



# 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 DRSNOSTI POVRCHU NA TŘENÍ A MAZÁNÍ V SIMULOVANÉM KONTAKTU OZUBENÍ

THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON FRICTION AND LUBRICATION IN SIMULATED GEAR CONTACT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Mořický

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2022



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Ondřej Mořický**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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 drsnosti povrchu na tření a mazání v simulovaném kontaktu ozubení**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Spolehlivý provoz ozubených převodů je umožněn při dosažení kvalitního a dostatečného mazání. Trendem poslední doby je používání maziv nižší viskozity, které dovolují dosáhnout vyšší energetické efektivity provozu. Proto pro zajištění dostatečné kvality mazání je nutné snižovat drsnost povrchu ozubení. Snižování drsnosti má své limity a ty souvisí s nejnižší hodnotou udržitelnou v průběhu provozu součásti po záběhu a během její životnosti. V této práci bude experimentálně studován vliv topografie povrchu a změn během procesů opotřebení na kvalitu mazání simulovaných kontaktů ozubených převodů.

Typ práce: výzkumná  
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)  
Projekt: GAČR

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je experimentálně zjistit jaký vliv má výchozí struktura povrchu a provozní podmínky na tření a tloušťku mazací vrstvy v simulovaném kontaktu ozubení. Úkolem je sledovat vývoj struktury povrchu během záběhu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled vlivu topografie povrchu na mazání bodových kontaktů,
- navrhnout experimenty a povrchy pro měření,
- realizovat experimenty pro různé struktury povrchu,
- analyzovat výsledky, učinit závěry a sepsat výstupy práce.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

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

**Seznam doporučené literatury:**

HANSEN, J., BJÖRLING, M., LARSSON, R. A New Film Parameter for Rough Surface EHL Contacts with Anisotropic and Isotropic Structures. *Tribology Letters*, 2021, 69.2: 1-17.

HANSEN, J., BJÖRLING, M., LARSSON, R. Topography transformations due to running-in of rolling-sliding non-conformal contacts. *Tribology International*, 2020, 144: 106126.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním studiem vlivu drsnosti povrchu na formování mazacího filmu a vývoj tření v mazaném bodovém kontaktu. Kontakt typu kulička na disku je provozován za podmínek smíšeného až elasto-hydrodynamického režimu mazání. K měření tloušťky tenkých mazacích filmů u obecně nerovných povrchů je přistoupeno pomocí metody fluorescenční mikroskopie. V práci jsou popsány vlivy velikosti a charakteru původní drsnosti, včetně jejich vývoje během procesů záběhu. Výsledkem je bližší pochopení mechanismů odehrávajících se v tomto typu kontaktu a nalezení optimální drsnosti z hlediska odolnosti vůči změnám při záběhu pro konkrétní provozní podmínky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elastohydrodynamické mazání, smíšené mazání, tření, záběh, drsnost povrchu

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with experimental study of the effect of surface roughness on lubricating film formation and friction behaviour in lubricated point contact. The ball-on-disc contact is operated under conditions of transition from mixed to elasto-hydrodynamic lubrication regime. The measurement of the thickness of thin lubrication films on generally rough surfaces is approached by fluorescence microscopy. The effects of magnitude and character of the initial roughness, including their evolution during the running-in processes, are described. The result is a closer understanding of the mechanisms taking place in this type of contact and the identification of the optimum surface roughness in terms of resistance to changes during running-in for specific operating conditions.

## KEYWORDS

elasto-hydrodynamic lubrication, mixed lubrication, friction, running-in, surface roughness



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MOŘICKÝ, Ondřej. *Vliv drsnosti povrchu na tření a mazání v simulovaném kontaktu ozubení*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140095>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky během zpracování této diplomové práce. Velké poděkování patří také mé rodině a přátelům za podporu a motivaci během celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Kritická rešerše	16
2.2.1	Sumarizace výsledků z jednotlivých informačních zdrojů	16
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	22
2.4	Mezera v poznání	24
<b>3</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b>	<b>25</b>
3.1	Výzkumné otázky	25
3.2	Cíle výzkumu	25
3.3	Hypotézy	25
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>26</b>
4.1	Metodika	26
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	26
4.2.1	Optický tribometr ball-on-disc	26
4.2.2	Optický 3D profilometr	29
4.2.3	Zařízení pro dokončování povrchu elementů ložisek	29
4.3	Materiál a testovací podmínky	30
4.3.1	Použité mazivo – TOTM	30
4.3.2	Kontaktní dvojice	31
4.3.3	Stanovení provozních podmínek	32
4.4	Metody	33
4.4.1	Příprava vzorků	33
4.4.2	Měření topografie	34
4.4.3	Příprava oleje	36
4.4.4	Kalibrace fluorescenční kamery a měření tloušťky	37
4.4.5	Měření tření	38
4.5	Testované predikce	39
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>40</b>
5.1	Vývoj měřicí metody	40
5.1.1	Konfrontace s interferenčním měřením	40

5.1.2	Vysvěcování fluorescenčního maziva	41
5.1.3	Aplikace metody na tenké filmy	44
5.2	Vyhodnocení záběhu	45
5.3	Změna topografie povrchu po záběhu	48
5.3.1	Vliv charakteru drsnosti	49
5.4	Ovlivnění tření v jednotlivých režimech mazání	52
5.4.1	Stribeckův test pro povrchy s odlišnou velikostí drsnosti	52
5.4.2	Stribeckův test pro povrchy s odlišným charakterem drsnosti	53
5.5	Vliv režimu mazání na záběh	53
5.6	Ovlivnění tloušťky mazacího filmu	55
<b>6</b>	<b>DISKUSE</b>	<b>58</b>
6.1	Interpretace výsledků	58
6.1.1	Měření tloušťky mazacího filmu pomocí fluorescence	58
6.1.2	Záběhové testy	59
6.1.3	Posouzení režimu mazání	60
6.1.4	Vyhodnocení charakteru drsnosti	60
6.2	Verifikace hypotéz	61
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>67</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>69</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>72</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>73</b>

# 1 ÚVOD

V současné době jsou stále více kladeny náročné požadavky na co nejvyšší efektivitu a životnost strojních součástí v souladu se zachováním minimálních provozních a výrobních nákladů. Možností, jak zvýšit efektivitu jejich provozu, je snížení ztrát vzniklých třením v místech kontaktu. Nynějším trendem, především v odvětví automotive, je snižování viskozity maziva, které ve svém důsledku vede na nižší tření. Současně s tím však roste riziko vystavení povrchů přímé vzájemné interakci a jsou tak kladeny vyšší nároky na kontaktní povrchy součástí. Tloušťka filmu se stává srovnatelnou s velikostí povrchových nerovností, a v mazacím procesu začínají tyto nerovnosti hrát významnou roli. Mnoho moderních strojních součástí je tak provozováno za podmínek na pomezí smíšeného a elastohydrodynamického (EHD) mazání, u kterého jednoznačně dochází k ovlivnění mazacího filmu nerovnostmi povrchu. Jelikož nejsou reálné inženýrské povrchy ideálně hladké, je třeba vlivu drsnosti povrchu věnovat pozornost na poli výzkumu.

Podíváme-li se obecně na kontakt v ozubení, zatížení je zde soustředěno do velmi malé kontaktní plochy a vede na vysoké kontaktní tlaky. Působením tlaku dochází k transformaci povrchů, které mohou mít jak negativní, tak pozitivní vliv. Pozitivním vlivem může být záběh povrchů součástí, kdy dochází k ustálení, případně i snížení hodnoty součinitele tření. Naopak negativní je tvorba opotřebení, které ve svých kritických fázích může vést až k fatálnímu porušení a zamezení funkce stroje. V dnešní době je již běžnou praxí superfinišování povrchů pro dosažení co nejnižší drsnosti. Otevírá se zde otázka, jaká drsnost povrchu je optimální pro provoz systému ozubení z hlediska minimálního tření a odolnosti proti tvorbě kritického opotřebení v oblasti velmi tenkých mazacích filmů.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

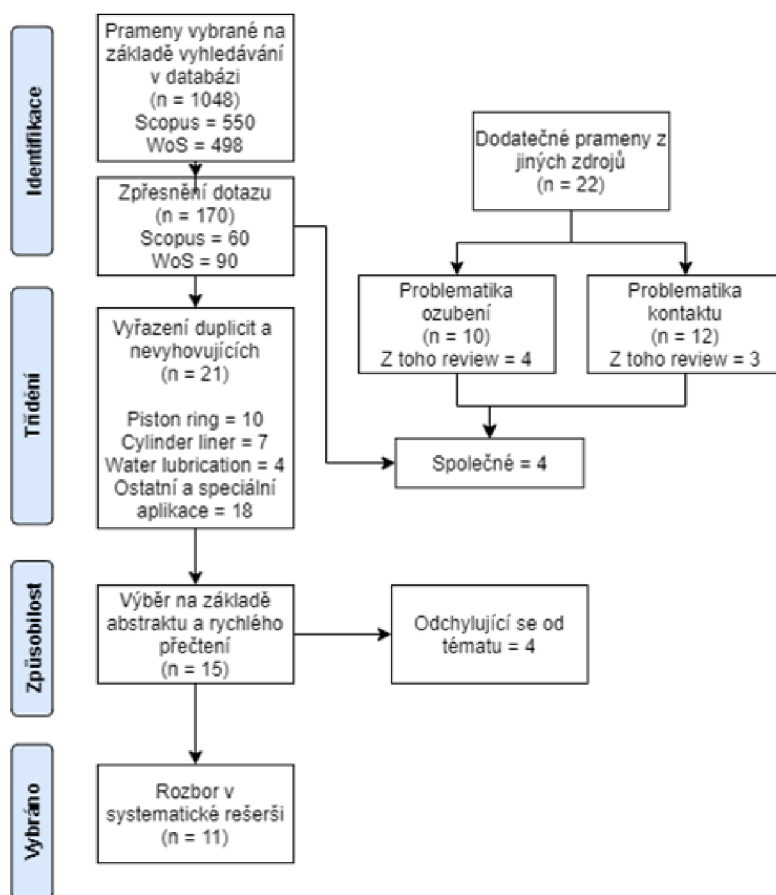
Cílem systematické rešerše je zmapování současných poznatků ze studií mazaného kontaktu reálně drsných povrchů. Ve spojitosti s drsností, tenkými mazacími filmy a přechodem do smíšeného mazání je na místě prověření stability povrchu z hlediska prvotní tvorby mírného opotřebení. Důležitými pojmy pro sestavení rešeršního dotazu jsou tření, tloušťka mazacího filmu, a jejich ustálení po čas záběhu (running-in). Dalším stádiem vývoje povrchu je pak kritický projev opotřebení ve formě micropittingu. Tento stav však v práci není řešen a není tak zásadní pro rešerši. V některých zdrojích [1] se však jeho přesný popis vyskytuje ve spojitosti s prvotní tvorbou opotřebení.

Syntéza získaných informací by měla vést k zodpovězení otázky „Jak se bude vyvíjet tloušťka mazací vrstvy a tření u reálně drsných inženýrských povrchů za použití maziv nižší viskozity a s předpokladem záběhu?“. Současně má také rešerše za cíl přinést přehled o použitých metodách, predikčních modelech a parametrech experimentálního měření.

### 2.1 Rešeršní metody

Na základě definice problému a stanovení rešeršních otázek bylo možné identifikovat klíčové pojmy, jejich synonyma a pojmy související. Vyhledávání pramenů bylo provedeno především na základě sestaveného rešeršního dotazu v databázích Scopus a Web of Science. Vhodnost vyhledaných pramenů byla posouzena především dle abstraktu. Mezi další kritéria hodnocení relevance patřila scientometrická data jako impact factor periodika (IF), H-index autora, počet citací daného článku a rok vydání. Pro korelaci s aktuálností současného stavu poznání byly vybírány především vědecké články z posledních let (2015+), nicméně starší prameny byly také v menší míře zařazeny. Jedná se o vědecké články uveřejněné v odborných časopisech, avšak druh dokumentu nebyl při vyhledávání specifikován. U novějších článků nebylo příliš předmětné hodnocení dle počtu citací či h-indexu autora, naopak bylo více přihlíženo k hodnocení periodika na základě IF. U starších pramenů byl zase kladen větší důraz na počet citací, díky kterým bylo možné posoudit jejich důležitost na poli daného problému.

Formulace rešeršního dotazu byla provedena v 15 iteracích, které jsou detailněji rozepsané v Příloha 1. V Příloha 2 a Příloha 3 je pak graficky znázorněná četnost výsledků a porovnání databází Scopus a Web of Science. K syntéze bylo v konečném důsledku vybráno 11 pramenů, přitom některé pocházely i z jiných zdrojů než zmíněný rešeršní dotaz. Cesta jejich postupného výběru je zobrazena v PRISMA diagramu na Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Vývojový diagram PRISMA

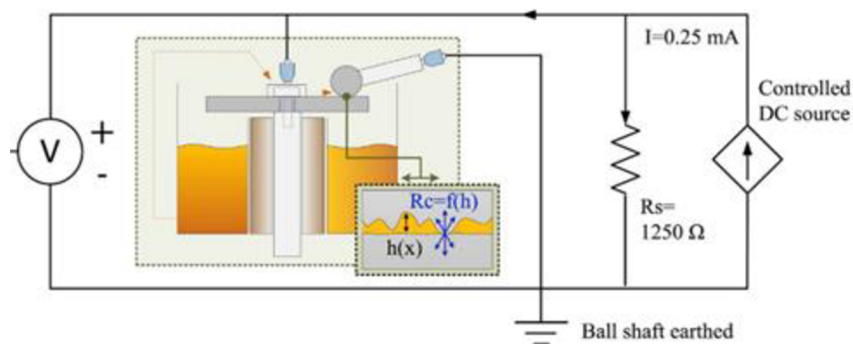
Po vyhledávání v databázích bylo vybráno celkem 11 článků, které byly následně analyzovány a syntetizovány. Ve všech případech se jedná o vědecké články publikované v odborném periodiku. Je mezi nimi zařazeno 8 zdrojů novějšího data (od roku 2015), stejně jako další 3 články starší (z let 2001 až 2011). Samozřejmě existuje i mnoho kvalitních zdrojů, které pochází z doby od 70. minulého století, nicméně pro aktuálnost tématu byly voleny především články z posledních let.

Z pohledu periodika, ve kterém byly články uveřejněny, je četnost omezena na 4 odborné časopisy. U nich došlo k porovnání Impact Factoru, kde mezi nejkvalitnější se řadí Tribology International a Wear. Dalším kritériem pro posouzení kvality a věrohodnosti článku byl H-index autora. U autorů je tento znak podmíněn dobou publikování. Pokud ještě nemají publikovaný dostatečný počet článků a současně tolik citací, h-index dosahuje nižší hodnoty. Autoři s delší dobou publikování, především pak vedoucí výzkumných skupin, pak obecně mívají H-index vyšší. Proto je třeba brát na tento parametr zřetel a vztáhnout jej vždy k danému autorovi a případně porovnat s počtem citací určitého článku.

## 2.2 Kritická rešerše

### 2.2.1 Sumarizace výsledků z jednotlivých informačních zdrojů

Z výsledků je vhodné nejdříve uvést metody, pomocí kterých autoři kontakt experimentálně studovali. V případě studií kruhového kontaktu je použita konfigurace tribometru ball-on-disc [2–7], díky které je zaručený nekonformní kontakt zakřivené plochy na plochu rovinnou. V případě tohoto tribologického systému lze sledovat tloušťku mazací vrstvy pomocí optické interferometrie, jako je tomu v pracích od Morales-Espejela [7], či Bonaventure [6]. Další možností, jak u ball-on-disc tribometru zjistit tloušťku mazací vrstvy, je přístupem elektrického kontaktního odporu (Electric Contact Resistance; ECR) [2–4]. Pomocí ECR metody je také možné měřit tření. Schéma tohoto zařízení je na Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Schéma zařízení ball-on-disc pro měření elektrického odporu v kontaktu (ECR)

Naopak při studiích liniového kontaktu je v mnoha případech [1, 8, 9] použito experimentální zařízení založené na mechanismu dvoudiskového stroje (twin-disk machine), kde je energie recirkulována mezi EHL kontaktem a dvojicí převodů. Z toho důvodu hnací motor překonává pouze třecí a jiné ztráty v systému. Na zařízení je možno vytvořit zatížení, které produkuje Hertzův tlak až 2 GPa. Analogickou variantou je zařízení využívající čtyři disky [10]. Tato zařízení jsou použita především pro studium tření a opotřebení, mazací vrstva není v konkrétních případech analyzována.

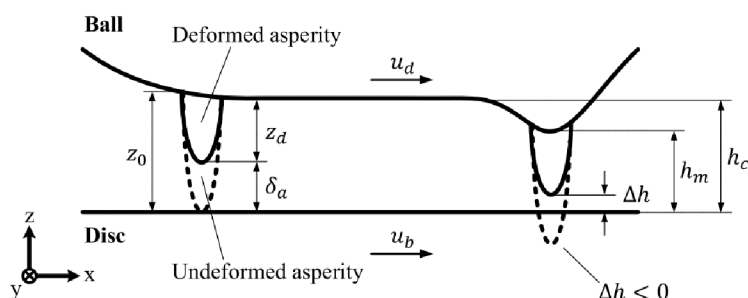
Experimentálním studiem vlivu povrchových transformací drsných povrchů na přechod z mezného (případně smíšeného) mazání do plného elastohydrodynamického mazání (EHL) se zabýval Hansen [3]. Jsou zkoumány různé izotropní struktury s různými amplitudami, a je posouzena změna topografie povrchu v jednom místě před a po testu. Rotační disk je zatížen vůči rotující kuličce pro vytvoření tlaku v nekonformním kontaktu v nižších jednotkách GPa. Každý rotační element je poháněn vlastní jednotkou pro vytvoření různých hodnot prokluzu (slide-to-roll ratio, SRR) v rozsahu od 0 (čistě valení) po 2 (čistý kluz). Hansen v této práci také hodnotil přechod mezi režimy mazání pomocí parametru  $\lambda$ . Zjistil však, že jeho klasická definice není příliš vyhovující pro popis



režimu mazání a při výpočtu dle známé teorie není dostatečný. V následující práci [4] tak došlo k jeho modifikaci a vzniku nového parametru  $\lambda^*$ , který je definovaný jako:

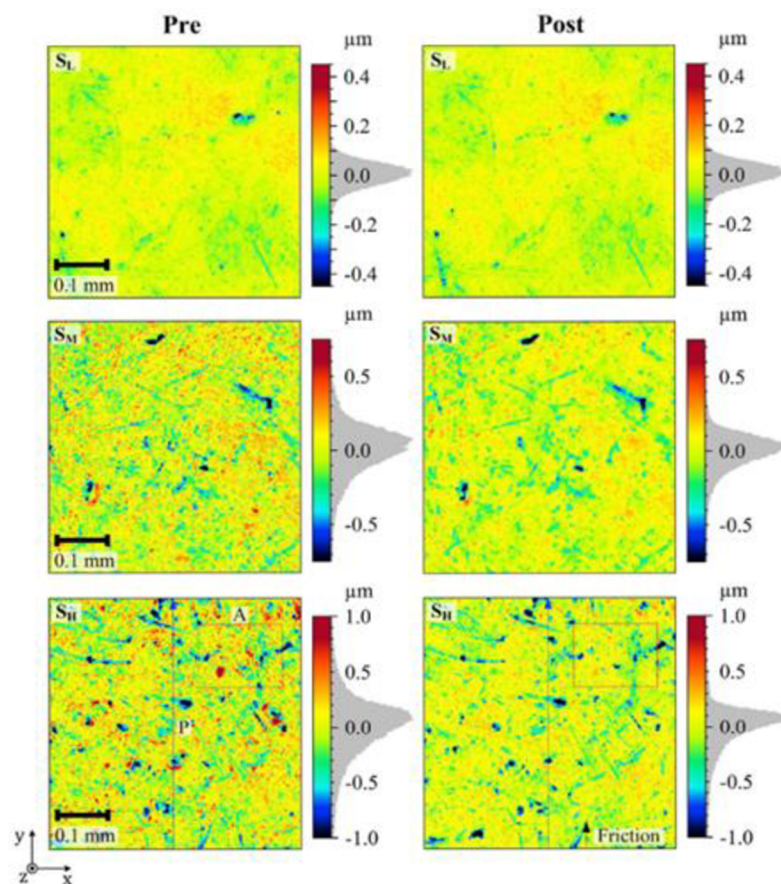
$$\lambda^* = \frac{h_m + \delta_a}{z_0} \quad (1)$$

kde  $h_m$  je minimální tloušťka filmu,  $z_0$  je nezatížená výška vrcholku a  $\delta_a$  je velikost plastické deformace Obr. 2-3.



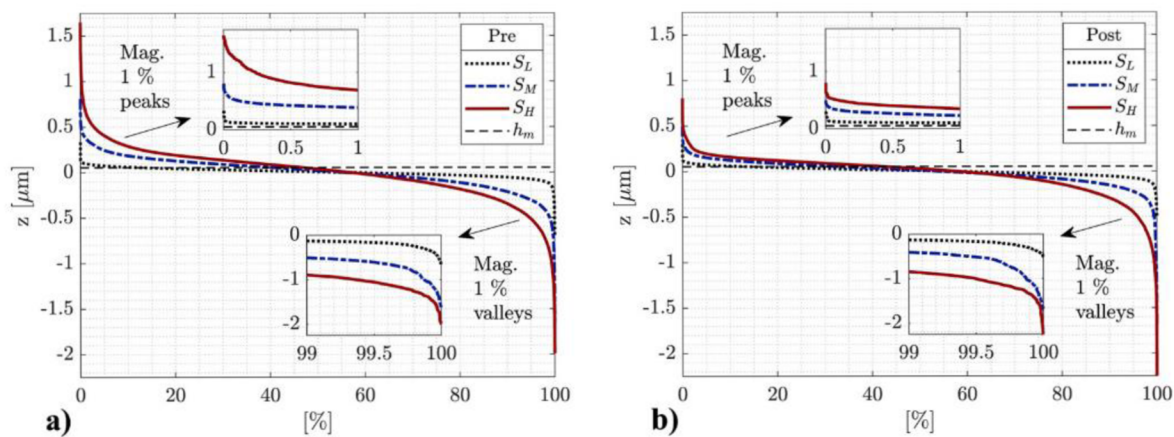
Obr. 2-3 Schéma znázorňující teoretický rámec navrhovaného parametru  $\lambda^*$

Stribeckovy testy v pracích [3, 4] ukázaly, že přestup ze smíšeného mazání na mazání EHD silně závisí na drsnosti povrchu RMS (root mean square). Vliv drsnosti se při nástupu k plnému EHD mazání postupně snižoval. Snižování rychlosti pak naopak mělo za následek dřívější a výrazně intenzivnější zvýšení tření v důsledku pohybu na pomezí smíšeného a mezního režimu mazání. Drsnější povrch potřeboval větší počet cyklů pro záběh. Docházelo k vyšší modifikaci drsnosti povrchu a bylo zaznamenáno větší snížení tření pro ustálený stav. Analýza povrchu po testu ukázala, že hlavní struktura drsnosti zůstává po záběhu stejná a že většina změn topografie se pohybuje na úrovni odstranění nejexponovanějších vrcholků Obr. 2-4 a Obr. 2-5. Prohlubně jsou prakticky nedotčeny. Byla identifikována plastická deformace vlivem normálové síly v kombinaci s mírným opotřebením. Povrchy po testu vykazovaly ve všech případech snížení drsnosti, u nejdřsnějšího o  $< 20\%$  RMS.



Obr. 2-4 In-situ optické profily povrchů před a po testu [3]

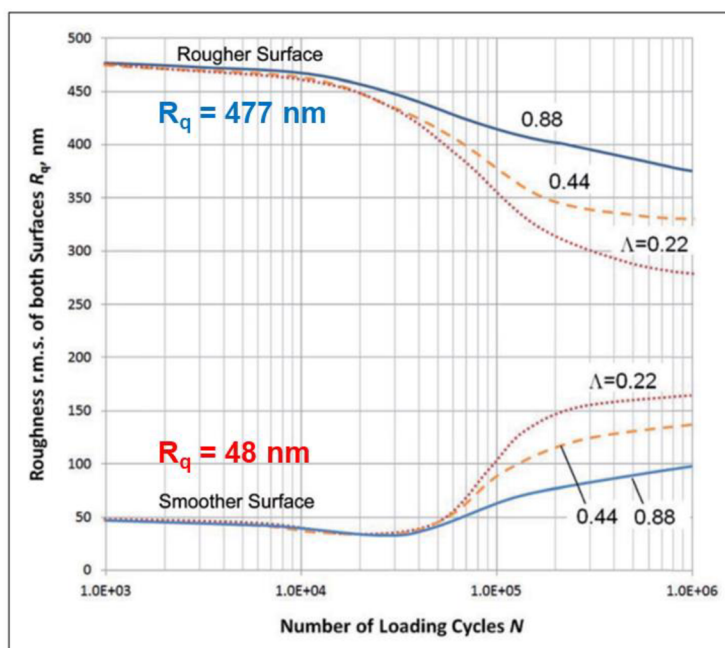
Porovnání in-situ profilů bylo provedeno i z hlediska rozložení výstupků a prohlubní, které popisuje Abbott-Firestonova křivka (Obr. 2-5).



Obr. 2-5 Abbott-Firestonovy křivky před (a), a po testu (b) pro stejnou oblast [3]

Dále Morales-Espejel [10] ukázal, že některé hladší povrchy mají tendenci se v průběhu záběhu zdrsnovat vlivem tvorby mírného opotřebení při vyšším počtu cyklů ( $10^6$ ). Např. u povrchu s původní drsností  $R_q = 49 \pm 2$  nm došlo ke zvýšení parametru na

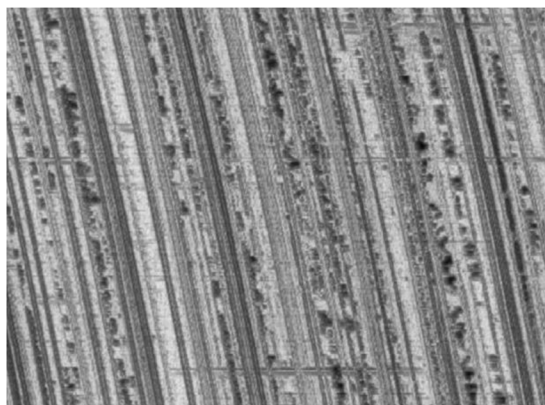
$R_q = 63 \pm 5$  nm. Autor si dal také za cíl zavést model, který dokáže správně modelovat mírné opotřebení na úrovni vrcholů. Ten má za úkol časové sledování změny mikrogeometrie a přidružených tlaků v rámci EHL kontaktu během několika cyklů. Současně sleduje součinitel opotřebení na úrovni mikrogeometrie jako funkci času, s ohledem na vliv mazání. Celkový model mírného opotřebení je konfrontován s laboratorními experimenty. Autor pracuje, mimo jiné, s klasickým parametrem mazání  $\lambda$ . Uvažuje jeho 3 hodnoty,  $\lambda = 0,22$  (mezní režim), 0,44 (smíšený režim) a 0,88 (přechod ze smíšeného do EHD režimu), kterých dosahuje odlišnou viskozitou mazacího oleje. Vývoj těchto povrchů pod stejnými podmínkami můžeme sledovat na Obr. 2-6. Zde ukazuje, že přechod k nižším tloušťkám filmu vede k rychlejšímu vývoji povrchů.



Obr. 2-6 Modelová predikce vývoje drsnosti povrchu [10], upraveno

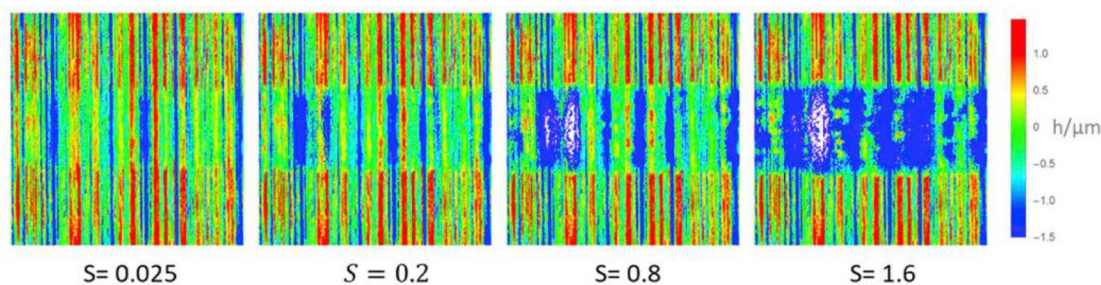
Vliv tvrdosti na změnu topografie povrchu sledoval Clarke [1], kdy pro experiment použil povrchy jak se stejnou velikostí drsnosti, tak povrchy opatřené odlišnou hodnotou velikosti drsnosti. Stejně jako Hansen [3] ukázal, že za daných zkušebních podmínkách je záběh v podstatě procesem plastické deformace, při níž se nerovnosti na kontaktních površích rychle přizpůsobují. Autor ale v testu po vyhodnocení záběhu pokračoval, a studoval mimo jiné vliv plastické deformace nerovností na dlouhodobé únavové procesy povrchu (micropitting). Jako mazivo je v tomto případě použitý minerální olej OEP-80 s EP (Extreme pressure) aditivu. Mazivo opatřené aditivu se více podobá reálně používaným olejům např. v automotive a povrchy jsou díky těmto aditivům více chráněny přímé interakci a opotřebení. Z jeho výsledků vyplývá, že running-in je rychlý proces, kdy se vrcholky nerovností plasticky deformují během prvních několika cyklů zatěžování. Prohlubně zůstávají během procesu nezměněny a vrcholky se zplošťují, což výrazně ovlivňuje rozložení jednotlivých parametrů drsnosti. Po záběhu je kontaktní dvojice

stabilní, pokud však nedojde ke změně provozních podmínek. U kontaktních povrchů, které nemají stejnou tvrdost, dochází k velké plastické deformaci během záběhu na povrchu s nižší tvrdostí. Změna topografie je však také omezena na zploštění nejvyšších nerovností. Plastická deformace se u zkoumaných vzorků jeví jako faktor přispívající k následné poruše povrchů mikropittingem Obr. 2-7.



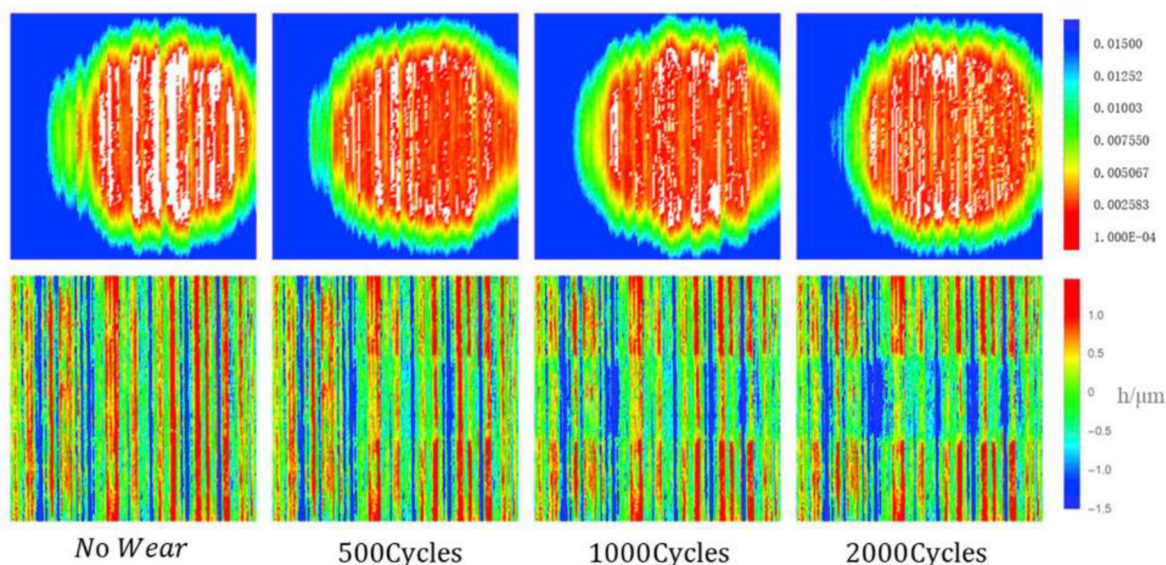
Obr. 2-7 Zvětšený detail dráhy po testu s projevy micropittingu (rozměry cca 0,5 x 1,2 mm) [1]

Povrchy s vyšší drsností ( $R_a < 0,1$ ) jsou také ve studiích popsány [5, 9, 11], především ale z pohledu tření, opotřebení a porovnání povrchu před a po testu. Akbarzadeh [9] sledoval mimo jiné závislost teploty povrchu a součinitele tření na hodnotě SRR. Míra a hloubka opotřebení měly obdobný trend vývoje ve stavu záběhu, tj. oba se zpočátku zvyšují s relativně ostrým sklonem. Jakmile dochází k odstraňování vrcholků a snižování počtu plasticky deformovaných nerovností, snižuje se také sklon křivky pro dané veličiny opotřebení. Pei [5] systematicky popsal vývoj stopy opotřebení, parametr drsnosti RMS a součinitel tření během tvorby opotřebení drsných povrchů. Rovněž jsou zkoumány vlivy zatížení, prokluzu SRR a orientace struktury povrchu. Dráha opotřebení je zcela odlišná při mazaném a suchém kontaktu, v důsledku působení oleje a kontaktní deformace. Součinitel tření nejprve klesá a poté se udržuje stabilní s malými výkyvy s ohledem na vývoj opotřebení. Zatížení a poměr skluzu SRR mají velký dopad na míru opotřebení, zatímco vliv topografie povrchu je omezený. Výsledky [5] ukazují, že drsnost RMS nejprve mírně klesá, poté se ale během procesu opotřebení postupně zvyšuje. Stejného trendu je pozorováno u tření v některých případech.



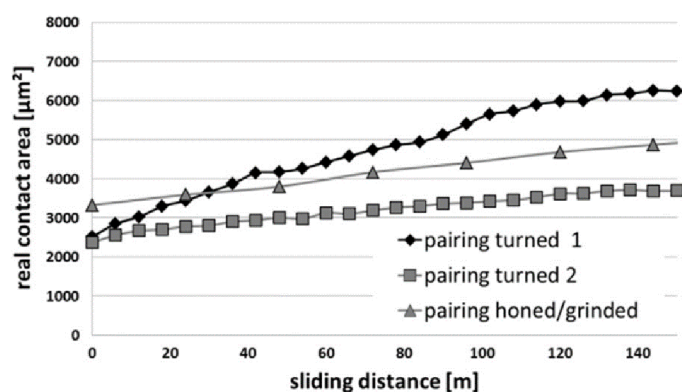
Obr. 2-8 Topografie povrchu disku po testu při různých hodnotách SRR [5]

Autor také pracuje s numerickými simulacemi bodového kontaktu, kdy do analýzy vstupují reálné naskenované povrchy, a je sledována tloušťka mazací vrstvy (Obr. 2-9).



Obr. 2-9 Vývoj mazacího filmu (nahore) a přetvoření povrchu (dole) [5]

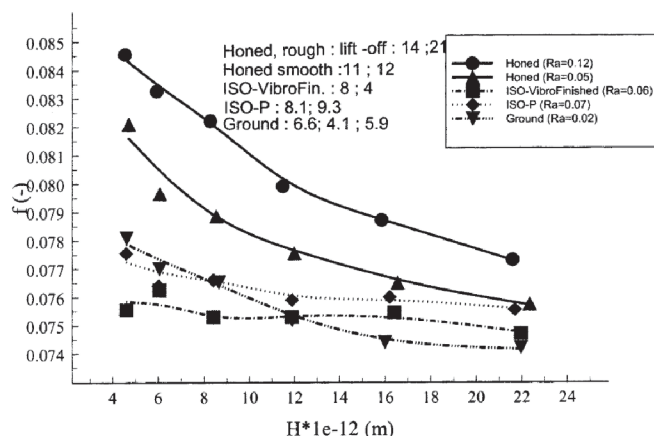
Dalším zdrojem pro popis vlivu drsnosti povrchu na tření a chování při tvorbě opotřebení je studie, kde je vytvořen numerický model s využitím metody konečných prvků [12]. Autor stanovuje numerický výpočet založený na modelu smíšeného mazání, který je rozšířen o vliv tvorby opotřebení. To umožňuje výpočet lokálních hloubek opotřebení na obou kontaktních površích ve stavu bez maziva i s ním. Pro modelování lokálních hloubek opotřebení je využitý upravený Archardův model, podle kterého jsou upraveny povrchové uzly konečnoprvkové sítě. Ačkoliv jsou studovány povrchy vykazující vyšší drsnosti ( $R_a$  0,16 až 1,17), je využitý pouze plošný konformní kontakt, kde je dosaženo nižšího kontaktního tlaku než u nekonformních kontaktů.



Obr. 2-10 Vývoj velikosti kontaktní plochy vyšetřovaných kontaktních dvojic [12]

Lugt [8] charakterizoval tři odlišné způsoby, určené topografií povrchu, podle kterých se chová oddělení povrchů před dosažením plného zaběhnutí. Konkrétní stav závisí na velikosti zakřivení a sklonu povrchových nerovností (vrcholů). U povrchů s více

zploštěnými vrcholy se mazací film formuje vždy lépe při čistém valení. Z hlediska dosažení nízkého tření jsou vhodné poměrně drsné izotropní povrchy, které fungují lépe než povrchy s pravidelnými lineárními rýhami.



Obr. 2-11 Stribeckovy křivky pro jednotlivé experimentální vzorky [8]

## 2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Dle provedené rešerše lze prohlásit, že problematika vlivu topografie povrchu na formování mazacího filmu a tření je velmi komplexním problémem. Experimentální studie, které sledují rozložení tloušťky mazací vrstvy v kontaktu, využívají především tribologickou konfiguraci ball-on-disc. Zde dochází k bodovému, resp. kruhovému kontaktu vystavenému vysokým kontaktním tlakům v řádu nižších jednotek GPa. Pro optické sledování formování mazacího filmu jsou využívány metody na principu optické interferometrie. Zde je tedy kontaktu dosaženo vždy mezi kovovou kuličkou a průhledným (skleněným) diskem, který umožňuje vhled do kontaktní oblasti. Další metodou, díky které je možné určit množství maziva v kontaktu, nikoli však opticky, je metoda ECR využívající kontaktní odpor. S touto metodou pracuje především Hansen a kol. [3]. Pomocí ECR metody je možné pracovat s kontaktní dvojicí, kde jsou obě komponenty vyrobeny s vodivých materiálů, např. z ložiskové oceli. Tato kontaktní dvojice více napodobuje reálné podmínky používané v ložiscích či ozubení.

Naopak optická interferometrie, která je hojně využívanou metodou pro stanovení množství maziva v kontaktu a tloušťky mazací vrstvy v jednotlivých oblastech, naráží u povrchů s vyšší drsností na své limity vycházející z fyzikální podstaty této metody. Vzhledem k tomu, že lze celou kontaktní plochu pozorovat pomocí mikroskopické kamery, je možné vyhodnotit tloušťku mazací vrstvy v jakémkoliv místě. Nejčastěji jsou vyhodnocovány dvě hodnoty, centrální a minimální tloušťka. Metoda přesně pracuje s dobře odrazivými povrchy. Pokud se však na povrchu objevují nerovnosti s vysokou lokální strmostí, data s interferenčními mapami se stávají nevyhodnotitelnými [13].

Transformace topografie povrchu při provozu ve smíšeném a EHD mazání je charakterizována ve studiích [1, 3, 5, 10]. V důsledku se všechny shodují na tom, že hlavní část topografie povrchu zůstává po záběhu stejná, a většina změn se odehrává na úrovni nejexponovanějších vrcholků nerovností v podobě plastické deformace. Z výsledků vyplývá, že proces running-in je rychlý, a napomáhá mu i zvyšování hodnoty prokluzu slide-to-roll ratio (SRR). Se zvyšujícím se poměrem SRR je zvyšována také míra opotřebení a povrchy se vyvíjí rychleji. Charakter vývoje nicméně zůstává poměrně podobný, SRR tedy hraje roli z hlediska času. Po záběhu zůstávají kontaktní dvojice stabilní, nedojde-li ke změně provozních podmínek. Při překročení určitého stadia, které můžeme nazvat životností kontaktu, se setkáváme s iniciačními projevy únavového porušení na úrovni mikrogeometrie (micropitting), které je většinou rychle následováno fatálním porušením.

Clarke [1], stejně jako Hansen [3], ukázali, že povrchy s vyšší drsností se v průběhu záběhu zjemňují. Nicméně v dalších studiích je popsán i opačný vliv [10]. Morales-Espejel pracuje s modelem, který předpokládá nejprve mírný pokles globálního parametru drsnosti  $R_q$ , v následující fázi ale dochází k nárůstu jeho hodnot v důsledku tvorby mírného opotřebení. Na charakter opotřebení má vliv více faktorů. Je to jak samotná drsnost povrchů, tak potom především viskozita a rychlost, které ovlivňují tloušťku maziva v kontaktu a tím pádem i parametr mazání. U těchto experimentů je počítáno s provozem za smíšeného a částečného EHD mazání.

Vylepšený parametr  $\lambda^*$ , formovaný dle Hansena [4], se jeví jako vhodnější pro posouzení kvality mazání při výskytu micro-EHD kontaktu. Pokud povrch vykazuje určité nerovnosti a není téměř ideálně hladký, jeví se jako přesnější. Ve srovnání s klasickým parametrem  $\lambda$  totiž pracuje s elastickou deformací nerovností, resp. příspěvkem EHD. Pokud byl kontakt kuličky na disk provozován za podmínek smíšeného mazání, nový parametr predikoval příspěvek přibližně 60-80 % EHD. Nicméně i přes nejnovější zjištění a zavedení parametru  $\lambda^*$  je starý parametr hojně používaný při konstrukčním návrhu jednotlivých kontaktních uzlů. Proto je také v práci i přes své limity používaný zavedený a dobře známý klasický parametr mazání  $\lambda$ .

Na základě provedené rešerše lze konstatovat závěry, jakým způsobem drsnost povrchu ovlivňuje tření a mazání v nekonformním kontaktu reálných povrchů. Hlavní výsledky plynoucí z rešerše lze shrnout následovně:

- Drsnost povrchu má výrazný vliv na formování mazacího filmu a tření.
- Opotřebení u povrchů vykazující vyšší drsnost je omezeno na plastické přetvoření vrcholků, zatímco charakter prohlubní zůstává nezměněn.
- Na základě tvorby zmíněného druhu opotřebení se výrazně mění rozložení jednotlivých parametrů drsnosti.
- Proces záběhu je nejintenzivnější v prvních fázích, následně dochází k útlumu a ustálení hodnoty součinitele tření.

- Povrchy s vyšší drsností mají tendenci být v procesu záběhu zjemňovány a dochází k poklesu tření. Nejhladší povrchy ale mají za stejných podmínek mazání být zdrsňovány a tření se zvyšuje.

## 2.4 Mezera v poznání

Většina prací dobře popisuje mechanismy, ke kterým dochází u kontaktních dvojic během iniciačních stádií mírného opotřebení a jejich ustálení neboli záběhu. Experimentální studie, při kterých byl umožněn optický vhled do místa kontaktu, využívají k hodnocení tloušťky mazací vrstvy metodu optické interferometrie. Kvůli limitám metody jsou však omezeny na dobře odrazivé povrchy s velmi nízkou drsností ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ ). Povrchy současně musí obsahovat velkou nosnou plochu, aby bylo možné dosáhnout kvalitní kalibrace. Tyto limity není v současné době možné překonat a nabízí se použití jiné metody, která přinese také přesnou představu o tloušťce mazacího filmu. V podstatě neexistují žádné optické snímky kontaktu, které by ukazovali formování filmu u drsných povrchů, které se běžně objevují u ozubených převodů.

Některé studie pracují s předpokladem, že ideálně hladké povrchy jsou odděleny mazacím filmem prakticky okamžitě už při minimální rychlosti, a tření způsobené přímým kontaktem povrchů je tak minimální. Z hlediska výkonnosti se tyto povrchy jeví jako nejlepší. S tímto předpokladem pracují především numerické simulace, které nepočítají s modelem mírného opotřebení pro nejhladší povrchy. Experimentální práce však ukazují, že projevy opotřebení mohou být u hladkých povrchů velmi intenzivní z důvodu kritické tloušťky mazacího filmu. Většina těchto prací však neumožňuje hodnotit tloušťku maziva z důvodu nemožnosti optického vhledu do kontaktu. V tomto případě se nabízí použití jiné metody pro hodnocení tloušťky mazacího filmu a otevření možnosti vhledu do kontaktu i pro povrchy s vyšší drsností, u kterých metoda optické interferometrie naráží na své limity. V ideálním případě by tato metoda neměla být na drsnosti závislá a měla by fungovat dobře i s hladkými povrchy.



## 3 CÍLE PRÁCE

### 3.1 Výzkumné otázky

Výzkumná otázka č.1

Jaký je vliv velikosti drsnosti na dlouhodobé oddělení povrchu mazacím filmem při zohlednění změn topografie během záběhu?

Výzkumná otázka č.2

Jaký vliv má charakter drsnosti povrchu na délku záběhu a ustálenou hodnotu tření?

### 3.2 Cíle výzkumu

Hlavním cílem výzkumu je experimentální zjištění vlivu výchozí struktury povrchu na tření a tloušťku mazací vrstvy. Za kinematických a provozních podmínek simulovaného kontaktu ozubení je sledováno oddělení povrchu mazacím filmem s ohledem na změnu povrchu při procesech záběhu. Jedná se o základní výzkum.

### 3.3 Hypotézy

Hypotéza č.1

Lze předpokládat, že existuje limitní drsnost z hlediska stability vývoje povrchu, která bude odolná vůči změnám způsobených záběhem a povede na dlouhodobě stabilní oddělení třecích povrchů souvislým mazacím filmem. Minimální drsnost bude charakterizována plným oddělením povrchů při zachování své velikosti. U nejnižších hodnot bude pozorováno zhoršení povrchu, zatímco u vyšších drsností bude docházet ke zjemnění povrchu.

Hypotéza č.2

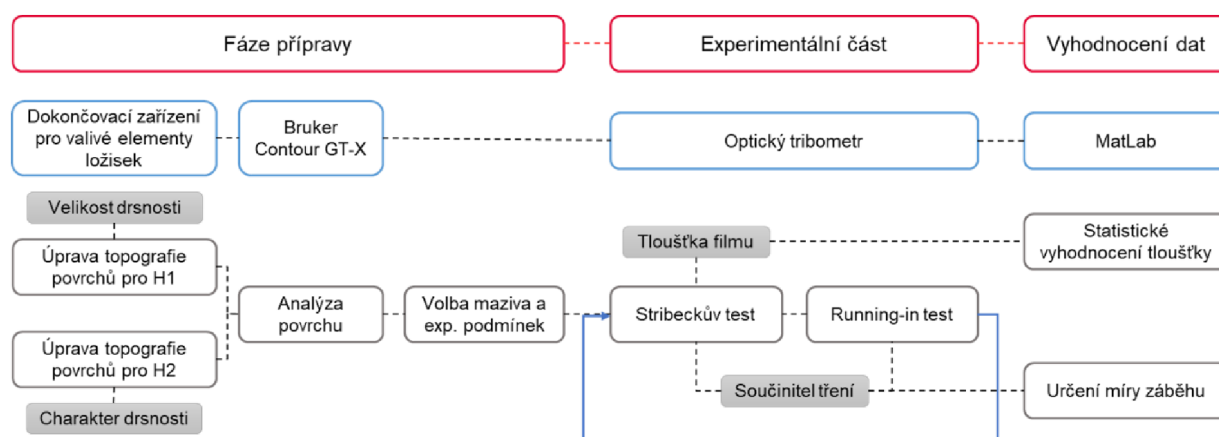
Různé struktury mají odlišný charakter rozložení výstupků a rýh, které popisuje Abbott-Firestonova křivka. Jednotlivé segmenty povrchu jsou vystaveny různým adhezivním a abrazivním účinkům. Výstupky jsou při provozu kontaktu rychle odstraněny, zatímco charakter rýh zůstává nezměněn a zásadně ovlivňuje mazání kontaktu.

## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Metodika

V diplomové práci je zkoumán vliv charakteru a velikosti výchozí drsnosti povrchu na schopnost oddělení mazacím filmem při zohlednění změn povrchu během procesu záběhu. Jedná se o kauzální problém, kdy je sledován příčinný vztah mezi výchozí drsností povrchu a jeho oddělení mazacím filmem. Studium se opírá o simulaci kontaktu v ozubení, kde se setkáváme s reálnými hodnotami drsností povrchů. Určení závislosti je dosaženo pomocí kvantitativní vědecké metody díky experimentálnímu vyšetření s deduktivním přístupem.

Samotná realizace se stává z několika stěžejních fází, které popisuje schéma na Obr. 4-1.



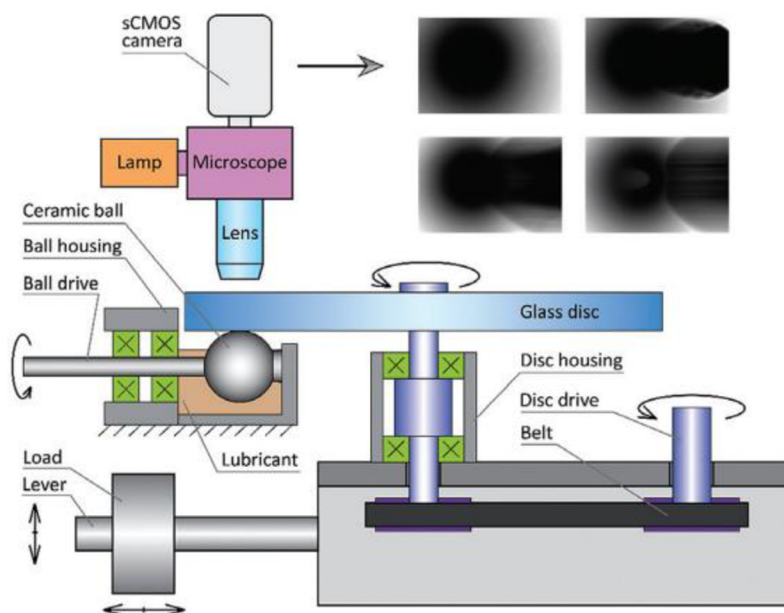
Obr. 4-1 Schéma postupu řešení

### 4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

#### 4.2.1 Optický tribometr ball-on-disc

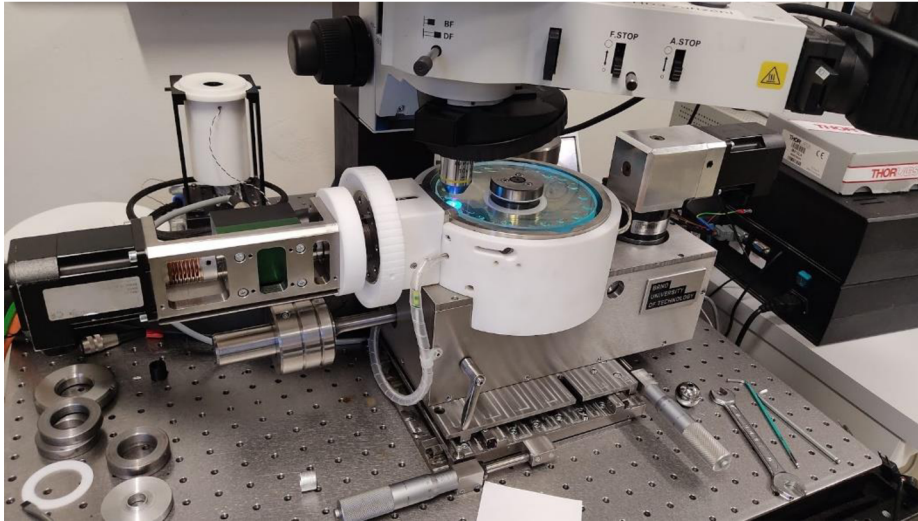
K analýze tloušťky maziva v kruhovém kontaktu je použito upravené zařízení tribometru typu ball-on-disc (Obr. 4-3). Toto zařízení, původně sloužící k optickému pozorování s využitím kolorimetrické interferometrie, bylo upraveno pro účely využití fluorescenční mikroskopie. Na zařízení je utvářen kontakt mezi diskem (skleněným, safírovým či ocelovým) a ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm. Kulička je pro účely upnutí k unášivé hřídeli pomocí šroubového spoje vrtná. Oba rotující elementy jsou poháněny nezávisle na sobě pomocí servomotorů. Díky frekvenčním měničům lze variovat s unášivou rychlostí a

měnit tak hodnotu prokluzu SRR. Zatížení v kontaktu je dosaženo pomocí závaží umístěného na dvojzvratné páce. Schéma zařízení je na Obr. 4-2.



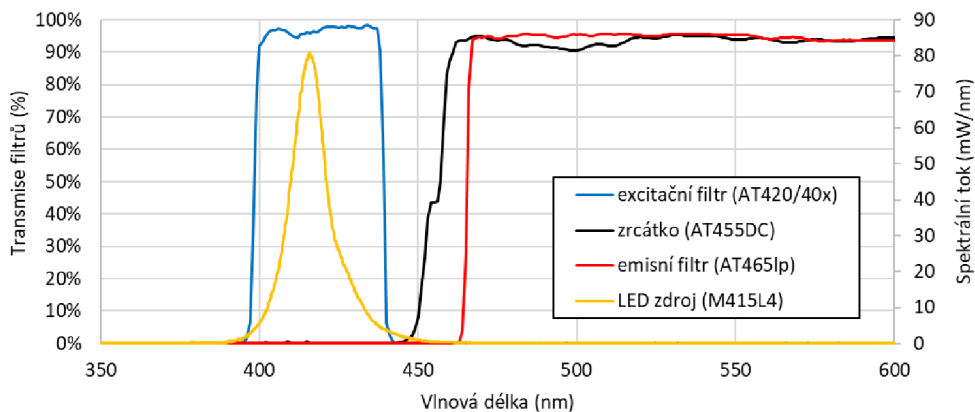
Obr. 4-2 Schéma optického tribometru ball-on-disc [14]

Další nedílnou součástí zařízení je sestava optického systému, díky kterému je možné v reálném čase pozorovat místo styku a okolí kontaktu. Optický systém se skládá z mikroskopu, fluorescenční kamery a světelného zdroje. Paprsek od zdroje světla prochází přes aperturní a polní clonu. Pomocí aperturní clony je možné omezit svazek paprsků a regulovat tak intenzitu propouštěného světla. Polní clona slouží k omezení excitované oblasti v zorném poli. Dále světelný paprsek prochází modulem, který obsahuje emisní a excitační filtr a polopropustné zrcátko. Poté svazek putuje přes objektiv do místa kontaktu. Vyzářená emise pak prochází objektivem zpět přes modul s filtry do snímače kamery. Použitý zdroj LED (Thorlabs M415L4) produkuje světelné spektrum se středem při vlnové délce 415 nm (Obr. 4-4).



Obr. 4-3 EHD Rig upraven pro účely fluorescenční mikroskopie

Součástí zařízení je sestava fluorescenčních filtrů Chroma 19001 – AT – Aqua Longpass. Ta obsahuje excitační a emisní filtr spolu s polopropustným zrcátkem, a ze světelného zdroje propouští pouze vlnové délky v okolí 420 nm (Obr. 4-4). Po průchodu světla excitačním filtrem dochází k odrazu paprsku od polopropustného zrcátka přes objektiv do kontaktu, kde dochází k jeho absorpci fluorescenčním barvivem v mazivu. Poté dochází k emisi vyzářeným barvivem zpět do objektivu a vzhledem k vyšší vlnové délce toto světlo prochází polopropustným zrcátkem a emisním filtrem do snímáče kamery. Monochromatická kamera s označením FLIR Blackfly<sup>®</sup> S (BFS-U3-51S5M-C) pak zpracovává obraz pomocí CMOS snímáče s rozlišením 2448×2048 pixelů s hloubkou 12 bit. Každému pixelovému bodu je tedy přiřazena hodnota v rozsahu 0 až 4096, odpovídající intenzitě emitovaného světla.



Obr. 4-4 Graf transmise fluorescenčních filtrů AT 19001 se zobrazených spektrem LED zdroje [15, 16]

## 4.2.2 Optický 3D profilometr

Pro bezkontaktní měření topografie povrchu a vyhodnocení parametrů drsnosti byl použit 3D optický profilometr ContourGT-X německé firmy Bruker. Jedná se o pokročilý interferometrický profilometr a obsahuje vlastní ovládací software Vision64. Nabízí použití zvětšení 2x, 5x, 10x, 20x, 50x a vertikální rozlišení 0,01 nm. Skenovací rozsah v ose z je 0,1 nm až 10 mm a dosahuje maximální skenovací rychlosti  $92,5 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Povrchy kuliček s vyšší drsností jsou měřeny pomocí metody VSI (Vertical Scanning Interferometry). Jsou vyhodnocované plošné parametry drsnosti  $S_q$ , parametry pro A-F křivky (SK, Spk a Svk), hybridní parametry  $S_{dq}$ ,  $S_{sc}$  a prostorový parametr  $S_{al}$ .



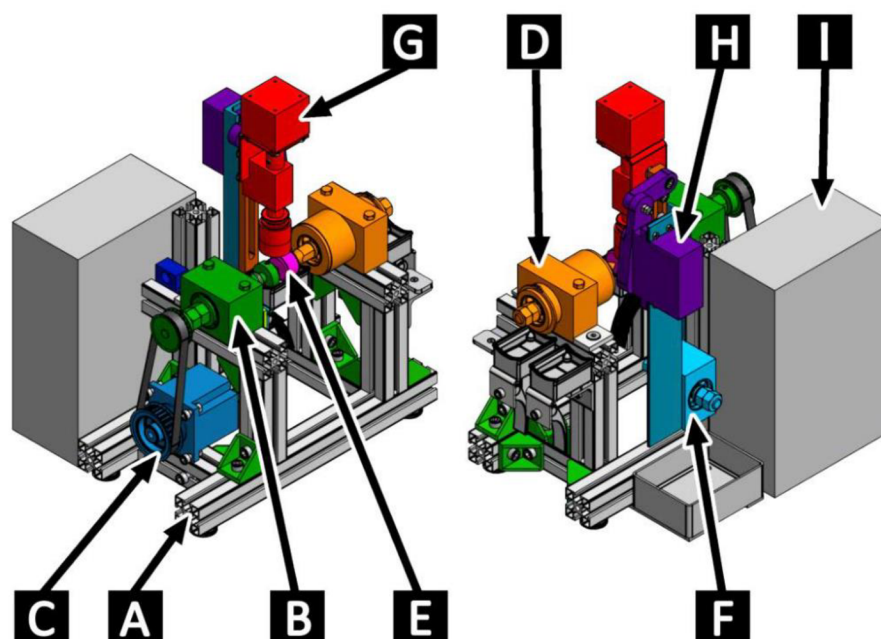
Obr. 4-5 Optický profilometr Bruker ContourGT-X

## 4.2.3 Zařízení pro dokončování povrchu elementů ložisek

Pro řízenou úpravu povrchu vzorků a dosažení cílených struktur bylo využito zařízení pro dokončování povrchu soudečků a kuliček, jež je výsledkem diplomové práce na Odboru tribologie ÚK z roku 2015 [17]. Na zařízení je možné kombinovat dokončovací obráběcí metody jako je broušení, lapování a abrazivní leštění. Konstrukce zařízení a jeho funkční možnosti jsou detailně popsány v DP [17]. Schéma zařízení zobrazující jeho hlavní prvky je na Obr. 4-6.

Zařízení využívá rotačního pohybu obrobku (kuličky upnuté na hřídeli) a současné rotace nástroje, případně doplněné o kyv nástroje. Kombinací těchto pohybů je docíleno souvislého dokončování zakřivené plochy (vrchlík kuličky). Na povrchu kuličky je vytvořen pás o šířce cca 5 mm s novou strukturou povrchu. Pro vytvoření vzorků v této DP byla využita celá řada obráběcích nástrojů. Jsou jimi ocelové piny, na které je možné pomocí vteřinového lepidla fixovat brusné papíry různých zrnitostí, dále hliníkové a

plastové nástroje pro lapování pomocí brusných past, a nakonec nástroje s leštícím filcem pro dosažení nejhladších povrchů.

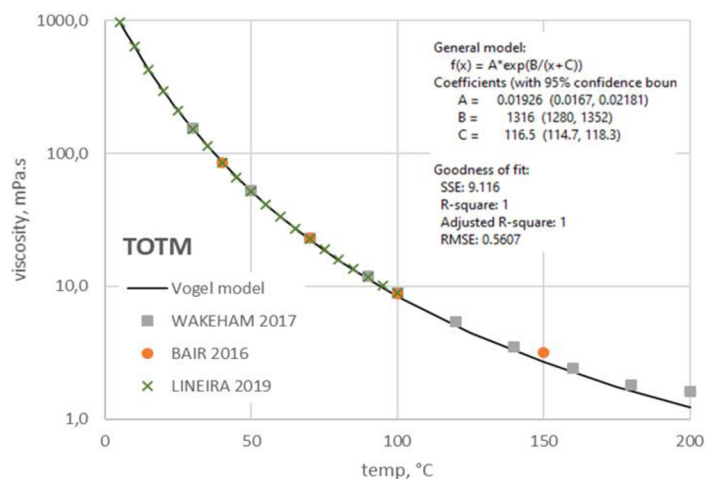


Obr. 4-6 Model zařízení. (A) rám; (B) domek upínacího hrotu; (C) ozubený řemen; (D) domek druhého trnu; (E) obráběný element (soudeček/kulička); (F) domek čepu (osa kyvu); (G) podsestava nástroje a motoru; (H) servo; (I) skříň elektroniky [17]

## 4.3 Materiál a testovací podmínky

### 4.3.1 Použité mazivo – TOTM

Pro hlavní část experimentů byla jako mazivo použita látka Trioctyl Trimellitate (TOTM). Jedná se o vysokomolekulární rozvětvený uhlovodík, který se v průmyslu používá jako změkčovadlo u polymerních aplikací. Dále nachází své uplatnění jako základový olej nebo příměsově aditivum v motorových olejích, kompresorových olejích či plastických mazivech [18]. Jedná se o vhodnou referenční látku pro experimenty v základním výzkumu orientovaném na EHD mazání, která nabízí vhodný rozsah viskozit v závislosti na teplotě. Pomocí temperování vany tribometru je dosaženo rozsahu dynamické viskozity v rozmezí 0,005 až 0,24 Pa · s. Viskozitní model byl získán na základě dat z článků [19–21] a je zobrazen v grafu na Obr. 4-7.



Obr. 4-7 Teplotně-viskozitní model Trioctyl Trimellitate (TOTM)

### 4.3.2 Kontaktní dvojice

Pro sledování záběhu je využito kontaktní dvojice ocel-ocel. Jak kuličky, tak disk jsou vyrobeny z kalené ložiskové oceli 100Cr6. Zatímco na kuličkách byly vytvořeny reálné inženýrské povrchy s izotropní strukturou, disk je broušený a leštěný pro dosažení minimální drsnosti blízké nule. Reálná hodnota velikosti drsnosti, které bylo na disku dosaženo, je  $S_q = 6,8$  nm. První sada vzorků byla upravena brusnými papíry SiC s různou hrubostí, pomocí kterých je dosaženo různé velikosti drsnosti dle kvadratické odchylky profilu  $S_q$ . Výčet vzorků s naměřenými hodnotami je znázorněn v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Přehled vzorků pro hlavní měření s uvedeným parametrem  $S_q$

Označení	Použitý papír	Další úprava	Drsnost $S_q$ (nm)
BH1_01	#320	/	246
BH1_02	#400	/	143
BH1_03	#1200	/	73
BH1_04	#3000	/	66
BH1_05	#5000	/	34
SMOOTH	/	Leštění <sup>1</sup>	3,6
BH2_01	#320	Lapování <sup>2</sup>	86
BH2_02	#600	Leštění <sup>3</sup>	86

<sup>1</sup> Vzorek leštěný pro dosažení nejnižší drsnosti za použití abrazivních past (postupně 5/3;3/2;1/0),

<sup>2</sup> Vzorek lapovaný pomocí hliníkového nástroje za použití pasty 5/3)

<sup>3</sup> Vzorek leštěný filcem bez abrazivní pasty za přívodu Isopropylalkoholu (IPA)

### 4.3.3 Stanovení provozních podmínek

Jak bylo zmíněno, pro sledování tření a ustálení během záběhu byl využitý ocelový disk 100Cr6. Pro měření tloušťky a umožnění vzhledu do kontaktu je používán safírový disk, který díky své vysoké tvrdosti umožňuje dosažení stejného Hertzova kontaktního tlaku, jako v případě oceli.

Tab. 4-2 Materiálové vlastnosti kontaktních dvojic

Materiál disku	Modul pružnosti E (GPa)	Poissonův poměr $\mu$ (-)	Zatížení $F_N$ (N)	Hertzův tlak $p_H$ (GPa)
Ocel	206	0,3	65	1
Safír	395	0,25	38	

Kontakt je provozován za podmínek vycházejících z teoretické predikce podle klasické definice parametru mazání:

$$\lambda = \frac{h_c}{\sqrt{Sq_1^2 + Sq_2^2}} \quad (2)$$

kde  $h_c$  je centrální tloušťka mazacího filmu a vztah  $\sqrt{Sq_1^2 + Sq_2^2}$  vyjadřuje kompozitní drsnost kontaktních povrchů.

Tloušťka mazacího filmu  $h_c$  je predikovaná pomocí Hamrock-Dowson formule: [22]

$$h_c = 2,69 \cdot G^{0,53} \cdot U^{0,67} \cdot W^{-0,067} \cdot (1 - 0,61e^{-0,73k}) \quad (3)$$

$$k \approx 1,03 \left( \frac{R_Y}{R_X} \right)^{0,64} \quad (4)$$

$$R_Y = R_X \quad (5)$$

$$G = \alpha_p E' \quad (6)$$

$$U = \frac{\eta u}{E' R_X} \quad (7)$$

$$W = \frac{F}{E' R_X^2} \quad (8)$$



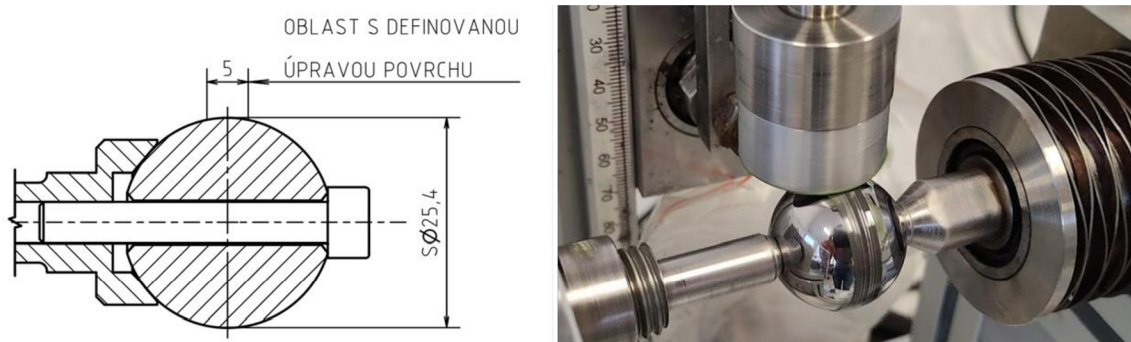
U hlavní části experimentů bylo cíleno na stejnou hodnotu parametru  $\lambda = 1 \pm 0,05$ . Aby toho bylo dosaženo napříč vzorky, tj. aby bylo dosaženo požadovaných tloušťek  $h_c$ , a zároveň střední unášivé rychlosti  $u$  zůstali napříč vzorky stejné, proměnnou veličinou u stanovení podmínek je pouze dynamická viskozita oleje  $\eta$ .

## 4.4 Metody

### 4.4.1 Příprava vzorků

Vzorky připravené pro hlavní experimentální část zahrnují sadu povrchů s různou velikostí drsnosti dle Sq. Další sada, vztahující se k druhé hypotéze, cílí na vzorky se stejnou velikostí parametru Sq, zatímco nese odlišný charakter dle dalších parametrů hodnotící drsnost. Těmi jsou jednak parametry vycházející z A-F křivek (SK, Spk a Svk), pro hodnocení ale byly z důvodu detailnější analýzy použity také další hybridní parametry.

Povrch ložiskových kuliček o průměru 25,4 mm je opracován brusnými papíry z karbidu křemíku (SiC) o různých zrnitostech. K broušení dochází na zařízení pro úpravu povrchu kuliček a soudečků [17] na oblasti dle Obr. 4-8.



Obr. 4-8 Postup vytvoření povrchů s nerovnostmi

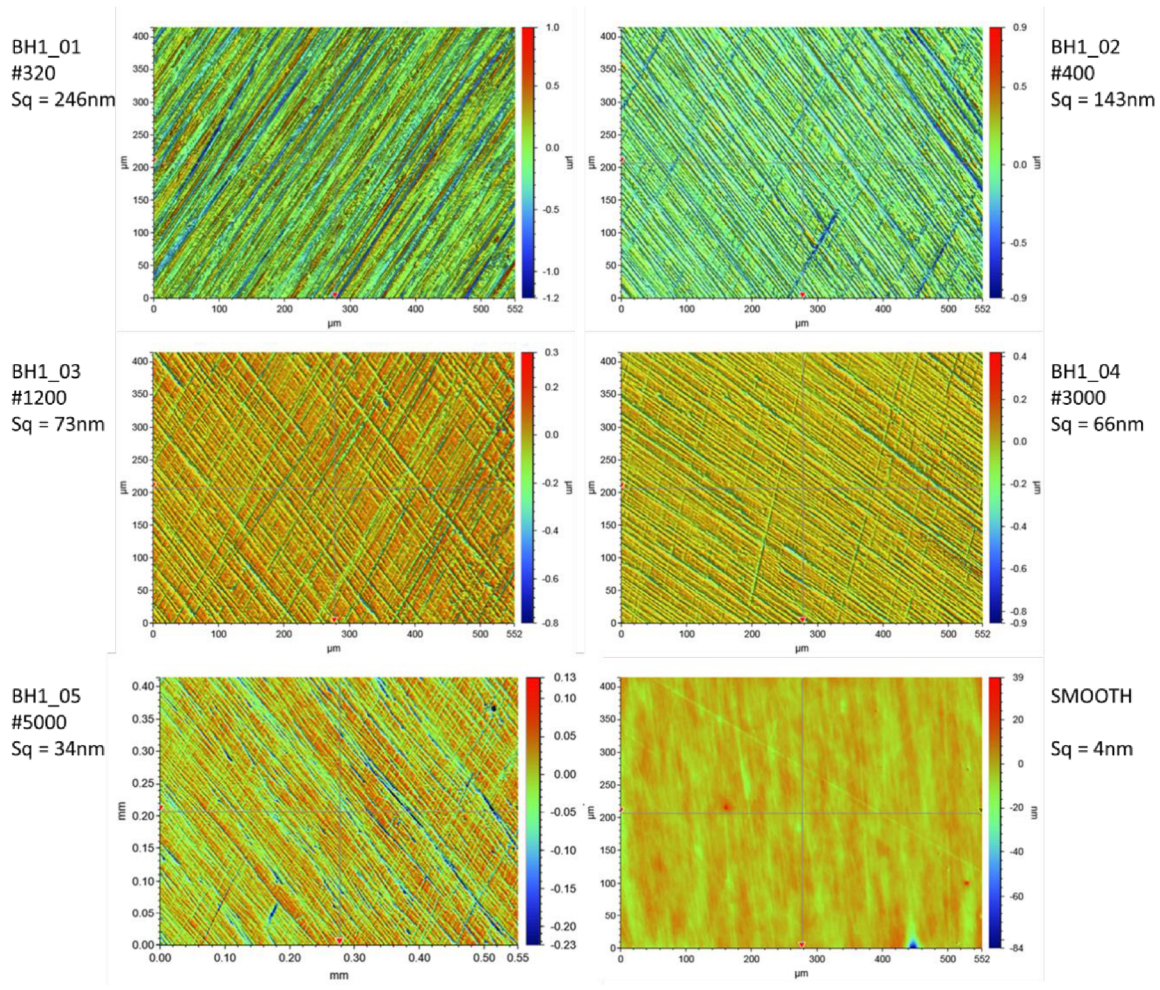
Proces přípravy povrchů kuliček, označených BH1\_01 až BH1\_05 (Tab. 4-1) byl následovný. Po důkladném očištění byly surové ložiskové kuličky (Grade 16, dle ISO 3290) pomocí svěrných kuželů upnuty na zařízení. Na nástroj, jehož základ tvoří ocelový pin, byl pomocí vteřinového lepidla nalepen nový kus brusného papíru dané zrnitosti. Po zahájení otáček došlo ke spuštění nástroje a k jeho styku s obrobkem pod zatížením, které zajišťuje závaží na horní straně kyvné páky. Pro odplavování abradovaných částic byl do kontaktu přiváděn isopropylalkohol. Tento proces byl pro každý povrch několikrát iterován pro dosažení požadovaného výsledku na zkušebních vzorcích. Po odladění procesu došlo k aplikaci metody na finální používané kuličky. Brusný papír měl především u vyšších zrnitostí (#1200 a víc) snahu se velmi rychle zanášet abradovanými částicemi, a při delším broušení docházelo k vyhlazování broušeného

povrchu. Naopak pokud byl vzorek vyjmut moc brzy, byly na kuličkách známky vyrytých drah, jejichž výšky byly nominálně větší než okolní profil povrchu. Nedošlo tedy ke kompletní transformaci původního povrchu. Dále se ukázalo, že papíry různých výrobců vykazují různý charakter při stejných provozních podmínkách.

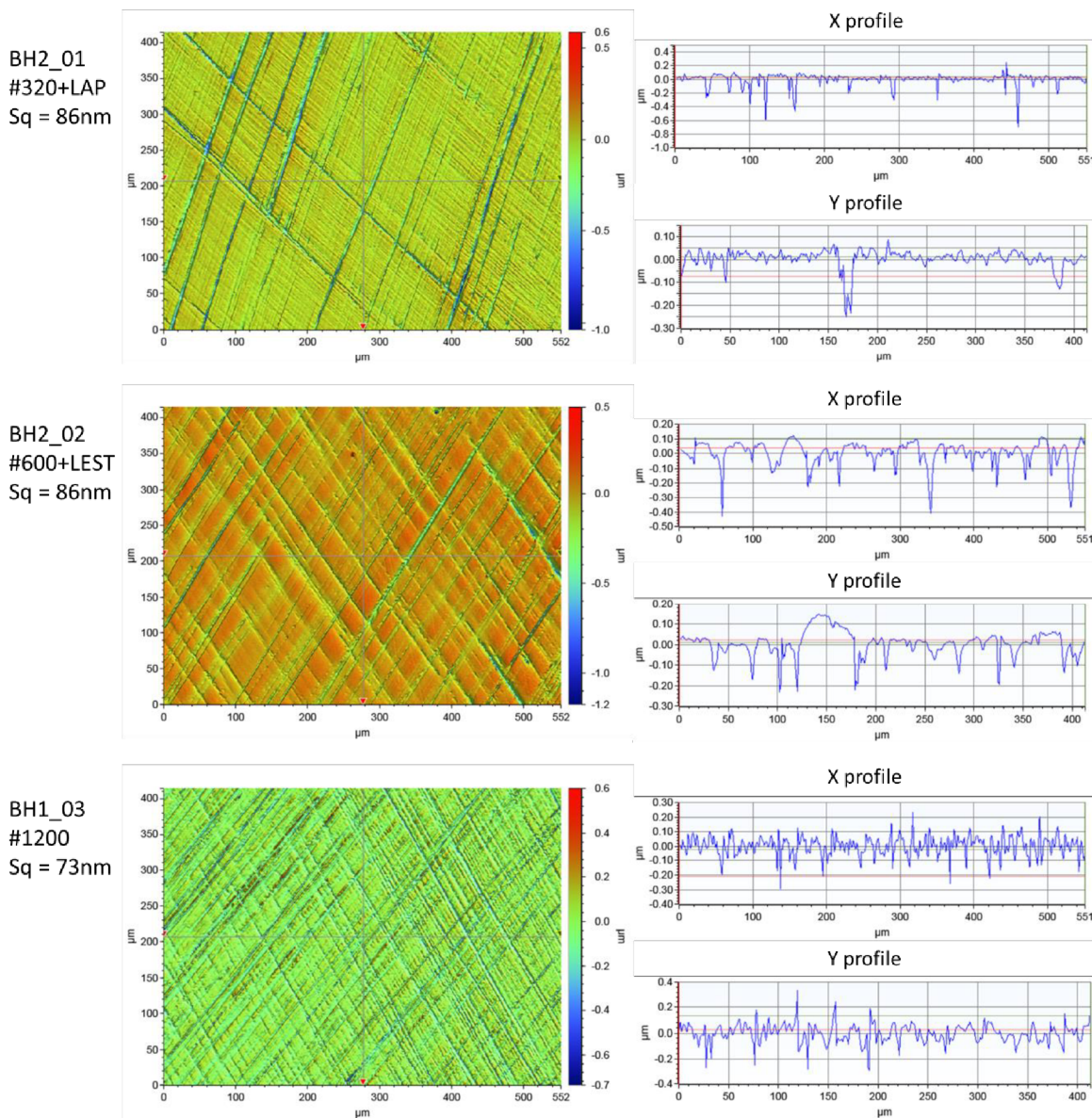
Další povrchy vzorků, označených BH2\_01, resp. BH2\_02 jsou vytvořeny za pomoci broušení a následného lapování, resp. leštění. Lapování vzorku BH2\_01 probíhalo s pomocí hliníkového nástroje a abrazivní pasty s hrubostí 5/3. Vzorek BH2\_02 je nejprve broušen pomocí papíru #600 a následně leštěný filcem za přívodu IPA. Tímto rozdílným způsobem byly vytvořeny dva vzorky, které dosahují stejné průměrné hodnoty střední kvadratické odchylky povrchu  $S_q$ , jejich charakter je však odlišný (Obr. 4-10).

#### 4.4.2 Měření topografie

Pomocí optického profilometru Bruker CountourGT-X byly změřeny připravené povrchy kuliček pro určení parametrů drsnosti. Měření topografie probíhalo vždy v 10 bodech pomocí metody VSI. Použitý byl objektiv 20x s předsádkou 0,55x, pomocí kterého měla snímaná a vyhodnocovaná oblast velikost cca 0,55x0,42 mm. Pro zjištění drsnosti došlo k odfiltrování tvaru a vlnitosti dle ISO 16610 s použitím Gaussova regresního filtru ve výrobci dodávaném softwaru Vision64. Z hlediska velkého množství dat bylo přistoupeno k souhrnnému vyhodnocení pomocí vyhodnocovacího skriptu a logování do připravené databáze. Ze získaných dat byly vyhodnoceny aritmetické průměry a směrodatné odchylky. Snímky povrchů s různou velikostí drsnosti dle  $S_q$  lze pozorovat na Obr. 4-9, povrchy s různým charakterem drsnosti jsou pak součástí Obr. 4-10.



Obr. 4-9 Topografie povrchu kuliček sady BH1



Obr. 4-10 Topografie povrchu kuliček sady BH2 s uvedenými XY profily

#### 4.4.3 Příprava oleje

Pro zkoumání tloušťky mazacího filmu pomocí fluorescenční mikroskopie je možné využít přirozené fluorescence minerálního základového oleje. Avšak z důvodu použití syntetického maziva a zajištění jeho fluorescenční emise je přistoupeno k obarvení oleje pomocí fluorescenčního barviva Coumarin 6 o koncentraci 0,02 hm%. Barvení probíhá nejdříve rozpuštěním přesného množství prášku v polárním rozpouštědle (ethanol či isopropylalkohol), které je následně smícháno s olejem a za stálého míchání a zahřívání odpařeno. Pokud je dosaženo úplného odpaření alkoholu, tedy je dosaženo původní hmotnosti oleje, je proces barvení ukončen. Výsledný roztok obsahuje pouze základový

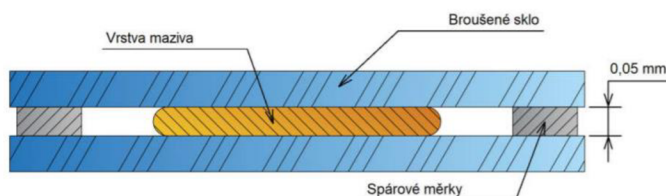
olej s přesnou koncentrací barviva. Tento proces obarvení je časově náročný a na jeho přípravu je třeba vyčlenit několik hodin.



Obr. 4-11 Proces obarvení oleje pomocí fluorescenčního barviva Coumarin 6

#### 4.4.4 Kalibrace fluorescenční kamery a měření tloušťky

Obraz intenzitního pole je před kalibrací nehomogenní z důvodu nehomogenního rozložení světelného zdroje a vlivu optických prvků v mikroskopu. Kompenzace na konstantní intenzitní pole (flatfield) probíhá na prostředí s konstantní tloušťkou maziva 0,05 mm, kterého je dosaženo pomocí jednoduchého přípravku (Obr. 4-12). Sejmутý snímek slouží v softwaru kamery  $\mu$ Manager pro korekci a homogenizaci konstantního pole. Po zavření clony zdroje světla je ještě sejmутý snímek pozadí (background), který je také v softwaru aplikován. Obarvené mazivo mezi sklíčky produkuje určitou intenzitu fluorescence, která odpovídá její tloušťce. Z důvodu, že takto vysoké tloušťky (0,05 mm) nebudou měřeny, je emise putující do kamery snížena pomocí ND filtrů 1/32. Poté je expozice snímáče kamery nastavena tak, aby produkované intenzitní spektrum bylo na úrovni maxima bitového rozsahu kamery (4096 hladin). Tímto způsobem dochází ke snížení kalibračního rozsahu na cca 1,5  $\mu$ m tloušťky.



Obr. 4-12 Přípravek pro kalibraci na flatfield [23]

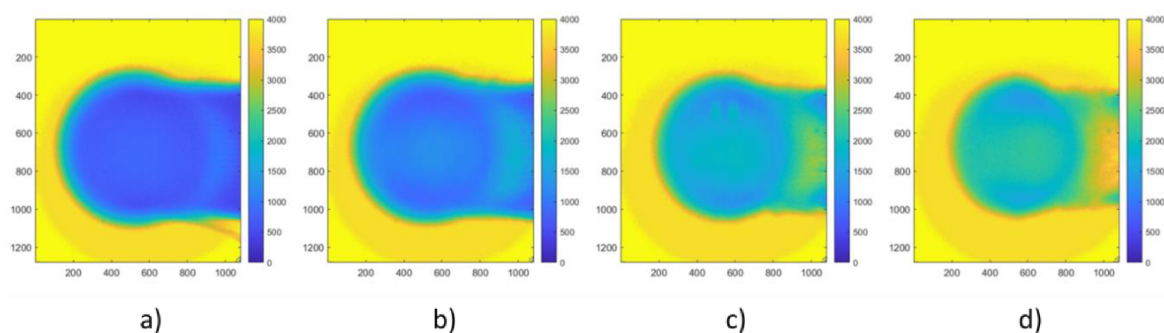
Vyhodnocení tloušťky bylo provedeno z intenzitních map, získaných pomocí fluorescenční kamery. Ze snímků byly získány obrazy intenzity emitovaného světla, které byly podle rovnice (9) přepočteny na tloušťku maziva v kontaktu:

$$h = k \cdot \phi_{em} - q \quad (9)$$

kde  $h$  je tloušťka mazacího filmu,  $\phi_{em}$  je intenzita emitovaného světla,  $q$  je posun signálu a  $k$  je koeficient lineárního zesílení.

Měření probíhalo vždy v minimálně 10 bodech, aby došlo ke statistickému vyhodnocení. Z důvodu zpracovávání velkého množství dat bylo přistoupeno k co nejvyšší míře zjednodušení práce pomocí skriptování. Tomu je provedeno jak v softwaru ovládání kamery a získávání snímků ( $\mu$ Manager), tak u programu sloužícího k měření tření (Achilles) a řízení pohonů tribometru (Acontrol). Díky přesně definovanému skriptu je čas provozu napříč jednotlivými vzorky stejný, a bylo tak možné jejich vzájemné porovnání z hlediska záběhu.

V prostředí Matlab je vytvořen skript, do kterého vstupují snímky z kamery ve formátu .tiff s 12bitovým rozsahem. Skript pracuje s celou sérií měření, kde je průměrná intenzita vyhodnocována z definované kruhové oblasti (poloměr 200 px). Po spuštění skriptu dochází k ručnímu zadání středu kruhového kontaktu. Dále dochází k vytvoření matice, která slouží k maskování vyhodnocované centrální kruhové oblasti. Výstupem je tabulka průměrných hodnot intenzity fluorescenčního signálu z každého snímku. S daty je dále pracováno v prostředí MS Excel.



Obr. 4-13 Snímky hladkého kontaktu z fluorescence; a) 50 mm/s; b) 150 mm/s; c) 400 mm/s; d) 600 mm/s

#### 4.4.5 Měření tření

Součinitel tření je získán pomocí snímání kroutícího momentu na hřídeli kuličky pomocí snímače umístěného za podpůrnými ložisky. Malou složku snímaného momentu tvoří parazitní moment od ložisek hřídele, který je separátně změřen a při vyhodnocení odečten. Jeho hodnota je snímána při nezátíženém stavu pro dané rychlostní podmínky. Snímaná

data momentu jsou zaznamenávána v programu Achilles s 2sekundovým průměrovacím oknem. Hodnota součinitele tření je získána pomocí přepočtu:

$$\mu_{celk} = \frac{(M - M_r)}{r \cdot F_N} \quad (10)$$

kde  $\mu_{celk}$  je součinitel tření,  $M$  je měřený moment,  $M_r$  je parazitní moment od ložisek,  $r$  je poloměr kuličky a  $F_N$  normálová síla.

## 4.5 Testované predikce

Při provozu simulovaného kontaktu je možné ze sledování průběhu součinitele tření v čase vyhodnotit záběh povrchů. Při tomto procesu dochází ke změně povrchů z hlediska velikosti drsnosti a distribuce výstupků a rýh. Na změně povrchu je závislé formování mazacího filmu a oddělení třecích ploch souvislou vrstvou maziva. U povrchů vykazujících vyšší drsnost je predikce taková, že po záběhu dojde ke zlepšení třecích vlastností, zatímco povrchy s nejnižší drsností budou vykazovat zhoršení. Před záběhovým testem a po něm dojde ke změření tloušťky maziva v kontaktu a bude určena změna v závislosti na přetvoření povrchu po testu.

V první sérii testů, týkající se hypotézy H1, jsou povrchy opatřeny topografií s rozdílnou velikostí střední kvadratické odchylky povrchu  $S_q$ . Tyto vytvořené vzorky budou provozovány za stejných podmínek smíšeného mazání dle klasického parametru mazání ( $\lambda = 1$ ) a vzájemně porovnané. Provozní podmínky (rychlost, zatížení, skluzová dráha, délka testu) zůstávají napříč vzorky stejné. Jediný parametr, který bude při provozu měněn, je dynamická viskozita maziva. Rozdílné viskozity jednoho maziva při stejných rychlostních podmínkách je dosaženo pomocí změny teploty.

Druhá série testů se týká hypotézy H2. Zde jsou připraveny vzorky, u kterých je záměrem dosažení stejné hodnoty parametru drsnosti  $S_q$ . Povrchy však vykazují odlišný charakter drsnosti dle dalších parametrů hodnotících drsnost. Podmínky pro provoz jsou stejné jako u předchozího měření.

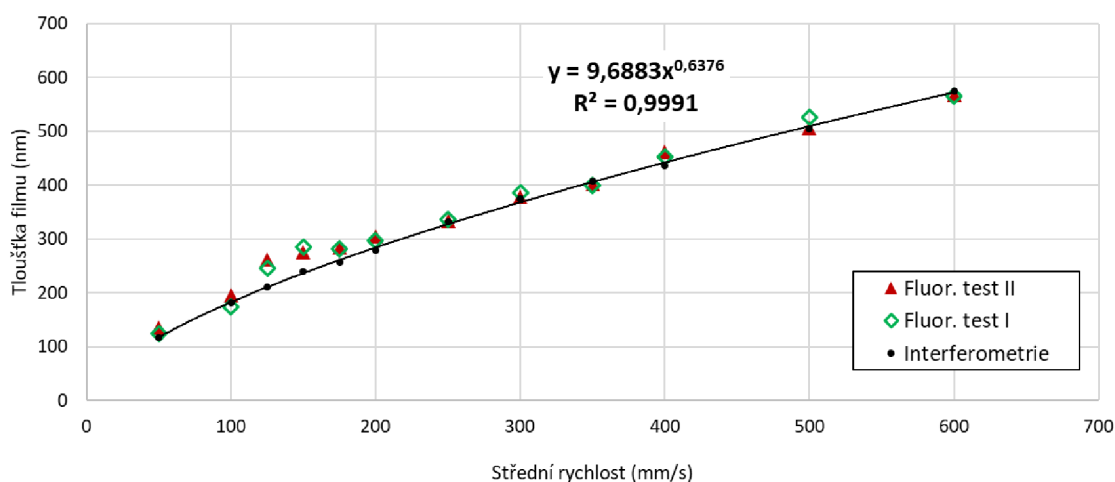
## 5 VÝSLEDKY

V této kapitole diplomové práce jsou nejprve popsány výsledky z vývoje metody měření tloušťky mazacího filmu pomocí fluorescenční mikroskopie. Protože je práce díky aplikaci této metody na konfiguraci ball-on-disk tribometru pro povrchy s reálnými nerovnostmi ve své podstatě první a unikátní, bylo věnováno nezbytné úsilí pro vývoj měřicí metody. Dalšími významnými parametry, které byly zkoumány, jsou topografie povrchu a součinitel tření. Nejprve jsou představeny výsledky z hlavní části měření, jehož mechanismus sestavení je napříč vzorky stejný. Experimenty probíhaly za stejných provozních podmínek, jako jsou střední rychlosti, skluz, kontaktní tlak a parametr mazání lambda. V další části jsou blíže zkoumány další vlivy za jiných podmínek.

### 5.1 Vývoj měřicí metody

#### 5.1.1 Konfrontace s interferenčním měřením

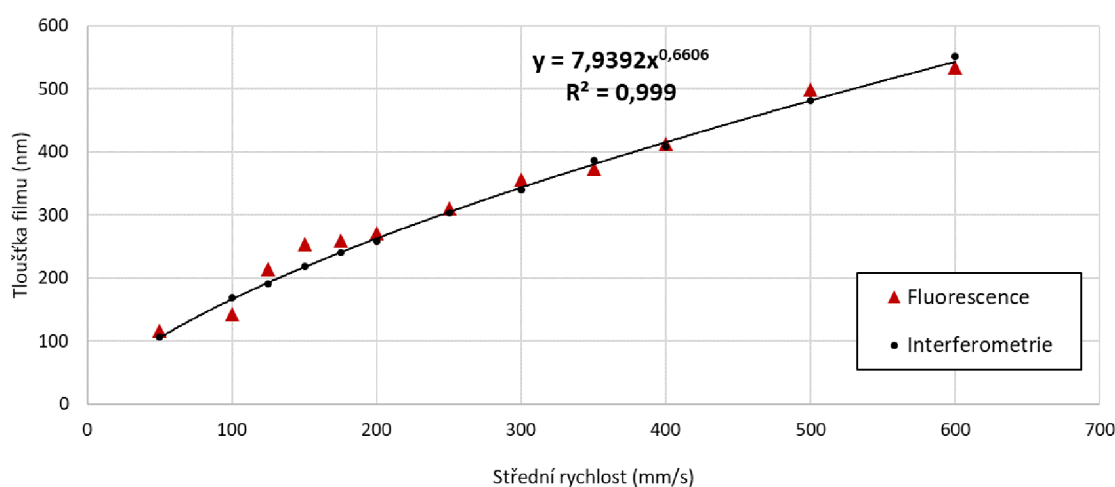
V první fázi vývoje metody bylo přistoupeno k validaci přístupu pomocí měření tloušťky na hladkém kontaktu s využitím optické interferometrie. Kontaktní dvojici tvoří ocelová kulička, vyleštěná pro dosažení co nejnižší drsnosti ( $S_q$  3,2 nm), a skleněný disk BK7. Pro fluorescenční měření bylo obarveno mazivo PAO100, pro interferenční měření je použito neobarvené mazivo ze stejné šarže. První test byl proveden za nízkého zatížení (7,5 N) a pokojové teploty, a je zobrazen na grafu níže (Obr. 5-1). Fluorescenční měření je z důvodu zjištění opakovatelnosti provedeno dvakrát. Každý bod zobrazený v grafu je průměrnou hodnotou ze tří měřených bodů.



Obr. 5-1 Porovnání fluorescenční metody s měřením z interferometrie.  $F = 7,5$  N



Další měření bylo provedeno za stejných podmínek, avšak s vyšším zatížením (21 N). Opět došlo ke srovnání přístupu pomocí optické interferometrie a fluorescence, graf závislosti tloušťky mazacího filmu na rychlosti je na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Další měření za vyššího zatížení. F = 21 N

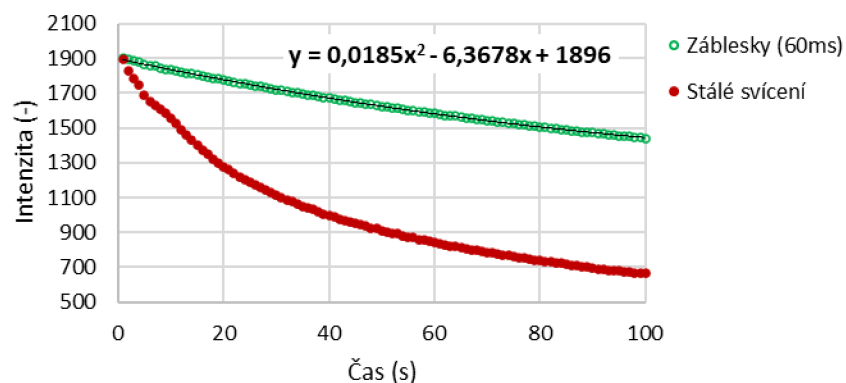
U vyšších rychlostí, resp. vyšších tlouštěk filmu je pozorována lepší shoda, nicméně trend závislosti tloušťky filmu z fluorescence vykazuje odchylky u nižších rychlostí. Tyto zjištěné odchylky bylo třeba dále analyzovat. Výsledky testů z měření pomocí interferometrie vykazují predikovanou mocninnou závislost, přičemž exponent by se měl v ideálním případě co nejvíce blížit hodnotě 0,67 (viz predikce dle Hamrock-Dowson [22]). Kvůli nižšímu zatížení však může být exponent nižší.

### 5.1.2 Vysvěcování fluorescenčního maziva

Významným jevem ve fluorescenční mikroskopii je vysvěcování fluorescenčního barviva vlivem excitace. Jedná se o fotochemickou změnu barviva, v literatuře nazývanou jako „photobleaching“ [24]. Tento jev může mít vliv na ztrátu intenzity světla v čase a je třeba mu pro dosažení vysoké přesnosti výsledků věnovat pozornost. Především u tenkých mazacích filmů, kde se v kontaktní oblasti nachází nižší objem emitujících částic, může tento jev hrát významnou roli. Byla provedena sada testů, které jej mají blíže objasnit pro dané podmínky. Při stálém působení zdroje fluorescenčního světla na statický kontakt je vyhodnocovaný pokles, resp. útlum intenzity signálu v okolí s nenulovou tloušťkou filmu. V grafu na Obr. 5-3 je zobrazena závislost vysvěcování maziva při stálém svícení. V prvních vteřinách je ztráta signálu cca 16 světelných hladin za sekundu, což odpovídá při daném nastavení kamery přibližně 10 nm tloušťky.

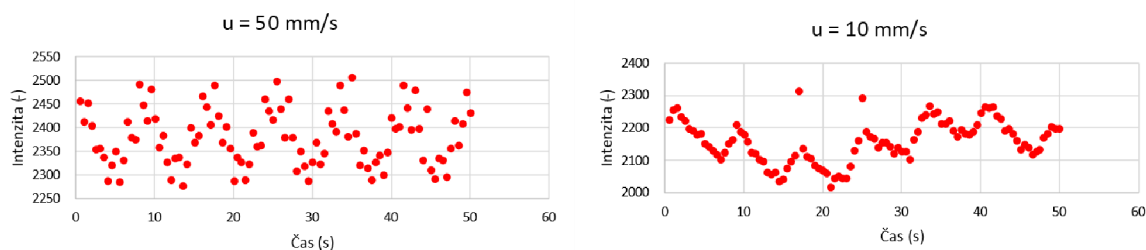
Z tohoto důvodu využito pulzního svícení, resp. aktivaci zdroje světla omezeného pouze na čas expozice kamery. Záblesky jsou synchronizovány s kamerou a pro daný případ snímání

bylo dosaženo až 8násobného snížení efektu photobleaching. Je třeba konstatovat, že trend vysvěcování maziva (Obr. 5-3) nelze aplikovat pro reálné schéma měření. Při nenulové rychlosti dochází ke stálému přívodu nového maziva do kontaktu a je tak téměř nulová šance, že by bylo opakovaně snímáno už jednou vysvícené mazivo. Ve vztahu k celkovému objemu maziva, které se nachází v rezervoáru tribometru, a je neustále promícháváno, je pak ztráta intenzity téměř nulová.



Obr. 5-3 Ztráta intenzity fluorescenčního světla při stálém svícení a se záblesky

Dále byla prověřena stabilita signálu v čase při zachování dalších provozních podmínek konstantních. Byla provedena sada měření pro škálu rychlostí (1 až 50 mm/s) a během 50 vteřin zachycovány snímky s vzorkovací frekvencí 500 ms. Na grafech (Obr. 5-4) jsou vybrána data pro dvě měření, kde nejvýznačněji pozorujeme fluktuaci hodnot v rozmezí až 200 intenzitních hladin. Při relativním vyjádření k průměrné hodnotě tento rozsah odpovídá přibližně 10 až 15 %. Při této analýze se ukázalo, že do fluktuace hodnot se promítá především otáčková frekvence disku, ale do určité míry i frekvence kuličky. Při sledování pravidelné cyklické proměny signálu v čase si lze povšimnout jejich vzájemné superpozice.



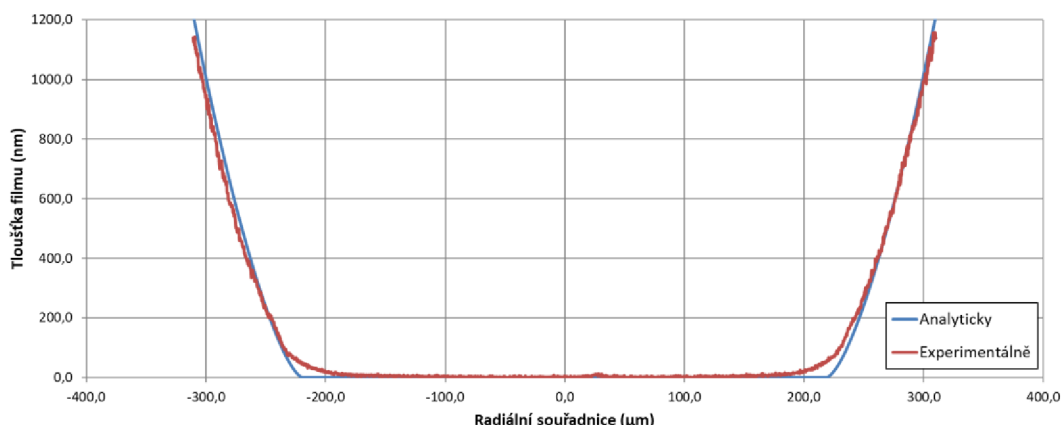
Obr. 5-4 Rozptyl hodnot v závislosti na otáčkách disku a kuličky

Možné vysvětlení lze hledat v samé podstatě fluorescenční mikroskopie. Působením excitačního zdroje je vyvolána emise fluorescenčního barviva, která putuje všemi směry stejně. Při úvodních měřeních byla excitovaná oblast větší, než je samotný kontakt. To znamená, že dochází k emisi i z okolí s nenulovou tloušťkou. Vzhledem k tomu, že tloušťka maziva je zde daleko násobně vyšší (než kalibrační rozsah 1,5  $\mu\text{m}$ ), vyvolaná

emise je velmi silná. Je tak možné, že pro daný snímaný bod putuje do objektivu intenzita nejen ze sledované kontaktní oblasti, ale částečně i z jejího okolí. Mezi kontaktem a objektivem se nachází prostředí, kterým má možnost se emitované světlo šířit. Toto ovlivnění emisí z okolí je možné pozorovat i na zakřivení fluorescenčního signálu na okraji oblasti statického kontaktu na Obr. 5-5.

Také musíme uvažovat, že jak disk, tak kulička, vykazují při pohybu házení. Byť je jejich házivost minimální, a u měření pomocí optické interferometrie se nijak neprojevuje, může se zde (na disku či kuličce) nacházet další excitační zdroj, který produkuje odlišnou intenzitu signálu a souvisí právě s jejich otáčkami. Nutno zmínit, že ke snížení fluktuace hodnot (z Obr. 5-4) došlo omezením excitované oblasti pomocí částečného uzavření polní clony mikroskopu. Takto je excitovaná především oblast kontaktu a omezena excitace okolí.

Původně bylo přistupováno k přepočtu fluorescenčního signálu na tloušťku pomocí rovnice (9) z kalibrace dle snímku statického kontaktu. Byly vyhodnoceny centrální řezy X a Y, spočítána jejich průměrná hodnota a porovnána s analytickým výpočtem dle Hertzovy kontaktní oblasti, jak lze pozorovat na Obr. 5-5.

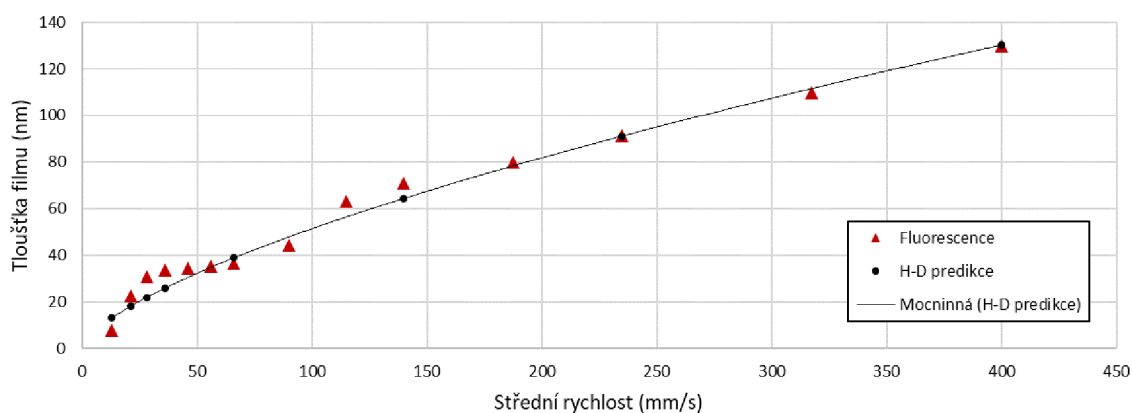


Obr. 5-5 Porovnání teoretické kontaktní oblasti a fluorescenčního signálu na statickém kontaktu

Pomocí tohoto způsobu kalibrace dochází ke zjištění konstant  $k$  (koeficient lineárního zesílení) a  $q$  (posun signálu), díky čemuž má profil tloušťky maziva z fluorescence dobrou shodu. Bylo však zjištěno, že hodnota posunutí  $q$  je různá pro odlišné povrchy. Možné vysvětlení lze hledat v odlišné odrazivosti jednotlivých povrchů, kdy více odrazivé povrchy vykazují vyšší hodnotu fluorescenčního signálu. Dále při tomto způsobu kalibrace nedocházelo k dobré shodě při vyšších rychlostech, resp. u vyšších tloušťkách mazacího filmu. Nakonec bylo přistoupeno ke kalibraci pomocí měření s hladkým kontaktem, kde bylo dosaženo větší shody u vyšších tloušťek. Předpokladem je, že pokud silnější mazací filmy vykazují vyšší intenzitu emitovaného světla, tak celkový signál bude méně ovlivněn samotným odrazivým povrchem. Při měření s hladkým kontaktem totiž dochází k vyšší shodě s predikcí u vyšších tloušťek filmu a jejich hodnotám je přikládána vyšší váha.

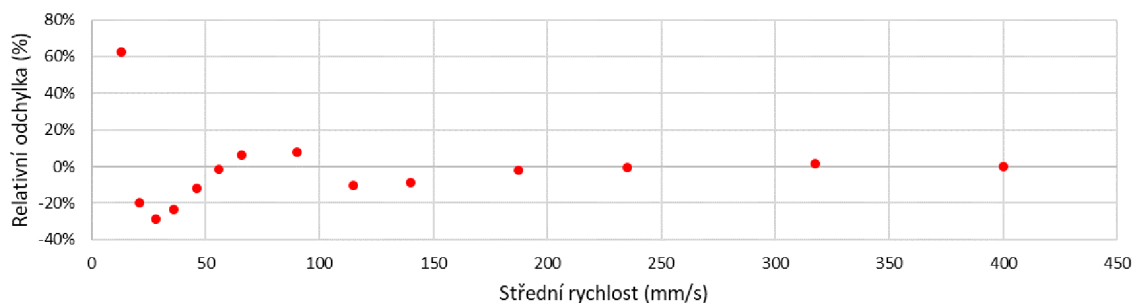
### 5.1.3 Aplikace metody na tenké filmy

Další vývojové měření probíhalo s referenčním mazivem, kterým je rozvětvený uhlovodík Squalene (CAS No.: 111-02-4). Jeho využitím bylo dosaženo nižších tloušťek filmu pro pokojové teploty. Měření bylo provedeno za vyššího zatížení 82 N a pokojové teploty (23,4 °C). Na rozdíl od přechozích experimentů bylo zde přikročeno k vyššímu počtu měřicích bodů a vyhodnoceno vždy 20 snímků pro danou rychlost s využitím vyvinutého skriptu. Vzorkovací frekvence vychází z otáček disku tak, aby snímky byly sejmuty rovnoměrně po obvodu disku. Tímto přístupem bylo dosaženo maximální směrodatné odchylky v každém měřicím bodě do 1,5 nm tloušťky filmu. Test na grafu Obr. 5-6 byl proveden směrem od nejnižších rychlostí k nejvyšším. Pokud byl směr obrácen, odchylky dvou měření dosahovaly maximálně 1 nm tloušťky.



Obr. 5-6 Měření tloušťky tenkých filmů pomocí fluorescence

Při použití více bodů měření si lze povšimnout větších odchylek od mocninné závislosti dle Hamrock-Dowsonovy rovnice (Obr. 5-6). Tyto odchylky mají charakter tlumené harmonické funkce (Obr. 5-7). Odchylky u velmi nízkých tloušťek můžeme přisuzovat interferenci emitovaného světla mezi hladkou kuličkou a diskem bez povlaku. U drsných povrchů se tento jev může objevit také, nicméně není tolik konzistentní a projevuje se spíše větším rozptylem hodnot z jednotlivých snímků.

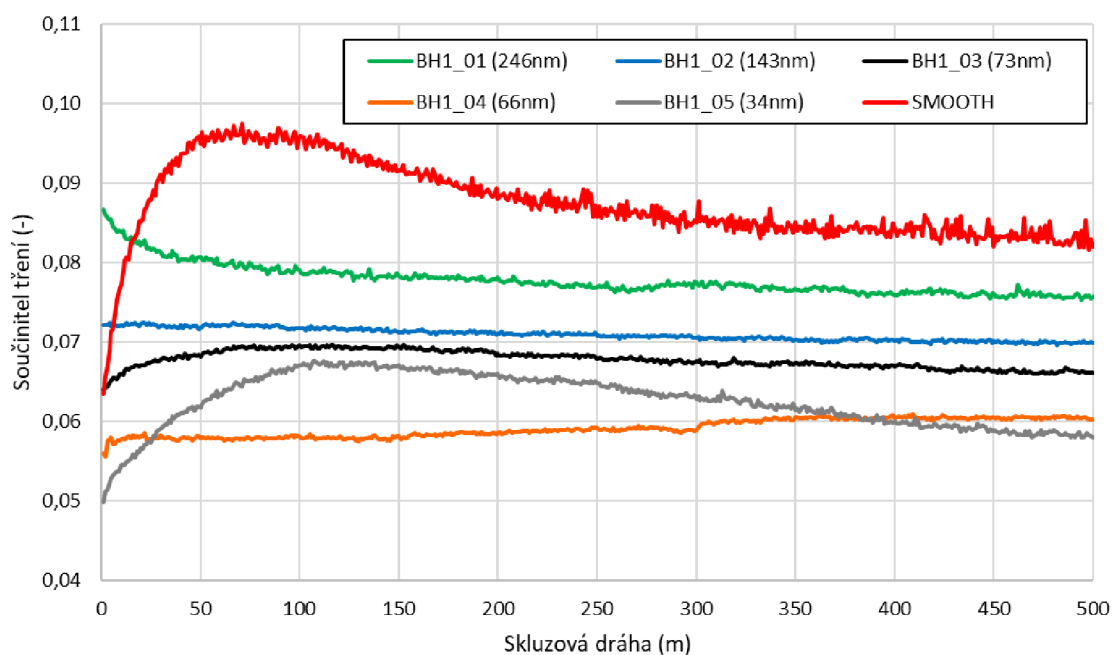


Obr. 5-7 Relativní odchylky pro měření tenkých filmů na hladkém kontaktu

## 5.2 Vyhodnocení záběhu

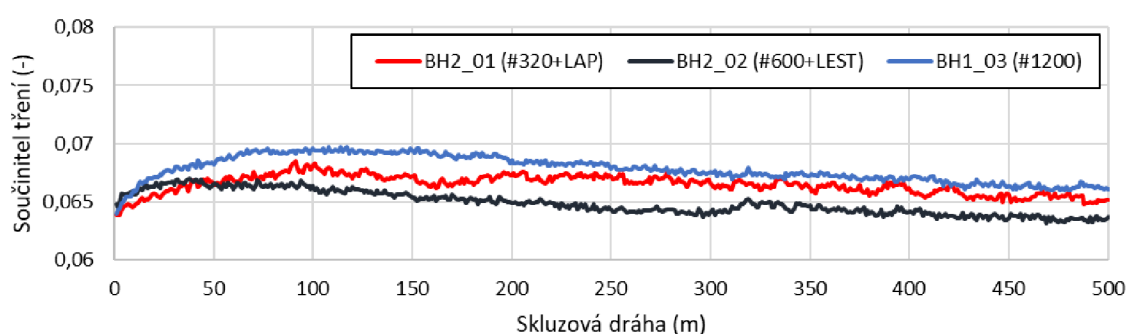
V této části jsou popsány výsledky záběhových testů pro vzorky popsané v kap. 4.3.2. Pro simulaci záběhu v laboratorních podmínkách byl vytvořen skript, který vzorek vystavuje celkové skluzové vzdálenosti 500 m. Napříč vzorky je volena stejná rychlost, s ohledem na zachování parametru mazání  $\lambda = 1$  (s odchylkou  $\pm 0,05$ ). Odchylka je způsobena mírnou nestabilitou v teplotě a vyhodnocením parametru  $Sq$ . Po uražení dráhy jednoho metru při rychlosti 162 mm/s (přibližně 12 vteřin) dochází vždy k zastavení kontaktu a opětovnému rozběhu. Celkem skript tedy obsahoval 500 cyklů. Tento způsob provozu je volen s ohledem na simulaci kontaktu v ozubení, kde rychlost není konstantní a dochází k její pulzaci. Mezi kontaktní dvojicí ocel-ocel je dosaženo kontaktního tlaku 1 GPa pomocí zatížení 65 N. Všechny tyto testy byly provedeny za kladného prokluzu 50 % (SRR 0,5).

Graf na Obr. 5-8. zobrazuje výsledné hodnoty součinitele tření v závislosti na čase, resp. skluzové dráze. Jak lze vidět, charakter vývoje tření je různý pro vzorky s různou počáteční drsností. Hladký povrch (SMOOTH), stejně jako povrch s nejnižší drsností dosaženou broušením (BH1\_05), vykazují nejvyšší progresi v první třetině testu. Dochází k rychlému nárůstu hodnoty součinitele tření, k následnému poklesu a ustálení. Směrem k vyšším drsnostem (BH1\_04 a BH1\_03) je tato počáteční progresse nižší, nicméně stále dochází v prvních fázích k nárůstu tření. Povrch BH1\_04 vykazuje stálý růst součinitele tření i na konci testu, ale u povrchu BH1\_03 v konečné fázi tření mírně klesá. U vzorku s nejvyšší drsností (BH1\_01) stojí za povšimnutí výrazný pokles před uražením dráhy 50 m, následovaný progresí s nižším sklonem.



Obr. 5-8 Vývoj celkového součinitele tření pro vzorky s odlišnou velikostí drsnosti

Stejný cyklus záběhového testu byl volen i u vzorků vykazujících odlišný charakter drsnosti. Vzhledem k velmi podobné velikosti drsnosti byl volen provoz za stejné teploty pro všechny 3 vzorky. Kuličky BH2\_01 a BH2\_02 byly provozovány za reálného parametru  $\lambda = 0,88$ , zatímco vzorek BH1\_03, který byl součástí předchozího testu (Obr. 5-8), byl provozován za  $\lambda = 1$ . Součinitel tření začíná během záběhového testu na přibližně stejné hodnotě, charakter vývoje je však jiný, jak lze sledovat na grafu Obr. 5-9. Jako povrch s nejmenší progresí součinitele tření v čase za daných podmínek vychází vzorek BH2\_02. Vyšší tření produkuje lapovaný povrch BH2\_01 a nejvyšší hodnoty dosahuje broušený BH1\_03. Vzhledem k tomu, že kulička BH1\_03 nebyla provozována za srovnatelného parametru mazání ( $\lambda = 1$  namísto  $\lambda = 0,88$ ), a u nižších  $\lambda$  je předpoklad vyššího tření, trendové porovnání v Obr. 5-9 odpovídá posloupnosti vzorků. Křivka BH1\_03 by za tohoto předpokladu byla pouze posunuta směrem výš.

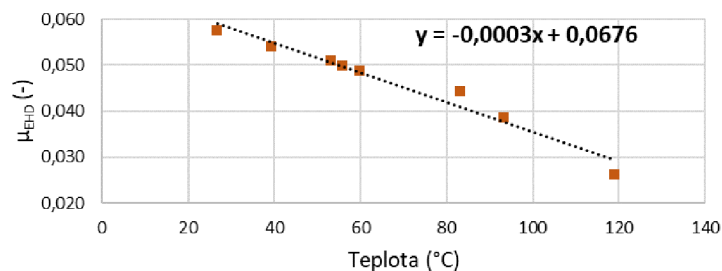


Obr. 5-9 Vývoj celkového součinitele tření pro vzorky s odlišným charakterem drsnosti

Celková hodnota součinitele tření, znázorněného na Obr. 5-8 a Obr. 5-9, se u nerovných povrchů skládá ze 3 částí odkazujících na jednotlivé režimy mazání. Vzhledem k odlišným teplotám pro jednotlivé vzorky byla změřena hodnota kapalinového tření v EHD kontaktu hladkých povrchů ( $\mu_{EHD}$ , Obr. 5-10). Stejně tak byla zjištěna kritická hodnota mezního tření ( $\mu_B$ ) a od celkového součinitele ( $\mu_{celk}$ ) odečtena dle:

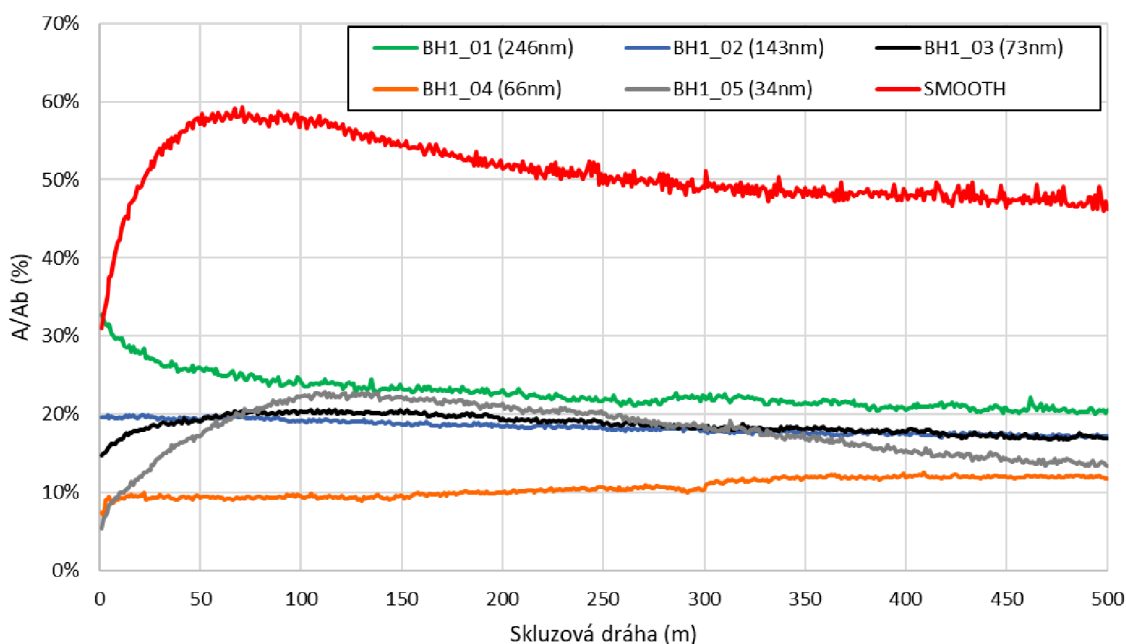
$$\frac{A}{A_B} \approx \frac{\mu_{celk} - \mu_{EHD}}{\mu_B - \mu_{EHD}} \quad (11)$$

Výsledná hodnota parametru  $\frac{A}{A_B}$ , který znázorňuje procentuální zastoupení síly přenášené přímým kontaktem, resp. míru smíšeného mazání, zobrazuje graf Obr. 5-11 a Obr. 5-12. U mezního tření byla uvažována konstantní hodnota  $\mu_B = 0,146$  vycházející z měření při kriticky nízké rychlosti.



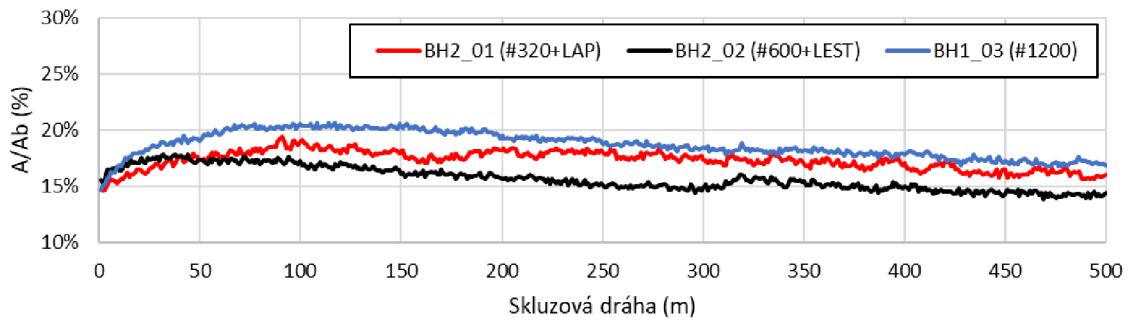
Obr. 5-10 Experimentálně zjištěné EHD tření pro jednotlivé provozní teploty

Uvedený parametr je aplikovaný na data z grafu záběhových křivek (Obr. 5-8) a znázorněn na Obr. 5-11. Charakter průběhu zůstává stejný, dochází pouze k posunu jednotlivých křivek ve směru osy Y v závislosti na velikosti kapalinového tření pro rozdílné teploty. Zatímco dochází k odchýlení křivky SMOOTH z důvodu vysoké teploty, a tedy nižšího kapalinového tření, průběhy dalších vzorků jsou k sobě přiblíženy. Z hlediska nejnižší hodnoty se jeví jako optimální vzorek BH1\_04, který je nejméně ovlivněn smíšeným mazáním. Povrchy BH1\_02 a BH1\_03 jsou pak sice ovlivněny více, ale udržují si stabilní hodnotu v okolí 20 % i na konci testu.



Obr. 5-11 Míra ovlivnění tření smíšeným mazáním pro vzorky s odlišnou velikostí drsnosti

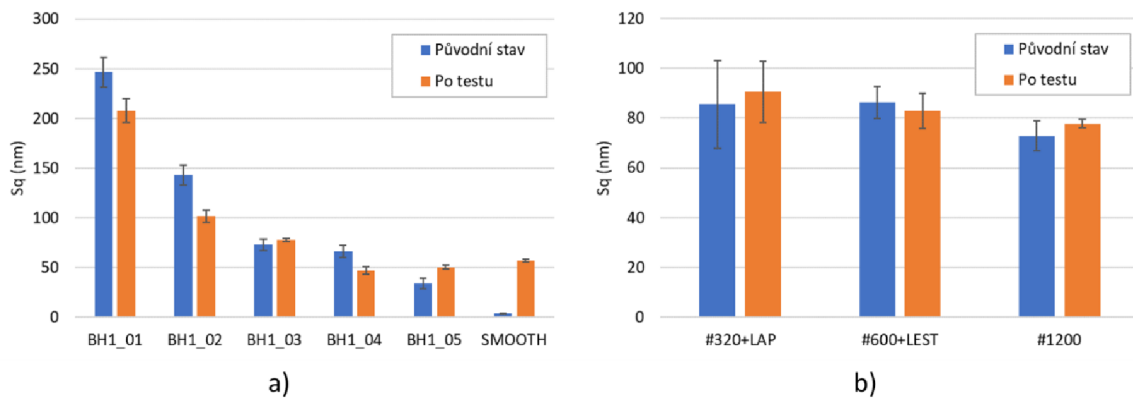
Pro druhou sadu vzorků je provedena stejná analýza míry smíšeného tření. Graf na Obr. 5-12 ukazuje, že nejnižší ovlivnění vykazuje leštěný vzorek BH2\_02 a konečná hodnota po testu se nachází lehce pod 15 %. A to i přes provoz při nižším parametru mazání  $\lambda = 0,88$  oproti povrchu BH1\_03.



Obr. 5-12 Míra ovlivnění tření smíšeným mazáním pro vzorky s odlišným charakterem drsnosti

### 5.3 Změna topografie povrchu po záběhu

Pomocí optického profilometru byla sledována změna parametru  $S_q$  po testu. Měření topografie probíhalo stejně, jako je popsáno v kap. 4.4.2. Na snímcích jsou patrné vyjeté dráhy s opotřebením, proto je oblast dráh maskována v programu Vision64 na čtvercovou oblast s délkou strany přibližně 0,42 mm. Výsledky na grafech (Obr. 5-13) zobrazují průměrné hodnoty z měření na 10 místech po obvodu kuličky s přibližně rovnoměrným rozložením. Chybové úsečky odpovídají směrodatné odchylce z 10 měření. U drsných povrchů je pozorováno snížení parametru  $S_q$ , zatímco nejjemnější povrchy vykazují zvýšení (Obr. 5-13a). Výjimkou je vzorek BH1\_03, který dosahuje mírného snížení počáteční drsnosti.

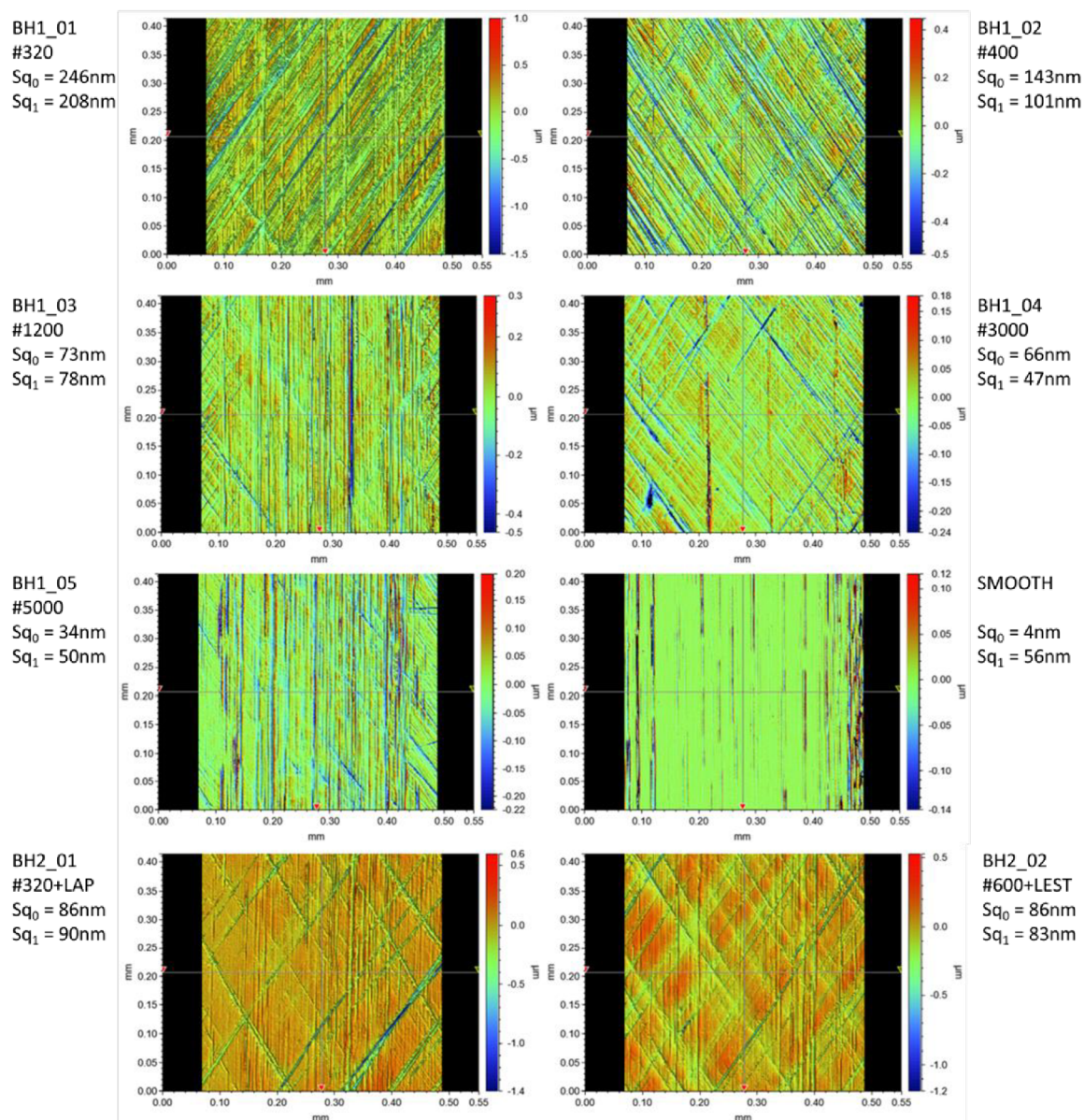


Obr. 5-13 Porovnání drsnosti před a po záběhu; a) sada vzorků k H1; b) sada k H2

Změna parametru  $S_q$  u vzorků s odlišným charakterem drsnosti je znázorněna na Obr. 5-13b. Zde se ukazuje, že drsnost se příliš nemění. U vzorku BH2\_01 (#320+LAP) stojí za povšimnutí vysoká směrodatná odchylka původního povrchu, která je po testu mírně snížena. Ta je způsobena hlubokými rýhami a jejich zastoupením na jednotlivých měřených místech.



Pokud se blíže podíváme na snímky povrchů (Obr. 5-14), všimneme si opotřebení povrchu ve formě vyrytých drah ve směru pohybu. Tyto rýhy jsou projevem abrazivního opotřebení. Současně lze pozorovat plastickou deformaci na úrovni výstupků, především u nejdrsnějších povrchů. U snímků jsou uvedeny jak počáteční hodnoty parametru  $Sq_0$ , tak vyhodnocené hodnoty po testu  $Sq_1$ .

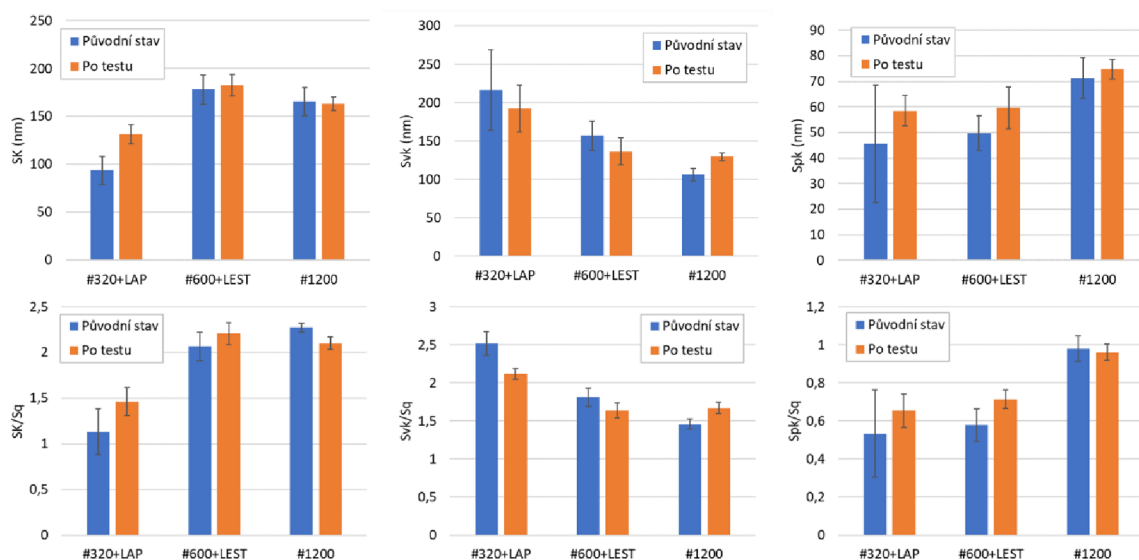


Obr. 5-14 Topografie vzorků po záběhu s viditelným abrazivním opotřebením

### 5.3.1 Vliv charakteru drsnosti

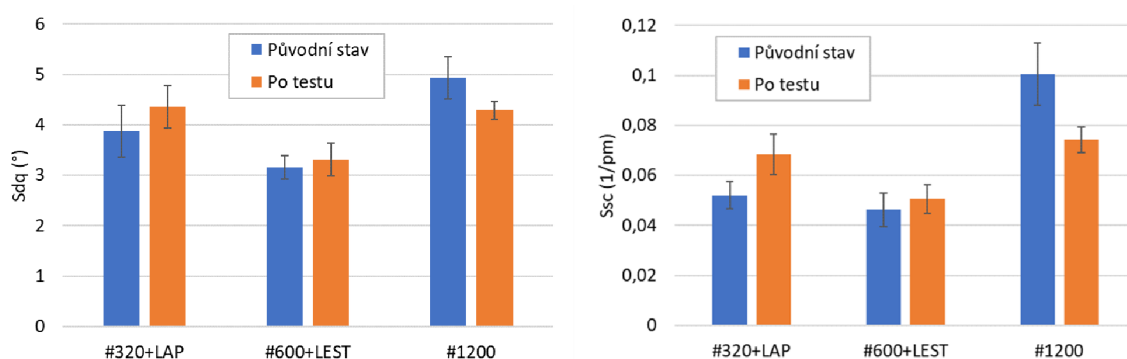
Pro hodnocení vlivu charakteru drsnosti jsou využity další parametry klasifikující drsnost. Dle původního zamýšlení byla provedena analýza pomocí funkčních parametrů dle Abbott-Firestonovy křivky. Parametr  $S_k$ , charakterizující nosnou plochu, stejně tak jako  $S_{pk}$  (redukovaná výška výstupků) a  $S_{vk}$  (redukovaná hloubka prohlubní) jsou zobrazeny na

Obr. 5-15. U povrchů BH2\_01 (#320+LAP) a BH2\_02 (#600+LEST) dochází ke zvýšení parametru SK, zatímco u broušeného povrchu BH1\_03 (#1200) je jeho hodnota velmi minimálně snížena. Dále hloubka prohlubní Svk je u prvních dvou vzorků po testu nižší, zatímco u posledního pozorujeme zvýšení. Nakonec z parametru Spk vyplývá, že výška výstupků je zvýšena napříč všemi pozorovanými vzorky. Současně jsou hodnoty parametru SK, Svk a Spk jmenovitě vztaheny k drsnosti Sq pro každé měření. Lze tak vidět, že jejich relativní poměr se pohybuje na přibližně stejné úrovni ve stavu před a po záběhovém testu.



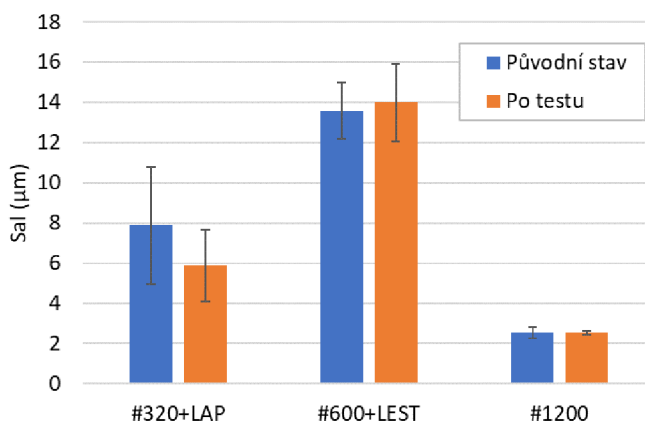
Obr. 5-15 Parametry A-F křivky vztahované k drsnosti Sq

Mezi další veličiny, které byly zařazeny pro hodnocení charakteru drsnosti, se řadí Sdq a SSc ze skupiny hybridních parametrů. Ty charakterizují sklon a jsou definovány délkou a výškou (amplitudou). Sdq představuje průměrný kvadratický sklon povrchu a SSc průměrné zakřivení vrcholů [25]. Původní povrch BH1\_03 (#1200) vykazuje nejvyšší sklon a zakřivení vrcholů, ty jsou však po záběhu redukovány. Naopak BH2\_01 (#320+LAP) se projevuje zvýšením a výsledná hodnota obou vzorků je srovnatelná. Poslední topografie vzorku BH2\_02 (#600+LEST) ukazuje nejnižší hodnoty obou parametrů Sdq i SSc.



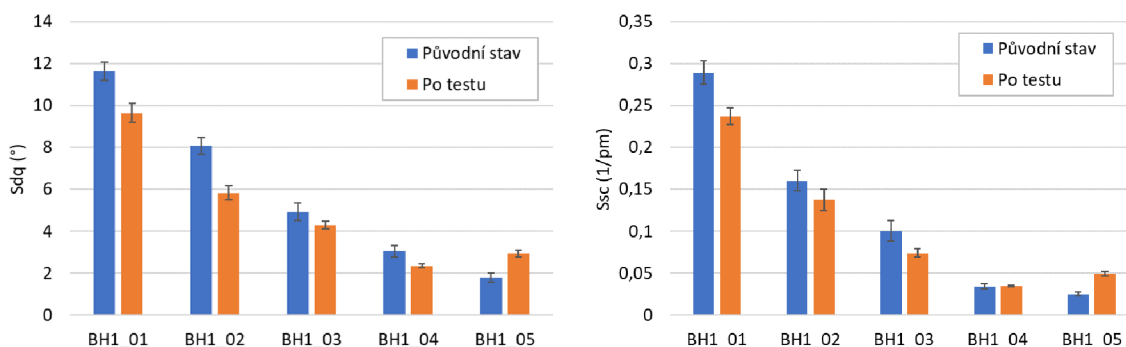
Obr. 5-16 Porovnání povrchů pomocí vybraných hybridních parametrů Sdq a SSc

Posledním porovnávacím kritériem je prostorový parametr Sal. Ten vychází z autokorelační funkce a vyjadřuje její délku, resp. vodorovnou vzdálenost. Díky této funkci je možné hodnotit periodičnost a nahodilost tvaru povrchu [26]. Zde se ukazuje, že leštěný vzorek má hodnotu parametru Sal až sedminásobně vyšší než povrch broušený, zatímco lapovaný se nachází mezi nimi a projevuje se nejvyššími směrodatnými odchylkami.



Obr. 5-17 Prostorový parametr Sal popisující délku autokorelační funkce

Pomocí hybridních parametrů byly porovnány také vzorky z první sady testů, tedy vzorky vykazující odlišnou velikost drsnosti povrchu Sq (Obr. 5-18). Zde se ukázalo, že všechny povrchy, až na BH1\_05, vykazují snížení obou parametrů Sdq i Ssc po záběhu. Zároveň výsledky korespondují s počátečními hodnotami součinitele tření při záběhovém testu na Obr. 5-8.



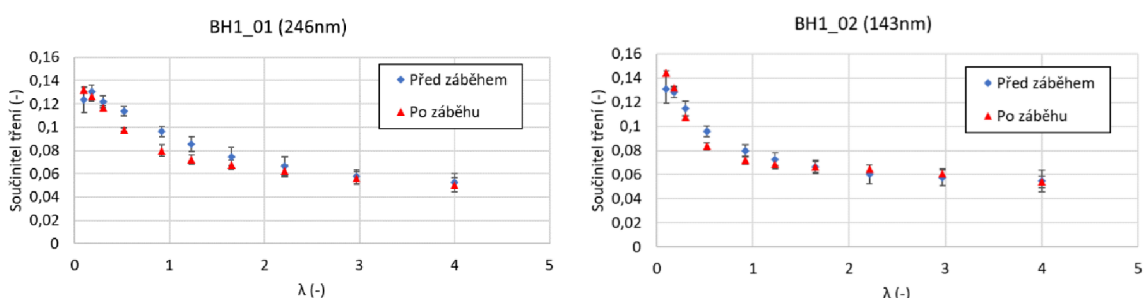
Obr. 5-18 Porovnání hybridních parametrů Sdq a Sal pro vzorky z první sady měření

## 5.4 Ovlivnění tření v jednotlivých režimech mazání

### 5.4.1 Stribeckův test pro povrchy s odlišnou velikostí drsnosti

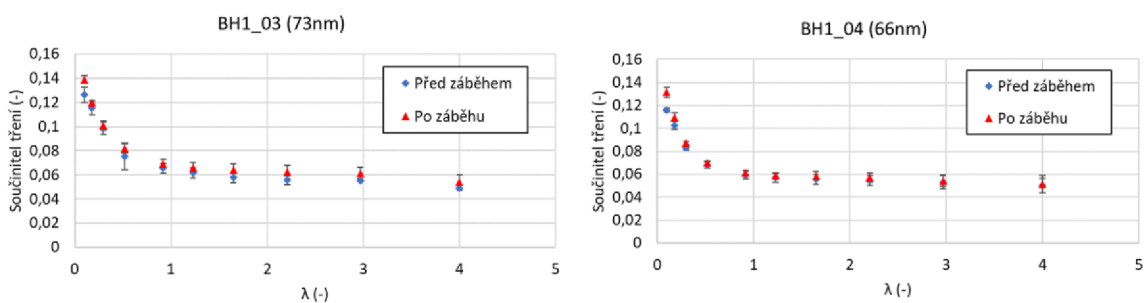
V této části jsou představeny výsledky ze Stribeckových testů před a po záběhu. Stribeckovy křivky zobrazují vývoj tření v závislosti na rychlosti pro jednotlivé režimy mazání. Rozsah rychlostí pokrývá parametr mazání  $\lambda = 0,1$  až 4. Chybové úsečky v grafech odpovídají směrodatné odchylce z celkového počtu 4 měření pro každý bod.

Obr. 5-19 obsahuje grafy dvou vzorků s nejvyšší počáteční drsností. U těchto povrchů lze pozorovat pokles tření se zvyšující se rychlostí, resp. zvyšujícím se parametrem mazání  $\lambda$ . U obou vzorků je součinitel tření pro jednotlivé rychlosti po záběhu nižší.



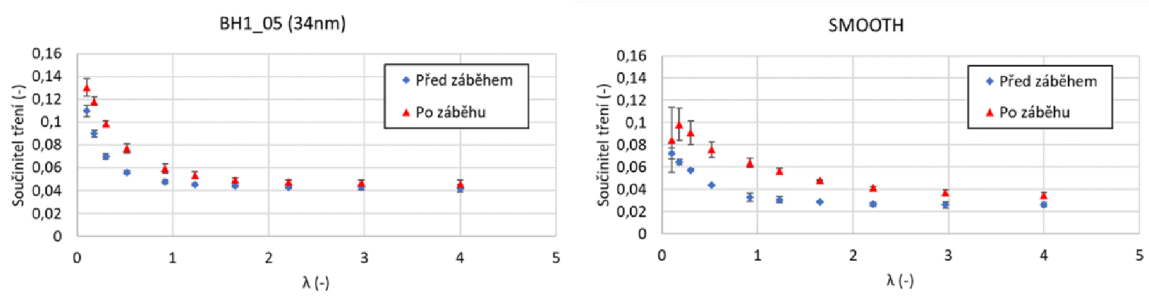
Obr. 5-19 Stribeckovy křivky pro povrchy s nejvyšší velikostí drsností (BH1\_01 a BH1\_02)

Naopak u testů s povrchy vykazující nižší drsnost (Obr. 5-20) lze vidět, že pokles tření nastává už při nižších hodnotách parametru  $\lambda$ , a charakter vývoje více připomíná Stribeckovu křivku pro hladký kontakt. Současně můžeme konstatovat, že změna tření vlivem záběhu je u těchto dvou povrchů minimální. Tyto vzorky vykazují stabilitu i při dalších měřeních z hlediska záběhu (kap. 5.2) a změn topografie (kap. 5.3).



Obr. 5-20 Stribeckovy křivky pro povrchy se střední velikostí drsnosti (BH1\_03 a BH1\_04)

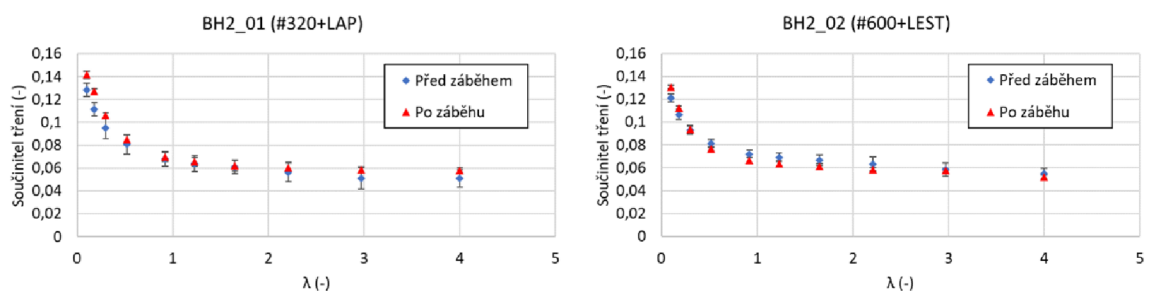
Nakonec jsou představeny Stribeckovy křivky pro povrchy s nejnižší drsností (Obr. 5-21). Zde již vidíme patrnější odchylku mezi stavem před a po záběhu, kdy u hladkého povrchu je změna nejcitlivější. Navíc u nejnižších rychlostí dochází k většímu rozptylu měřených hodnot tření. Nutno zmínit, že tyto vzorky vykazují zhoršení v celém rozsahu měření.



Obr. 5-21 Stribeckovy křivky pro povrchy s nejnižší velikostí drsnosti (BH1\_05 a SMOOTH)

## 5.4.2 Stribeckův test pro povrchy s odlišným charakterem drsnosti

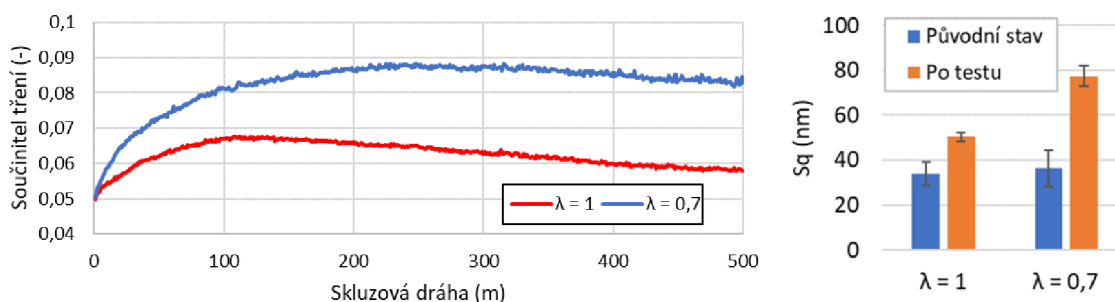
U měření povrchů s odlišným charakterem si lze povšimnout, že součinitel tření zůstává i po záběhu na přibližně stejných hodnotách. Pouze u povrchu BH2\_02 ve smíšeném až EHD režimu je hodnota součinitele tření mírně nižší po záběhu (Obr. 5-22). Současně jsou u tohoto povrchu nižší směrodatné odchylky než u lapovaného vzorku BH2\_01. Tyto povrchy jsou stabilní z hlediska změn při záběhu.



Obr. 5-22 Stribeckovy křivky pro povrchy s odlišným charakterem drsnosti

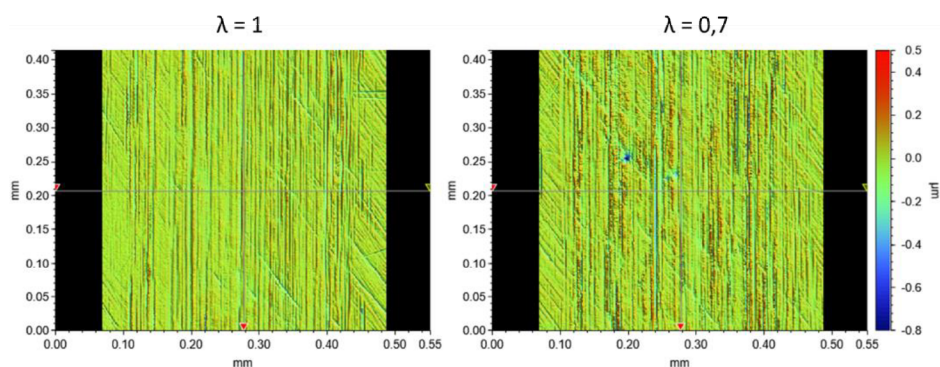
## 5.5 Vliv režimu mazání na záběh

Vzhledem k tomu, že všechny přechozí testy probíhaly za podmínek  $\lambda = 1$ , byl proveden další test pro pochopení vlivu režimu mazání na ustálení součinitele tření. Povrch na vzorku BH1\_05, který měl původní drsnost  $S_q = 34$  nm byl vyroben ještě jednou (tentokrát s drsností  $S_q = 36$  nm) a provozován za vyšší teploty pro dosažení nižšího parametru mazání se stejným mazivem. V konkrétním případě pro  $\lambda = 0,7$ . Na grafu Obr. 5-23 je možné si všimnout, že ačkoliv provoz kontaktu začíná na přibližně stejné hodnotě tření, jeho vývoj se významně mění během provozu. Dochází také k odlišné transformaci povrchu po testu, kdy se v obou případech zvyšuje hodnota parametru  $S_q$ .



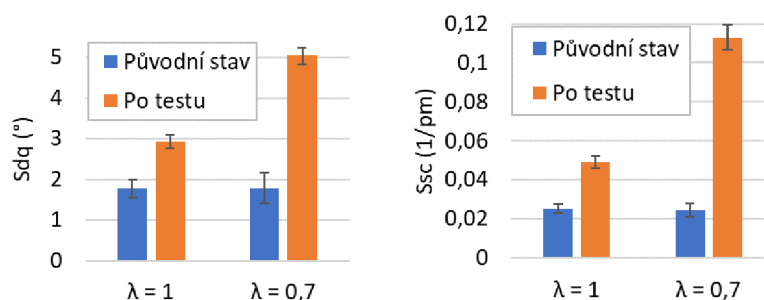
Obr. 5-23 Záběhový test pro provoz v rozdílných režimech mazání, včetně změny drsnosti povrchu

Odlíšnou změnu topografie lze vidět i snímcích na Obr. 5-24, kdy u vzorku, který byl provozovaný s nižší parametrem  $\lambda$ , vznikají hlubší rýhy a zároveň je více materiálu vytlačeno ve formě vyšších výstupků. Barevná škála, charakterizující výšku osy Z, je pro toto porovnání srovnána.



Obr. 5-24 Porovnání snímků topografie po záběhu pro odlišný parametr mazání  $\lambda$

Současné porovnání pomocí hybridních parametrů (Obr. 5-25) potvrzuje zhoršení povrchu ve smyslu zvýšení sklonu a zakřivení pro oba případy. U vzorku provozovaného za vyššího parametru mazání je zvýšení drsnosti výraznější.

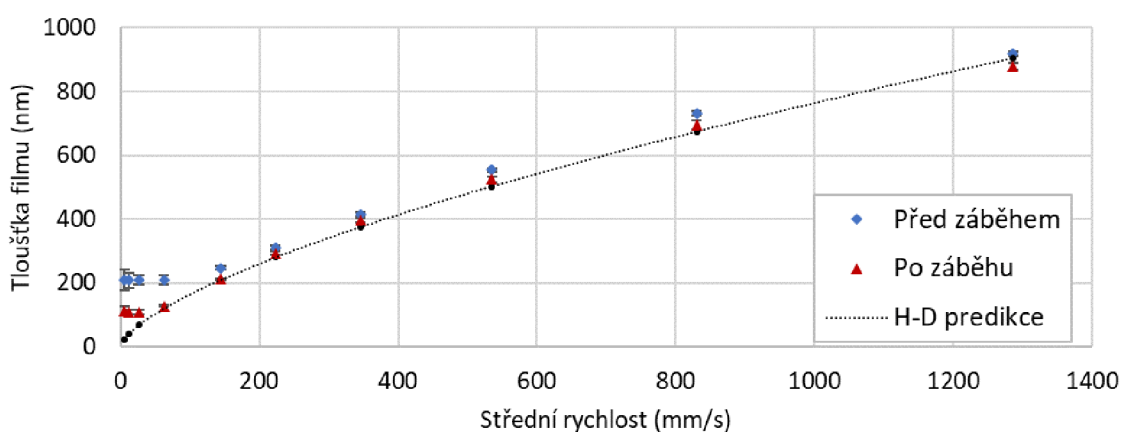


Obr. 5-25 Hybridní parametry  $Sdq$  a  $Ssc$  pro provoz při odlišném parametru  $\lambda$

## 5.6 Ovlivnění tloušťky mazacího filmu

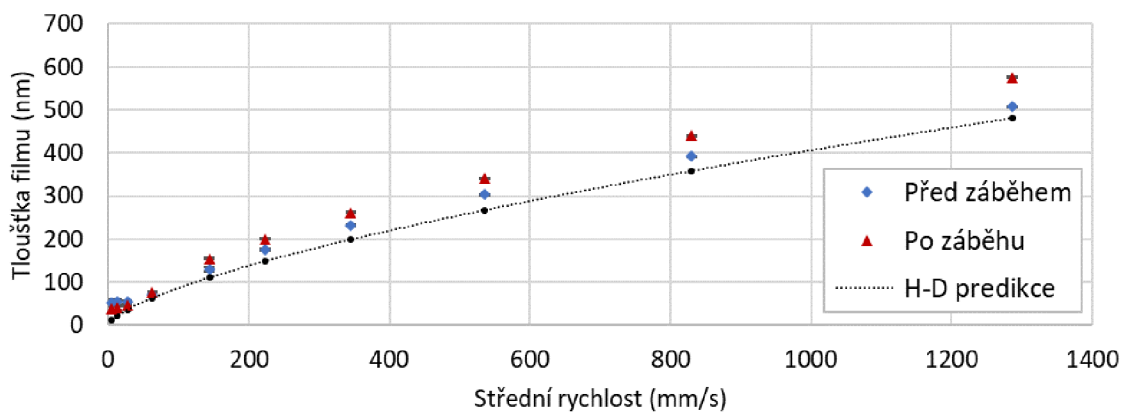
Po každý vzorek byla během úvodního a závěrečného Stribeckova testu měřena současně s třením tloušťka mazacího filmu pro škálu rychlostí pokrývajících rozsah od mezního mazání k teoreticky plnému kapalinovému. Z důvodu větších nepřesností u velmi tenkých filmů, jak je vysvětleno v kap. 4.4.4, jsou zde zobrazeny výsledky pouze pro některá měření. U povrchů s velmi nízkou drsností nebyla získána plně reprezentující data. Každá hodnota v uvedených grafech byla získána průměrem z 20 vyhodnocovaných snímků. Chybové úsečky jsou směrodatnými odchylkami získané z měření daného bodu.

První vzorek s nejvyšší počáteční drsností (BH1\_01; Obr. 5-26) vykazuje vyšší tloušťku u nejnižších rychlostí, která je do určitého stavu konstantní. Tloušťka mazacího filmu je silně závislá na drsnosti povrchu, dokud nedojde k oddělení povrchů souvislým kapalinovým filmem vlivem zvyšující se rychlosti. Současně měření po záběhu vykazuje nižší tloušťky v této oblasti, které souvisejí s naměřenou nižší drsností povrchu (kap. 5.3; Obr. 5-13).



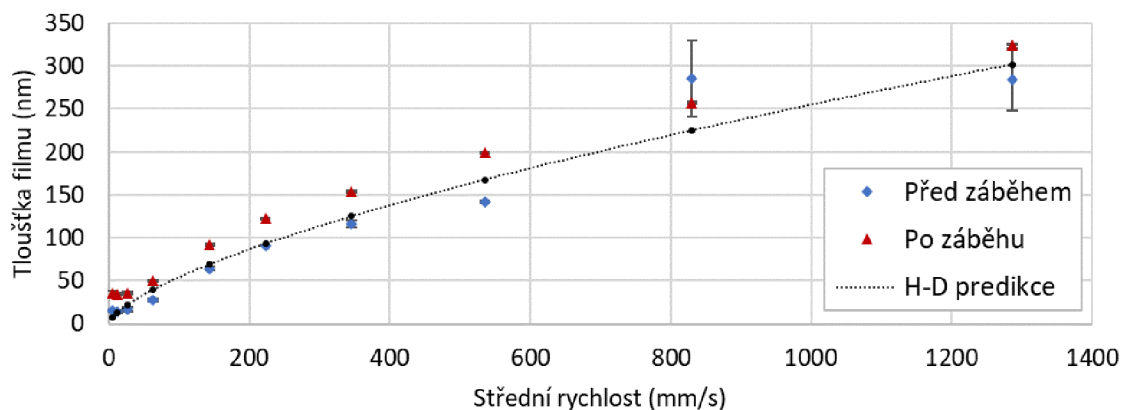
Obr. 5-26 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1\_01 (246nm)

Stejný jev můžeme sledovat u vzorku BH1\_02 (Obr. 5-27), kdy u nejnižších rychlostí je tloušťka filmu před záběhem vyšší. Po záběhu, kdy dojde ke snížení původní drsnosti, je tloušťka nižší. Stejně jako v předchozím případě, tak i zde se tloušťka filmu u nejnižších rychlost odvíjí od drsnosti a je potřeba vyšší rychlosti, aby došlo k oddělení třecích povrchů souvislým mazacím filmem.

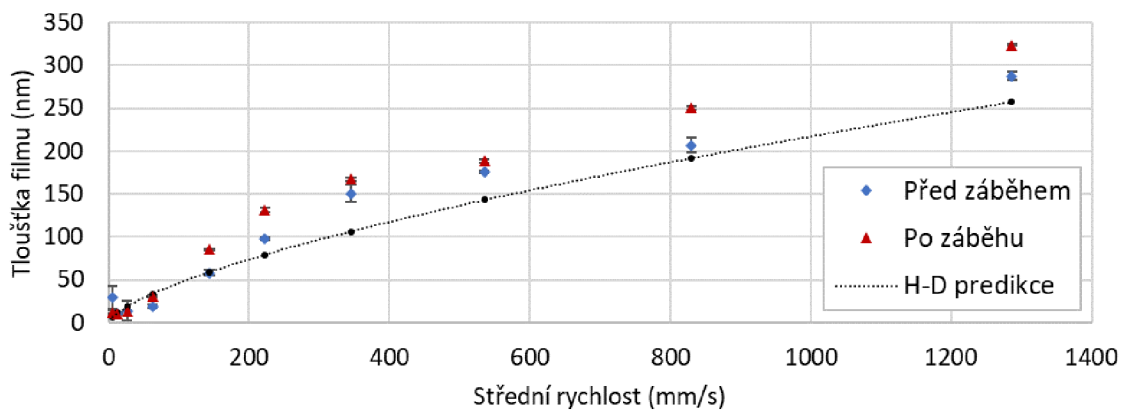


Obr. 5-27 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1\_02 (143nm)

Se snižující se drsností pak sledujeme, že povrchy po záběhu vykazují vyšší tloušťky především u vyšších rychlostí (Obr. 5-28 a Obr. 5-29). Směrem k nižším tloušťkám se zvyšuje nejistota v měření a odchylka od H-D formule. U některých bodů v grafu Obr. 5-28 se objevují velké směrodatné odchylky v měřených hodnotách. U nejnižších rychlostí je tloušťka stále ovlivněna drsností a není nikdy nulová.



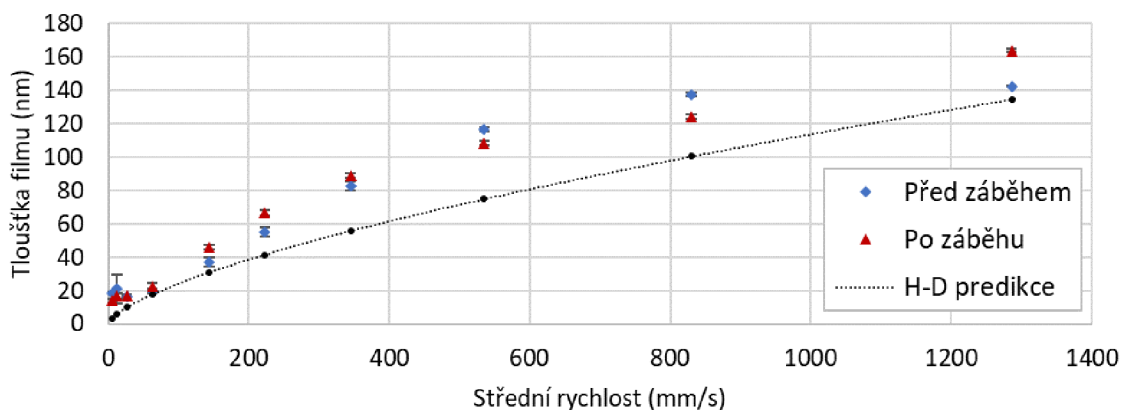
Obr. 5-28 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1\_03 (73nm)



Obr. 5-29 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1\_04 (66nm)

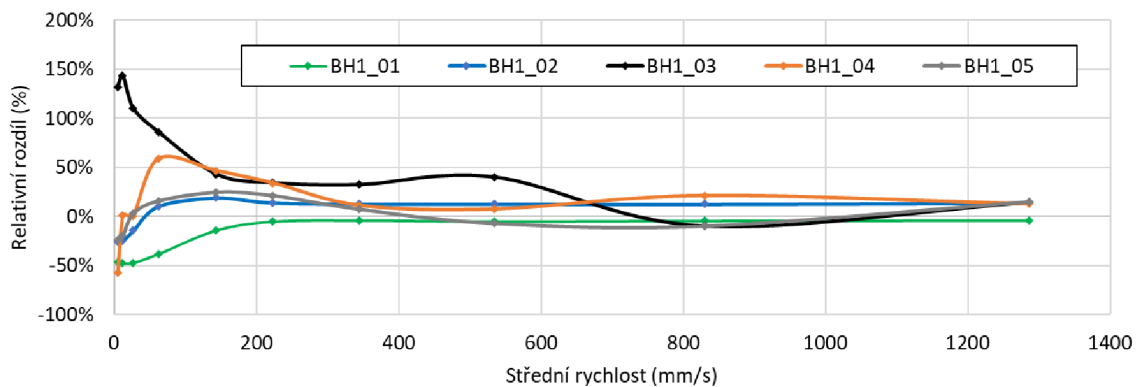


Povrch s nejnižší drsností (BH1\_05; Obr. 5-30) vykazuje odchylky od predikce v celém pásmu rychlostí. Povrch se po záběhu zhoršil, což se projevuje i vyšší tloušťkou v užším pásmu. Ačkoliv hodnoty vykazují nízké směrodatné odchylky, probíhají zde jevy, popsané v kap. 5.1.3. (měření s hladkým kontaktem), které mají za příčinu větší nejistoty v měření.



Obr. 5-30 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1\_05 (34nm)

Pro lepší vzájemné porovnání byly ze získaných dat vyhodnoceny relativní odchylky tloušťky mazací vrstvy před a po testu, vyjádřeny v procentech (Obr. 5-31). Odchylky se směrem k vyšším rychlostem snižují a asymptotně přibližují konstantní hodnotě, která je blízká nule. U rychlostí nad 1000 mm/s je uvažováno, že povrchy jsou již plně odděleny souvislou vrstvou mazacího filmu.s



Obr. 5-31 Relativní odchylky tloušťky filmu před a po testu pro jednotlivé vzorky

## 6 DISKUSE

### 6.1 Interpretace výsledků

#### 6.1.1 Měření tloušťky mazacího filmu pomocí fluorescence

V kapitole 5.1 je popsán vývoj metody pro měření tloušťky mazacího filmu. Byla vytvořena metodika hodnocení tloušťky v kontaktu ocel-sklo s využitím obarvení maziva pomocí fluorescenčního barviva. První měření vykazovalo mnoho odchylek od predikovaných hodnot dle Hamrock-Dowsonovy rovnice. Z tohoto důvodu došlo k důkladnější analýze pomocí měření více bodů a jejich statistického vyhodnocení. Na grafu Obr. 5-6 lze pozorovat odchylky od mocninné závislosti, které při vykreslení (Obr. 5-7) vykazují charakter harmonické tlumené funkce. Vzhledem k tomu, že vzhledem do kontaktu byl umožněn pomocí skleněného (později safírového) disku, je tento vliv možné přisuzovat interferenci, ke které dochází na rozhraní prostředí vlivem odlišného indexu lomu světla. U nejnižších tlouštěk je odchylka nejvyšší, proto jsou tyto data zatížena nejvyšší chybou. Naopak u vyšších tlouštěk ( $>1 \mu\text{m}$ ) je parazitní vliv interference nižší, proto zvolenou metodou bylo dosaženo přesnějších výsledků. V porovnání s měřením pomocí kolorimetrické interferometrie bylo dle konfigurace dosaženo lepší shody pro tloušťky nad 300 nm (Obr. 5-1 a Obr. 5-2). Vliv nežádoucí interference by mohl být potlačen použitím antireflexních vrstev na spodní straně disku, aby nedocházelo k odrazu. Při tomto řešení by ovšem bylo třeba počítat s možností narušení, či úplného odstranění těchto velmi tenkých vrstev vlivem opotřebení disku při provozu kontaktu.

Kapitola 5.6 obsahuje výčet výsledků z měření tloušťky filmu pro hlavní vzorky. Na rozdíl od předchozího měření s hladkým kontaktem byl využitý safírový disk pro dosažení stejného kontaktního tlaku, jako v případě dvojice ocel-ocel (tj. 1 GPa). Měření došlo ke zjištění celkové průměrné tloušťky maziva v kontaktu, která bylo přepočtena na základě intenzity emise fluorescenčního barviva.

Z výsledků lze pozorovat, že u povrchu s nejvyšší drsností ( $S_q$  246 nm; Obr. 5-26) před záběhem byla tloušťka filmu znatelně daná velikostí drsnosti u velmi malých rychlostí. U dalších povrchů nastal stejný jev, který byl však vzhledem k velmi malým tloušťkám filmu obtížněji měřitelný. Nejprve nedocházelo k oddělení třecích povrchů a kontakt se tak nacházel v mezním režimu mazání. Směrem k vyšším rychlostem pak docházelo k nárůstu EHD tlaku, díky čemuž se povrchy od sebe vzdalují až dojde k úplnému oddělení souvislým mazacím filmem. Po záběhu byla měřená průměrná tloušťka v kontaktu nižší, což lze vysvětlit celkovým snížením velikosti drsnosti, resp. vyhlazením nejvyšších nerovností. Naopak u vzorků s nižší drsností bylo množství maziva v kontaktu vyšší. To mohlo být způsobeno zvýšením drsnosti během záběhu. Případně i vznikem drsnosti nové,

kteřá se vřak mēnē deformuje. Novou drsností jsou myřleny ůzkē rýhy, které jsou vidēt na Obr. 5-14 a které produkují vyřřší intenzitu emise fluorescenēního barviva.

Při pohledu na graf s relativními odchylkami (Obr. 5-31), které porovnávají tlouřtku maziva před a po záběhu, je pozorován trend, který se asymptotně blíží ke konstantní hodnotě se zvyřující se rychlostí. Nejvyřřší střední rychlost (1280 mm/s) odpovídá parametru mazání  $\lambda = 4$  napřiē všemi vzorky, tedy by se měl systém nacházet v plně kapalinovém režimu, který je mēnē závislý na drsnosti povrchu. U nejdrsnějšiho vzorku je relativní odchylka záporná, zatímco u ostatních vzorků se asymptotně blíží kladné hodnotě kolem 10 %. U nejvyřřší rychlosti by se měly všechny povrchy již nacházet v plně odděleném režimu, tedy by drsnost povrchu měla tlouřtku mazací vrstvy ovlivňovat minimálně. Je možné, že pokud by bylo přistoupeno k měření při jeřtě vyřřších rychlostech pro dosažení  $\lambda > 4$ , dořlo by jeřtě ke snižení asymptotní hodnoty. Nicménē i tak by nejspíš nebylo dosaženo nulového stavu odchylky. Posun asymptot pro jednotlivé vzorky je s největří pravděpodobností způsobený nejistotou v teplotě mezi dvěma experimenty. Měřená teplota oleje sice dosahovala na začátku testu tolerance  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , je ale možné, že safirový disk nebyl v některých případech dostatečně teplotně stabilizovaný a docházelo k rozlišným teplotám v kontaktní oblasti, především kvůli ochlazování u vyřřších teplot. Důležitým zjiřtřením je vřak samotné asymptotní chování, které implikuje, že vliv nerovností je limitně nulový pro dostatečně tlustý mazací film, resp. vyřřší parametr mazání  $\lambda$ .

### 6.1.2 Záběhové testy

U testů záběhu, který je popsán v kapitole 5.2, lze pozorovat odlišný vývoj součinitele tření v závislosti na čase, resp. skluzové dráze. Vzhledem k tomu, že testy byly provedeny za stejných provozních podmínek jako je rychlost, parametr mazání a délka jednotlivých testů, bylo možné data vzájemně porovnat. Jednotlivé vzorky byly měřeny za odlišné teploty. Z tohoto důvodu byla změřena hodnota kapalinového tření pro konkrétní teploty a vypočítána míra ovlivnění tření smiřšeným režimem pro lepší porovnatelnost. Z chování na grafu Obr. 5-11 můžeme usoudit, že nejnižří hodnotu síly přenášené přímým kontaktem vykazuje povrch s drsností  $S_q = 66 \text{ nm}$  (BH1\_04), nicménē součinitel tření je po čas záběhového testu stále rostoucí. Naopak vzorek s nižří drsností (BH1\_05;  $S_q = 34 \text{ nm}$ ) vykazuje druhou nejnižří hodnotu po záběhu a vývoj je stále klesající. Povrch ale prošel viditelnou transformací v podobě vytvoření abrazivních rýh, jak je možné vidēt na Obr. 5-14. Současně dořlo k nárůstu velikosti drsnosti až na  $S_q = 50 \text{ nm}$ , což je hodnota blízká konečné velikosti drsnosti povrchu vzorku BH1\_04 ( $S_q = 47 \text{ nm}$ ).

Nutno podotknout, že začátek záběhových křivek v grafech (Obr. 5-8 a Obr. 5-9) chybí, protože k částečnému vývoji dořlo už při stribeckových testech se safirovým diskem, který záběhovému testu předcházet a mohlo tak dojít k přetvoření nejexponovanějších míst

topografie. Délka testu byla z důvodu ovládní pohonů a měření veličin pomocí skriptování pro jednotlivé vzorky stejná, takže změny z hlediska času jsou pro všechny vzorky srovnatelné.

### 6.1.3 Posouzení režimu mazání

Podmínky provozu kontaktu byly voleny na základě výpočtu dle původní topografie a klasické definice parametru  $\lambda$ . Vzhledem k rychlé transformaci povrchů, a tím způsobené změně velikosti parametru  $S_q$ , se predikovaný režim mazání mění v důsledku prvotních fází záběhu. U povrchů, které svou velikost drsnosti během záběhu snižují, dochází k vyššímu oddělení mazacím filmem. Naopak u povrchů, které se vlivem mírného opotřebení zdrsňují, dochází k posunu směrem k meznímu režimu mazání. U stribeckových testů v kap. 5.4.1 lze vidět, že povrchy s vyšší drsností (Obr. 5-19) jsou více ovlivněny povrchovými nerovnostmi směrem k vyšším rychlostem, a vykazují vyšší tření až do parametru  $\lambda = 3$ . Celkově je pokles tření pozvolnější než u povrchů s nižšími drsnostmi. U hladkých povrchů (Obr. 5-21) je tření nejnižší, nicméně velmi nízká drsnost se nejvíce dlouhodobě udržitelnou.

### 6.1.4 Vyhodnocení charakteru drsnosti

Byly vyhodnoceny parametry  $S_K$ ,  $S_{vk}$  a  $S_{pk}$  před a po testu pro 3 vzorky vykazující rozlišný charakter drsnosti a vykresleny v grafech (Obr. 5-15). Z těchto dat se jednoznačně neukázalo, že by zastoupení vrcholů bylo sníženo, zatímco výška prohlubní by se zvýšila. Možná úskalí lze hledat v tom, že povrchy vykazují odlišnou míru nově vytvořených povrchových rýh, které jsou známky abrazivního opotřebení (Obr. 5-14), a mají vliv na zastoupení parametrů A-F křivky. Pro signifikantnější porovnání by bylo vhodné se dívat na stejné místo povrchu před a po testu (in-situ), jako to ukazuje Hansen [3] nebo Clarke [1]. Tímto přístupem je možné porovnat přímo celou A-F křivku pro konkrétní místo a sledovat změny lépe.

Lapovaný povrch (BH2\_01 #320+LAP) vykazuje vysokou směrodatnou odchylku v měření parametru  $S_q$ . Ta je způsobena zastoupením hlubokých rýh v měřených místech. Zbytek povrchu vykazuje nosnou plochu vytvořenou lapováním. Pokud by tyto rýhy nebyly při vyhodnocení uvažovány (došlo by k jejich filtraci), celková hodnota parametru  $S_q$  by byla přibližně o 30% nižší.

Proces leštění se vyznačuje odstraněním nejvyšších vrcholů vzniklých broušením a povrch se zaobluje, což potvrzují nejnižší hodnoty parametrů  $S_{dq}$  a  $S_{sc}$  (Obr. 5-16). Leštění povrchu napomáhá k dosažení nižšího tření a současně nejvyšší stability při záběhu (Obr. 5-12).

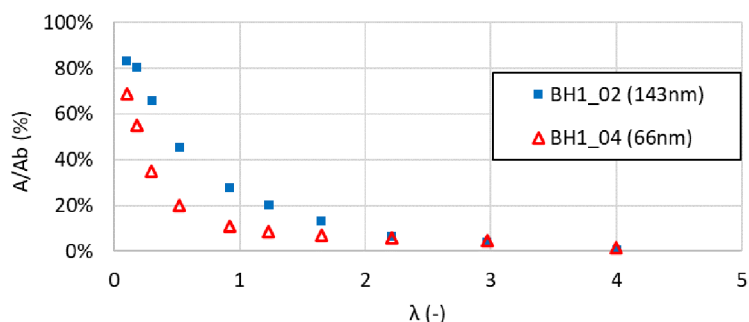
## 6.2 Verifikace hypotéz

### Hypotéza č.1

Lze předpokládat, že existuje limitní drsnost z hlediska stability vývoje povrchu, která bude odolná vůči změnám způsobených záběhem a povede na dlouhodobě stabilní oddělení třecích povrchů souvislým mazacím filmem. Minimální drsnost bude charakterizována plným oddělením povrchů při zachování své velikosti. U nejnižších hodnot bude pozorováno zhoršení povrchu, zatímco u vyšších drsností bude docházet ke zjemnění povrchu.

### Vyjádření:

Na základě záběhových testů, které byly provedeny pro stejných podmínek mazání napříč vzorky s různou velikostí drsnosti dle  $S_q$ , bylo potvrzeno, že u povrchů s nejvyšší původní drsností došlo ke snížení drsnosti ( $S_q > 73$  nm) a tím pádem i k lepšímu oddělení mazacím filmem pro parametr mazání počítaný z původní drsnosti. Naopak povrchy s minimální drsností povrchu vykazovaly na začátku testů nízkou hodnotu součinitele tření, ta se však brzy začala zvyšovat a celkově došlo ke zhoršení schopnosti kvalitního mazání z důvodu tvorby opotřebení, jehož velikost byla vzhledem k původní topografii významná. Současně bylo v rámci vzorků nalezeno optimum odolné vůči změnám během záběhu z hlediska minimálního tření a zachování plného oddělení povrchů mazacím filmem. Toto optimum bylo za daných provozních podmínek simulujících kontakt v ozubení shledáno v okolí parametru drsnosti  $S_q$  66 nm. Nižší hodnota drsnosti může být v dlouhodobé perspektivě lepší, protože i přes vyšší nárůst tření v první fázi je výsledná hodnota součinitele tření nižší. Ale jak ukazují data z Obr. 5-23, tento povrch je citlivý na provozní podmínky (parametr  $\lambda$ ). Vyšší hodnota drsnosti povrchu ( $S_q$  143 nm) zase nemusí vést v širším spektru rychlostí k nejnižšímu tření, jak lze vidět na Obr. 6-1. U těchto povrchů s vyšší drsností má významnou roli ovlivnění přímým kontaktem.



Obr. 6-1 Srovnání míry smíšeného mazání pro povrchy BH1\_02 a BH1\_04

## Hypotéza č.2

Různé struktury mají odlišný charakter rozložení výstupků a rýh, které popisuje Abbott-Firestonova křivka. Jednotlivé segmenty povrchu jsou vystaveny různým adhezivním a abrazivním účinkům. Výstupky jsou při provozu kontaktu rychle odstraněny, zatímco charakter rýh zůstává nezměněn a zásadně ovlivňuje mazání kontaktu.

### Vyjádření:

Bylo potvrzeno, že charakter drsnosti má vliv na tření a mazání. Při pohledu na data ze záběhu je zřejmé, že leštěný povrch se zabíhá rychleji než lapovaný a broušený. Leštěný povrch dosahuje nejvyšší hodnoty nosného jádra, resp. parametru SK dle A-F křivky a koreluje tak s nejnižším třením. Na druhé straně lapovaný povrch má podobně nízkou průměrnou hodnotu  $Sp_k$ , ale nedopadl v záběhu tak dobře. To může být odůvodněno vyšším parametrem  $Svk$  oproti leštěnému vzorku. Nicméně se jedná o možné vysvětlení, které by bylo vhodné ještě podpořit dalšími experimenty.

Avšak byla provedena bližší analýza pomocí dalších parametrů popisující odlišný charakter drsnosti. Mezi ně patří jak hybridní parametry  $Sdq$  a  $Ssc$ , tak délka autokorelační funkce  $Sal$ . U všech tří pozorovaných veličin byla zjištěna jasná závislost na velikosti součinitele tření. Struktura leštěného povrchu, která vykazovala nejvyšší hodnotu parametru  $Sal$ , zatímco sklon povrchu  $Sdq$  a průměrné zakřivení vrcholů  $Ssc$  byly nejnižší, dosahovala nejnižší hodnoty součinitele tření a nejlepší schopnosti oddělení třecích povrchů se současně nejvyšší stabilitou v záběhovém cyklu. Úprava topografie leštěním se tak jeví jako nejvhodnější ve všech směrech.

## 7 ZÁVĚR

V rámci řešení této diplomové práce byla provedena řada experimentálních měření s cílem popsat vliv reálně nerovných povrchů na tření a mazání v simulovaném kontaktu ozubení s předpokladem záběhu. Byl studován vliv velikosti a charakteru původní drsnosti povrchu na připravených vzorcích. Experimenty se zaměřovali na oblast smíšeného mazání až oblasti plného oddělení mazacím filmem, u kterého jsou vykazovány nejnižší hodnoty tření a tvoří tak důležitou oblast současného výzkumu. Další provozní podmínky byly voleny s ohledem na simulaci kontaktu v ozubení.

Důležitou částí práce je aplikace metody fluorescenční mikroskopie na sledování tloušťky mazacího filmu, která není omezená velikostí drsnosti. Využitím jednotné metodiky měření s využitím skriptování jsou získána ucelená data o tření a mazání v jednom synchronizovaném kroku. Fluorescenční metoda pro výzkum tohoto druhu kontaktu doposud nebyla využita, což vyplývá z provedené syntetické rešerše.

V práci je po vývoji měřicí metody navržena podoba experimentálních vzorků, stanoveny podmínky a simulovaný proces prvotních změn ve smyslu záběhu. Pro porovnatelnost jednotlivých měření jsou zajištěny stejné podmínky mazání dle klasické a obecně používané definice parametru mazání.

Hlavní zjištěné poznatky plynoucí z této diplomové práce:

- Fluorescenční mikroskopie je vhodnou metodou především pro měření mazacích filmů s vyššími tloušťkami. Po dalším a důkladnějším vývoji má ale tato metoda ambice pro širší spektrum použití.
- Velikost drsnosti má zásadní vliv na velikost tření a udržitelnost během záběhu a po něm. Povrchy s vyšší drsností se v provozu zjemňují, zatímco nejhladší struktury nejsou udržitelné z hlediska stabilního tření a mazání.
- Povrchy se stejnou velikostí drsnosti dle  $S_q$  vykazují odlišný charakter dle hybridních parametrů. Leštěný povrch, vyznačující se nejnižšími parametry  $S_dq$  a  $S_{sc}$ , vykazuje nejnižší tření a nejvyšší stabilitu během záběhu.
- Optimum velikosti drsnosti se nachází v okolí  $S_q$  60 až 70 nm. Vyšší drsnosti jsou více ovlivněny nerovnostmi ve smíšeném a EHD režimu mazání (podle parametru mazání  $\lambda$ ) a nižší drsnosti nejsou udržitelné z důvodu rychlé iniciace tvorby opotřebení.

Poznatky obsažené v této práci mají přínos pro lepší pochopení vlivu obecně nerovných povrchů a mohou vést k přesnějším inženýrským návrhům povrchů především v ozubení. Možnými navazujícími pracemi je prověření dalších struktur nebo detailnější výzkum vlivů u fluorescenční mikroskopie. Především eliminace parazitních jevů, jako je např. přirozená interference a celkové zpřesnění metody.

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Výsledkem dle „Metodiky hodnocení výzkumných organizací a programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací“ je finalizovaný rukopis, který je podkladem pro publikační výsledek I. Kategorie J<sub>imp</sub>:

Morický O., Sperka P..The effect of surface roughness on friction and lubrication in simulated gear contact

### Abstrakt

The purpose of this study is to describe effect of surface roughness on lubricating film formation and friction behaviour in lubricated point contact. The ball-on-disc contact is operated under conditions of transition from mixed to elastohydrodynamic lubrication regime. The measurement of the thickness of thin lubrication films on generally rough surfaces is approached by fluorescence microscopy. The effects of magnitude and character of the initial roughness, including their evolution during the running-in processes, are described. The result is a closer understanding of the mechanisms taking place in this type of contact and the identification of the optimum surface roughness in terms of resistance to changes during running-in for specific operating conditions.



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CLARKE, A., I. J.J. WEEKS, R. W. SNIDLE a H. P. EVANS. Running-in and micropitting behaviour of steel surfaces under mixed lubrication conditions. *Tribology International*. 2016, roč. 101, s. 59–68. ISSN 0301679X.
- [2] HANSEN, Jonny, Marcus BJÖRLING a Roland LARSSON. Mapping of the lubrication regimes in rough surface EHL contacts. *Tribology International*. 2019, roč. 131, č. October 2018, s. 637–651. ISSN 0301679X.
- [3] HANSEN, Jonny, Marcus BJÖRLING a Roland LARSSON. Topography transformations due to running-in of rolling-sliding non-conformal contacts. *Tribology International*. 2020, roč. 144, č. 2. ISSN 0301679X.
- [4] HANSEN, J., M. BJÖRLING a R. LARSSON. A New Film Parameter for Rough Surface EHL Contacts with Anisotropic and Isotropic Structures. *Tribology Letters*. 2021, roč. 69, č. 2.
- [5] PEI, X., W. PU, Y. ZHANG a L. HUANG. Surface topography and friction coefficient evolution during sliding wear in a mixed lubricated rolling-sliding contact. *Tribology International*. 2019, roč. 137, s. 303–312.
- [6] BONAVENTURE, J., J. CAYER-BARRIOZ a D. MAZUYER. Transition Between Mixed Lubrication and Elastohydrodynamic Lubrication with Randomly Rough Surfaces. *Tribology Letters*. 2016, roč. 64, č. 3.
- [7] MORALES-ESPEJEL, G. E., A. W. WEMEKAMP a A. FÉLIX-QUIÑONEZ. Micro-geometry effects on the sliding friction transition in elastohydrodynamic lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, roč. 224, č. 7, s. 621–637. ISSN 13506501.
- [8] LUGT, P. M., R. W.M. SEVERT, J. FOGELSTRÖM a J. H. TRIPP. Influence of surface topography on friction, film breakdown and running-in in the mixed lubrication regime. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001, roč. 215, č. 6, s. 519–533. ISSN 13506501.
- [9] AKBARZADEH, S. a M.M. KHONSARI. Experimental and theoretical investigation of running-in. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 2, s. 92–100.
- [10] MORALES-ESPEJEL, G.E., V. BRIZMER a E. PIRAS. Roughness evolution in mixed lubrication condition due to mild wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2015, roč. 229, č. 11, s. 1330–1346.
- [11] AKBARZADEH, S. a M.M. KHONSARI. On the prediction of running-in behavior in mixed-lubrication line contact. *Journal of Tribology*. 2010, roč. 132, č. 3, s. 1–11.
- [12] ALBERS, A. a S. REICHERT. On the influence of surface roughness on the wear behavior in the running-in phase in mixed-lubricated contacts with the finite element method. *Wear*. 2017, roč. 376–377, s. 1185–1193. ISSN 00431648.
- [13] REJENT, Pavel. *Záběh povrchů strojních součástí*. Brno, 2020. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=212252](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=212252)
- [14] NECAS, David, Petr SPERKA, Martin VRBKA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL.

- Film thickness mapping in lubricated contacts using fluorescence. *MM Science Journal*. 2015, roč. 2015, č. DECEMBER, s. 821–824. ISSN 18050476.
- [15] *AT - Aqua Longpass | Chroma Technology Corp.* [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: [https://www.chroma.com/products/sets/19001-at-aqua-longpass#tabs-detail\\_page\\_plot-left-1%7Ctabs-0-main-1](https://www.chroma.com/products/sets/19001-at-aqua-longpass#tabs-detail_page_plot-left-1%7Ctabs-0-main-1)
- [16] *Mounted LEDs.* [vid. 11. květen 2022]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=2692](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2692)
- [17] CAGAŠ, R. *Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek*. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=101936](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101936)
- [18] *Trioctyl Trimellitate (TOTM) - Chemical Supplier Distributor Chemceed.* [vid. 12. květen 2022]. Dostupné z: <https://chemceed.com/products/trioctyl-trimellitate-totm/>
- [19] BAIR, Scott. The temperature and pressure dependence of viscosity and volume for two reference liquids. *Lubrication Science*. 2016, roč. 28, č. 2, s. 81–95. ISSN 15576833.
- [20] LIÑEIRA DEL RÍO, José M., María J.G. GUIMAREY, María J.P. COMUÑAS a Josefa FERNÁNDEZ. High pressure viscosity behaviour of tris(2-ethylhexyl) trimellitate up to 150 MPa. *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2019, roč. 138, s. 159–166. ISSN 10963626.
- [21] WAKEHAM, William A., Marc J. ASSAEL, Helena M.N.T. AVELINO, Scott BAIR, Hseen O. BALED, Babatunde A. BAMGBADE, Jean Patrick BAZILE, Fernando J.P. CAETANO, María J.P. COMUÑAS, Jean Luc DARIDON, João C.F. DIOGO, Robert M. ENICK, João M.N.A. FARELEIRA, Josefa FERNÁNDEZ, M. Conceição OLIVEIRA, Tânia V.M. SANTOS a Chrysi M. TSOLAKIDOU. In Pursuit of a High-Temperature, High-Pressure, High-Viscosity Standard: The Case of Tris(2-ethylhexyl) Trimellitate. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2017, roč. 62, č. 9, s. 2884–2895. ISSN 15205134.
- [22] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part 1—Theoretical Formulation. *J Lubr Technol Trans ASME*. 1976, roč. 98 Ser F, č. 2, s. 223–229. ISSN 0022-2305.
- [23] NAVRÁTIL, Marek. *Vliv stárnutí plastického maziva na jeho chování v blízkém okolí elastohydrodynamického kontaktu*. Brno, 2019. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=193265](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193265)
- [24] DENK, Winfried, James H. STRICKLER a Watt W. WEBB. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy. *Science*. 1990, roč. 248, č. 4951, s. 73–76. ISSN 00368075.
- [25] BLUNT, Liam a Xiangqian JIANG. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards „Surfstand“. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards „Surfstand“*. 2003, s. 1–355.
- [26] TYKAL, Doc Ing Miroslav. Normalizace struktury povrchu, současný stav a trendy vývoje. nedatováno.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### Seznam použitých zkratek

A-F	Abbott-Firestone
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
ECR	Electric Contact Resistance
EHD	elastohydrodynamický
EHL	elastohydrodynamicky mazaný
EP	extreme pressure
IF	Impact Factor
IPA	isopropylalkohol
LED	Light-Emitting Diode
ND	neutral-density
PAO	polyalphaolefin
RMS	root mean square
SRR	Slide-to-Roll Ratio
SQL	squalene
TOTM	Trioctyl Trimellitate
ÚK	Ústav konstruování
VSI	Vertical Scanning Interferometry

### Seznam použitých symbolů

$E$	Youngův modul pružnosti
$F_N$	normálové zatížení
$\lambda$	parametr mazání
$\lambda^*$	modifikovaný parametr mazání
$G$	parametr materiálu
$U$	parametr rychlosti
$W$	parametr zatížení
$\mu$	Poissonův poměr
$h_m$	minimální tloušťka filmu
$h_c$	centrální tloušťka filmu
$p_H$	Hertzův tlak
$R_a$	průměrná aritmetická úchylka povrchu

$R_q$	průměrná kvadratická úchylka povrchu
$R_Y$	ekvivalentní poloměr křivosti v ose Y
$R_X$	ekvivalentní poloměr křivosti v ose X
$k$	parametr elipticity
$\alpha_p$	tlakově-viskozitní koeficient
$E'$	ekvivalentní konstanta elasticity
$\eta$	dynamická viskozita
$u$	průměrná unášecí rychlost
SK	výška jádra
Spk	redukovaná výška vrcholků
Svk	redukovaná hloubka prohlubní
Sdq	základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí
Ssc	průměrné zakřivení vrcholků
Sal	délka autokorelační funkce
Sa	průměrná aritmetická úchylka povrchu
Sq	průměrná kvadratická úchylka povrchu
$z_0$	nezatížená výška vrcholků
$\delta_a$	velikost plastické deformace
$\phi_{em}$	intenzita emitovaného světla
$h$	tloušťka mazacího filmu
$k$	hodnota násobící intenzitní signál
$q$	velikost odečítaného pozadí
$M$	měřený krouticí moment
$M_r$	parazitní moment od ložisek
$r$	poloměr kuličky
$\frac{A}{A_B}$	míra smíšeného mazání
$\mu_B$	mezní složka součinitele tření
$\mu_{EHD}$	elastohydrodynamická složka součinitele tření
$\mu_{celk}$	celková hodnota součinitele tření

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Vývojový diagram PRISMA .....	15
Obr. 2-2 Schéma zařízení ball-on-disc pro měření elektrického odporu v kontaktu (ECR)16	
Obr. 2-3 Schéma znázorňující teoretický rámec navrhovaného parametru $\lambda^*$ .....	17
Obr. 2-4 In-situ optické profily povrchů před a po testu [3] .....	18
Obr. 2-5 Abbott-Firestonovy křivky před (a), a po testu (b) pro stejnou oblast [3].....	18
Obr. 2-6 Modelová predikce vývoje drsnosti povrchu [10], upraveno .....	19
Obr. 2-7 Zvětšený detail dráhy po testu s projevy micropittingu (rozměry cca 0,5 x 1,2 mm) [1] .....	20
Obr. 2-8 Topografie povrchu disku po testu při různých hodnotách SRR [5] .....	20
Obr. 2-9 Vývoj mazacího filmu (nahore) a přetvoření povrchu (dole) [5] .....	21
Obr. 2-10 Vývoj velikosti kontaktní plochy vyšetřovaných kontaktních dvojic [12] .....	21
Obr. 2-11 Stribeckovy křivky pro jednotlivé experimentální vzorky [8].....	22
Obr. 4-1 Schéma postupu řešení .....	26
Obr. 4-2 Schéma optického tribometru ball-on-disc [14] .....	27
Obr. 4-3 EHD Rig upraven pro účely fluorescenční mikroskopie .....	28
Obr. 4-4 Graf transmise fluorescenčních filtrů AT 19001 se zobrazených spektrem LED zdroje [15, 16] .....	28
Obr. 4-5 Optický profilometr Bruker ContourGT-X.....	29
Obr. 4-6 Model zařízení. (A) rám; (B) domek upínacího hrotu; (C) ozubený řemen; (D) domek druhého trnu; (E) obráběný element (soudeček/kulička); (F) domek čepu (osa kyvu); (G) podsestava nástroje a motoru; (H) servo; (I) skříň elektroniky [17].....	30
Obr. 4-7 Teplotně-viskozitní model Trioctyl Trimellitate (TOTM).....	31
Obr. 4-8 Postup vytvoření povrchů s nerovnostmi .....	33
Obr. 4-9 Topografie povrchu kuliček sady BH1 .....	35
Obr. 4-10 Topografie povrchu kuliček sady BH2 s uvedenými XY profily.....	36
Obr. 4-11 Proces obarvení oleje pomocí fluorescenčního barviva Coumarin 6.....	37
Obr. 4-12 Přípravek pro kalibraci na flatfield [23] .....	37
Obr. 4-13 Snímky hladkého kontaktu z fluorescence; a) 50 mm/s; b) 150 mm/s; c) 400 mm/s; d) 600 mm/s .....	38

Obr. 5-1 Porovnání fluorescenční metody s měřením z interferometrie. $F = 7,5 \text{ N}$ .....	40
Obr. 5-2 Další měření za vyššího zatížení. $F = 21 \text{ N}$ .....	41
Obr. 5-3 Ztráta intenzity fluorescenčního světla při stálém svícení a se záblesky.....	42
Obr. 5-4 Rozptyl hodnot v závislosti na otáčkách disku a kuličky.....	42
Obr. 5-5 Porovnání teoretické kontaktní oblasti a fluorescenčního signálu na statickém kontaktu.....	43
Obr. 5-6 Měření tloušťky tenkých filmů pomocí fluorescence.....	44
Obr. 5-7 Relativní odchylky pro měření tenkých filmů na hladkém kontaktu.....	44
Obr. 5-8 Vývoj celkového součinitele tření pro vzorky s odlišnou velikostí drsnosti.....	45
Obr. 5-9 Vývoj celkového součinitele tření pro vzorky s odlišným charakterem drsnosti	46
Obr. 5-10 Experimentálně zjištěné EHD tření pro jednotlivé provozní teploty .....	47
Obr. 5-11 Míra ovlivnění tření smíšeným mazáním pro vzorky s odlišnou velikostí drsnosti .....	47
Obr. 5-12 Míra ovlivnění tření smíšeným mazáním pro vzorky s odlišným charakterem drsnosti .....	48
Obr. 5-13 Porovnání drsnosti před a po záběhu; a) sada vzorků k H1; b) sada k H2 .....	48
Obr. 5-14 Topografie vzorků po záběhu s viditelným abrazivním opotřebením.....	49
Obr. 5-15 Parametry A-F křivky vztažené k drsnosti $S_q$ .....	50
Obr. 5-16 Porovnání povrchů pomocí vybraných hybridních parametrů $S_{dq}$ a $S_{sc}$ .....	50
Obr. 5-17 Prostorový parametr $S_{al}$ popisující délku autokorelační funkce .....	51
Obr. 5-18 Porovnání hybridních parametrů $S_{dq}$ a $S_{al}$ pro vzorky z první sady měření ....	51
Obr. 5-19 Stribeckovy křivky pro povrchy s nejvyšší velikostí drsnosti (BH1_01 a BH1_02) .....	52
Obr. 5-20 Stribeckovy křivky pro povrchy se střední velikostí drsnosti (BH1_03 a BH1_04) .....	52
Obr. 5-21 Stribeckovy křivky pro povrchy s nejnižší velikostí drsnosti (BH1_05 a SMOOTH) .....	53
Obr. 5-22 Stribeckovy křivky pro povrchy s odlišným charakterem drsnosti.....	53
Obr. 5-23 Záběhový test pro provoz v rozdílných režimech mazání, včetně změny drsnosti povrchu.....	54
Obr. 5-24 Porovnání snímků topografie po záběhu pro odlišný parametr mazání $\lambda$ .....	54
Obr. 5-25 Hybridní parametry $S_{dq}$ a $S_{sc}$ pro provoz při odlišném parametru $\lambda$ .....	54

Obr. 5-26 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1_01 (246nm) .....	55
Obr. 5-27 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1_02 (143nm) .....	56
Obr. 5-28 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1_03 (73nm).....	56
Obr. 5-29 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1_04 (66nm).....	56
Obr. 5-30 Tloušťka mazací vrstvy pro vzorek BH1_05 (34nm).....	57
Obr. 5-31 Relativní odchylky tloušťky filmu před a po testu pro jednotlivé vzorky .....	57
Obr. 6-1 Srovnání míry smíšeného mazání pro povrchy BH1_02 a BH1_04.....	61

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Přehled vzorků pro hlavní měření s uvedeným parametrem $S_q$ .....	31
Tab. 4-2 Materiálové vlastnosti kontaktních dvojic .....	32



# 13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Seznam rešeršních dotazů

Č.	Rešeršní dotaz
1	Running-in AND Roughness
2	Running-in AND Roughness AND Friction
3	Running-in AND Roughness AND Friction AND Gears
4	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction
5	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND Gears
6	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Mixed lubrication OR EHL)
7	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND Ball-on-disk
8	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Ball-on-disk OR Interferometry OR Fluorescent OR Fluorescence)
9	Roughness AND Friction AND (Fluid film OR Film thickness OR Tribofilm)
10	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Fluid film OR Film thickness OR Tribofilm)
11	Roughness AND Friction AND (Fluid film OR Film thickness OR Tribofilm) AND (Ball-on-disk OR Interferometry OR Fluorescent OR Fluorescence)
12	Roughness AND Friction AND (Ball-on-disk OR Interferometry OR Fluorescent OR Fluorescence)
13	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Ball-on-disk OR Interferometry OR Fluorescent OR Fluorescence)
14	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Surface OR Structure OR Topography)
15	(Running-in OR Wear-in OR Break-in) AND Roughness AND Friction AND (Mixed lubrication OR EHL) AND (Surface OR Structure OR Topography)

Příloha 2 Četnost výsledků pro jednotlivé dotazy

Č.	Počet výsledků			
	Scopus			Web of Science
	TITLE-ABS-KEY	TITLE	KEY	TOPIC
1	550	33	162	498
2	285	4	90	264
3	25	0	5	24
4	527	94	10	471
5	32	0	5	30
6	62	0	17	91
7	4	0	0	5
8	6	0	0	9
9	177	0	25	1037
10	8	0	0	65
11	8	0	1	49
12	291	0	108	259
13	6	0	0	9
14	496	6	90	446
15	60	0	17	90

Příloha 3 Porovnání četnosti výsledků z databáze Scopus a Web of Science

