studentka: | Bc. Tereza Katrincová |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Konstrukční inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Petr Šperka, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2020/21 |

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:

Vliv geometrie textur na tření a utváření mazacího filmu v radiálním kluzném ložisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kluzná ložiska představují uložení, které umožňuje provoz za vysokých rychlostí při nízké hodnotě tření a teoreticky až neomezené životnosti. Texturování povrchů ložisek je progresivní technologie, která umožňuje navýšení únosnosti mazacího filmu. Pro správnou funkci je nezbytná optimalizace parametrů textury a testování. Běžné testování se provádí bez možnosti opticky pozorovat procesy v ložisku. To brání lepší optimalizaci funkce textury. V rámci předchozí práce vzniklo zařízení, které umožňuje tento vhléd a tedy lepší pochopení funkce za daných podmínek.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit jak parametry textury ovlivňují tření a utváření mazacího filmu v radiálním kluzném ložisku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled v oblasti texturovaných povrchů,
- navrhnout experiment a texturované vzorky,
- realizovat měření tření a tloušťky mazací vrstvy pomocí fluorescence,
- vyhodnotit, interpretovat a publikovat výsledky.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

GALDA, L., J. SEP, A. OLSZEWSKI a T. ZOCHOWSKI. Experimental investigation into surface texture effect on journal bearings performance. *Tribology International*. 2019, 136, 372-384.

GACHOT, C., A. ROSENKRANZ, S.M. HSU a H.L. COSTA. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*. 2017, 372-373, 21-41.

TALA-IGHIL, N., M. FILLON a P. MASPEYROT. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. *Tribology International*. 2011, 44(3), 211-219.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je zjistit, jak geometrické parametry kruhových textur ovlivňují tření a mazání v kontaktu. Byla zkoumána konfigurace parciálního, radiálního, hydrodynamického ložiska s modifikací block-on-ring zařízení, kde byl nahrazen block za safírovou úseč. Zařízení umožňuje současné měření tření a pozorování dějů v kontaktu. Pro měření byla využita metoda optické fluorescence. Žádná ze studovaných kombinací textur neměla pozitivní vliv na přechod z hydrodynamického režimu do smíšeného režimu mazání. Pozitivní vliv mají textury v úzkém pásmu kombinace průměru a hloubky, mimo něj je vliv textur negativní.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kluzná ložiska, texturování povrchu, fluorescenční mikroskopie, tření a tloušťka mazacího filmu

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to find out how the geometric parameters of circular textures affect the friction and lubrication in a conformal contact. The configuration of a partial, radial, hydrodynamic bearing was investigated on a modified block on-ring device, where the block was replaced by a sapphire section. The device allows simultaneous measurement of friction and optical observation of processes in contact. The light induced fluorescence method was used for the measurement of film thickness. None of the studied texture combinations had a positive effect on the transition from hydrodynamic mode to mixed lubrication mode. Textures in the narrow band of the combination of diameter and depth have a positive effect, outside of them negative effect of texture on friction and film thickness was observed.

KEYWORDS

Journal bearings, surface texturing, fluorescence microscopy, friction and lubricating film thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KATRINCOVÁ, Tereza. *Vliv geometrie textur na tření a utváření mazacího filmu v radiálním kluzném ložisku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132586>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a za projevenou vstřícnost během řešení práce. Dále děkuji rodině za podporu během celého studia a především příteli za podporu během psaní závěrečné práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 2 | PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 14 |
| 2.1 | Hydrodynamická kluzná ložiska | 14 |
| 2.1.1 | Stribeckova křivka | 15 |
| 2.1.2 | Radiální vůle | 17 |
| 2.2 | Cílená modifikace povrchu | 17 |
| 2.2.1 | Experimentální a teoretické studie | 19 |
| 3 | ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE | 30 |
| 3.1 | Analýza problému | 30 |
| 3.2 | Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše | 30 |
| 3.3 | Cíl práce | 32 |
| 3.4 | Vědecká otázka a hypotéza | 32 |
| 4 | MATERIÁL A METODY | 33 |
| 4.1 | Postup řešení | 33 |
| 4.2 | Experimentální zařízení | 34 |
| 4.3 | Měření tření | 35 |
| 4.4 | Optické měření tloušťky maziva | 36 |
| 4.5 | Příprava měření | 37 |
| 4.6 | Experimentální vzorky | 39 |
| 4.7 | Typy experimentů | 41 |
| 5 | VÝSLEDKY | 43 |
| 5.1 | Opakovatelnost a reprodukovatelnost | 43 |
| 5.2 | Vliv zatížení | 44 |
| 5.3 | Vliv geometrie textur na tření | 44 |
| 5.3.1 | Vliv parametrů textur v HD režimu mazání | 45 |
| 5.3.2 | Vliv parametrů textur ve smíšeném režimu mazání | 48 |
| 5.4 | Vliv geometrie textur na tloušťku filmu | 49 |
| 5.4.1 | Kavitace | 53 |
| 6 | DISKUZE | 54 |

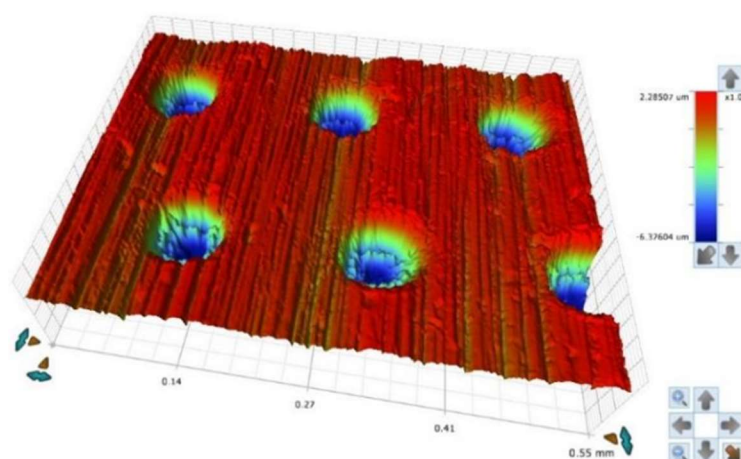
| | | |
|-----------|--|-----------|
| 6.1 | Porovnání tření a tloušťky | 54 |
| 6.2 | Vliv parametrů textur na součinitel tření | 54 |
| 6.3 | Optické pozorování | 57 |
| 6.3.1 | Pozorování kavitace | 57 |
| 6.3.2 | Vyhodnocování tloušťky maziva | 57 |
| 7 | ZÁVĚR | 58 |
| 8 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 59 |
| 9 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN | 61 |
| 10 | SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ | 63 |
| 11 | SEZNAM TABULEK | 66 |

1 ÚVOD

Tribologie je věda zabývající se třením, opotřebením a mazáním za účelem snížení ztrát, zvýšení životnosti nebo snížení hluku. Tření vzniká v různých mechanismech, kde dochází ke vzájemnému pohybu dvou těles. Ve spalovacích motorech jsou jedním z nejdůležitějších komponent kluzná ložiska v aplikaci na klikové hřídeli. Až 40 % celkových ztrát v motoru je způsobeno třením a opotřebením [1]. To silně ovlivňuje spotřebu paliva, což se může projevit na ceně provozu vozidla, a proto je potřeba tření co nejvíce redukovat. Pro dosažení co nejnižšího součinitele tření se používají různé druhy maziv, díky kterým, společně s rychlostí, dochází k oddělení povrchů jednotlivých součástí. Během provozu však může dojít k situaci, kdy se v kontaktu nenachází dostatečné množství maziva a může dojít k meznímu režimu mazání, které je nežádoucí z důvodu vyššího tření a tím i zkrácené životnosti.

Pro zlepšení mazacích podmínek může sloužit i cílená modifikace povrchu. Tou se rozumí vytváření textur (dentů) na třecí povrchy, které mohou být různých tvarů a rozměrů. Textury mohou navyšovat hydrodynamický tlak a tím i zvýšit únosnost ložisek. Mimo jiné mohou sloužit jako zásobník maziva, nebo mohou postupně v průběhu chodu stroje zachycovat částice opotřebení. Nejvýznamnějšími parametry ovlivňující samotnou funkci textur na chod kluzných ložisek jsou průměr a hloubka dentů.

V této diplomové práci je zkoumán právě vliv změny parametrů textur na tření a tloušťku maziva v kontaktu. Měření bude probíhat na tribometru block-on-ring s přímým vhladem do kontaktu, díky kterému je možné opticky pozorovat mazací film současně s monitorováním tření. Základní metodologie byla zpracována v předešlé diplomové práci [2], na kterou tato práce navazuje.

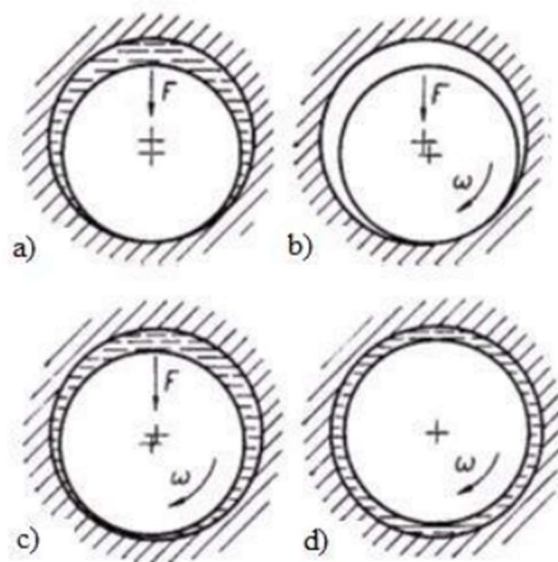


Obr. 1-1 Detail textury [2]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

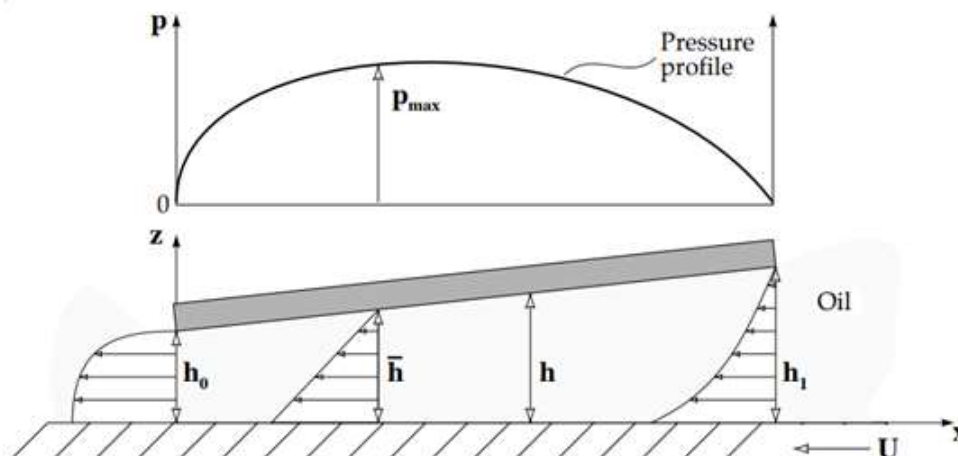
2.1 Hydrodynamická kluzná ložiska

Kluzná ložiska se používají k uložení hřídele a přenášení radiálních zatížení s minimální ztrátou výkonu a minimálním opotřebením. Princip hydrodynamického (HD) mazání je znázorněn na Obr. 2-1. Můžeme pozorovat, že ložiskový čep nezaujímá vystředěnou polohu vůči pouzdru. Tento posuv se nazývá excentricita, která je ovlivňována zatížením ložiska. Při postupném zvyšování otáček ložiskového čepu narůstá hydrodynamický tlak. Ve smíšeném režimu mazání je normálové zatížení v rovnováze s HD tlakem a kontaktním tlakem mezi nerovnostmi jednotlivých povrchů. Jakmile je dosaženo dostatečných otáček, dochází k tvorbě klínové mezery a nárůstu HD tlaku a tím i k plnému oddělení kluzných ploch, jak lze vidět na Obr. 2-1 c) [3, 4].



Obr. 2-1 Poloha čepu v ložisku a) $\omega=0$, b) ω je velmi malé (mezní mazání), c) HD mazání, d) $\omega=\infty$ [3]

Princip vytváření HD tlaku mezi pohybujícími se nerovnoběžnými povrchy je znázorněno na Obr. 2-2. Spodní povrch se pohybuje určitou rychlostí. Horní povrch je statický a je nakloněn o určitý úhel vůči spodnímu povrchu. Při pohybu spodního povrchu je mazivo vtahováno do sbíhajícího se klínu, čímž je generováno tlakové pole. Z důvodu zachování rovnice kontinuity musí být zachována plocha rychlostního profilu maziva (tok). Na začátku mezery (vpravo) je tudíž vstupní rychlost maziva omezena zvyšujícím se tlakem. Na výstupu naopak tlak klesá a výstupní rychlost maziva se zvýší [4]. V případě HD radiálních kluzných ložisek je princip obdobný, kdy linearizovaná spára má konvergentně divergentní charakter.



Obr. 2-2 Princip hydrodynamického tlaku [4]

2.1.1 Stribeckova křivka

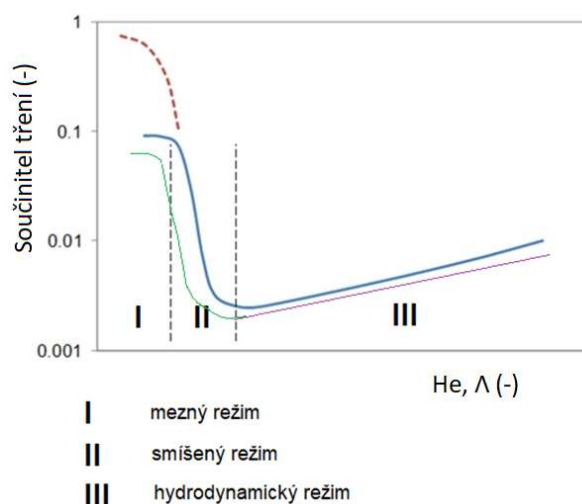
Součinitel tření kluzného ložiska je závislý na provozních podmínkách, jak lze vidět na Obr. 2-3, kde je znázorněna Stribeckova křivka. Svislá osa představuje součinitel tření a vodorovná osa Herseyho číslo, které je vyjádřeno vztahem (1).

$$He = \frac{\eta \cdot n}{p} \quad (1)$$

Kde:

| | | |
|--------|---------------------|---------------------|
| η | [Pa·s] | dynamická viskozita |
| n | [rpm] | otáčky |
| p | [N/m ²] | tlak |

Stribeckovu křivku lze vykreslit i na základě parametru mazání Λ , který vyjadřuje poměr mezi minimální tloušťkou mazací vrstvy a redukované drsnosti povrchu. Když je drsnost povrchu porovnatelná právě s tloušťkou mazací vrstvy, tak je možné na základě tohoto parametru posuzovat přechod do smíšeného režimu mazání. Rozhraní mezi oblastí II a oblastí III odpovídá hodnotě parametru mazání $\Lambda=3$. Při přechodu ze smíšeného do plně kapalinového (hydrodynamického) režimu je hodnota součinitele tření na minimum a dochází k plnému oddělení jednotlivých povrchů mazivem. Minimální hodnota součinitele tření se pohybuje řádově kolem hodnoty 0,001. Postupně se zvyšujícím se Herseyovým číslem, resp. parametrem mazání, součinitel tření znovu (lineárně) narůstá. Nárůst součinitele tření již v plně kapalinovém režimu mazání je z důvodu třecí síly, která je způsobena viskozitou maziva, a je úměrná smykové rychlosti mazacího filmu [5].



Obr. 2-3 Stribeckova křivka [6]

Trend křivky v III. oblasti směřuje do počátku, přičemž po určité době, z důvodu drsnosti povrchu, dojde k přechodu do smíšeného režimu. V případě posunutí oblasti II směrem doleva se tento přechod oddálí a dojde tak ke snížení minimální hodnoty součinitele tření (viz. zelená křivka). Toho může být docíleno pomocí zvýšení únosnosti. Další možnost, jak snížit tření se nachází přímo v oblasti III. Tato oblast je popisována Newtonovým zákonem (2) [4]. Při zvýšení tloušťky maziva dojde ke snížení smykového napětí a tím i ke snížení součinitele tření, jak je znázorněno fialovou křivkou.

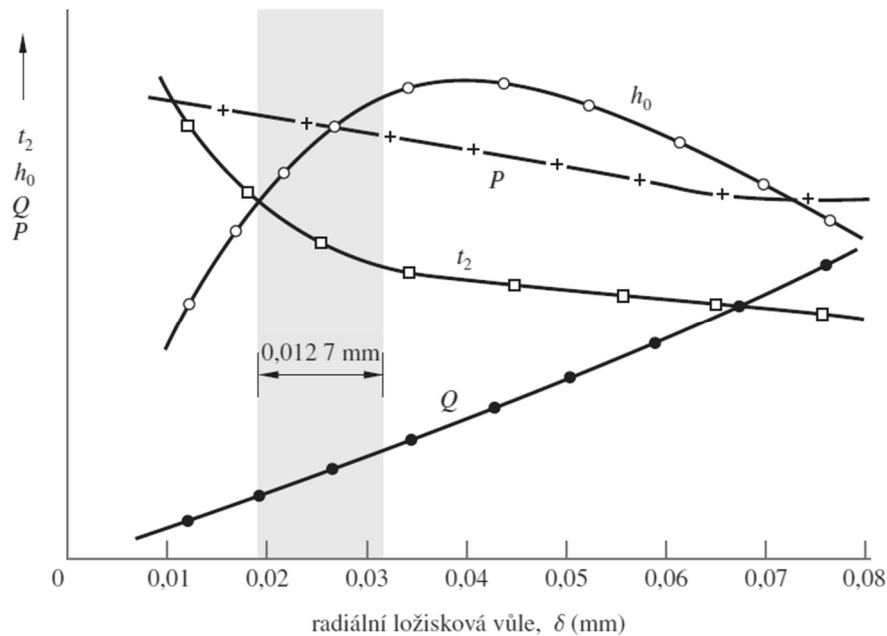
$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta u}{h} \quad (2)$$

Kde:

| | | |
|------------|----------------------|---------------------|
| τ | [Pa] | smykové napětí |
| η | [Pa·s] | dynamická viskozita |
| Δu | [m·s ⁻¹] | relativní rychlost |
| h | [mm] | tloušťka filmu |

2.1.2 Radiální vůle

Jedním z nejdůležitějších parametrů a zároveň nejobtížnějších parametrů na kontrolu je radiální vůle, jelikož se během chodu ložiska může důsledkem opotřebení zvýšit. Na Obr. 2-4 je znázorněn vliv radiální mezery na parametry radiálního kluzného ložiska. V případě příliš malé radiální vůle dochází k navýšení teploty. Důsledkem toho dochází ke snížení minimální tloušťky filmu a může dojít k výraznějšímu opotřebení a případně i k zadření. Velká vůle umožní větší tok maziva a částice opotřebení mohou procházet kontaktem bez zadírání. To má za následek snížení teploty a prodlužuje se tak životnost ložiska. Pokud je však radiální vůle příliš velká, ložisko se stane hlučným a minimální tloušťka filmu začne opět klesat [7].

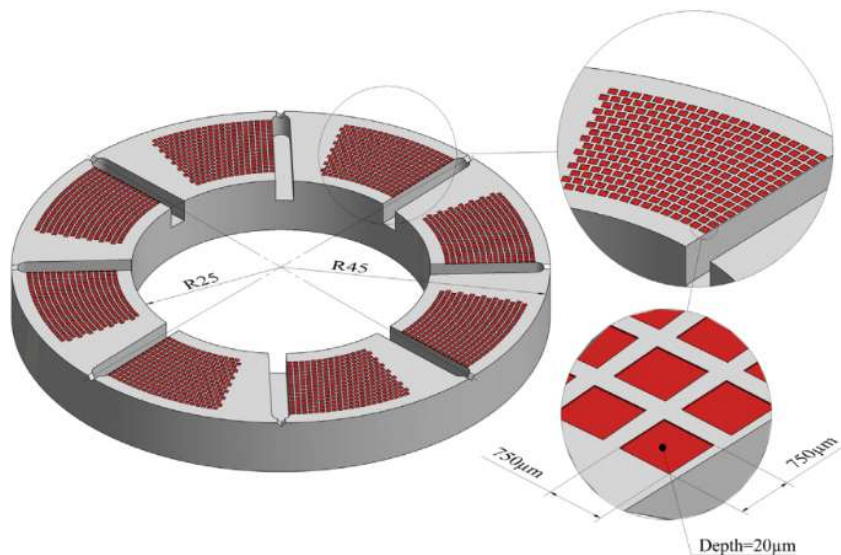


Obr. 2-4 Vliv radiální vůle na parametry ložiska [8]

Zvýrazněné pásmo na Obr. 2-4 znázorňuje nejvhodnější volbu radiální vůle s ohledem na výrobní toleranci a budoucí opotřebení ložiska. Budoucí opotřebení posune provozní bod mírně doprava a tím se zajistí zvětšení minimální tloušťky maziva a snížení teploty [7].

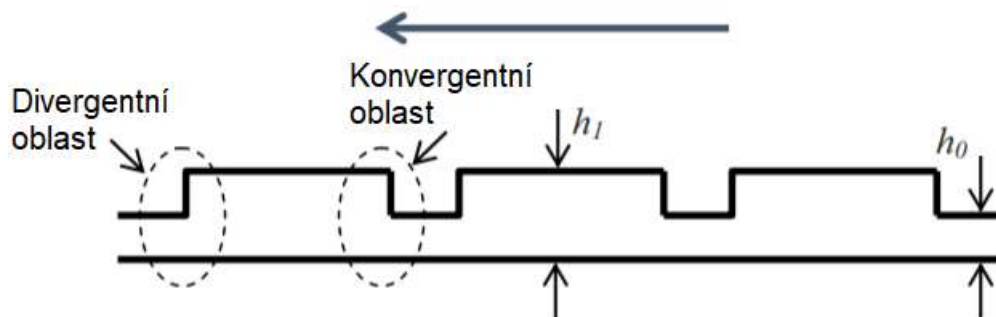
2.2 Cílená modifikace povrchu

Pojem cílená modifikace povrchu představuje vytváření textur (dentů) na třecí povrchy za účelem zlepšení výkonu ložiska. Tyto textury se mohou vyskytovat v různých tvarech, avšak vždy s přesně definovanou geometrií. Na Obr. 2-5 lze vidět příklad částečně texturovaného povrchu axiálního ložiska.



Obr. 2-5 Částečně texturované axiální ložisko [9]

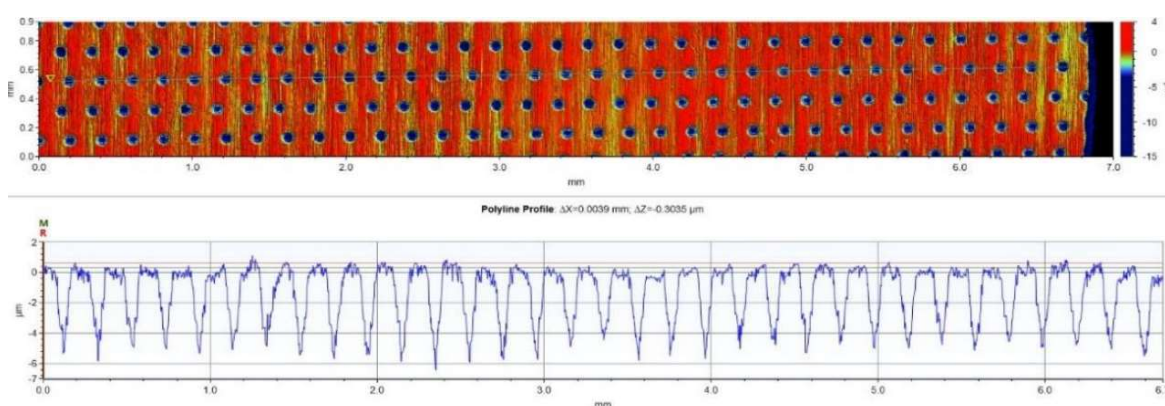
Jedním z hlavních problémů u volby textur je závislost optimálních parametrů textur na typu kontaktu a na provozních podmínkách. Textury musí být navrženy pro konkrétní aplikace a dané provozní podmínky. V ideálním případě by mělo mít texturování povrchu pozitivní vliv na výkon ložiska z hlediska únosnosti, minimální tloušťky filmu, tření a opotřebení. Vliv textur obecně silně ovlivňují jejich samotné parametry a v některých případech nevhodně stanovených parametrů mohou mít textury i negativní vliv [9]. Jednotlivé mikro textury lze považovat za konvergující klíny na mikro úrovni a ve větším množství mohou působit jako sada mikro ložisek, viz Obr. 2-6, kde lze vidět konvergentní a divergentní oblast. V konvergentní oblasti se tlak zvyšuje, v divergentní oblasti dochází k jeho snížení. Pozitivního nárůstu tlaku je možné dosáhnout právě díky přítomnosti textury a to tehdy, pokud v divergentní části dojde k omezenému poklesu tlaku, což je způsobeno díky kavitaci. V konvergentní části potom dochází k nárůstu tlaku, který je větší než pokles tlaku v té divergentní části, která je omezena kavitací a celkově dochází tedy k pozitivnímu nárůstu tlaku [10]. Další kapitola je zaměřena na rozbor experimentálních a teoretických studií, které se danou problematikou zabývaly.



Obr. 2-6 Texturovaný povrch s mikro ložisky [10]

2.2.1 Experimentální a teoretické studie

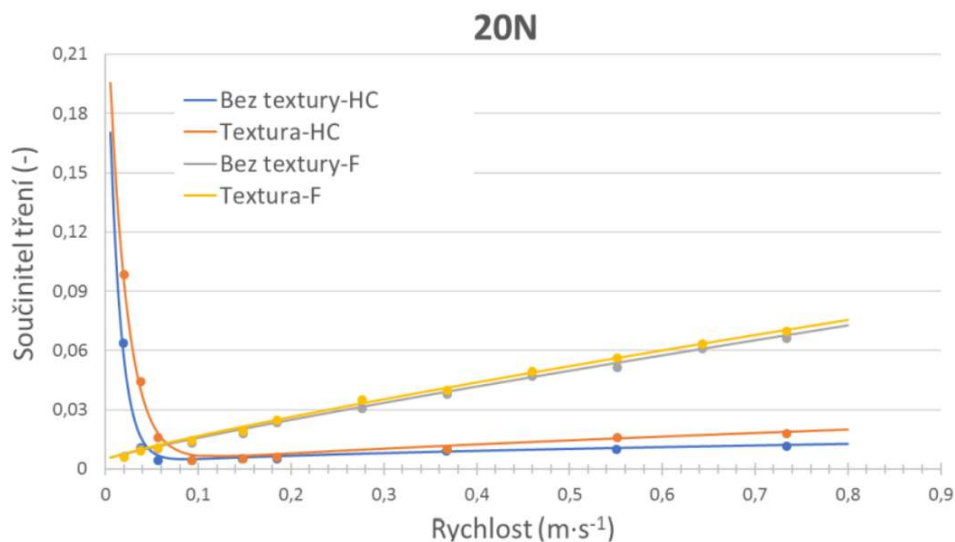
Autor předchozí diplomové práce [2] zkoumal, jaké účinky má modifikace povrchu na součinitel tření a tloušťku mazací vrstvy. Experimenty probíhaly v konfiguraci blok-on-ring, kde byl blok nahrazen safírovou úsečí a bylo tak formováno radiální parciální kluzné ložisko. Díky úseči je umožněno přímého vhledu do kontaktu. Jako ložiskový čep byl použit vnější kroužek ložiska o průměru 35 mm a šířce 8 mm, na kterém se nacházely kruhové vtisky o průměru 56 μm a hloubce 4-6 μm . Na Obr. 2-7 lze vidět rozmístění vtisků na vzorku. Safírová úseč má poloměr 17,75 mm a úhel úseče činí 85°. Jako mazivo byly použity oleje s nízkou dynamickou viskozitou (53,4 mPa·s a 78 mPa·s) a naopak s dynamickou viskozitou vysokou (416 mPa·s a 470 mPa·s). Experimenty probíhaly při konstantním zatížení 20-80 N (0,14-0,55 MPa) a při narůstající rychlosti otáčení 10-400 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 2-7 Rozmístění vtisků na povrchu vzorků [2]

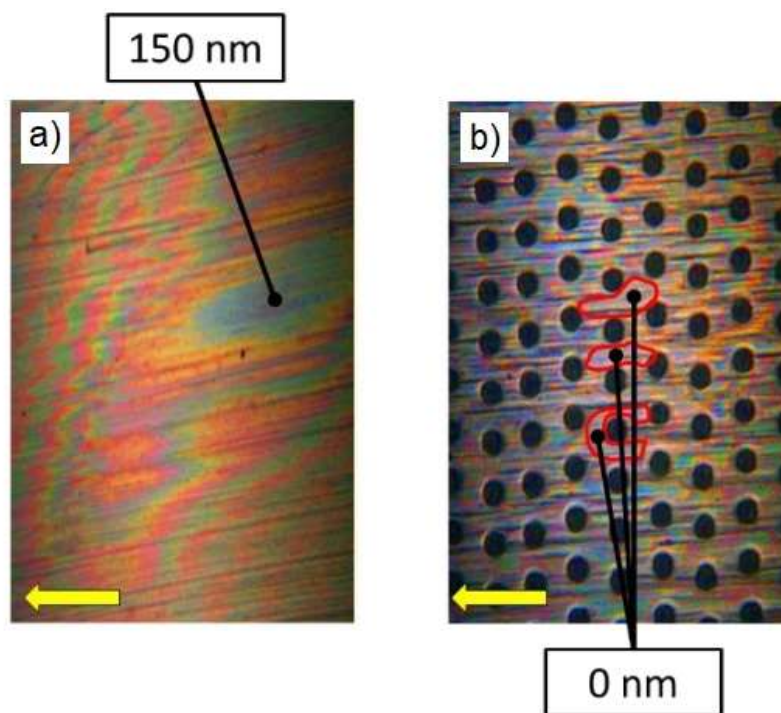
Na Obr. 2-8 lze vidět závislost součinitele tření na rychlosti otáčení při zatížení 20 N za přítomnosti dvou druhů maziv, a to minerálního oleje HC (53,4 mPa·s) a fluorovaného maziva F (416 mPa·s). U maziva HC u hladkého vzorku došlo k přechodu do HD režimu mazání přibližně při rychlosti 0,05 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. U texturovaného vzorku se přechod posunul na rychlost 0,08 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ve smíšeném režimu se projevilo vyšší tření až o 58 %. Po přechodu do HD režimu se krátce hodnoty součinitele tření vyrovnaly, ale při zvyšující se rychlosti měly texturované vzorky opět negativní vliv. Při požití fluorovaného maziva F se hodnoty součinitele tření téměř shodovaly. Při vyšších rychlostech se projevil negativní vliv textur, a to celkově asi o 5 %. U vyšších hodnot zatížení bylo chování texturovaných vzorků obdobné.

Bylo zjištěno (za použití maziva HC), že při navyšování zatížení se negativní vliv textur na součinitel tření postupně snižuje. Při nejnižším zatížení dosahovaly textury nárůstu součinitele tření až o 60 % a naopak při nevyšším zatížení byla změna součinitele tření maximálně 8 %. Při využití fluorovaného maziva F s vyšší viskozitou byly relativní změny menší a trend byl opačný, tudíž při navyšování zatížení se negativní vliv textur na součinitel tření postupně zvyšoval.



Obr. 2-8 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení [2]

Tloušťka mazacího filmu byla vyhodnocována na základě optické interferometrie. Jako mazivo bylo použito fluorované mazivo F při teplotě 56 °C (viskozita 78 mPa·s). Rychlost otáčení byla postupně navyšována od 10 ot·min⁻¹ do 60 ot·min⁻¹. Na Obr. 2-9 je zobrazen interferogram hladkého vzorku (a) a texturovaného vzorku (b). Při rychlosti 0,018 m·s⁻¹ byla hodnota tloušťky maziva u hladkého vzorku přibližně 150 nm. V případě texturovaného vzorku se místy objevila oblast, kde tloušťka maziva dosahovala nulových hodnot. Při zvyšující se rychlosti narůstala i hodnota tloušťky maziva, avšak vždy u texturovaného povrchu byla hodnota nižší, což se projevilo negativně na hodnotě tření.



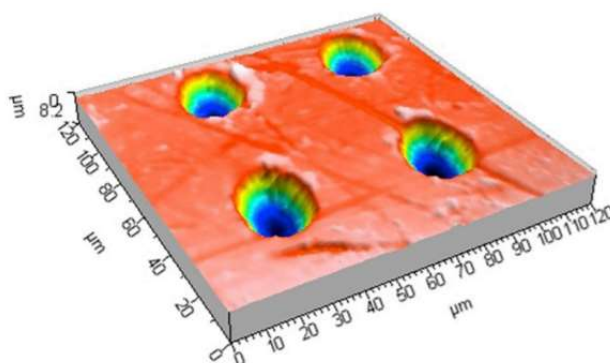
Obr. 2-9 Experimentální tloušťka mazacího filmu při zatížení 40 N, viskozitě 78 mPa·s a rychlosti 0,018 m·s⁻¹ a) hladký vzorek, b) texturovaný vzorek [2]

Dále byla měřena tloušťka maziva v HD režimu mazání s viskozitou maziva 416 mPa·s. Zatížení činilo 50 N a rychlost otáčení se zvyšovala od 0,018 m·s⁻¹ do 0,11 m·s⁻¹, avšak pozorování proběhlo pouze pro rychlosti 0,018 a 0,037 m·s⁻¹ z důvodu nemožnosti vyhodnocení interferogramů. Hodnoty tloušťky mazací vrstvy dosahovaly v případě hladkého vzorku až 490 nm a v případě texturovaného vzorku až 450 nm. Díky takto vysoké tloušťce mazací vrstvy neměly textury výrazný negativní vliv na součinitel tření.

Ve studii [11] se **FIASCHI** zabýval účinkem texturování povrchu na součinitel tření. Experiment probíhal v konfiguraci pin-on-disk, přičemž textury se nacházely na čelní ploše válcového pinu o průměru 17 mm. Použitý materiál pro pin i disk byla ocel 100Cr6. Jako mazivo byl použit plně formulovaný syntetický motorový olej (Shell Helix 5W-40). Modifikovaný povrch obsahoval kruhové denty průměru od 10 μm do 13 μm a hloubky od 4 μm do 6,5 μm uspořádané do čtvercové mřížky. Denty byly vyrobeny prostřednictvím laseru. Byly testovány tři hustoty zaplnění textur, a to 2 %, 5 % a 10 %. Vzorky byly rozděleny do skupin podle průměru, hloubky a hustoty zaplnění, viz Tab. 2-1. Experimenty byly provedeny za pokojové teploty při nominálním zatížení o velikosti 2 N (0,0088 MPa) a kluzné rychlosti 0,005 až 0,4 m/s. Na Obr. 2-10 je znázorněn detail textury jednoho ze vzorků.

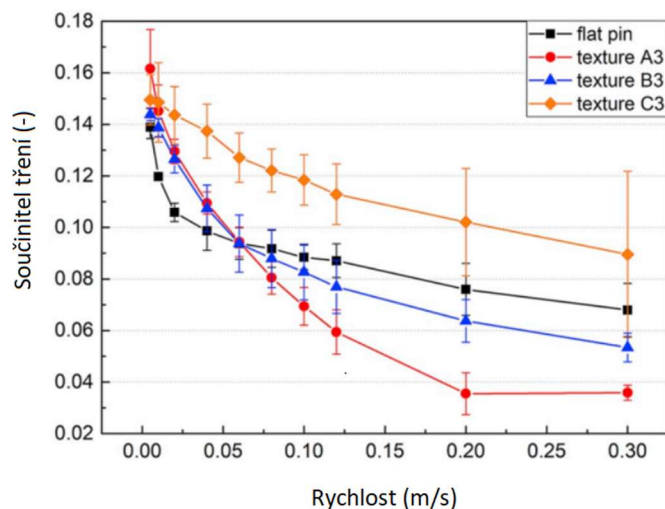
Tab. 2-1 Geometrie vzorků [11]

| | Poloměr μm | Hloubka μm | Hustota textur % |
|----|---------------|---------------|---------------------|
| A1 | 13.6 ± 0.8 | 6.31 ± 0.013 | 2 |
| A2 | 12.8 ± 0.7 | 6.64 ± 0.13 | 5 |
| A3 | 12.2 ± 0.3 | 6.28 ± 0.1 | 10 |
| B1 | 12.7 ± 0.6 | 3.9 ± 0.1 | 2 |
| B2 | 13.2 ± 0.7 | 3.63 ± 0.15 | 5 |
| B3 | 10.3 ± 0.9 | 2.58 ± 0.05 | 10 |
| C1 | 11.7 ± 0.8 | 4.69 ± 0.09 | 2 |
| C3 | 11.8 ± 0.7 | 6.9 ± 0.7 | 10 |



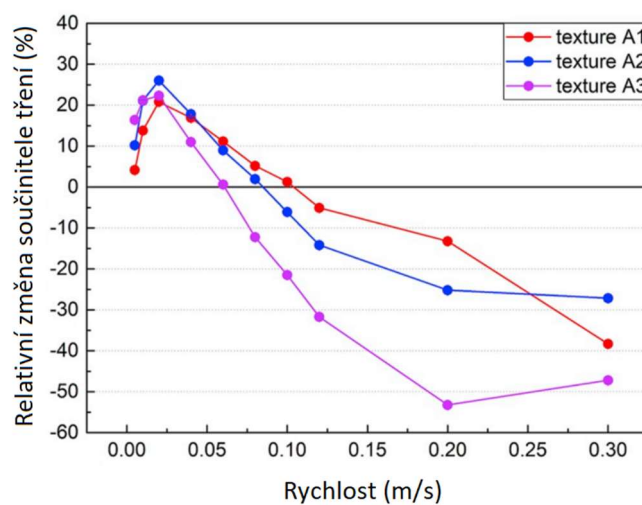
Obr. 2-10 Detail textury vzorku A3 [11]

Z výsledků je patrné, že geometrie textur má velký vliv na součinitel tření. Ukázalo se, že nejdůležitějším parametrem ovlivňující součinitel tření je poloměr a hloubka dentu. Na Obr. 2-11 je znázorněna závislost součinitele tření na rychlosti.



Obr. 2-11 Součinitel tření v závislosti na rychlosti [11]

Z grafu je patrné, že u skupiny C došlo k nárůstu tření oproti hladkému vzorku. Autoři uvádí, že příčinou může být menší poloměr dentů. U ostatních skupin můžeme pozorovat již pozitivní vliv textur na součinitel tření. Čím větší poloměr dentu, popřípadě hloubka, tím byl naměřen menší součinitel tření. Autoři studie se proto zaměřili na textury skupiny A, s poloměrem cca 13 μm a hloubkou 6,5 μm , pro které vyšel součinitel tření nejmenší. Na Obr. 2-12 je znázorněna změna součinitele tření texturovaných vzorků skupiny A vzhledem k hladkému vzorku v závislosti na rychlosti. Ve smíšeném režimu mazání součinitel tření poklesl o 35 % v případě vzorku A1 a o 50 % v případě vzorku A3. V případě mezního režimu mazání měly textury negativní vliv. Největší pozitivní vliv na pokles součinitele tření má tedy vzorek s největší hustotou zaplnění, která činí 10 %.



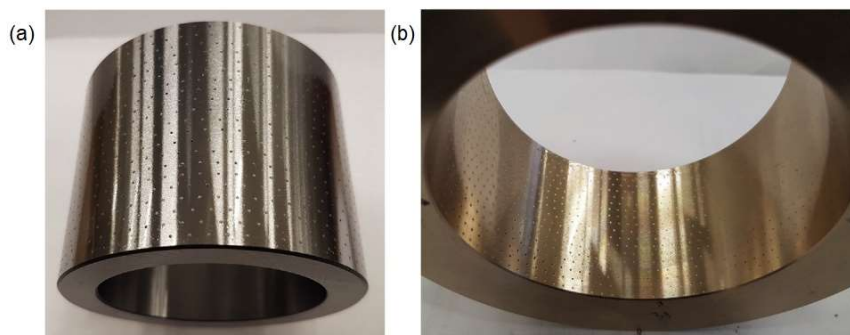
Obr. 2-12 Pokles součinitele tření v závislosti na rychlosti [11]

Podobným tématem se zabývala i **L. Galda** [12], která experimentálně zkoumala, jak texturovaná kluzná ložiska ovlivňují tribologické parametry, jako je třecí moment nebo součinitel tření. Textury byly vytvořené jednak na ložiskovém pouzdře, ale i na ložiskovém čepu. Výsledky byly následně porovnány s hladkým vzorkem.

Byly provedeny dva typy testů:

- První typ testu probíhal za konstantního zatížení 6 kN (1,68 MPa) s postupně klesající rychlostí otáčení ze 150 ot/m na 0 ot·min⁻¹. Teplota na začátku každého testu byla 35 °C. Tento typ testů byl prováděn za účelem určení bodu, kde se přechází z hydrodynamického režimu mazání do smíšeného režimu.
- Druhý typ testu byl prováděn za konstantní rychlosti 100 ot·min⁻¹ a poté 500 ot·min⁻¹. Velikost zatížení byla změněna každých 10 minut, a to ve třech krocích na 1,5 kN (0,42 MPa), 3 kN (0,84 MPa) a 4,5 kN (1,26 MPa). Teplota na začátku každého testu se pohybovala na 50 °C. Druhý způsob testování zvolen pro zkoumání chování kontaktu při delší době běhu.

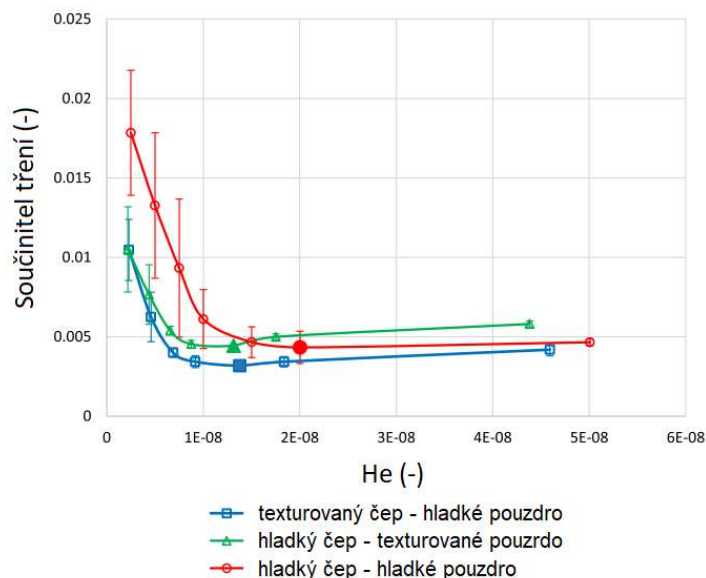
Hřídel (ložiskový čep) byl vyroben z běžně používané tvrzené oceli 42CrMo4 o průměru 80 mm, pouzdro bylo vyrobeno z bronzu CuSn10P a jeho průměr byl 80,1 mm. Radiální vůle tedy činí 0,1 mm. Vytvořené textury byly kruhového tvaru, přičemž parametry textur byly autory zvoleny na základě poznatků z předchozích studií. Průměr dentů na ložiskovém čepu činil 0,7 mm; na pouzdře ložiska poté 0,75 mm. Hloubka byla zvolena na ložiskovém čepu 58 μm. V případě ložiskového pouzdra hloubka dentů byla mírně menší, a to 53 μm. Hustota pokrytí textur činila 5,5 % pro čep a 6,3 % pro pouzdro. Texturovaný povrch ložiskového čepu a pouzdra je znázorněn na Obr. 2-13.



Obr. 2-13 (a) texturovaný povrch čepu, (b) texturovaný povrch pouzdra [12]

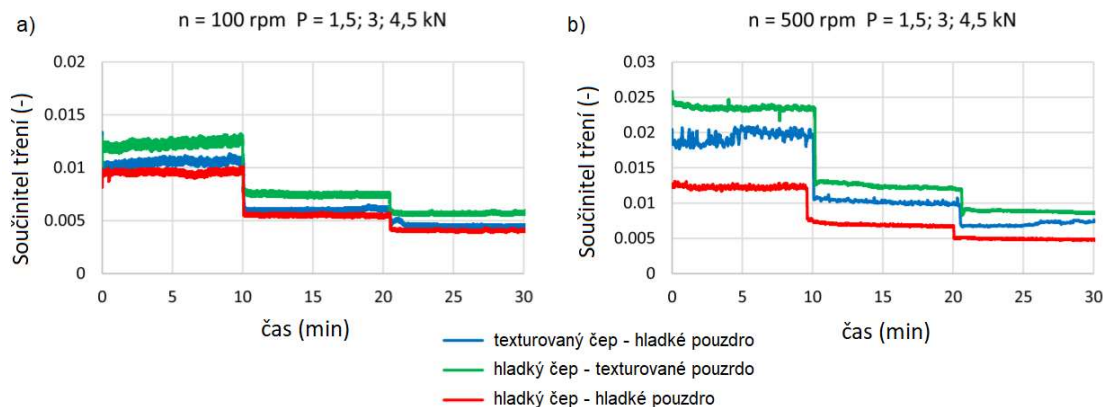
Pro zjištění efektu textur byla během prvního typu testu vykreslena Striebeckova křivka, viz Obr. 2-14. Z porovnání Striebeckových křivek je zřejmé, že v oblasti nízkých hodnot Herseyova čísla měly textury v obou případech pozitivní vliv. Při nízkých otáčkách byl součinitel tření snížen o více než 40 % v případě texturovaného pouzdra a o více než 57 % v případě texturovaného ložiskového čepu. Nejnížší hodnota součinitele tření byla nalezena v přechodu ze smíšeného do hydrodynamického režimu mazání. Pro hladké ložisko je hodnota minimálního součinitele tření podobná jako u vzorku s texturovaným

pouzdrům, avšak při vyšší hodnotě Herseyova čísla. Z toho lze usoudit, že kluzné ložisko bez modifikace povrchu přechází z HD režimu do smíšeného režimu mazání při vyšších otáčkách. Texturované vzorky vykazují nižší hodnoty součinitele tření v oblasti smíšeného režimu mazání. Se zvyšujícím se Herseyovým číslem při přechodu do HD režimu má součinitel tření u texturovaných vzorků tendenci se zvyšovat. V případě texturovaného pouzdra dojde ke zvýšení součinitele tření natolik, že vykazuje vyšší hodnotu oproti hladkému vzorku.



Obr. 2-14 Součinitel tření v závislosti na Herseyho čísle [12]

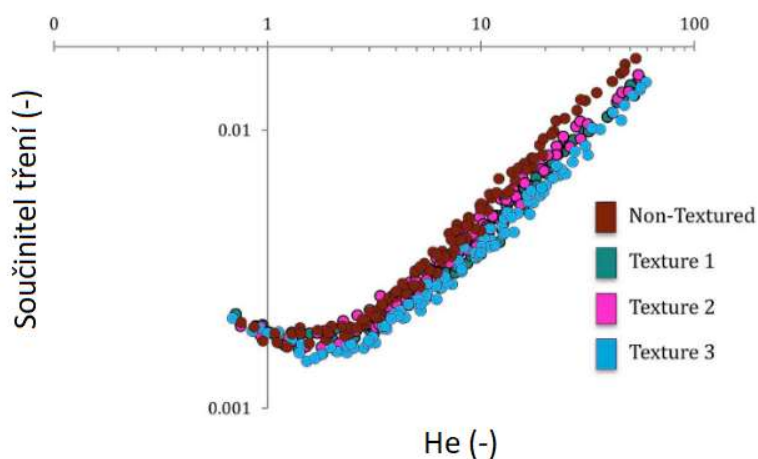
Při druhém typu testu byla kluzná ložiska bez modifikace povrchu charakterizována menším součinitelem tření než ložiska s texturovaným povrchem. Jak lze pozorovat na Obr. 2-15, při konstantní rychlosti 100 ot·min⁻¹ se součinitel tření hladkého ložiska a ložiska s texturovaným čepem příliš neliší. Významnější rozdíl byl v případě porovnání hladkého ložiska a ložiska s texturovaným pouzdrům, kde texturované ložisko vůči hladkému vykazovalo až o 41 % vyšší součinitel tření. Při rychlosti 500 ot·min⁻¹ se rozdíl součinitele tření zvýšil až na 74 %.



Obr. 2-15 Součinitel tření v závislosti na čase pro a) $n=100$ rpm, b) $n=500$ rpm [12]

S.-C. Vladescu [13] se zabýval experimentálním ověřením vlivu texturovaného povrchu ojnicích kluzných ložisek na součinitel tření. Pro tuto studii bylo použito komerční kluzné ložisko z motoru V6. Průměr ložiska je 59,5 mm, délka 17,8 mm a radiální vůle činí 29 μm .

Testy probíhaly při rychlosti otáčení od 750 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ po 4000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ v krocích po 250 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Zatížení se pohybovalo mezi 1 kN (1 MPa) a 8 kN (7,5 MPa). V průběhu testů se teplota oleje pohybovala mezi 60 a 120 $^{\circ}\text{C}$. Dynamická viskozita maziva při 60 $^{\circ}\text{C}$ činila 30,49 $\text{mPa}\cdot\text{s}$. Textury byly vytvořeny pomocí laserové technologie o průměru 70 μm a hloubce 20 μm , přičemž byly aplikovány na ložisková pouzdra ve třech různých konfiguracích. Textura 3 obsahuje denty aplikované po celém obvodu ložiskového pouzdra, zatímco textury 1 a 2 obsahují denty aplikované pouze na určité části obvodu (převážně mimo zátěžnou oblast) s různými hustotami zaplnění. Hustota textur 1 a 3 je stejná, a to 25 %. Hustota textury 2 činí 46,7 %. Výsledky byly porovnány s kluzným ložiskem bez modifikace povrchu. Obr. 2-16 znázorňuje Stribeckovu křivku pro všechny zkušební vzorky použité v této studii.



Obr. 2-16 Součinitel tření v závislosti na Herseyově čísle pro všechny použité vzorky [13]

Výsledky experimentů ukazují, že došlo ke snížení součinitele tření v průměru o 18 % u textur aplikovaných po celém obvodu ložiska (textura 3). Autoři uvádí, že jednou z příčin může být díky tomu, že se textury nacházely v oblasti vysokého tlaku. V případě textur 1 a 2, kde se denty nacházely na určitých částech obvodu ložiska, došlo taktéž k redukci tření, a to v průměru přibližně o 6 % a 13 %, v závislosti na hustotě zaplnění textur.

Ve všech konfiguracích textur došlo ke snížení tření i v plně hydrodynamickém režimu mazání. Tato skutečnost je výhodná, jelikož v HD režimu mazání fungují tyto ložiska v praxi. Ve smíšeném režimu mazání nebyly zaznamenány žádné negativní účinky textur. Lze tedy konstatovat, že vhodný výběr textury může být vhodnou volbou pro snížení součinitele tření a může mít pozitivní vliv na únosnost kluzného ložiska. Ze studie také

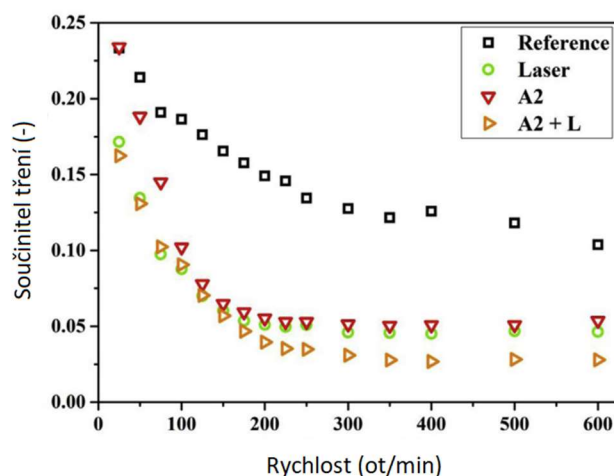
vyplývá, že trendově mají textury s menší hustotou zaplnění lepší výsledky na součinitel tření než textury s hustotou zaplnění větší.

Experimentálním ověřením účinku textur na třecí vlastnosti se zabýval i **P. G. Grützmacher** ve studii [14]. V rámci tohoto experimentu bylo použito radiální kluzné ložisko o průměru 25 mm, přičemž relativní vůle činila 1,4 ‰, což odpovídá radiální vůli 17,5 μm. Textury byly vytvořené válcováním, laserem, nebo kombinací těchto technologií na ocelovou hřídel. Testy probíhaly za konstantního zatížení 1 MPa s postupně snižující se rychlosti z 600 ot·min⁻¹ (0,785 m/s) na 25 ot·min⁻¹ (0,033 m/s). Kinematická viskozita použitého maziva při 40 °C odpovídá 16,8 mm²·s⁻¹.

Tab. 2-2 Parametry textur [14]

| | Průměr μm | Hloubka μm | Hustota textur % |
|----------------------|--------------|---------------|---------------------|
| Laser (L) | 5.8 ± 0.2 | 0.64 ± 0.2 | - |
| Válcování (A1) | 116.9 ± 3.0 | 16.3 ± 0.5 | 2,9 |
| Válcování (A2) | 155.2 ± 5.0 | 35.3 ± 2.1 | 5,7 |
| Laser + Válc. (L+A1) | 124.5 ± 3.5 | 17.1 ± 0.7 | 3,2 |
| Laser + Válc. (L+A2) | 155.8 ± 2.3 | 35.3 ± 1.3 | 6 |

V průběhu testů byl zaznamenáván třecí moment a z něj byl následně vypočítán součinitel tření. Výsledky ukázaly, že všechny texturované vzorky disponují nižší hodnotou součinitele tření oproti hladkému vzorku v celém rozsahu experimentu. Při nejnižších rychlostech dosahoval součinitel tření hodnoty 0,23 (pro vzorek A2) a postupně se zvyšující se rychlostí otáčení docházelo k jeho náhlému poklesu, zatímco v případě hladkého vzorku součinitel tření klesal mírněji, jak lze pozorovat na Obr. 2-17.

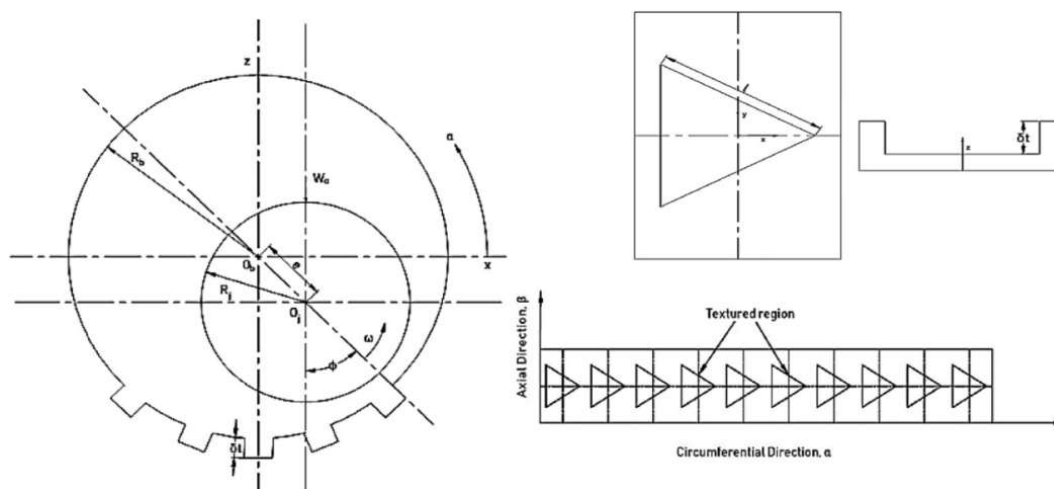


Obr. 2-17 Závislost součinitele tření na otáčkách [14]

Přechod ze smíšeného do hydrodynamického režimu mazání se děje za menších rychlostí otáčení. U rychlostí nad 150 ot·min⁻¹ došlo k ustálení součinitele tření pro texturované

vzorky na hodnotě průměrně 0,05. U vzorek A2+L je tato hodnota menší, a to 0,03. V případě vzorku bez modifikace povrchu se součinitel tření ustálil na hodnotě cca 0,12.

Ve studii [15] se **S. Sharma** zabýval numerickou analýzou částečně texturovaných hydrodynamických ložisek. Pro výpočet uvažoval kluzné ložisko s průměrem čepu 50 mm a radiální vůlí 50 μm . Textury měly tvar trojúhelníku a byly umístěné v oblasti nárůstu tlaku na ložiskovém pouzdře (viz Obr. 2-18).



Obr. 2-18 Tvar a umístění textur [15]

Autor zde zjišťoval vliv hloubky a množství textur na součinitel tření a únosnost. Při analýze byla uvažována bezrozměrná hloubka o velikosti 0,5 – 2 (s odstupem 0,5). Studie byla provedena při nízkých a průměrných poměrech excentricity, a to 0,2; 0,4 a 0,6. Pro výpočet byla použita Reynoldsova rovnice s použitím metody konečných prvků.

Výsledky ukázaly, že při excentricitě 0,2 mají na součinitel tření pozitivní vliv všechny texturované vzorky. Při zvýšení excentricity je trend opačný a textury mají naopak vliv negativní. Co se týče únosnosti, texturované vzorky měly při malé excentricitě vyšší únosnost než hladký vzorek, avšak rozdíl nebyl tak výrazný jako u součinitele tření.

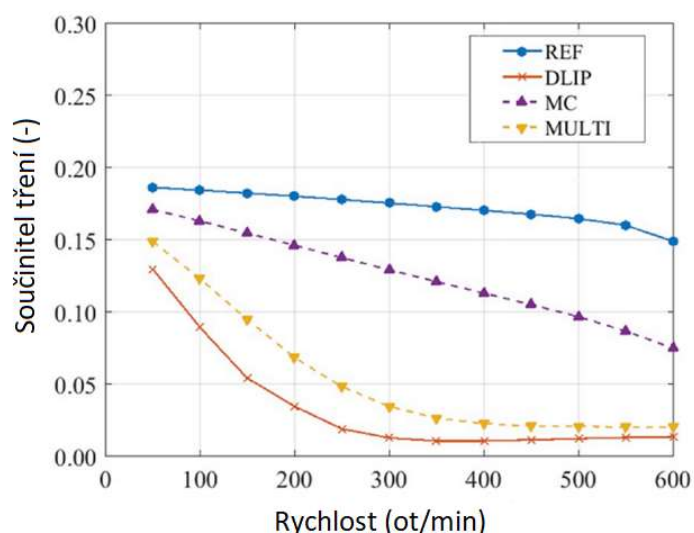
F. König se ve studii [16] zabýval numerickou predikcí vlivu modifikace povrchu na součinitel tření a opotřebení v konfiguraci kluzného ložiska, které má průměr 25 mm a šířku 20 mm. Radiální vůle činí 17,5 μm . Počítalo se s teplotou 40 $^{\circ}\text{C}$ a mazivem o kinematické viskozitě (odpovídající teplotě 40 $^{\circ}\text{C}$) 16,8 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Zatížení bylo konstantní o velikosti 450 N (1 MPa). Interval rychlosti otáčení odpovídal od 50 do 60 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ (0,066-0,785 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Numerický model byl založen na základně rozšířené Reynoldsovy rovnice o faktory toku podle Patira a Chenga a deterministický model drsnosti povrchu kontaktu. Uvažovány byly textury vyrobené laserem, válcováním a kombinací těchto dvou technologií. Parametry textur jsou uvedeny v Tab. 2-3.

Tab. 2-3 Parametry textur [16]

| | Poloměr μm | Hloubka μm | Hustota textur % |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| Laser (DLIP) | 5.8 ± 0.2 | 0.64 ± 0.2 | - |
| Válcování (MC) | 155.2 ± 5.0 | 35.3 ± 2.1 | 5,7 |
| Laser + Válč. (MULTI) | 155.8 ± 2.3 | 35.3 ± 1.3 | 6 |

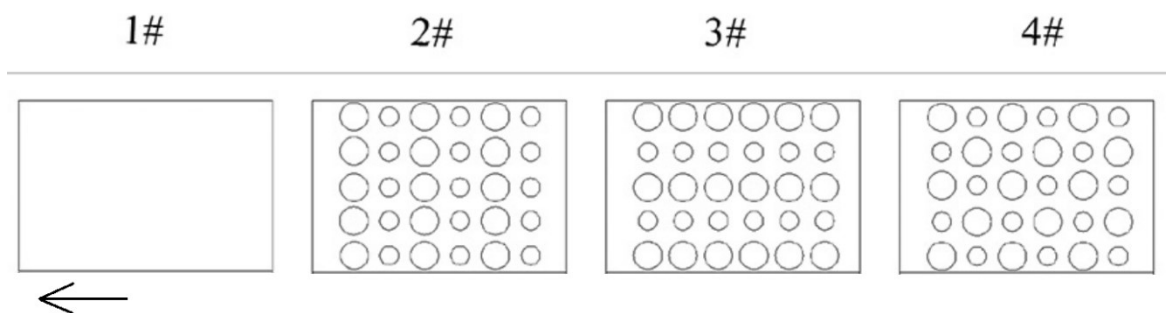
Výsledky ukázaly maximální snížení opotřebení v případě kombinace technologie Laseru a válcování (MULTI), a to o 80 %. V případě vzorku s válcovanými texturami (MC) bylo dosaženo snížení opotřebení o 78 %, u textur vyrobených pomocí technologie laseru došlo k snížení opotřebení o 65 %.

Co se týče součinitele tření, tak všechny vzorky vykazují jeho snížení, viz Obr. 2-19. K přechodu do HD režimu došlo při nižších otáčkách, a to má za následek již zmiňovaný pokles součinitele tření. Nejvyšší redukce součinitele tření dochází u vzorků s texturami vytvořenými pomocí laseru.



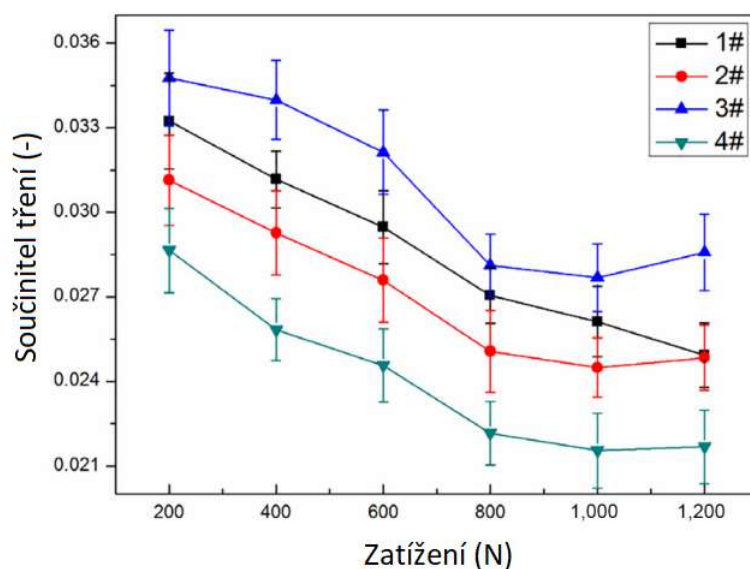
Obr. 2-19 Součinitel tření v závislosti na rychlosti otáčení [16]

Ve studii [17] se **Y. Mao** experimentálně zabývá vlivem modifikace povrchu a uspořádání textur na součinitel tření v konfiguraci kluzného ložiska. Průměr ložiska činí 50 mm. Experiment se prováděl při zatížení 200 N - 1200 N a obvodové rychlosti 200 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Textury se nacházely na pouzdře kluzného ložiska ve třech různých kombinacích. Průměry dentů jsou 60 μm a 125 μm , hloubka činí 25 μm . Jednotlivé středy vtisků jsou od sebe vzdáleny 200 μm . Na Obr. 2-20 jsou znázorněny jednotlivé experimentální vzorky.



Obr. 2-20 Rozložení textur na jednotlivých vzorcích [17]

Z Obr. 2-21 je patrné, že při zvyšování zatížení součinitel tření klesal, ale při zatížení od 1000 N začal narůstat. Důvodem je plastická deformace, která vznikla na povrchu textur. Mazivo bylo z dentů vytlačováno na povrch vzorků, což vedlo k turbulentnímu proudění na povrchu vzorku a způsobovalo tak postupné zvýšení součinitele tření. Největší pozitivní vliv na součinitel tření má vzorek s označením 4#.



Obr. 2-21 Součinitel tření v závislosti na zatížení [17]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Kluzná ložiska představují uložení, které umožňuje provoz za vysokých rychlostí při nízké hodnotě tření a teoreticky až neomezené životnosti. Cílená modifikace povrchů ložisek je progresivní technologie, která umožňuje navýšení únosnosti mazacího filmu, nebo snížení tření. Pro správnou funkci je nezbytná optimalizace parametrů textur, které mají velký vliv na pozorované tribologické vlastnosti (součinitel tření, tloušťka filmu).

Běžně se testování provádí bez možnosti opticky pozorovat procesy v kontaktu kluzného ložiska (např. kavitace), a tak nelze pozorovat děje probíhající přímo v kontaktu. Z tohoto důvodu bude blok nahrazen safírovou úsečí, díky které bude přímý vhled umožněn. Pro experiment je nutné zajištění rovnoměrného zatížení vzorku, a proto je potřeba co nepřesnějšího dolehnutí safírové úseče na vzorek. Toho bude docíleno díky změření geometrie úsečí a následné výrobě vhodných vzorků. Tloušťka maziva bude vyhodnocována na základě jednotlivých snímků intenzity světla. K získání přesných hodnot bude zapotřebí provést kalibrační měření na přesně známé geometrii, aby byla získána závislost tloušťky maziva na intenzitě světla. Jedním z nejdůležitějších problémů bude vhodné zvolení parametrů textur z důvodu obtížné porovnatelnosti jednotlivých studií. Experimenty probíhají za jiných podmínek, jako např. radiální vůle, zatížení, teplota apod. Dále mnoho experimentů probíhá v konfiguracích, které nejsou pro HD kontakty zcela legitimní (konfigurace pin-on-disk).

3.2 Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše

Podstatná část rešerše je věnována cílené modifikaci povrchů. Textury jsou vyráběny především pomocí laseru, ale mohou být vyráběny i jinými technologiemi, např. válcováním, nebo kombinací těchto technologií, jak je uvedeno ve studii [14]. Tématem modifikace povrchu, a jeho vlivem na zkoumané tribologické vlastnosti (především součinitel tření) se zabývá mnoho studií. Většina studií však zkoumá tento vliv v konfiguraci pin-on-disk, jako je tomu ve studii [11], což vede na kontakt flat-to-flat, který ale není reprezentativní pro kluzné ložisko. Funkce texturovaného povrchu vyplynula ze studií, které se touto problematikou zabývaly. Jednou z hlavních funkcí je navýšení HD tlaku v kontaktu a tím i zvýšení únosnosti ložiska díky omezenému poklesu tlaku v divergentní oblasti textury, který je zapříčiněn kavitací. Další významnou funkcí je zvýšení tloušťky mazacího filmu a snížení tření v kontaktu.

Na tyto vlastnosti mají velký vliv geometrické parametry, a to především průměr dentů (v případě že se jedná o textury kruhového tvaru), hloubka a hustota. Velký vliv má také umístění textur, zda se nachází na pouzdře ložiska, nebo na ložiskovém čepu, kde v případě studie [12] měl tento aspekt zásadní vliv na součinitel tření v HD režimu mazání. V případě umístění textur na čepu ložiska došlo ke snížení součinitele tření, avšak v případě umístění textur na ložiskovém pouzdře došlo k negativnímu ovlivnění. V této studii však průměry vtisků byly o dost větší, než v ostatních studiích. Stejně tak byla zde zvolena poměrně velká radiální vůle ve vztahu k průměru ložiska. V Tab. 3-1 jsou porovnané parametry textur a parametry ložiska ze studií [13, 17]. I přestože se parametry textur radikálně neliší, tak došlo k významnému odlišení z hlediska součinitele tření, kdy v případě studie [13] došlo k poklesu v průměru o 18 % a v případě studie [17] byl součinitel tření snížen v průměru asi o 75 %.

Tab. 3-1 Srovnání parametrů textur a ložiska [13, 17]

| | Průměr dentů μm | Hloubka dentů μm | Průměr ložiska mm | Radiální vůle μm |
|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
| Vladescu | 70 | 20 | 59,5 | 29 |
| Y Mao | 60; 125 | 25 | 50 | 12,5 |

Tento odlišný výsledek může být z důvodu jiného aplikovaného zatížení, kdy v případě studie s menším poklesem bylo aplikováno několikanásobně vyšší zatížení. Lze pozorovat, že u studie [13] při vyšším zatížení začínal součinitel tření narůstat. Provozní podmínky mají značný vliv společně s texturovaným povrchem na zkoumané vlastnosti. Ovlivňujícím parametrem může být i excentricita ložiskového čepu a pouzdra, kde příliš velká hodnota může způsobit horší výsledky než hladký vzorek [15]. Jako dalším parametrem ovlivňujícím tribologické vlastnosti je i hustota textur. Ze studie [11] vyplývá, že se zvětšující se hustotou zaplnění textur se zvětšuje i pozitivní vliv na součinitel tření, kde největší relativní změna součinitele tření byla zaznamenána pro vzorek s hustotou 10 %. Naopak ve studii [13] autoři došli k závěru, že menší hustota zaplnění textur má vyšší potenciál na redukci součinitele tření. V této studii byly zkoumány hodnoty hustoty zaplnění textur 25 % a 46,7 %. Z těchto studií tedy vyplývá, že hustota kolem 10 % nebo 20 % má nejvíce pozitivní účinky na redukci součinitele tření.

Veškeré studie probíhaly bez možnosti vhledu do kontaktu a tím tak autoři nemohli zkoumat děje probíhající přímo v kontaktu. Autor diplomové práce [2] zkoumal v konfiguraci radiálního parciálního kluzného ložiska vliv textur na součinitel tření s možností optického vhledu. Ve smíšeném režimu mazání mají textury negativní vliv na součinitel tření a s postupným zvyšováním zatížení tento negativní vliv narůstá. V hydrodynamickém režimu mají textury také negativní vliv, ale výrazně menší než u režimu smíšeného. Díky optickému vhledu byla možnost pozorování kavitace, která

ovšem v HD režimu nenastala, a tak nedošlo k navýšení únosnosti. Negativní výsledky mohou být zapříčiněny i příliš velkou radiální vůlí. Celkově lze tedy říci, že vhodné zvolené parametry textur vzhledem k provozním podmínkám mohou pozitivně přispět ke snížení součinitele tření. Je ale velmi obtížné tyto parametry určit a bez možnosti optického pozorování není možné přesně stanovit režim mazání nebo pozorovat probíhající děje.

3.3 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je zjistit, jak kruhové parametry textury pro konfiguraci úzkého, hydrodynamicky mazaného kluzného ložiska ovlivňují tření a mazání v kontaktu za hydrodynamického, ale i smíšeného režimu mazání. Zkoumané parametry budou především průměr, hloubka a hustota textur. Použité zařízení bude umožňovat optický vhléd do kontaktu s využitím fluorescenční mikroskopie pro měření tloušťky a pozorování procesu utváření mazacího filmu.

Dílčí cíle diplomové práce jsou následující:

- zpracovat přehled v oblasti texturovaných povrchů,
- navrhnout experiment a texturované vzorky,
- realizovat měření tření a tloušťky mazací vrstvy pomocí fluorescence,
- vyhodnotit, interpretovat a publikovat výsledky.

3.4 Vědecká otázka a hypotéza

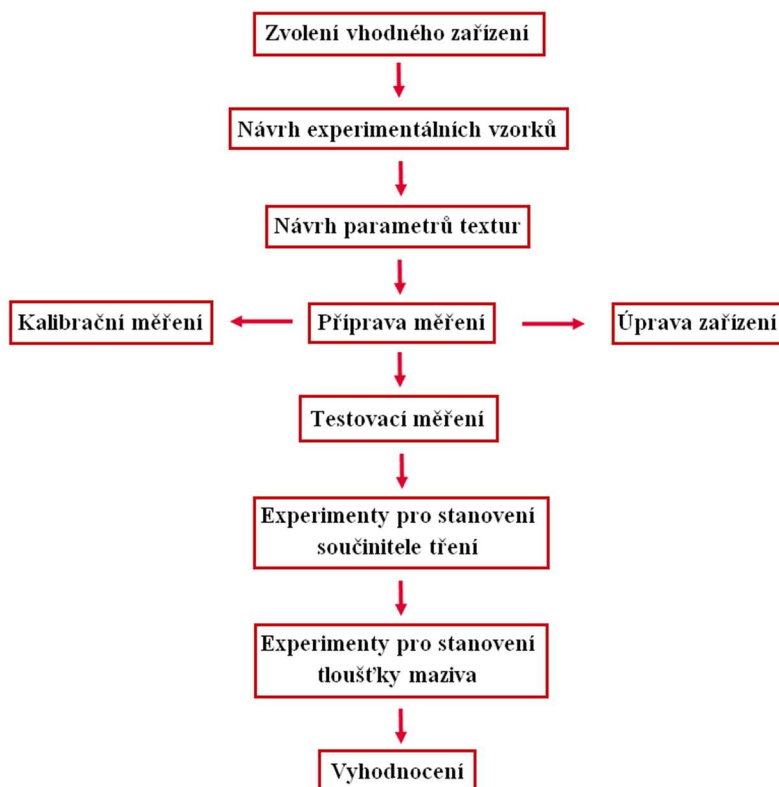
Jak parametry textur ovlivňují tření a utváření mazacího filmu v hydrodynamických kluzných ložiscích?

Nejvíce ovlivňující parametry jsou průměr a hloubka dentu. Větší průměry textur mají pozitivní vliv na tření v kontaktu. Stejně tak pozitivní výsledky narůstají se zvětšující se hloubkou dentu. Toto může platit do překročení určitého limitu, kde příliš velké rozměry mohou snížit HD efekt a tím snížit únosnost. Naopak zvolení velmi malých parametrů textur může mít za následek zanedbatelně malý vliv na pozorované tribologické vlastnosti.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Postup řešení

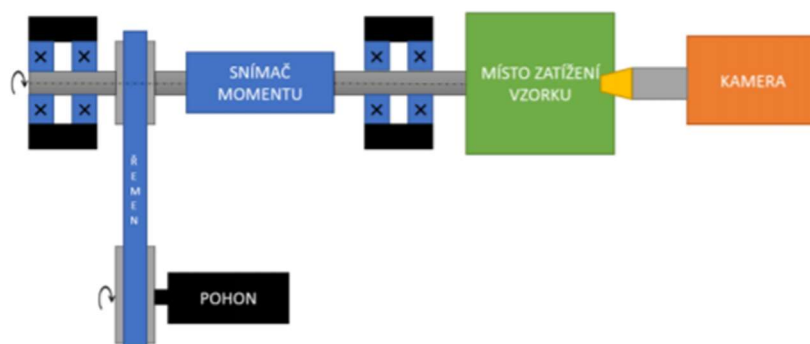
Pro tento výzkum je stěžejní návrh experimentálního přístupu a zvolení vhodného zařízení. V předchozí diplomové práci, na kterou tato práce navazuje, byl použit RTEC tribometr v konfiguraci block-on-ring s maximálními otáčkami $5000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Tento tribometr bude použit i pro tuto práci. Díky rozšíření o optické pozorování je umožněn přímý vzhled do kontaktní oblasti. Dále proběhlo vhodné navržení experimentálních vzorků. Z důvodu přesného dolehnutí byly vzorky navrženy s ohledem na geometrii safírových úsečí, která byla změřena pomocí 3D skeneru a byla navržena radiální vůle. Jako další bod bylo navrženo parametrů textur a jejich uspořádání na kontaktní ploše. Tyto parametry, jako je průměr, hloubka a hustota textur, byly navrženy na základě rešeršní části. Dále následovaly přípravy měření, které zahrnují úpravu a sestavení zařízení, kalibrační a testovací měření a následné stanovení provozních podmínek. Poté již následovaly experimenty jak se vzorky s texturovaným povrchem, tak i se vzorky s povrchem hladkým, které následně slouží jako referenční hodnota pro určení vlivu texturovaného povrchu. Po provedení všech experimentů následuje již vyhodnocení naměřených dat a porovnání výsledků jednotlivých změn parametrů. Na Obr. 4-1 lze vidět schéma postupu řešení.



Obr. 4-1 Schéma postupu řešení

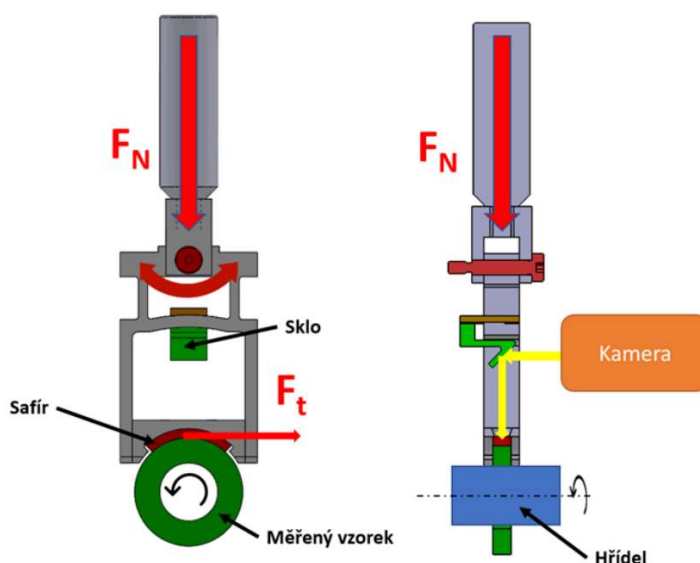
4.2 Experimentální zařízení

Zařízení bylo upraveno studentem v předešlé diplomové práci [2] tak, aby bylo možné optické pozorování a umožňovalo přímý vhléd do kontaktu. Toho bylo docíleno díky nahrazení bloku safírovou úsečí a bylo tak formováno radiální parciální kluzné ložisko. V případě konfigurace block-on-ring je tření měřeno pomocí snímače krouticího momentu, který je umístěn tečně na bloku. Z důvodu nahrazení bloku safírovou úsečí je tribometr dovybaven snímačem krouticího momentu, který je umístěn na hřídeli. Na Obr. 4-2 lze vidět návrh úpravy měřícího modulu.



Obr. 4-2 Návrh úpravy měřícího modulu [2]

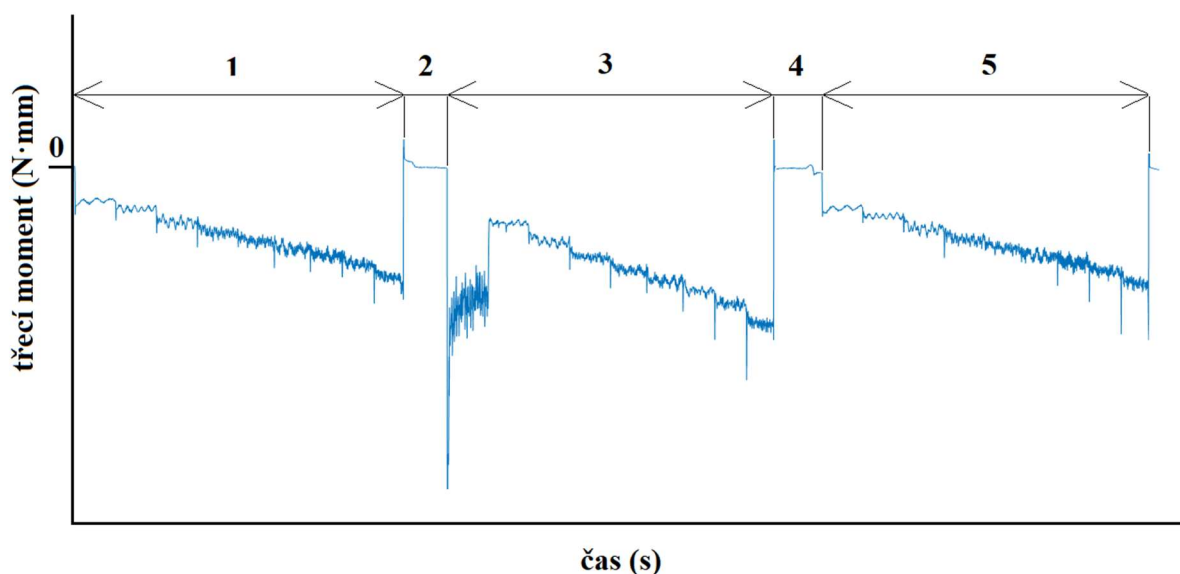
Safírová úseč je uchycena v držáku, který umožňuje pohyb v příčném směru a zároveň i natočení pomocí naklápěcí části. V držáku je umístěno sklíčko natočené o 45° , díky kterému se paprsek světla odrazí směrem do zkoumané oblasti. Na Obr. 4-3 lze vidět princip zatěžování a optického pozorování.



Obr. 4-3 Schéma principu zatěžování vzorku a optického pozorování [2]

4.3 Měření tření

Součinitel tření, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, bude zjišťován na základě snímání hodnoty třecího momentu. Snímaná data se zaznamenávala pomocí programu vytvořeného v softwaru Labview. Jelikož je snímač umístěn mezi ložiskovými domky, tak je zaznamenáváno i tření v ložiscích, které musí být následně odečteno od výsledné hodnoty. Záznam měření daného zatížení je rozdělen celkem do 5 samostatných úseků, kde v první a páté fázi dochází k zaznamenávání parazitního tření před a po zatížení pro všechny rychlosti. Ve třetí fázi pak dochází k zaznamenávání třecího momentu při požadovaném zatížení, přičemž délka záznamu se (v každé fázi) s narůstající rychlostí zkracuje. Jelikož se tloušťka maziva měřila paralelně se třením, tak fáze dva a čtyři sloužily k zachycení statického snímku před a po zatížení. V přechodu mezi jednotlivými fázemi dochází k zatížení a odtížení vzorku, přičemž otáčky hřídele jsou v těchto přechodech nulové. Na Obr. 4-4 je znázorněn průběh měření graficky.



Obr. 4-4 Průběh měření tření

Naměřená data jsou zpracovávána v softwaru Matlab. Hodnoty třecího (parazitního) momentu ve fázi 1 a 3 jsou pro jednotlivé rychlosti zprůměrovány a odečteny od hodnot třecího momentu ve fázi druhé. Součinitel tření se následně získá přepočtem z hodnot třecího momentu pro jednotlivé rychlosti pomocí vztahu (3). Získané výsledky jednotlivých hodnot součinitele tření se ukládají do souboru Excel pro další zpracování.

$$CoF = \frac{M}{r \cdot F} \quad (3)$$

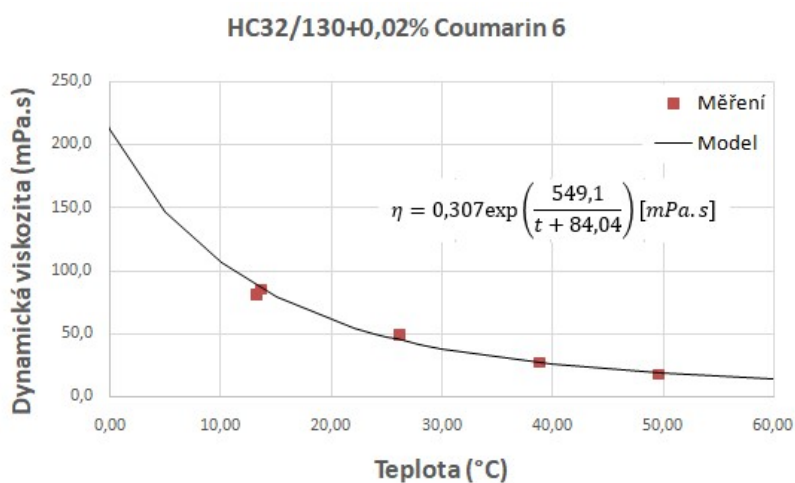
Kde:

| | | | | | |
|-------|--------|------------------|-----|------|-----------------|
| CoF | [-] | součinitel tření | r | [mm] | poloměr úseče |
| M | [N·mm] | třecí moment | F | [N] | zatěžovací síla |

4.4 Optické měření tloušťky maziva

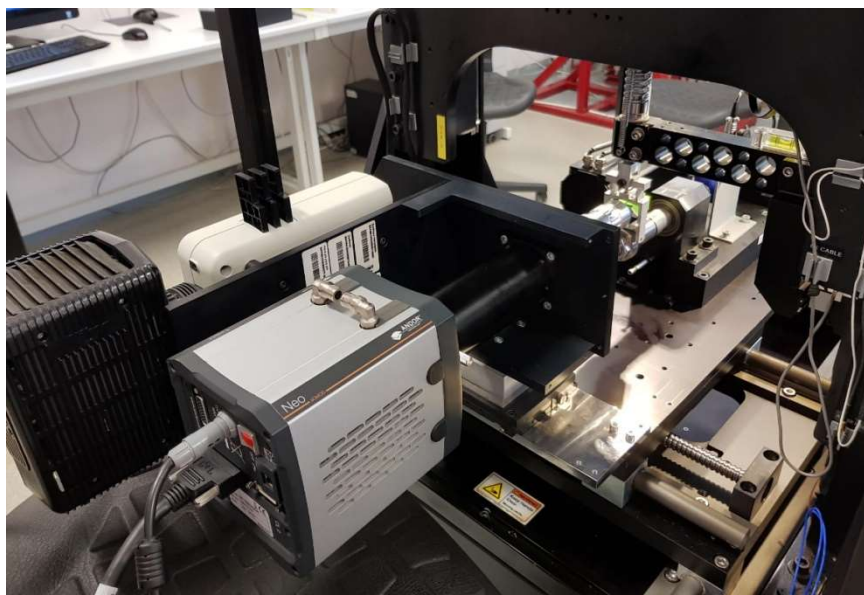
Tloušťka mazacího filmu bude měřena pomocí metody, která je založena na principu světlem indikované fluorescence. Jedná se o světelnou emisi elektromagnetického záření, obvykle viditelného světla, způsobenou excitací atomů v materiálu. Fluorescence je výsledkem třístupňového procesu, ke kterému dochází v určitých molekulách. V první fázi dochází k excitaci, kde je foton dodáván z vnějšího zdroje, jako je lampa nebo laser, a je absorbován molekulami fluorescenční látky. Další fáze je tzv. životnost excitovaného stavu, kdy dojde k excitaci elektronu (elektron je přesunut do vyšší energetické hladiny). V závěrečné fázi dochází k uvolnění energie již ve formě světelné emise [18].

Zdroj světla, z důvodu rychlého záznamu, byl pulzní laser vyzařující monochromatické světlo o vlnové délce 532 nm. Snímač kamery zachycoval emisi vyzařovanou mazivem smíchaným s fluorescenčním barvivem Coumarin 6 o koncentraci 0,02 hm.%. Obr. 4-5 zobrazuje model viskozity pro použité mazivo.



Obr. 4-5 Model viskozity pro použité mazivo

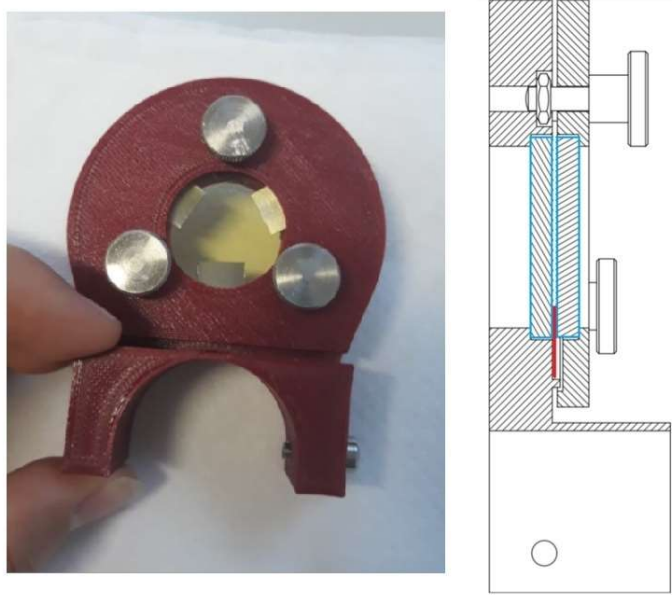
Postup přípravy roztoku maziva byl následující. Nejprve bylo barvivo smícháno s isopropylalkoholem v poměru 2:1 a důkladně promícháno. Poté byl roztok isopropylalkoholu s barvivem postupně vmíchán do maziva. Finální roztok se míchal při teplotě 120 °C po dobu cca 3 hodin, aby došlo k veškerému vypaření isopropylalkoholu. Na Obr. 4-6 lze vidět experimentální zařízení pro optické pozorování.



Obr. 4-6 Experimentální zařízení pro měření s využitím fluorescenční metody

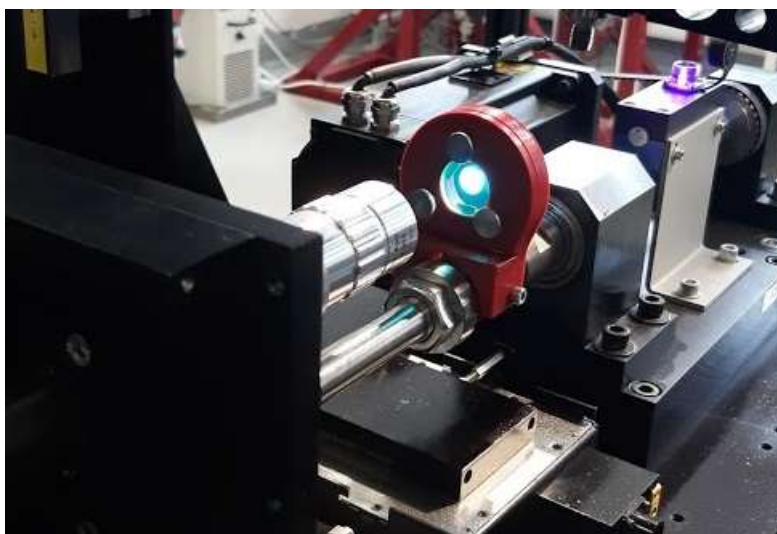
4.5 Příprava měření

Pro měření tloušťky maziva s využitím fluorescence byl navrhnout přípravek pro kalibraci a vyrovnání pole na jednotnou intenzitu. Na Obr. 4-7 lze vidět tento přípravek společně s vertikálním řezem, kde lze lépe pozorovat princip funkce. Přípravek zajišťuje uchycení dvou kruhových průzorů (sklíček), mezi kterými se nachází separační podložky a mazivo. Tyto podložky následně určují tloušťku maziva mezi sklíčky.



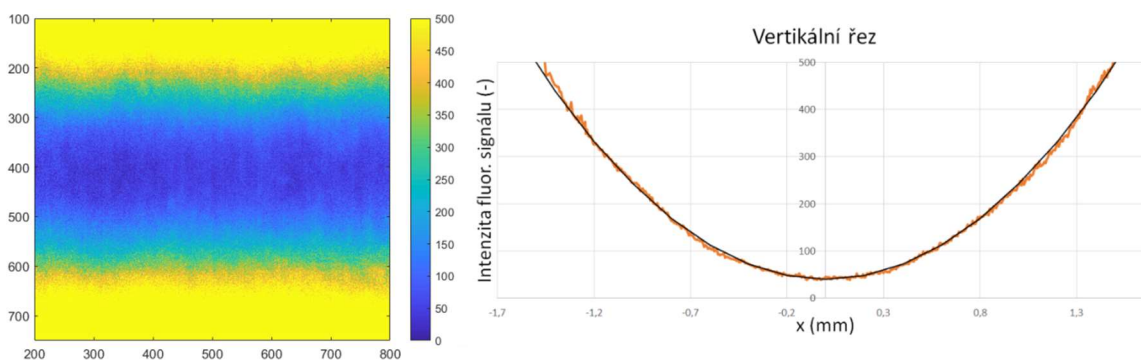
Obr. 4-7 Přípravek pro kalibraci (vpravo) a vertikální řez (vlevo)

Přípravek je rovněž možné připevnit přímo na hřídel (resp. experimentální vzorek) pro umožnění kalibrace již na finální konfiguraci mikroskopu pro experimentální měření.



Obr. 4-8 Kalibrace pomocí přípravku

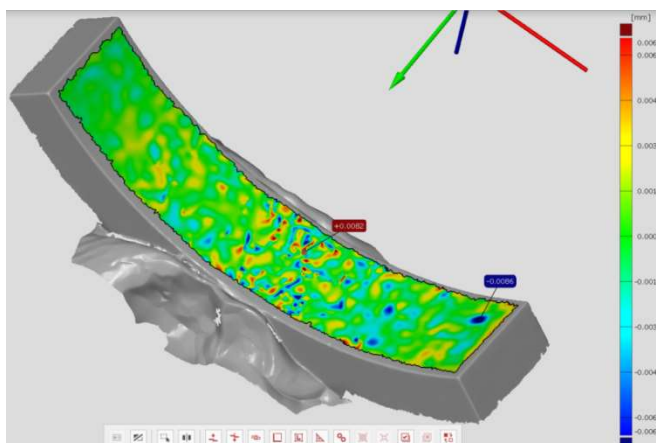
Pro získání hodnot tloušťky filmu při měření je zapotřebí získat závislost tloušťky maziva na intenzitě světla. Toho bylo docíleno pomocí kalibračního měření, které spočívalo ve změření hodnoty intenzity světla na přesně známé geometrii kontaktu. Pro tento kalibrační kontakt byl použit ložiskový kroužek o průměru 32 mm a safírová úseč, která je následně používaná i při samotném měření. Díky známé geometrii vzniklé spáry lze určit požadovanou závislost tloušťky maziva na intenzitě světla. Na Obr. 4-9 je znázorněna intenzita světla kalibračního kontaktu společně s profilem získaného z vertikálního řezu. Profil vertikálního řezu znázorňuje oranžová křivka, která byla získaná průměrem několika vertikálních řezů. Těmito daty byla proložena černá křivka, která znázorňuje geometrii spáry.



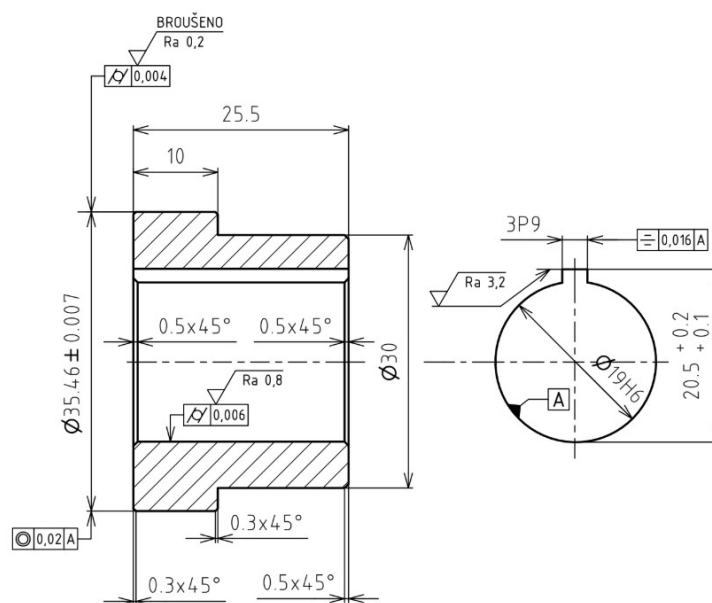
Obr. 4-9 Intenzita světla kalibračního kontaktu (vpravo) a profil vertikálního řezu (vlevo)

4.6 Experimentální vzorky

Pro návrh vzorků, které budou reprezentovat hřídel, byla nejprve změřena geometrie safírových úsečí na 3D skeneru, přičemž data byly vyhodnoceny v programu GOM Inspect. Plochou byl proložen válec a změřen jeho poloměr společně s odchylkami od teoretického válce (Obr. 4-10). S ohledem na geometrii těchto úsečí byl navržen vzorek, viz Obr. 4-11, o průměru 35,46 mm a šířce funkční plochy 10 mm. Jedná se konformní kontakt parciálního kluzného ložiska, kde radiální vůle činí 40 μm . Vzorky jsou vyrobeny z materiálu 100Cr6 o tvrdosti 58 HRC.

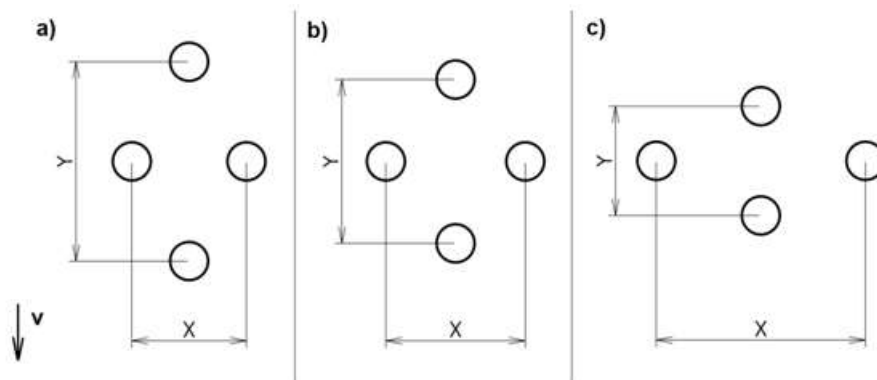


Obr. 4-10 Odchylky od teoretického válce safírové úseče



Obr. 4-11 Výkres vzorku

Na základě rešerše byly navrženy různé parametry textur společně s jejich uspořádáním. Textury byly uspořádány do jednotlivých sloupců a řad, přičemž každá řada je vždy posunuta o polovinu vzdálenosti jednotlivých textur. Byly navrženy tři koncepty uspořádání, které lze vidět na Obr. 4-12. Pomocí změny poměrů vzdáleností X a Y bylo docíleno různých uspořádání při zachování stejné hustoty.



Obr. 4-12 Koncepty rozložení textur

Při výběru vhodného uspořádání bylo zohledněno ovlivnění okolí textury ve směru obvodové (unášivé) rychlosti v . Jednotlivé vtisky ovlivní určité své okolí, a proto je zapotřebí při výběru vhodného uspořádání tuto skutečnost zohlednit. U struktury a) by se mohla vyskytnout větší oblast, která by byla texturami neovlivněná z důvodu většího rozměru Y. Naopak u struktury c) by mohla nastat situace, kde ovlivněná oblast by mohla zasahovat až k dalšímu vtisku. Z daných důvodů se jeví jako nejvhodnější varianta b), jelikož jsou textury od sebe vzdálené rovnoměrněji.

Proměnné parametry textur byly průměr, hloubka a hustota, přičemž průměr a hloubka textur měly být měněny ve třech stupních. Hustota textur měla být měněna ve stupních dvou. V Tab. 4-1 jsou uvedeny jednotlivé vzdálenosti sloupců a řad zvolené varianty uspořádání společně s původním plánem zvolených parametrů textur.

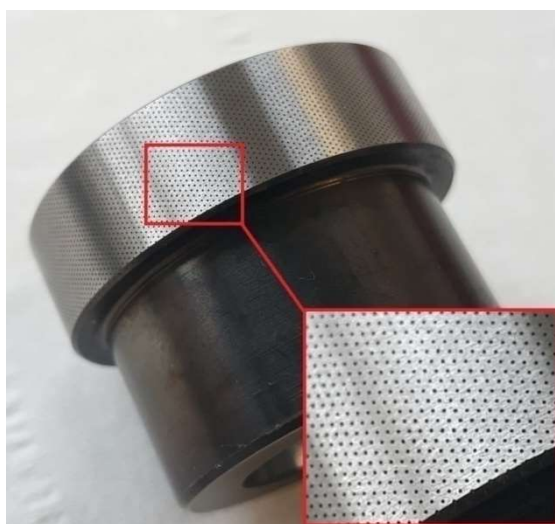
Tab. 4-1 Parametry textur

| | Průměr μm | Hloubka μm | Hustota textur % | Vzdálenost sloupců (X) μm | Vzdálenost řad (Y) μm |
|-----------|-------------------------|--------------------------|---------------------|--|--|
| Vzorek 1 | 35 | 15 | 10 | 105,4 | 182,6 |
| Vzorek 2 | 70 | 15 | 10 | 210,8 | 365,1 |
| Vzorek 3 | 140 | 15 | 10 | 421,6 | 730,3 |
| Vzorek 4 | 70 | 8 | 10 | 210,8 | 365,1 |
| Vzorek 5 | 70 | 15 | 10 | 210,8 | 365,1 |
| Vzorek 6 | 70 | 30 | 10 | 210,8 | 365,1 |
| Vzorek 7 | 70 | 50 | 10 | 210,8 | 365,1 |
| Vzorek 8 | 70 | 15 | 20 | 149,1 | 258,2 |
| Vzorek 9 | 140 | 50 | 10 | 421,6 | 730,3 |
| Vzorek 10 | 70 | 50 | 20 | 149,1 | 258,2 |

Texturované vzorky byly před experimentálním měřením změřeny na profilometru pro získání reálných hodnot. Většina textur se neshodovala s původně navrženými parametry, a proto byla vytipována skupina vzorků, která vyjadřovala změnu studovaných parametrů. Byl změřen průměr a objem vybraných texturovaných vzorků, přičemž se z těchto naměřených hodnot stanovila teoretická hloubka rotačního paraboloidu, viz Tab. 4-2. Na Obr. 4-13 lze vidět detail texturovaného povrchu vzorku 3.

Tab. 4-2 Teoretická hloubka textur

| Texturovaný vzorek | | 1 | 3 | 6 | 7 | 9 | 10 |
|-------------------------------|----|------|-------|------|------|-------|------|
| Průměr textur | μm | 36,6 | 138,2 | 87,1 | 77,7 | 133,2 | 66 |
| Hloubka rotačního paraboloidu | μm | 25,7 | 14 | 27,5 | 20,2 | 44,5 | 56,6 |
| Poměr hloubka/průměr | - | 0,7 | 0,1 | 0,31 | 0,26 | 0,33 | 0,86 |



Obr. 4-13 Detail texturovaného povrchu

4.7 Typy experimentů

Jednotlivé experimenty probíhaly při konstantním zatížení a proměnné rychlosti otáčení. Jako mazivo byl použit minerální základový olej HC 32/130. Jako první byly realizovány testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti pro hladký i texturovaný vzorek při zatížení (20-80) N (0,14-0,55 MPa) a skokově narůstající rychlosti (80-1000) ot·min⁻¹. Tyto testy sloužily také pro sestavení finálních podmínek, pro které byly testovány již ostatní vzorky. Po sestavení těchto podmínek proběhly experimenty pro získání součinitele tření a rovněž pro získání tloušťky maziva s využitím fluorescence, kde bylo možné pozorovat detailněji chování textur v kontaktu.

Aby se dal zkoumat i vtok a výtok kontaktu, což s původní úsečí nebylo možné, jelikož délka úseče byla větší než délka průzoru, tak byla zhotovena menší úseč o úhlu 30° , která se upevnila do stejného držáku pomocí hliníkových vložek. U této konfigurace ale nebyla dostačující reprodukovatelnost pro měření součinitele tření. Držák úseče musel být napevno z důvodu malé kontaktní plochy úseče se vzorkem, kde po samovolném ustavení úseče docházelo k nesouososti dané úseče se vzorkem. Malé natočení úseče bylo velice náchylné na výsledné hodnoty součinitele tření, a proto byla tato úseč využita především na pozorování kavitace na výtoku, viz kap. 5.4.1.

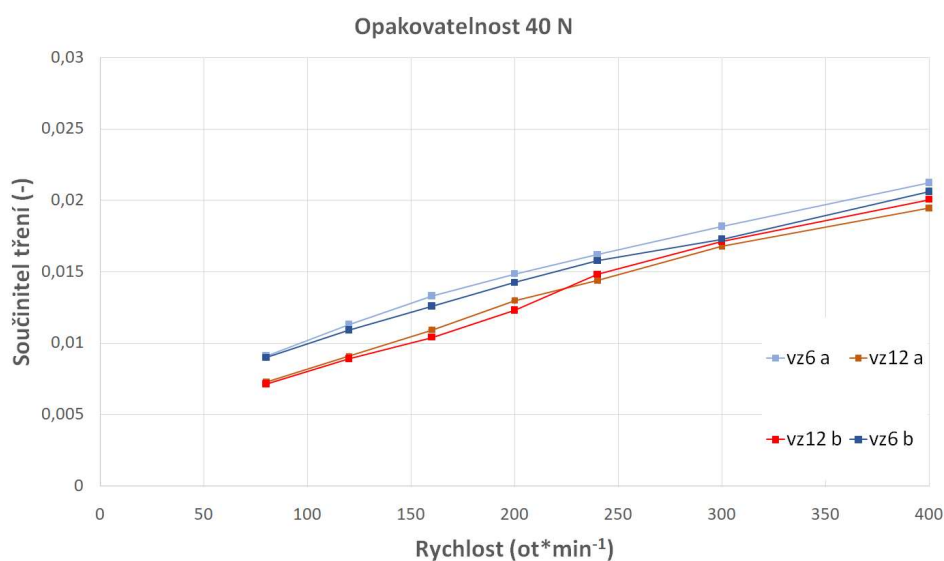
Z důvodu zachování rozumného počtu testů nebyly pro všechny vzorky získána data v celém rozsahu počátečních podmínek, především pro všechna zatížení, viz kap. 5.2. Tím, že je teplota maziva řízena teplotou lázně v celém rezervoáru, tak je zajištěna dobrá porovnatelnost mezi netexturovaným (referenčním) a texturovaným vzorkem. Měření probíhalo primárně v HD oblasti, ale v menší míře byla pozornost směřována i na režim smíšený.

Součinitel tření byl vyhodnocován na základě přepočtu z naměřeného krouticího momentu, jak je uvedeno v kap. 4.3. Tloušťka filmu byla vyhodnocována jako průměrná hodnota z několika oblastí, a to konkrétně z řezů jednotlivých snímků. Snímky zobrazují intenzitu světla, která znázorňuje rozložení tloušťky maziva. Jednotlivé řezy byly určeny pomocí softwaru Matlab. Získané hodnoty tloušťky filmu se následně porovnávaly za stejných provozních podmínek mezi vzorky s různými parametry a rovněž se vzorkem bez texturovaného povrchu, který sloužil jako reference.

5 VÝSLEDKY

5.1 Opakovatelnost a reprodukovatelnost

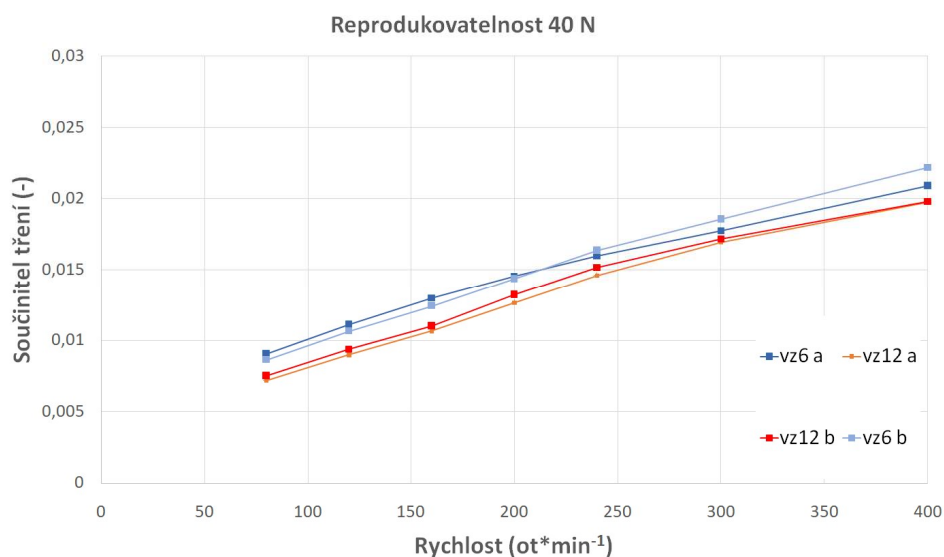
Jako první proběhly testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti pro ověření ustálených podmínek a pro zajištění vzájemné porovnatelnosti vzorků. Po několika testech byl interval rychlosti upraven na $(80-400) \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, jelikož u vyšších otáček docházelo k nedostatečnému přívodu maziva do kontaktu. Testy byly realizovány pro hladký referenční vzorek (vz 12) a pro vzorek texturovaný (vz 6). Na Obr. 5-1 lze vidět opakovatelnost měření pro oba vzorky při zatížení 40 N.



Obr. 5-1 Opakovatelnost měření při zatížení 40 N

Hodnoty součinitele tření se navzájem lišily průměrně o 3,07 % u referenčního vzorku a u vzorku texturovaného průměrně o 3,54 %.

Reprodukovatelnost byla vyhodnocena z průměrných testů opakovatelnosti, přičemž mezi jednotlivými testy bylo zařízení zcela rozebráno. Reprodukovatelnost byla měřena rovněž pro hladký a texturovaný vzorek. Výsledné hodnoty součinitele tření se u vzorku referenčního lišily průměrně o 3 %, u vzorku texturovaného průměrně o 3,86 %. Na Obr. 5-2 je znázorněna reprodukovatelnost měření pro oba vzorky při zatížení 40 N.



Obr. 5-2 Reprodukovatelnost měření při zatížení 40 N

5.2 Vliv zatížení

První experimenty, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, probíhaly pro tři různá zatížení (20 N, 40 N, 80 N). Při vyšších zatíženích byla pozorována vyšší náchylnost přechodu z HD režimu do smíšeného režimu mazání, což je v souladu s teorií. U zatížení 20 N a 40 N dochází pouze k HD režimu mazání. U zatížení 80 N lze pozorovat i smíšené mazání. Na základě těchto experimentů byly stanoveny finální provozní podmínky, které jsou znázorněny v Tab. 5-1. Další experimenty probíhaly pouze pro zatížení 40 N. Rychlost otáčení byla snížena od 20 ot·min⁻¹, aby mohl být zkoumán i smíšený režim mazání.

Tab. 5-1 Finální provozní podmínky

| Provozní podmínky | | Hodnota |
|-------------------|----------------------|----------|
| Zatížení | N | 40 |
| Rychlost | ot·min ⁻¹ | (20-400) |
| Teplota | °C | 25 |

5.3 Vliv geometrie textur na tření

Po realizaci testů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti a po stanovení finálních podmínek a konfigurace se přešlo na realizaci experimentů všech vybraných vzorků.

Pro získání hodnot součinitele tření se tedy prováděly experimenty se safírovou úsečí o úhlu 85 ° pro 6 texturovaných vzorků a vzorkem referenčním. Vzorky reprezentovaly změnu průměru (VZ 1 a VZ 6), hloubky (VZ 3 a VZ 9) a hustoty při podobném poměru hloubky a průměru textur (VZ 1 a VZ 10). Dále byl změřen jeden vzorek se střední hodnotou průměru a hloubky (VZ 7).

Jelikož experimenty probíhaly jak v hydrodynamickém, tak i ve smíšeném režimu mazání, tak se celkový součinitel tření (CoF) skládá ze tří částí, jak znázorňuje rovnice (4), (5) [2]. Tento vztah byl použit pro proložení měřených dat a je v grafech zobrazen plnými čarami.

$$CoF = CoF_{BL} + CoF_{HD} + f_{par2} \quad (4)$$

$$CoF = a \cdot e^{b \cdot v} + c \cdot v^d + f_{par2} \quad (5)$$

Kde:

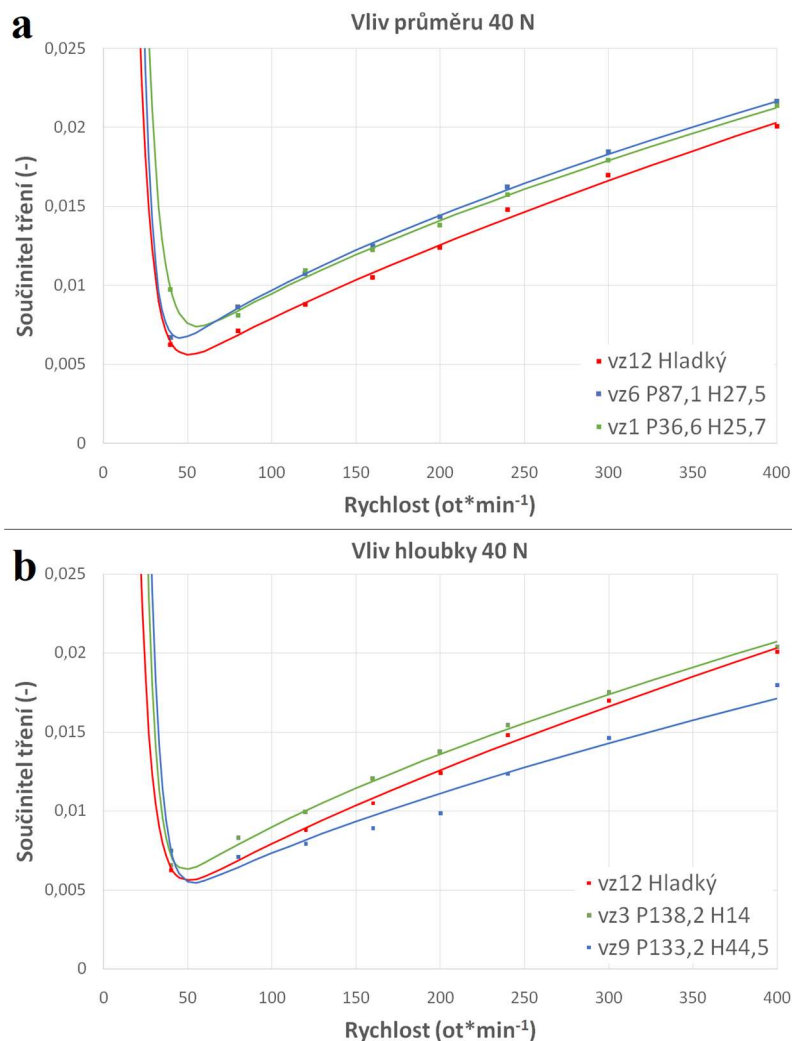
| | | | |
|------------|---------------------------------------|---------------|----------------------------------|
| CoF_{BL} | součinitel tření v mezném režimu | CoF_{HD} | součinitel tření v hydro. režimu |
| a | součinitel mezného tření | $c \cdot v^d$ | člen viskózního tření |
| b | parametr přechodu | c | parametr závislý na viskozitě |
| v | rychlost | d | koeficient mocninné závislosti |
| f_{par2} | parazitní tření (závislé na zatížení) | | |

5.3.1 Vliv parametrů textur v HD režimu mazání

Na následujících grafech jsou zobrazeny výsledky jednotlivých vzorků se zaměřením se na HD režim mazání. Pro všechny vzorky byly aplikovány stejné provozní podmínky. Uvedené průměrné relativní změny jsou vypočítány z hodnot součinitele tření z intervalu (80-400) $ot \cdot min^{-1}$, jelikož tento interval rychlostí není ovlivněn přechodem do smíšeného režimu mazání.

Obr. 5-3 znázorňuje grafy s výsledky texturovaných vzorků 1 a 6, které reprezentují změnu průměru (a), a dále výsledky texturovaných vzorků 3 a 9, které reprezentují změnu hloubky (b), vůči hladkému, referenčnímu vzorku. Z výsledků je patrné, že vliv dentů u vzorků 1 a 6 je v obou případech negativní. U vzorku 1, který má menší průměr, se průměrně hodnoty tření navýšily o 12,05 %. Negativní vliv u vzorku 6, který měl průměr dentů cca 2,4x větší, se zvýšil, a to na hodnotu relativní změny 14,94 %.

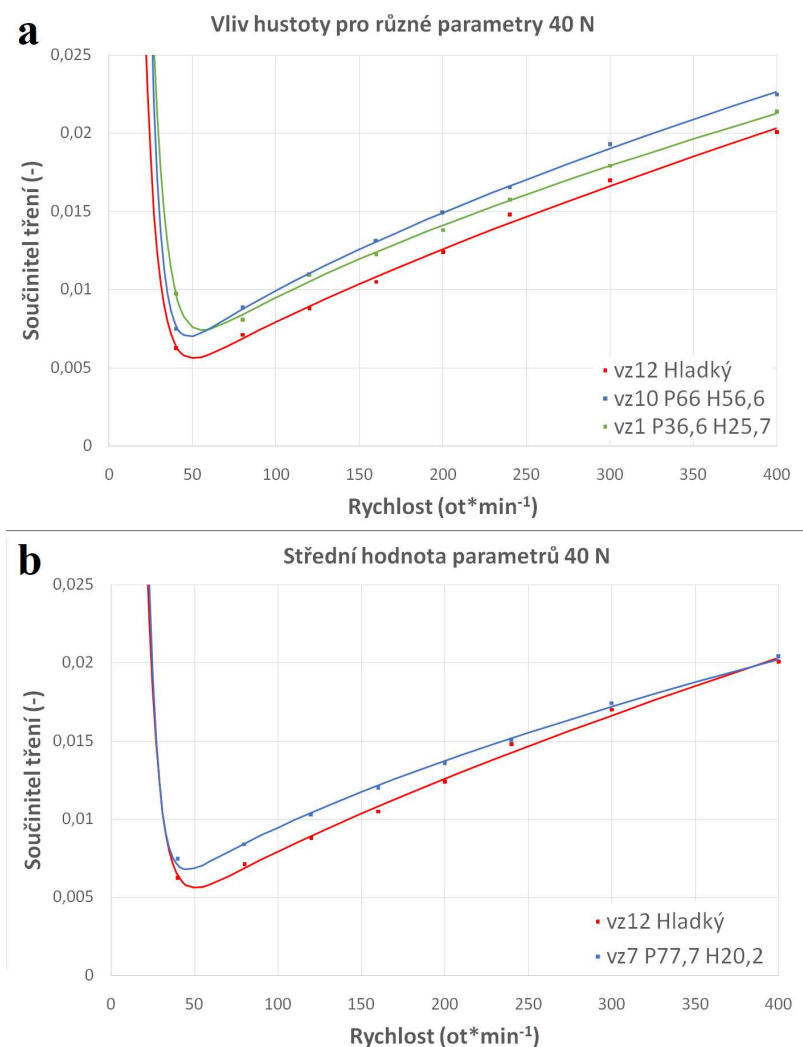
Vzorky reprezentující vliv hloubky měly diametrální rozdíl ve výsledcích součinitele tření. Zatímco vzorek 3 s menší hloubkou zaznamenal nárůst tření oproti referenčnímu vzorku průměrně o 8,96 %, texturovaný vzorek 9 vykazoval pozitivní vliv, který se postupně zvyšoval s narůstající rychlostí. Hloubka textur oproti vzorku 3 byla téměř 3,2x větší a celková průměrná relativní změna činila -12,4 %.



Obr. 5-3 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišným průměrem (a) a s odlišnou hloubkou (b), zatížení 40 N

Posledním zkoumaným parametrem byla hustota dentů, který představoval vzorek 10. Hustota dentů byla dvakrát větší než u ostatních vzorků, a to 20 %. Pro porovnání součinitele tření sloužil referenční vzorek a texturovaný vzorek 1 s podobným poměrem hloubky a průměru dentů. Hodnoty součinitele tření výrazně stouply a celkový nárůst oproti referenčnímu vzorku činil 18,7 %, což představuje nejvyšší hodnotu v porovnání s ostatními vzorky.

Experimenty byly prováděny i pro kombinaci parametrů textur, a to konkrétně pro vzorek 7, který reprezentoval střední hodnotu jak průměru, tak i hloubky, při hustotě pokrytí 10 %. Tato kombinace parametrů má taktéž negativní vliv na součinitel tření, avšak postupně se zvyšujícími se otáčkami negativní vliv klesá. Tento trend naznačuje, že pro vyšší rychlosti by mohlo dojít ke snížení tření. Průměrná relativní změna oproti referenčnímu vzorku je 9,1 %. Na Obr. 5-4 jsou znázorněny grafy závislosti součinitele tření na rychlosti otáčení pro texturovaný vzorek 10 a 1 a poté pro texturovaný vzorek 7.



Obr. 5-4 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro referenční vzorek a texturovaný vzorek s odlišnou hustotou (a) a s kombinací parametrů textur (b), zatížení 40 N

V následující tabulce jsou shrnuty relativní změny součinitele tření vůči referenčnímu vzorku v HD režimu mazání.

Tab. 5-2 Finální provozní podmínky

| Vzorek | VZ 1 | VZ 3 | VZ 6 | VZ 7 | VZ 9 | VZ 10 |
|--|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| Relativní změna vůči referenčnímu vzorku | + 12,05 % | + 8,96 % | + 14,94 % | + 9,13 % | - 12,38 % | + 18,7 % |

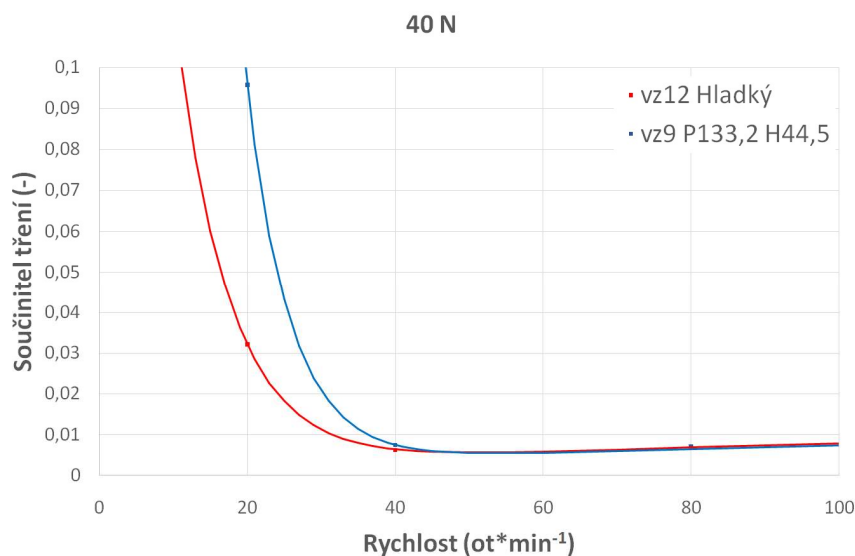
5.3.2 Vliv parametrů textur ve smíšeném režimu mazání

Přechod z HD do smíšeného režimu mazání probíhá postupně, z grafů je patrné, že hodnoty součinitele tření pro rychlost 80 ot·min⁻¹ jsou přechodem režimů ještě neovlivněné. Pro rychlost 40 ot·min⁻¹ jsou hodnoty CoF pro každý vzorek už určitou mírou přechodem do smíšeného režimu mazání ovlivněny. Pro porovnání přechodu z HD do smíšeného režimu mazání byly pro každý vzorek určeny otáčky nutné pro vzrůst tření na hodnotu 0,02, která představuje již smíšený režim mazání. Jednotlivé otáčky jsou uvedeny v Tab. 5-3. Vyšší otáčky značí, že přechod nastává dřív a únosnost mazacího filmu ve smíšeném režimu mazání je nižší.

Tab. 5-3 Otáčky nutné pro vzrůst tření na hodnotu 0,02

| Vzorek | VZ 1 | VZ 3 | VZ 6 | VZ 7 | VZ 9 | VZ 10 | VZ 12 |
|----------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Rychlost (ot·min ⁻¹) | 29,6 | 28,1 | 26,2 | 24,7 | 30,3 | 27,7 | 24,1 |
| Relativní posun rychlostí | 22,8 % | 16,6 % | 8,7 % | 2,5 % | 25,7 % | 14,9 % | - |

I na Obr. 5-5 lze pozorovat, že přechod proběhl pro všechny texturované vzorky dříve v porovnání s referenčním vzorkem. Největší posun mezi HD a smíšeným režimem zaznamenal vzorek 9, kde docházelo k posunu o 25,7 %.



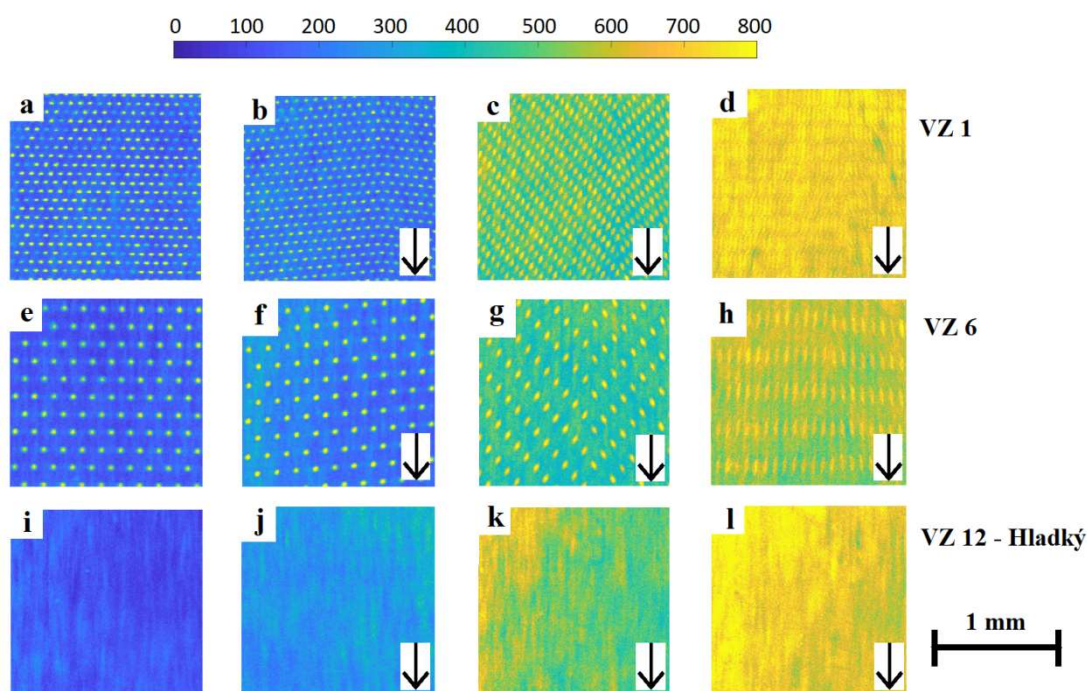
Obr. 5-5 Přechod z HD režimu do smíšeného režimu mazání u referenčního a texturovaného vzorku 9, zatížení 40 N

5.4 Vliv geometrie textur na tloušťku filmu

Tloušťka filmu u jednotlivých vzorků byla stanovena na základě snímání intenzity světla pomocí fluorescence. Vyhodnocování snímků probíhalo v softwaru Matlab, kde výsledná hodnota intenzity světla byla vždy zprůměrována ze stejné oblasti pro jednotlivé rychlosti a vzorky. Následně byla tato hodnota přepočítána na tloušťku maziva pomocí získané závislosti intenzity světla na tloušťce maziva, viz kap. 4.5.

Od snímků jednotlivých rychlostí se vždy odečetl snímek statického kontaktu, který sloužil jako reference.

Na následujícím obrázku lze vidět snímky vybraných rychlostí (0, 20, 160, 400) $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ pro texturovaný vzorek 1 (Obr. 5-6 a-d), texturovaný vzorek 6 (Obr. 5-6 e-h) a referenční hladký vzorek (Obr. 5-6 i-l), který znázorňují hodnoty intenzity fluorescenčního signálu ($1\ \mu\text{m} = 67$ jasových hladin). Černá šipka znázorňuje směr pohybu vzorku. Textury jsou na snímcích pro jednotlivé rychlosti zkreslené. Toto zkreslení vzniká kvůli způsobu řízení závěrky kamery. Protože se využívalo tzv. „rolling shutter“, tak jednotlivé řádky v obraze jsou exponovány v rozdílném čase. Na průměrné hodnoty intenzity toto zkreslení nemá vliv.

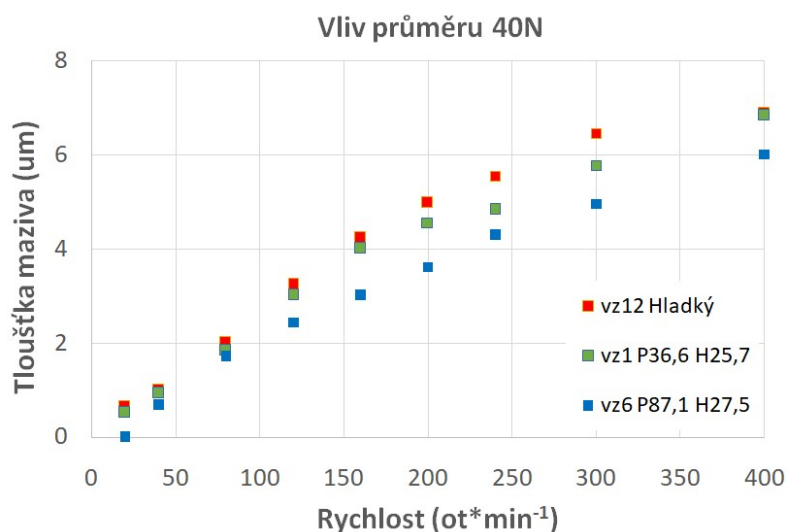


Obr. 5-6 Intenzita světla u texturovaného vzorku 1 a 6 a hladkého vzorku při zatížení 40N

Z obrázků je patrné, že s přibývajícím rychlostí se navyšuje i intenzita světla, respektive tloušťka filmu. Hodnoty pro texturovaný vzorek 1 jsou velice podobné hodnotám vzorku hladkého. Průměrně hodnota tloušťky maziva u texturovaného vzorku 1 klesla o 7,7 %. Dále lze pozorovat, že na snímcích texturovaného vzorku jsou jasně rozeznatelné jednotlivé vtisky, což značí, že jsou zaplavené mazivem. Při nejvyšších otáčkách 400 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ lze vidět, že je velmi silná intenzita, tedy formován tlustý mazací film, již přes celou zobrazovanou oblast.

Z jednotlivých snímků pro texturovaný vzorek 6 lze vidět, že intenzita světla je menší u všech rychlostí oproti hladkému vzorku. Dále lze zřetelně rozeznat jednotlivé vtisky i v nejvyšší rychlosti, což u vzorku 1 nebylo možné.

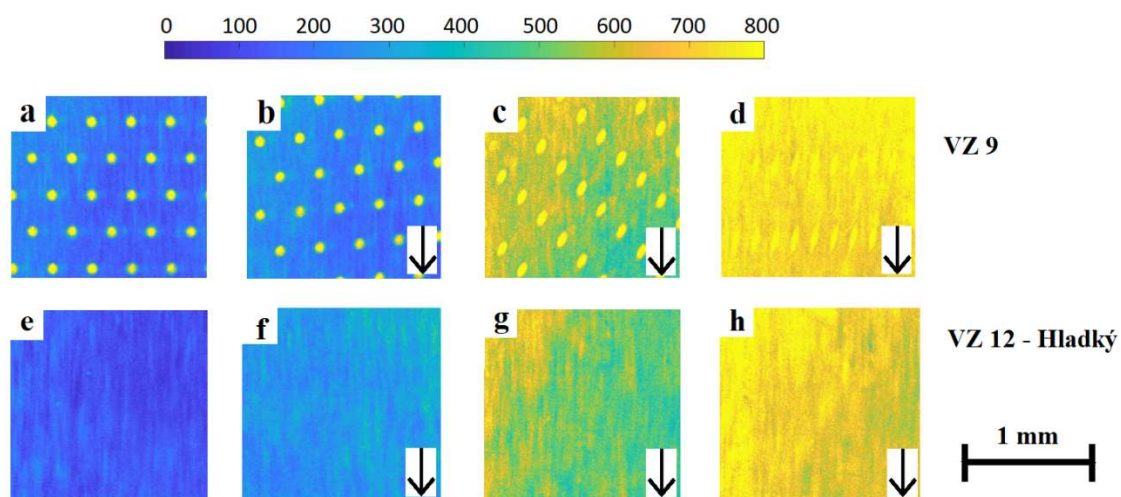
Průměrné hodnoty tloušťky maziva vzorku 6, který má větší průměr textur, klesly oproti referenčnímu vzorku téměř o 22 %, což je skoro 3x více než vzorek 1. Obr. 5-7 znázorňuje závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a texturované vzorky 1 a 6. Lze pozorovat, že při nižších rychlostech jsou hodnoty tloušťky filmu pro texturované vzorky velice podobné a s vyšší rychlostí, od 120 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$, se hodnoty již rozcházejí.



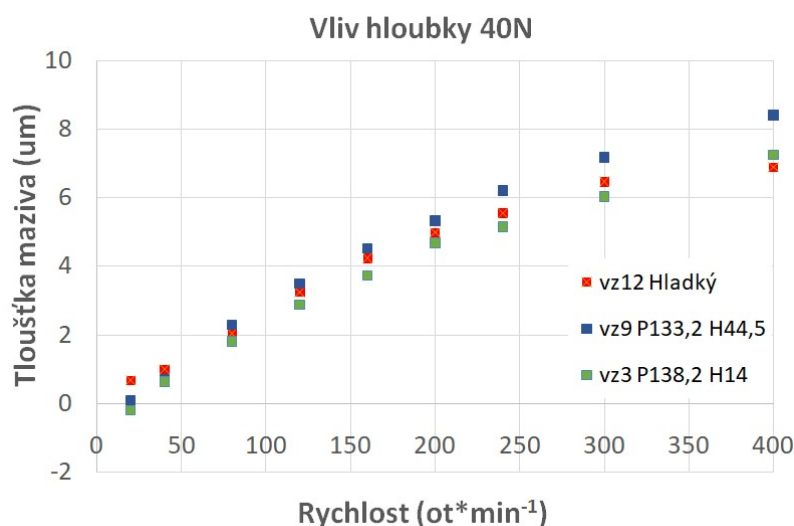
Obr. 5-7 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišným průměrem, zatížení 40 N

Další zkoumané texturované vzorky byly vzorky s proměnnou hloubkou, a to vzorek 3 a 9. Na Obr. 5-7 lze vidět grafické znázornění závislosti tloušťky maziva na rychlosti otáčení pro tyto vzorky. Z grafu je patrné, že tloušťka filmu u vzorku 9 je vyšší v porovnání se vzorkem referenčním. Průměrná relativní změna hodnoty tloušťky maziva činí 11 %. Jedná se o jediný vzorek, kde tloušťka maziva dosahuje vyšších hodnot oproti hladkému vzorku. Lze také pozorovat, že pro rychlost $20 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ má tloušťka maziva u vzorku 9 nižší hodnotu oproti hladkému vzorku, což se ale mezi rychlostmi $(40-80) \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ změnilo a ve vyšších rychlostech již vzorek 9 disponuje vyššími hodnotami tloušťky maziva. U vzorku 3 byla tloušťka filmu v porovnání s hladkým vzorkem na nižších hodnotách. Průměrně tloušťka maziva klesla o 7,1 %. Dále si lze všimnout, že v rychlosti $20 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ u vzorku 3 dochází k záporné hodnotě tloušťky maziva. Důvodem je větší hodnota intenzity světla u statického snímku (který se odečítá od jednotlivých rychlostí) než u dané rychlosti.

Na Obr. 5-8 jsou zobrazeny snímky s hodnotami intenzity fluorescenčního signálu texturovaného vzorku 9 (Obr. 5-8 a-d) a referenčního hladkého vzorku (Obr. 5-8 e-h), taktéž pro rychlosti $(0, 20, 160, 400) \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Na snímcích reprezentujících rychlost $20 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ lze vidět, že intenzita světla pro hladký vzorek dosahuje vyšších hodnot, než vzorek 9. Na snímcích pro vyšší rychlosti je tento trend již opačný, kde u nejvyšší rychlosti $400 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ lze vidět jasně vyšší hodnoty intenzity světla pro texturovaný vzorek 9.

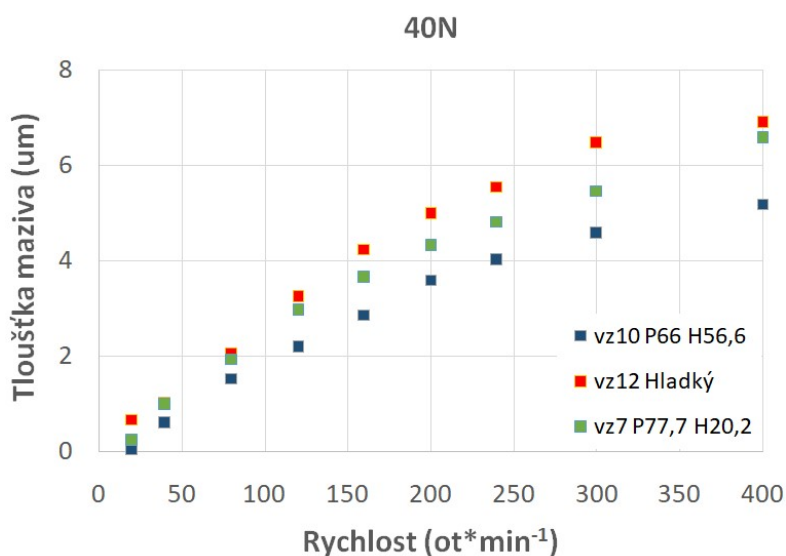


Obr. 5-8 Intenzita světla u texturovaného vzorku 9 a hladkého vzorku při zatížení 40N



Obr. 5-9 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišnou hloubkou, zatížení 40 N

Posledními zkoumanými vzorky byl texturovaný vzorek 7 a 10, kde na Obr. 5-10 lze vidět grafické znázornění závislosti tloušťky maziva na rychlosti otáčení pro tyto vzorky. Vzorek 10 je specifický svou hustotou zaplnění textur, která činí 20 %. Tloušťka filmu v porovnání s referenčním vzorkem výrazně klesla, a to průměrně o 28,4 %. Tato hodnota relativní změny je nejvyšší napříč celého spektra zkoumaných vzorků. Tloušťka maziva vzorku 7, který měl střední hodnotu průměru a hloubky textur, také klesla oproti referenčnímu vzorku, a to o hodnotu 10,5 %.



Obr. 5-10 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišnou hustotou a kombinací středního průměru a hloubky, zatížení 40 N

V následující tabulce (Tab. 5-4) jsou shrnuty relativní změny tloušťky filmu vůči referenčnímu vzorku pro všechny zkoumané texturované vzorky.

Tab. 5-4 Relativní změny tloušťky maziva

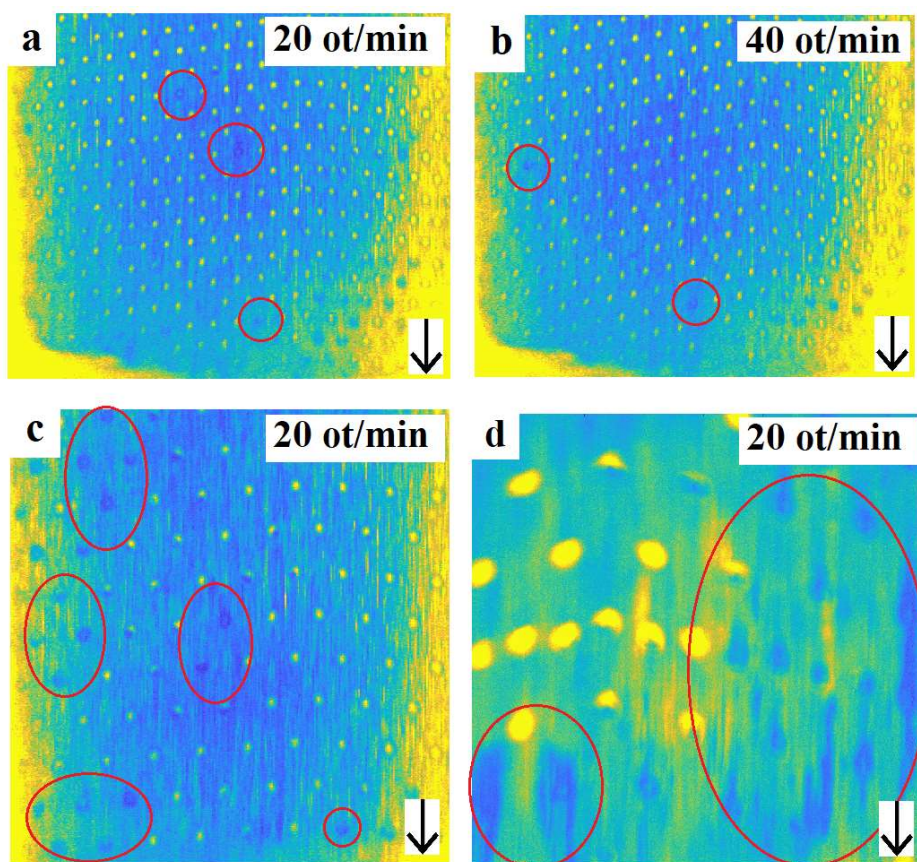
| Vzorek | VZ 1 | VZ 3 | VZ 6 | VZ 7 | VZ 9 | VZ 10 |
|--|---------|---------|--------|----------|--------|----------|
| Relativní změna vůči referenčnímu vzorku | - 7,7 % | - 7,1 % | - 22 % | - 10,5 % | + 11 % | - 28,4 % |

5.4.1 Kavítace

Kavítace byla pozorovaná s menší úsečí o úhlu 30° , aby bylo možné sledovat výtok kontaktu. Experimenty proběhly s objektivem se zvětšením 2:1, kde byla pozorovaná lokální kavítace v texturách, ale pouze v nízkých rychlostech ($20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, ojediněle i $40 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$). S vyššími rychlostmi se snímky začínaly rozmazávat a zhoršovala se tak samotná pozorovatelnost textur. Pro detailnější zkoumání byly realizovány i experimenty s objektivem se zvětšením 5:1 pouze pro rychlost $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na Obr. 5-14 lze vidět snímky zachycující kavítaci pro texturovaný vzorek 6 při rychlosti $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a $40 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ Obr. 5-11 (a,b), a poté pro texturovaný vzorek 3 při rychlosti $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ za použití objektivu 2:1 a 5:1 Obr. 5-11 (c,d).

U ostatních vzorků nebyl pozorován vznik kavítace a zaplněnost textur se držela napříč všemi rychlostmi.

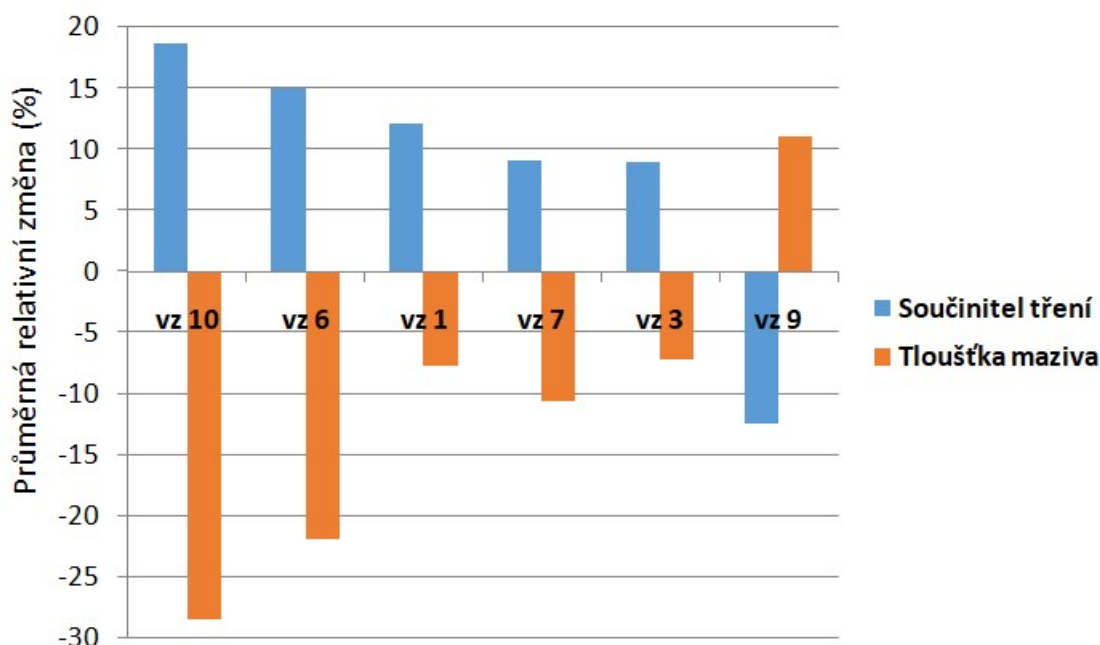


Obr. 5-11 Lokální kavítace texturovaného vzorku 6 (a,b) a texturovaného vzorku 3 (b,c)

6 DISKUZE

6.1 Porovnání tření a tloušťky

Tato podkapitola je věnována vzájemné korespondenci dat součinitele tření a tloušťky maziva. Z newtonova vztahu viskozity vyplývá, že pro menší smykové napětí v kapalině, které vede i na nižší součinitel tření, lze docílit zvýšení tloušťky mazací vrstvy (viz. kap. 2.1.1). Na Obr. 6-1 je znázorněná průměrná relativní změna součinitele tření a tloušťky maziva oproti referenčnímu vzorku. Lze vidět, že při nejvyšším nárůstu součinitele tření dochází k největšímu poklesu tloušťky maziva. Tloušťka maziva texturovaného vzorku 1 z tohoto trendu mírně vybočuje.



Obr. 6-1 Korespondence dat tření a tloušťky maziva

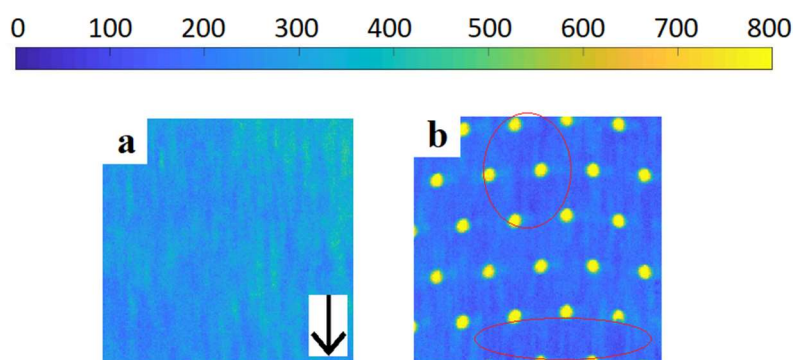
6.2 Vliv parametrů textur na součinitel tření

Za smíšeného režimu mazání měly všechny texturované vzorky negativní vliv na tření v kontaktu, i na rychlosti, kdy dochází k přechodu mezi mazacími režimy. K přechodu do smíšeného režimu mazání docházelo při vyšších otáčkách, než u vzorku hladkého. Největší posun o 25,7 % zaznamenal texturovaný vzorek 9. K negativnímu posunu docházelo i v práci [2], kde posun přechodu mezi režimy lehce přesahoval až 100 %. V této práci byl však studován kontakt s přibližně 6x větší radiální vůlí.

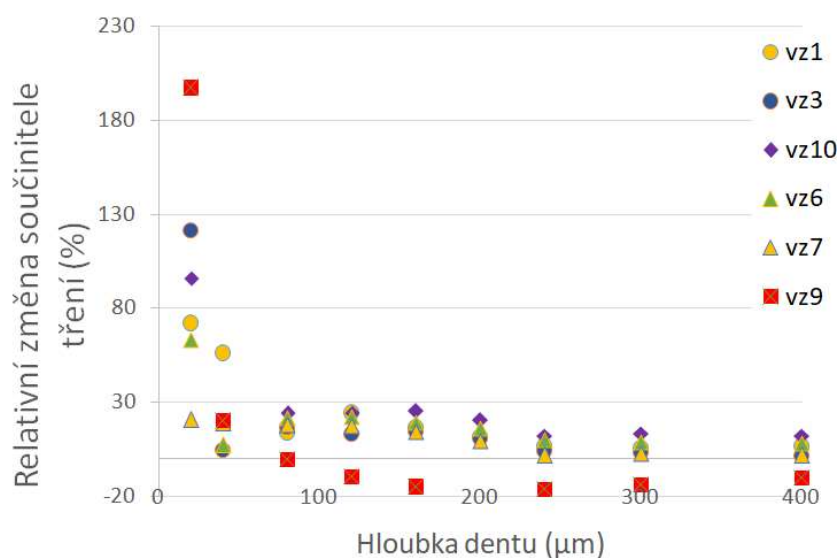
V oblasti nízkých otáček, především při rychlosti $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ docházelo k výraznému zvýšení tření. Z optického pozorování lze vidět, že u texturovaného vzorku 9 při rychlosti $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, jsou denty plně zaplavené mazivem, avšak v oblasti mezi denty výrazně klesla hodnota intenzity světla, viz Obr. 6-2. To nasvědčuje tomu, že u texturovaného vzorku 9 nebyla větší část zatížení přenášena tlakem maziva, ale přímým kontaktem nerovností povrchů, což se projevilo na několika násobném zvýšení tření. V Tab. 6-1 jsou vyjádřeny procentuální relativní změny součinitele tření oproti referenčnímu vzorku pro oblast smíšeného mazání. Na Obr. 6-3 jsou relativní změny součinitele tření graficky znázorněny pro celou zkoumanou oblast rychlostí.

Tab. 6-1 Relativní změny součinitele tření ve smíšeném režimu mazání

| Rychlost | VZ 1 | VZ 3 | VZ 6 | VZ 7 | VZ 9 | VZ 10 |
|--|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
| 20 ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$) | + 71,8 % | + 120,9 % | + 63,1 % | + 20,6 % | + 197,1 % | + 95,8 % |
| 40 ($\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$) | + 56,04 % | + 4,36 % | +7,1 % | +18,7 % | +19,9 % | +19,7 % |



Obr. 6-2 Intenzita světla pro hladký vzorek (a) a texturovaný vzorek 9 (b) při rychlosti $20 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$



Obr. 6-3 Relativní změny součinitele tření pro texturované vzorky, zatížení 40 N

Vliv průměru

Trendově z výsledků vyplývá, že větší průměr textur vykazuje vyšší hodnoty součinitele tření. Rozdíl relativní změny mezi texturovanými vzorky 1 a 6 je 2,9 %. Tento trend je podobný u studie [14], kde bylo zjištěno, že textury s velkým průměrem (cca 155 μm) vykazovaly vyšší tření než textury s průměrem malým (5,8 μm). Avšak při výrobě textur (se stejnou hodnotou průměru cca 155 μm) pomocí jiné technologie se tento trend otočí a textury vykazují lehce nižší hodnoty tření.

Vliv hloubky

Výsledky ukazují, že se zvětšující se hloubkou textur dochází k rapidnímu snížení tření. Rozdíl mezi relativními změnami texturovaného vzorku 3 a 9 je 21,4 %. Pozitivní vliv na součinitel tření zaznamenala i numerická studie [16], kde pro podobné parametry textur (průměr 155 μm a hloubka 35 μm) docházelo k výraznému snížení součinitele tření ve srovnání s hladkým vzorkem.

Vliv hustoty

Texturovaný vzorek 10 obsahoval textury s dvakrát větší hustotou pokrytí povrchu. Tyto parametry textur měly o více než 18 % horší výsledky tření v porovnání s referenčním vzorkem. Výsledky byly porovnány s texturovaným vzorkem 1 (který má stejný poměr hloubky a průměru textur) a rozdíl relativních změn činí 6,6 %. Z výsledků vyplývá, že příliš mnoho textur v kontaktu má větší negativní dopad na tření a tloušťku filmu v kontaktu.

V následující tabulce (Tab.6-2) jsou texturované vzorky seřazeny podle relativních změn vůči referenčnímu vzorku v HD režimu mazání.

Tab. 6-2 Seřazení texturovaných vzorků podle relativních změn vůči referenci

| Vzorek | Rel. změna CoF | Průměr μm | Hloubka μm | Hustota % | Vliv - |
|-----------|----------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-----------|
| Vzorek 9 | - 12,38 % | 133,2 | 44,5 | 10 | P |
| Vzorek 3 | + 8,96 % | 138,2 | 14 | 10 | N |
| Vzorek 7 | + 9,13 % | 77,7 | 20,2 | 10 | N |
| Vzorek 1 | + 12,05 % | 36,6 | 25,7 | 10 | N |
| Vzorek 6 | + 14,94 % | 87,1 | 27,5 | 10 | N |
| Vzorek 10 | + 18,7 % | 66 | 56,6 | 20 | N |

Jednotlivé vlivy parametrů textur nejsou monotónní a nezávislé. Z výsledků vyplývá, že pozitivní výsledky nelze získat v určité hodnotě průměru nebo hloubky, ale je potřeba soulad obou parametrů průměru a hloubky. Optimální hodnoty parametrů textur pro provozní podmínky v dané práci leží v úzkém pásmu kombinace parametrů texturovaného vzorku 9.

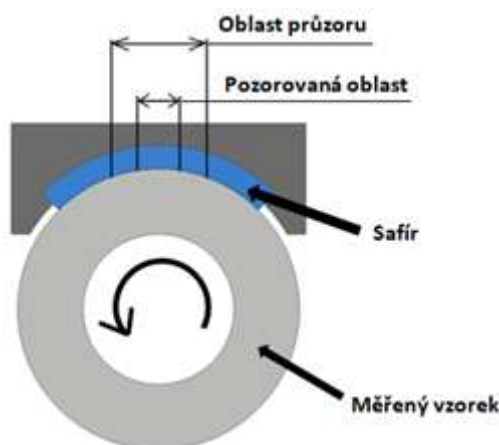
6.3 Optické pozorování

6.3.1 Pozorování kavitace

Pro detailnější pozorování kavitace byla využita menší safírová úseč, kde bylo možné sledovat výtok kontaktu. Na tyto experimenty byl použit objektiv se zvětšením 2:1 a poté objektiv se zvětšením 5:1 pro detailnější pozorování. U vzorku 6 byla kavitace pozorovaná pouze za použití objektivu se zvětšením 2:1, a to minimálně. Pouze u vzorku 3 byl jasně pozorován vznik kavitace. Ta by se podle teorie [10] měla vytvářet v divergentní oblasti textury. Pozorovaná kavitace však měla charakter celé textury a nebyla pozorovaná inicializace na divergentní části textury. Celkově pozorovaná kavitace spíše souvisí s provozem ve smíšeném režimu mazání a s lokálními nerovnostmi na povrchu a odchylkami hřídele i úseče od ideálního válce.

6.3.2 Vyhodnocování tloušťky maziva

Určité omezení ve vyhodnocování tloušťky maziva je v odčítání statického kontaktu od jednotlivých rychlostí, respektive ve stanovení správné reference, jelikož před a po měření byly určité odchylky mezi statickými snímky. Detailnější prověření těchto vlivů by mohlo vést na další zpřesnění měření (ve vztahu k absolutní přesnosti). Dále se vyhodnocuje průměrná hodnota intenzity světla pouze z určité pozorované oblasti, kterou jsme limitováni jednak z hlediska optického měření, ale také z velikosti průzoru, viz Obr. 6-4.



Obr. 6-4 Znázornění pozorované oblasti v kontaktu

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo zjistit, jak kruhové parametry textury pro konfiguraci úzkého, hydrodynamicky mazaného kluzného ložiska ovlivňují tření a mazání v kontaktu za hydrodynamického, ale i smíšeného režimu mazání. Zkoumané parametry byly především průměr, hloubka a hustota textur.

Z rešeršní části vyplynulo, že tématem modifikace povrchu, a jeho vlivem především na součinitel tření a tloušťku filmu, se zabývalo mnoho studií. Většina studií však zkoumá tento vliv v jiných konfiguracích (např. pin-on-disk). Bylo zjištěno, že největší vliv na tření a tloušťku filmu v kontaktu mají geometrické parametry textur, a to především průměr, hloubka a hustota. Ze studií však nešly přesně vyvodit jednoznačné trendy vlivů jednotlivých parametrů textur, jelikož v každé studii byly experimenty prováděny za jiných provozních podmínek a výsledky modifikovaného povrchu byly různorodé.

Tetxurované vzorky v této práci byly vyrobeny pomocí laseru, přičemž po změření reálných hodnot se některé vzorky neshodovaly s původně navrženými hodnotami. Bylo zkoumáno celkem 6 texturovaných vzorků a jeden vzorek referenční. Hloubka textur byla stanovena na základě teoreticky stanovené hodnoty pomocí proložení dentu rotačním paraboloidem o stejném průměru a objemu daného dentu. Pro optické pozorování byla využita metoda fluorescence, kde tloušťka maziva byla vyhodnocována na základě intenzity světla. K určení hodnot tloušťky maziva sloužilo kalibrační měření, díky kterému byla získána závislost mezi intenzitou světla a tloušťkou maziva.

Experimenty pro zjištění součinitele tření a tloušťky maziva byly prováděny pro zatížení 40 N a rozsah rychlostí (20-400) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro pozorování kavitace na výtoku kontaktu bylo měření realizováno s menší safirovou úsečí o úhlu 30 °, jelikož původní úseč měla výtok kontaktu za možnou pozorovanou oblastí.

Tloušťka maziva koresponduje s výslednými hodnotami součinitele tření, kde snížení tloušťky maziva vede na zvýšení hodnot součinitele tření. Během experimentů byly denty plně zaplaveny mazivem, přičemž byla pozorovaná kavitace u nejnižší rychlosti pro dva texturované vzorky. Kavítace spíše souvisí s lokálními nerovnostmi na povrchu.

Z provedených experimentů vyšlo najevo, že vlivy parametrů textur nejsou nezávislé a změnou pouze jednoho parametru se nemusí dosáhnout snížení tření. Optimum leží v určité kombinaci parametrů textur pro dané provozní podmínky. Možná cesta je v numerických simulacích konkrétních provozních podmínek pro návrh optimálních parametrů textur. Výsledná data z této práce mohou posloužit pro validaci numerických modelů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NAKADA, Masahiko. Trends in engine technology and tribology. *Tribology International*. 1994, roč. 27, č. 1, s. 3–8. ISSN 0301679X.
- [2] Mauer, M. Snižování tření cílenou modifikací povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 89 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..
- [3] VINŠ, Jindřich. Kluzná ložiska. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971.
- [4] STACHOWIAK, Gwidon W a Andrew W BATCHELOR. *Engineering tribology*. nedatováno.
- [5] HORI, Y. *Hydrodynamic Lubrication*. B.m.: Springer Japan, 2006. ISBN 9784431279013.
- [6] AZO materials. Generating a Stribeck Curve in a Reciprocating Test. [online] 2016 [cit. 16. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12810>
- [7] HAMROCK, Bernard J. *Fundamentals Fluid Film Lubrication of*. Nasa Publication 1255. 1991, s. 301–318.
- [8] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS, Miloš VLK, Martin HARTL. *Konstruování strojních součástí*. První. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [9] GROPPER, Daniel, Ling WANG a Terry J. HARVEY. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International*. 2016, roč. 94, s. 509–529. ISSN 0301679X.
- [10] GACHOT, C., A. ROSENKRANZ, S. M. HSU a H. L. COSTA. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*. 2017, roč. 372–373, s. 21–41. ISSN 00431648.
- [11] FIASCHI, Giulia, Michele DI LAURO, Antonio BALLESTRAZZI, Alberto ROTA, Fabio BISCARINI a Sergio VALERI. Tribological response of laser-textured steel pins with low-dimensional micrometric patterns. *Tribology International*. 2019, č. July 2018, s. 105548. ISSN 0301679X.
- [12] GALDA, Lidia, Jaroslaw SEP, Artur OLSZEWSKI a Tomasz ZOCHOWSKI. Experimental investigation into surface texture effect on journal bearings performance. *Tribology International*. 2019, roč. 136, č. April, s. 372–384. ISSN 0301679X.
- [13] VLĂDESCU, Sorin Cristian, Mark FOWELL, Lars MATTSSON a Tom REDDYHOFF. The effects of laser surface texture applied to internal combustion engine journal bearing shells – An experimental study. *Tribology International*. 2019, roč. 134, č. February, s. 317–327. ISSN 0301679X.

- [14] GRÜTZMACHER, Philipp G., Andreas ROSENKRANZ, Adam SZURDAK, Florian KÖNIG, Georg JACOBS, Gerhard HIRT a Frank MÜCKLICH. From lab to application - Improved frictional performance of journal bearings induced by single- and multi-scale surface patterns. *Tribology International*. 2018, roč. 127, č. June, s. 500–508. ISSN 0301679X.
- [15] SHARMA, Sanjay, Gourav JAMWAL a R. K. AWASTHI. Numerical study on steady state performance enhancement of partial textured hydrodynamic journal bearing. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 9, s. 1055–1063. ISSN 00368792. 35
- [16] KÖNIG, Florian, Andreas ROSENKRANZ, Philipp G. GRÜTZMACHER, Frank MÜCKLICH a Georg JACOBS. Effect of single- and multi-scale surface patterns on the frictional performance of journal bearings – A numerical study. *Tribology International*. 2020, roč. 143, č. August 2019. ISSN 0301679X.
- [17] MAO, Yazhou, Yang JIANXI, Xu WENJING a Liu YONGGANG. Study on the influence of round pits arrangement patterns on tribological properties of journal bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 7, s. 931–941. ISSN 00368792.
- [18] LAKOWICZ, Joseph R. Principles of fluorescence spectroscopy. 3rd ed. New York: Springer, c2006, xxvi, 954 p. ISBN 03-873-1278-1.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

| | | |
|------------|----------------------|--------------------------------------|
| HD | | Mazání Hydrodynamické mazání |
| DLIP | | Direct Laser Interference Patterning |
| ω | [rad/s] | úhlová rychlost |
| p | [Pa] | tlak |
| p_{\max} | [Pa] | maximální tlak |
| He | [-] | Herseyho číslo |
| η | [Pa·s] | dynamická viskozita |
| n | [1/min] | otáčky |
| Λ | [-] | parametr mazání |
| τ | [Pa] | smykové napětí |
| η | [Pa·s] | dynamická viskozita |
| Δu | [m·s ⁻¹] | relativní rychlost |
| h | [mm] | tloušťka filmu |
| F_N | [N] | Normálová síla |
| F_T | [N] | Třecí síla |
| CoF | [-] | součinitel tření |
| r | [mm] | poloměr úseče |

| | | |
|------------|--------|---------------------------------------|
| F | [N] | zatěžovací síla |
| M | [N·mm] | třecí moment |
| CoF_{BL} | [-] | součinitel tření v mezném režimu |
| CoF_{HD} | [-] | součinitel tření v hydro. Režimu |
| a | [-] | součinitel mezného tření |
| $c * v_d$ | [-] | člen viskózního tření |
| b | [-] | parametr přechodu c |
| v | [m/s] | rychlost |
| f_{par2} | [-] | parazitní tření (závislé na zatížení) |

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1-1 Detail textury [2]..... | 13 |
| Obr. 2-1 Poloha čepu v ložisku a) $\omega=0$, b) ω je velmi malé (mezní mazání), c) HD mazání, d) $\omega=\infty$ [3] | 14 |
| Obr. 2-2 Princip hydrodynamického tlaku [4] | 15 |
| Obr. 2-3 Stribeckova křivka [6] | 16 |
| Obr. 2-4 Vliv radiální vůle na parametry ložiska [8]..... | 17 |
| Obr. 2-5 Částečně texturované axiální ložisko [9] | 18 |
| Obr. 2-6 Texturovaný povrch s mikro ložisky [10] | 18 |
| Obr. 2-7 Rozmístění vtisků na povrchu vzorků [2]..... | 19 |
| Obr. 2-8 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení [2] | 20 |
| Obr. 2-9 Experimentální tloušťka mazacího filmu při zatížení 40 N, viskozitě 78 mPa·s a rychlosti 0,018 m·s ⁻¹ a) hladký vzorek, b) texturovaný vzorek [2] | 20 |
| Obr. 2-10 Detail textury vzorku A3 [11]..... | 21 |
| Obr. 2-11 Součinitel tření v závislosti na rychlosti [11] | 22 |
| Obr. 2-12 Pokles součinitele tření v závislosti na rychlosti [11]..... | 22 |
| Obr. 2-13 (a) texturovaný povrch čepu, (b) texturovaný povrch pouzdra [12] | 23 |
| Obr. 2-14 Součinitel tření v závislosti na Herseyho čísle [12] | 24 |
| Obr. 2-15 Součinitel tření v závislosti na čase pro a) n=100 rpm, b) n=500 rpm [12]..... | 24 |
| Obr. 2-16 Součinitel tření v závislosti na Herseyově čísle pro všechny použité vzorky [13]..... | 25 |
| Obr. 2-17 Závislost součinitele tření na otáčkách [14] | 26 |
| Obr. 2-18 Tvar a umístění textur [15] | 27 |
| Obr. 2-19 Součinitel tření v závislosti na rychlosti otáčení [16] | 28 |
| Obr. 2-20 Rozložení textur na jednotlivých vzorcích [17]..... | 29 |
| Obr. 2-21 Součinitel tření v závislosti na zatížení [17]..... | 29 |
| Obr. 4-1 Schéma postupu řešení..... | 33 |
| Obr. 4-2 Návrh úpravy měřicího modulu [2] | 34 |
| Obr. 4-3 Schéma principu zatěžování vzorku a optického pozorování [2] | 34 |
| Obr. 4-4 Průběh měření tření | 35 |

| | |
|---|----|
| Obr. 4-5 Model viskozity pro použité mazivo | 36 |
| Obr. 4-6 Experimentální zařízení pro měření s využitím fluorescenční metody | 37 |
| Obr. 4-7 Přípravek pro kalibraci (vpravo) a vertikální řez (vlevo)..... | 37 |
| Obr. 4-8 Kalibrace pomocí přípravku | 38 |
| Obr. 4-9 Intenzita světla kalibračního kontaktu (vpravo) a profil vertikálního řezu (vlevo)..... | 38 |
| Obr. 4-10 Odchylky od teoretického válce safírové úseče | 39 |
| Obr. 4-11 Výkres vzorku..... | 39 |
| Obr. 4-12 Koncepty rozložení textur | 40 |
| Obr. 4-13 Detail texturovaného povrchu | 41 |
| Obr. 5-1 Opakovatelnost měření při zatížení 40 N | 43 |
| Obr. 5-2 Reprodukovatelnost měření při zatížení 40 N | 44 |
| Obr. 5-3 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišným průměrem (a) a s odlišnou hloubkou (b), zatížení 40 N... | 46 |
| Obr. 5-4 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro referenční vzorek a texturovaný vzorek s odlišnou hustotou (a) a s kombinací parametrů textur (b), zatížení 40 N..... | 47 |
| Obr. 5-5 Přejít z HD režimu do smíšeného režimu mazání u referenčního a texturovaného vzorku 9, zatížení 40 N..... | 48 |
| Obr. 5-6 Intenzita světla u texturovaného vzorku 1 a 6 a hladkého vzorku při zatížení 40N..... | 49 |
| Obr. 5-7 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišným průměrem, zatížení 40 N..... | 50 |
| Obr. 5-8 Intenzita světla u texturovaného vzorku 9 a hladkého vzorku při zatížení 40N..... | 51 |
| Obr. 5-9 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišnou hloubkou, zatížení 40 N..... | 52 |
| Obr. 5-10 Závislost tloušťky maziva na rychlosti pro referenční vzorek a dva texturované vzorky s odlišnou hustotou a kombinací středního průměru a hloubky, zatížení 40 N..... | 52 |
| Obr. 5-11 Lokální kavitace texturovaného vzorku 6 (a,b) a texturovaného vzorku 3 (b,c)..... | 53 |
| Obr. 6-1 Korespondence dat tření a tloušťky maziva | 54 |

| | |
|--|----|
| Obr. 6-2 Intenzita světla pro hladký vzorek (a) a texturovaný vzorek 9 (b) při rychlosti 20 ot·min ⁻¹ | 55 |
| Obr. 6-3 Relativní změny součinitele tření pro texturované vzorky, zatížení 40 N..... | 55 |
| Obr. 6-4 Znázornění pozorované oblasti v kontaktu | 57 |

11 SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|---|----|
| Tab. 2-1 | Geometrie vzorků [11] | 21 |
| Tab. 2-2 | Parametry textur [14] | 26 |
| Tab. 2-3 | Parametry textur [16] | 28 |
| Tab. 3-1 | Srovnání parametrů textur a ložiska [13, 17]..... | 31 |
| Tab. 4-1 | Parametry textur | 40 |
| Tab. 4-2 | Teoretická hloubka textur | 41 |
| Tab. 5-1 | Finální provozní podmínky..... | 44 |
| Tab. 5-2 | Finální provozní podmínky..... | 47 |
| Tab. 5-3 | Otáčky nutné pro vzrůst tření na hodnotu 0,02 | 48 |
| Tab. 5-4 | Relativní změny tloušťky maziva | 53 |
| Tab. 6-1 | Relativní změny součinitele tření ve smíšeném režimu mazání | 55 |
| Tab. 6-2 | Seřazení texturovaných vzorků podle relativních změn vůči referenci | 56 |