



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ZÁBĚH POVRCHŮ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ

RUNNING-IN OF MACHINE ELEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Rejent

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Pavel Rejent**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 bakalářské práce:

Záběh povrchů strojních součástí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Povrchy strojních součástí prochází změnami během záběhu, které mění provozní parametry stroje. Podmínky při záběhu mohou mít vliv na fungování součástí po záběhu. Důvodem je vznik specifické struktury povrchu, která má pozitivní nebo negativní vliv na třecí procesy. Pro zjištění vlivu podmínek při záběhu bude v této práci studována změna povrchu vzorků během záběhu a experimentálně měřen vliv na tření a mazání.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je naměřit vliv změny povrchu během záběhu na tření a tloušťku mazací vrstvy pro různé provozní podmínky a různou výchozí strukturu povrchu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled v oblasti mazání inženýrských povrchů,
- připravit vzorky a navrhnout postup testování,
- realizovat a vyhodnotit měření.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

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

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

Seznam doporučené literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 0123970474.

SPIKES, H. A. Mixed lubrication—an overview. Lubrication Science, 1997, 9.3: 221-253.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem změny topografie na průběh záběhu součásti. Cílem bylo vyhodnotit časovou změnu součinitele tření během záběhu pěti ocelových kuliček s různým opracováním povrchu. Experiment byl proveden při smíšeném mazání kontaktu. Dále bylo úkolem po určitých časových úsecích kontrolovat změnu parametrů topografie. Pro každý vzorek měla být také vyhodnocena tloušťka mazací vrstvy. Výstupem měření jsou grafy časového průběhu součinitele tření a časové změny vybraných parametrů topografie. Změna topografie byla také zaznamenána na křivkách nosného podílu povrchu a naměřená tloušťka mazacího filmu byla porovnána s predikovanou hodnotou. Práce rozšiřuje povědomí o průběhu záběhu a poskytuje porovnání pro opracování povrchu třemi různými druhy brusných papírů a změnu v chování součásti při záběhu po lapování či leštění.

KLÍČOVÁ SLOVA

záběh, opotřebení, tloušťka mazacího filmu, smíšené mazání

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the effect of topography change on the running-in of a machine element. The objective was to evaluate the time change of the friction coefficient during running-in of five steel balls with different surface treatment. The experiment was performed in mixed lubrication regime. There was also a task to measure the change of surface topography after a concrete time intervals. Another task was to evaluate a fluid film thickness for every steel ball. The output of the measurement are graphs containing the time function of friction coefficient and time change of selected surface topography parameters. The change of topography was also displayed on Abbott-Firestone curves and the fluid film evaluation was compared with the predicted value. The thesis improves knowledge about running-in process and provides comparison for surface machining by three different types of sandpaper and shown change in the behaviour of machine element after lapping or polishing.

KEYWORDS

running-in, wear, fluid film thickness, mixed lubrication

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

REJENT, Pavel. *Záběh povrchů strojních součástí*. Brno, 2020, 55 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124574>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za jeho pomoc a cenné rady při psaní této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za obrovskou podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Tribologie	14
2.2	Tření a opotřebení	14
2.3	Mazání	15
2.4	Stribeckova křivka	15
2.5	Parametry měření struktury povrchu	17
2.5.1	Výškové parametry S_a , S_q , S_{sk} a S_{ku}	18
2.5.2	Křivka nosného podílu povrchu	20
2.5.3	Funkční parametry S_k , S_{pk} a S_{vk}	20
2.6	Záběh	21
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3.1	Analýza problému	24
3.2	Cíl práce	24
4	MATERIÁL A METODY	25
4.1	Testovací vzorky	25
4.2	Zařízení pro úpravu povrchu kuličky	25
4.3	Optický tribometr EHD5	26
4.4	3D optický profilometr Bruker ContourGT-X8	28
4.5	Počáteční podmínky a postup experimentu	28
4.5.1	Počáteční podmínky experimentu	29
4.5.2	Postup při měření experimentu	29
5	VÝSLEDKY	32
5.1	Vyhodnocení součinitele tření	32
5.2	Vyhodnocení topografie povrchu	35
5.3	Vyhodnocení tloušťky mazacího filmu	41
6	DISKUZE	46
6.1	Vliv způsobu opracování vzorku na součinitel tření	46

6.2	Vliv způsobu opracování vzorku na topografii povrchu	46
6.3	Vliv způsobu opracování vzorku na tloušťku mazacího filmu	47
6.4	Vliv způsobu opracování vzorku na záběh	47
7	ZÁVĚR	48
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	51
9.1	Seznam použitých zkratk	51
9.2	Seznam použitých symbolů a veličin	51
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	53
10.1	Seznam obrázků	53
10.2	Seznam grafů	54
11	SEZNAM TABULEK	55

1 ÚVOD

Záběh povrchu je velmi důležitým procesem, kterým si musí projít každá strojní součást. Jeho průběh ovlivní vlastnosti a výkon této součásti po zaběhnutí. Současnou funkcí záběhu je zarovnání nově vyrobeného povrchu a při vyšších zatíženích i jeho vytvrzení. Při zabíhání součásti je kladen důraz na co nejkratší čas a dosažení finálních požadovaných vlastností materiálu. Jedná se o oblast tribologie, která byla v minulosti zkoumána méně v porovnání s ostatními oblastmi. Z velké části jsou studie o záběhu prováděny pokusem a pro zařízení s hromadnou produkcí jako např. spalovací motory, ozubení, či třecí brzdy jsou pro záběh vyvinuty postupy, které by měly zajistit optimální záběh všech komponent a částí stroje.

V této bakalářské práci je zkoumán vliv topografie a zvolených způsobů opracování materiálu na průběh záběhu pěti vybraných vzorků, kterými jsou normované ocelové kuličky. Tři vzorky jsou opracovány brusnými papíry z karbidu křemíku SiC400, SiC600 a SiC1500. Zbývající dva vzorky jsou po opracování brusným papírem SiC400 lapovány a jeden z nich je po lapování ještě leštěn. Na vzorcích provedeme experiment záběhu v optickém tribometru, ve kterém dochází ke kontaktu povrchu vzorku se safírovým diskem v režimu smíšeného mazání po dobu 78 minut za současného měření součinitele tření. Doba experimentu rozdělíme na třetiny, tedy na časové úseky po 16 minutách. Po uplynutí časového úseku experiment přerušíme a na vzorku pomocí 3D optického profilometru měříme změnu topografie po tomto časovém úseku. Přerušeni experimentu poskytuje také povědomí o skokové změně součinitele tření ve fázi promazávání kontaktu kuličky a disku a tvorbě mazacího filmu. Před posledním měřením topografie vyhodnotíme tloušťku mazacího filmu pro každou kuličku.

Práce interpretuje závěry o vlivu volby způsobu opracování povrchu na součinitel tření, topografii povrchu, tloušťku mazacího filmu a na záběh samotný.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Tribologie

Tribologie zkoumá kontakt dvou povrchů v relativním pohybu (valení, klouzáni). Jejím zaměřením jsou především tření, opotřebení a mazání. Jedná se o oblast vědy řešící problémy s velkým ekonomickým významem jako např. spolehlivost, údržba a opotřebení strojních prvků. [1]

2.2 Tření a opotřebení

Tření je pasivní odpor, který je produkován dvěma interagujícími povrchy ve vzájemném relativním pohybu. Jeho charakteristickou veličinou je třecí síla. Ta závisí na normálovém zatížení působícím na součást. Podílem třecí a normálové síly vypočteme součinitel tření. [2]

Interakce povrchů mezi sebou způsobuje jejich opotřebení. Jedná se o degradační proces, který způsobuje úbytek materiálu obou těles. Můžeme si ho rozdělit do šesti skupin: abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační, vibrační, únavové. [3, 4]

Abrazivní opotřebení můžeme rozdělit na dva druhy, jelikož k jeho vzniku dochází při interakci dvou, nebo tří těles. Interakce dvou těles vzniká, když tvrdší těleso proniká do měkčího a tím mu působí abrazivní opotřebení. Interakce tří těles nastane, pokud se z tvrdšího tělesa uvolní abrazivní částice, které poté pronikají do měkčího. Abrazivní opotřebení lze snížit mazáním kontaktu nebo změnou drsnosti povrchu. [5]

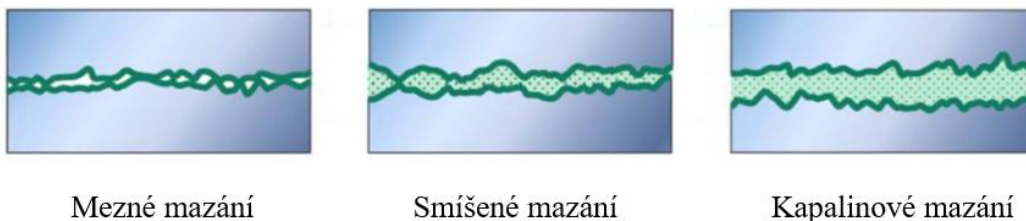
K adhezivnímu opotřebení dojde, když mezi sebou dva materiály s podobnou tvrdostí vytvoří tzv. adhezí spoje. Jedná se v podstatě o mikrosvary, které jsou následně odtrženy a dochází k přenosu částic z jednoho materiálu na druhý. Pokud odtržená částice neulpí na druhém povrchu, dostane se do okolního prostředí – mazacího filmu, který má za úkol její odplavení. Toto uvolnění do maziva může, ale nutně nemusí probíhat za současného vzniku částice opotřebení. [5]

Teplotní ovlivnění či deformační zpevnění částic zvýší jejich tvrdost. Při nedostatečné tloušťce mazací vrstvy pro jejich odvod mohou způsobit výše zmíněné abrazivní opotřebení (kontakt tří těles). Mazivo je proto velmi důležité, jelikož napomáhá zabránit tvorbě mikrosvarů či odvodu částic při jejich uvolnění. [5]

2.3 Mazání

Jak již bylo zmíněno, tření a opotřebení lze snížit vhodným užitím maziva. Mazaný kontakt může být provozován ve třech hlavních režimech mazání vyobrazených na Obr. 2-1 [6]

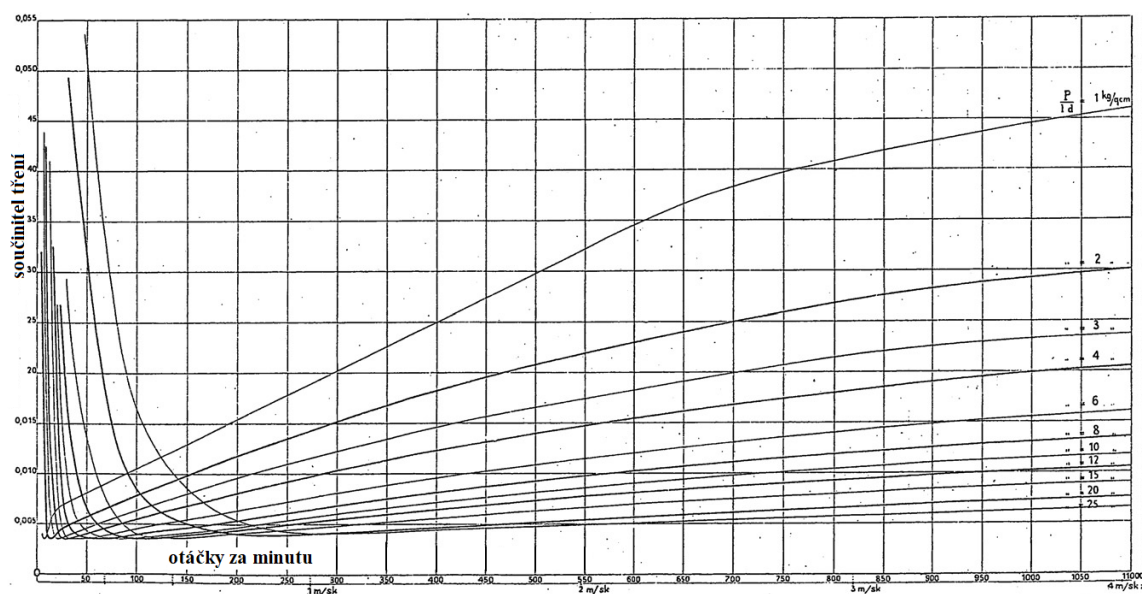
1. mezné – zatížení je přenášeno přímým kontaktem povrchů,
2. smíšené – zatížení je přenášeno kontaktem povrchů, ale z části i mazacím filmem,
3. kapalinové (elastohydrodynamické, hydrodynamické) – zatížení je přenášeno pouze mazacím filmem.



Obr. 2-1 Režimy mazání [3].

2.4 Stribeckova křivka

Tuto křivku vytvořil německý inženýr Richard Stribeck na začátku 20. století na základě zkoumání kluzných ložisek. Sledoval závislost součinitele tření dvou materiálů jako funkci rychlosti pro různá zatížení. Původní podoba Stribeckovy křivky je znázorněna na Obr. 2-2. [7]



Obr. 2-2 Původní Stribeckova křivka – upraveno [7].

Německý vědec Ludwig Gümbel využil tuto studii ke zdokonalení křivky (Obr. 2-3), kdy součinitel tření určil jako funkci bezrozměrného parametru (tzv. Gümbelova čísla) [7], tj.

$$\text{Gümbelovo číslo} = \frac{\eta^* \omega}{p}, \quad (1)$$

kde

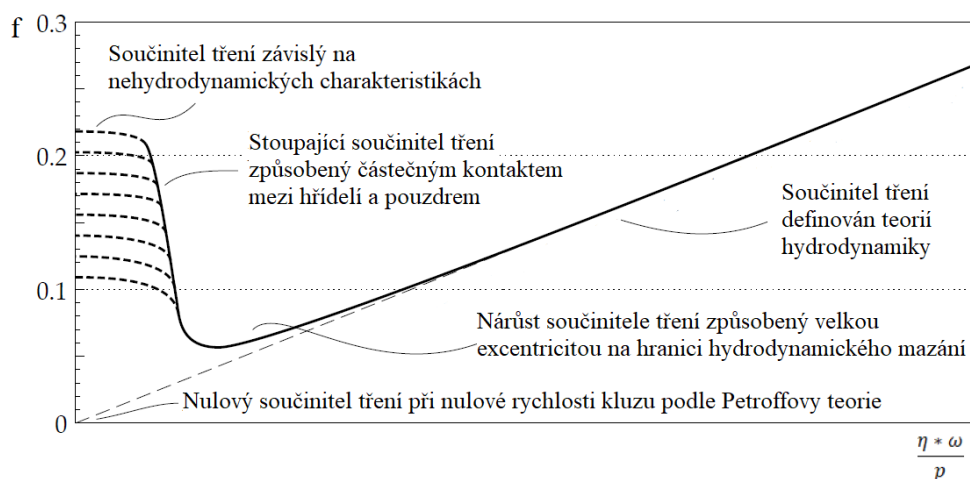
Gümbelovo číslo – [-],

η – viskozita maziva [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2$],

ω – úhlová rychlost čepu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$],

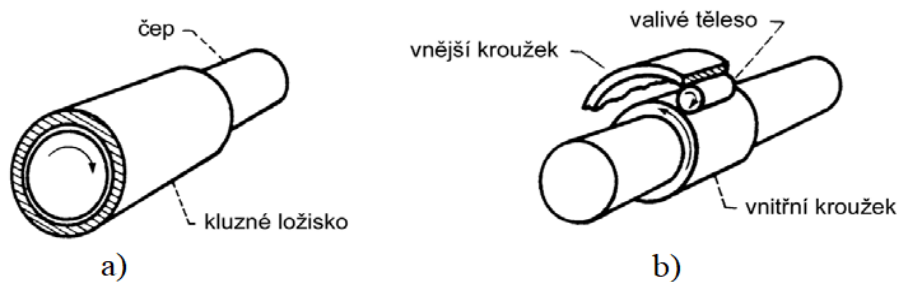
p – tlak [Pa].

Je zajímavé, že ve stejnou dobu použil stejný postup také americký vědec Mayo D. Hersey. Proto v některých literárních pramenech můžeme najít toto číslo označené jako Herseyho. [7]



Obr. 2-3 Stribeckova křivka podle Gümbelovy/Herseyho teorie – upraveno [1].

Kluzné ložisko, na kterém Richard Stribeck pokusy prováděl, je součástí s konformně zakřiveným třecím povrchem. V současné době se čím dál více využívají součásti s nekonformně zakřivenými třecími povrchy (např. valivá ložiska). Součásti s těmito třecími povrchy jsou vyobrazeny na Obr. 2-4.



Obr. 2-4 a) Konformně a b) nekonformně zakřivený třecí povrch [8].

Použití Stribeckovy křivky v její podobě s Herseyho/Gümbelovým číslem zajišťovalo její pohodlnou regulaci pro různé kombinace veličin, které toto číslo zahrnuje. Křivka v tomto případě ovšem neřeší různou topografii povrchů, což vedlo k zavedení tzv. parametru mazání, který vliv drsnosti povrchu zahrnuje a jeho použití pro Stribeckovu křivku je zobrazeno na Obr. 2-5. Parametr mazání vyjadřuje následující vztah [3]

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_{q1}^2 \cdot R_{q2}^2}, \quad (2)$$

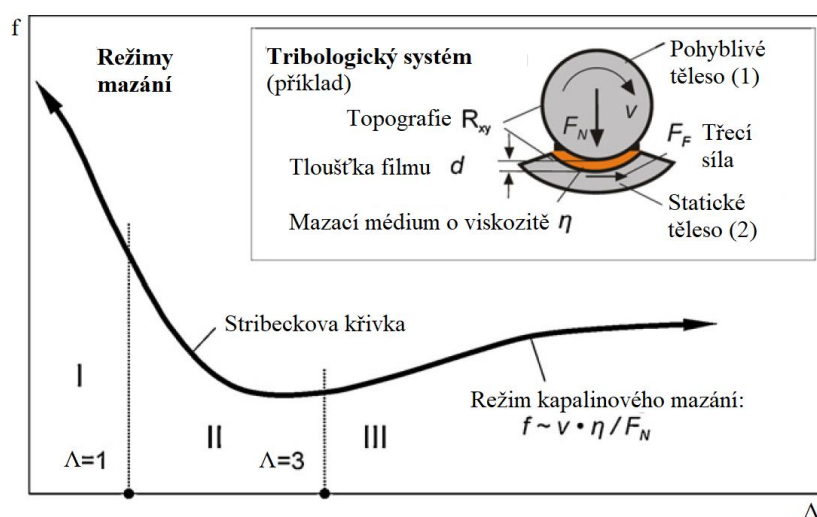
kde

Λ – parametr mazání [-],

h_{min} – minimální tloušťka mazacího filmu [μm],

R_{q1} – průměrná kvadratická odchylka profilu 1 [μm],

R_{q2} – průměrná kvadratická odchylka profilu 2 [μm].



Obr. 2-5 Křivka, kde součinitel tření závisí na parametru mazání Λ – upraveno [7].

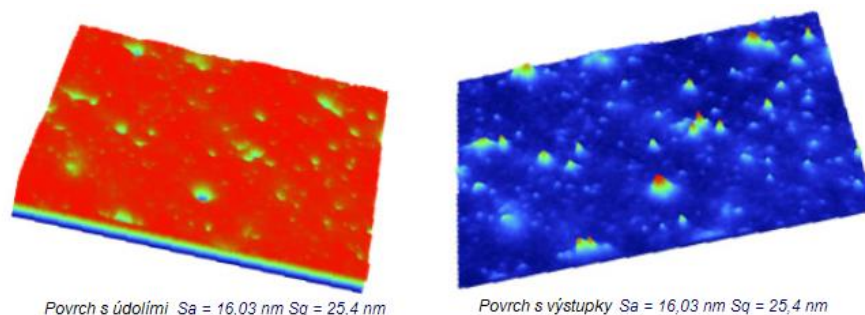
Dle [6] lze hranici přechodu z režimu kapalinového mazání do režimu smíšeného mazání předpokládat na hodnotě parametru mazání $\Lambda = 3$.

2.5 Parametry měření struktury povrchu

V této kapitole budou shrnuty parametry topografie užité při vyhodnocení výsledků naměřených pro tuto práci. Jedná se o plošné parametry (S-parametry).

2.5.1 Výškové parametry S_a , S_q , S_{sk} a S_{ku}

Parametry S_a a S_q se nazývají aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu, respektive základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu, jsou vyhodnoceny z celého povrchu a jsou nejčastěji využívány na vyjádření míry drsnosti povrchu. Jsou ale necitlivé na výstupky a údolí v materiálu. Proto tyto parametry mohou být zavádějící a nedefinují vzhled měřeného povrchu, čehož si můžeme povšimnout na Obr. 2-6. [9]



Obr. 2-6 Neprůkaznost použití parametrů S_a a S_q – upraveno [9].

Matematicky lze tyto parametry vyjádřit těmito rovnicemi

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| \, dx \, dy, \quad (3)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A (Z(x,y))^2 \, dx \, dy}, \quad (4)$$

kde

S_a – aritmetický průměr výšky čtvercem omezené stupnice povrchu [nm],

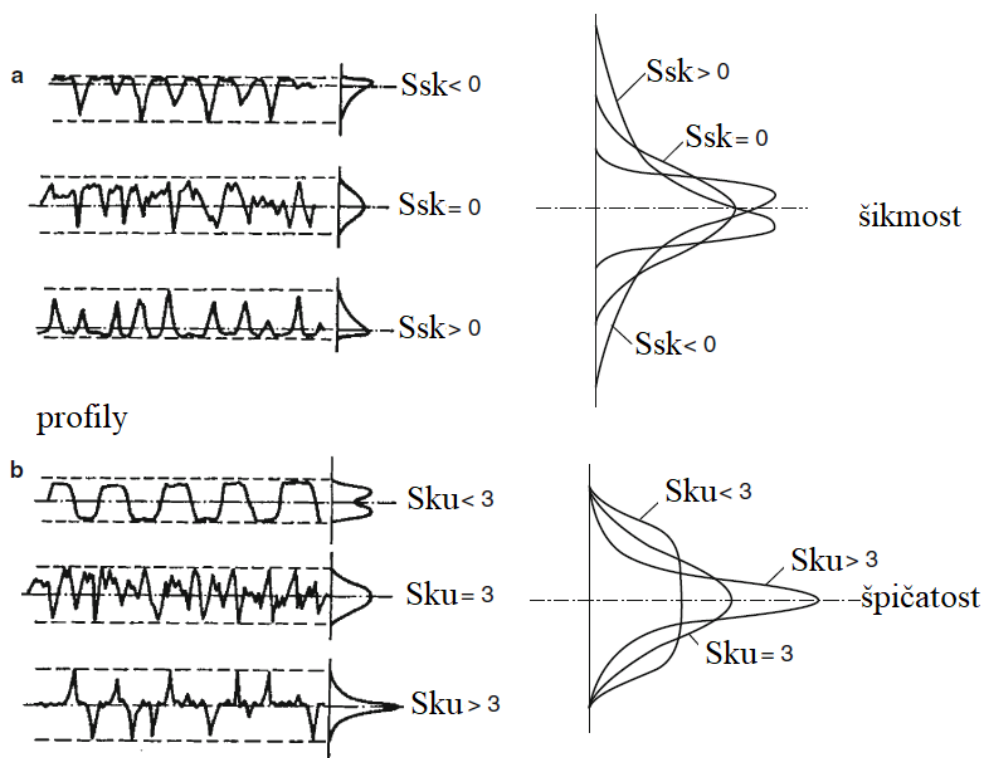
S_q – základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu [nm],

A – plocha ohraničující vyhodnocovanou oblast [nm²],

$Z(x,y)$ – funkce představující výšku profilu vůči základní rovině [nm].

Parametr S_a je nejčastěji využíván u obráběných součástí a parametr S_q je obvykle používán pro optické povrchy.

Parametry S_{sk} a S_{ku} se nazývají šikmost omezené stupnice povrchu, respektive špičatost omezené stupnice povrchu. Vyjadřují míru odchylky od normálního Gaussova rozdělení povrchu (tzv. Gaussovy křivky). Parametr šikmosti představuje míru symetrie výšek povrchu vůči základní rovině. Jak je patrné z Obr. 2-7, lze dle znaménka rozhodnout o převaze vrcholů ($S_{sk} > 0$), nebo údolí ($S_{sk} < 0$). Špičatost označuje přítomnost nepřiměřeně vysokých vrcholů či hlubokých údolí. Pokud je tato nepřiměřenost vyšší než při normálním rozdělení, pak $S_{ku} > 3$. Naopak pokud je nižší než při normálním rozdělení, pak $S_{ku} < 3$. Pokud je rozložení povrchu rovno normálnímu rozdělení, pak $S_{sk} = 0$ a $S_{ku} = 3$. [9]



Obr. 2-7 Typické příklady šikmosti a špičatosti – upraveno [10].

Matematicky lze tyto parametry vyjádřit těmito rovnicemi

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^3(x,y) dx dy \right], \quad (5)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x,y) dx dy \right], \quad (6)$$

kde

S_{sk} – šikmost čtvercem omezené stupnice povrchu [-],

S_{ku} – špičatost čtvercem omezené stupnice povrchu [-],

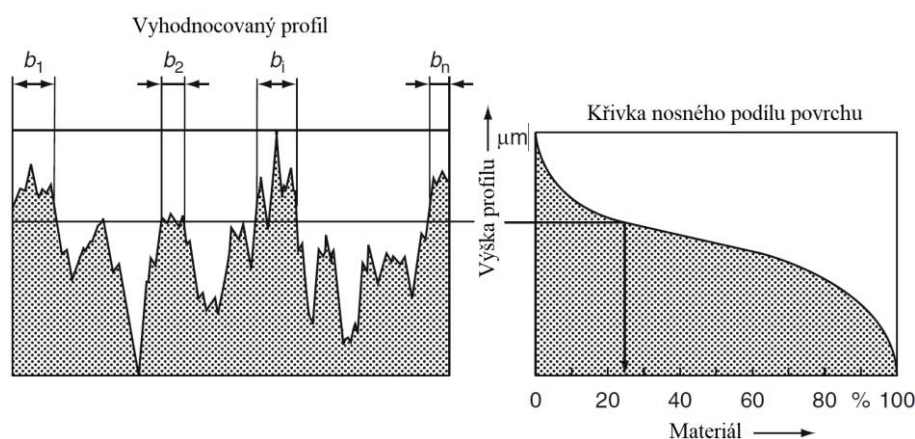
S_q – základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu [nm],

A – plocha ohraničující vyhodnocovanou oblast [nm²],

$Z(x,y)$ – funkce představující výšku profilu vůči základní rovině [nm].

2.5.2 Křivka nosného podílu povrchu

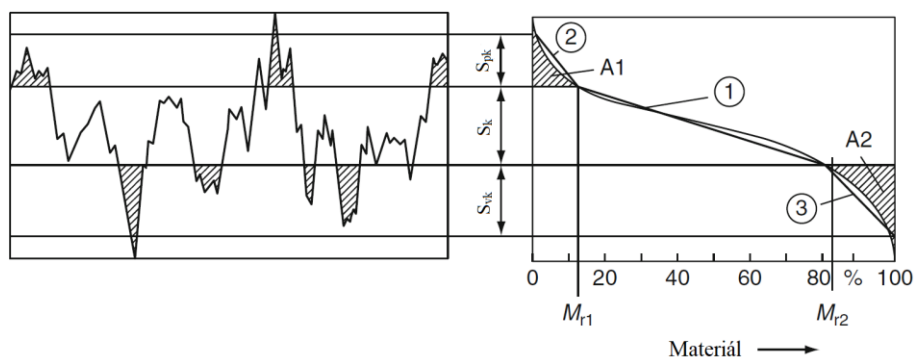
V anglicky psané literatuře je tato křivka nazývána Abbott-Firestone curve, či jen Abbott curve. Tato křivka (na Obr. 2-8 vpravo) představuje procentuální podíl materiálu v určité hloubce řezu z vyhodnocované plochy. Horizontální osa nese procenta povrchu a vertikální osa představuje výšku daného profilu. V podstatě jde o to, že z bodu na křivce můžeme z horizontální osy odečíst, kolik procent materiálu se vyskytuje nad hranicí uvedenou pro tento bod na ose vertikální. Z toho můžeme usoudit, že nad hranicí nejvyššího výstupku vyhodnocované plochy se vyskytuje 0 % povrchu, a nad hranicí nejhlubšího údolí vyhodnocované plochy se vyskytuje 100 % povrchu. Pro normální rozdělení povrchu protíná tato křivka hranici 50 % povrchu přesně v místě s nulovou hodnotou pro výšku daného profilu. To znamená, že přesně polovina povrchu se vyskytuje nad základní rovinou a polovina pod základní rovinou profilu. Pokud je šikmost povrchu $S_{sk} < 0$, znamená to převahu koncentrace údolí a na křivce se to projeví tak, že hodnota 50 % povrchu se posune nad hodnotu základní roviny profilu. Naopak pokud je šikmost povrchu $S_{sk} > 0$, převažuje koncentrace výstupků a na křivce se hodnota 50 % povrchu posune pod hodnotu základní roviny profilu.



Obr. 2-8 Křivka nosného podílu povrchu (vpravo) – upraveno [10].

2.5.3 Funkční parametry S_k , S_{pk} a S_{vk}

Tyto parametry přímo vycházejí z křivky nosného podílu povrchu. Princip získání těchto parametrů ukazuje Obr. 2-9. Redukovaná výška výstupků (S_{pk}) a redukovaná hloubka údolí (S_{vk}) obklopují na této křivce jádro, jehož výška má hodnotu S_k . Jádro je povrch s odstraněnými převládajícími vrcholy a údolími. [9]

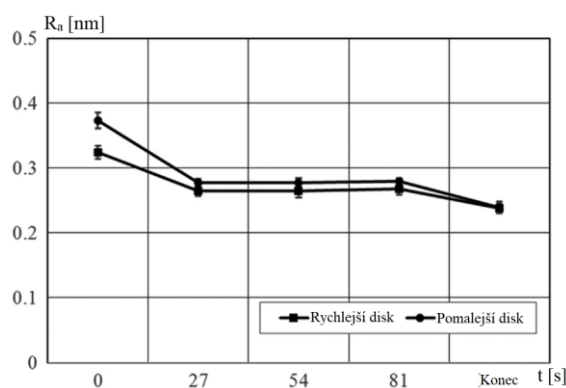


Obr. 2-9 Funkční parametry na křivce nosného podílu povrchu – upraveno [10].

2.6 Záběh

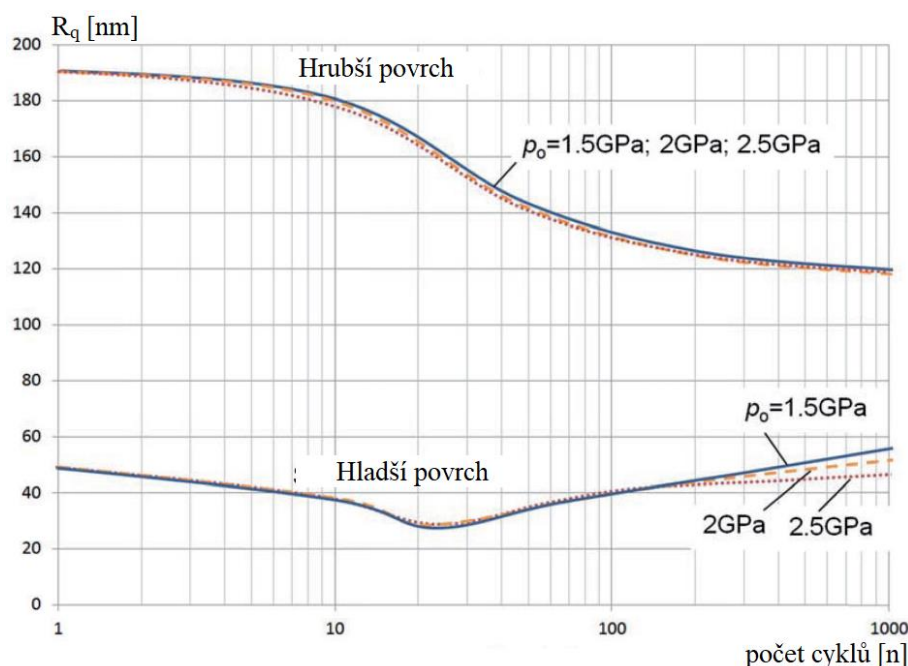
Záběh je nedílnou součástí každého strojního prvku. Jedná se o počáteční proces při kluzném kontaktu dvou povrchů, které na sebe působí nenulovou normálovou silou. V podstatě jde o přechodovou událost, která nemá ustálený stav. Obecně se týká nevratných změn v kluzném kontaktu, při kterých dochází k časovým změnám třecí síly, deformace povrchu a rychlosti opotřebení. Ačkoli je nejčastěji spojován s třecím stykem, u jiných typů opotřebení, jako například erozivního, se na počátku podobná přechodová oblast vyskytuje také. [10]

Při záběhu dochází ke strhávání výstupků povrchu (píků), čímž dochází ke snížení drsnosti původního povrchu (Obr. 2-10). Tím dochází také k vyrovnání povrchu, který je díky tomu schopen lépe rozložit na své ploše sílu na ni působící. Na počátku záběhu se začne zvyšovat opotřebení. To vede ke zvýšení koncentrace odtržených částic v mazacím médiu. Po záběhu se tato koncentrace částic začne snižovat, podle čehož se dá usoudit, že záběh je u konce. O konci záběhu lze také rozhodnout, pokud budeme sledovat hodnotu třecí síly či součinitele tření, a to ve chvíli, kdy třecí síla, popřípadě součinitel tření, začne vykazovat ustálenou hodnotu. Při dostatečném zatížení povrchu dochází k plastické deformaci, což má za následek jeho vytvrzování. [10]



Obr. 2-10 Změna drsnosti povrchu při záběhu součásti – upraveno [11].

Při přípravě součásti pro záběh je třeba dbát na správnou volbu počáteční drsnosti povrchu. Pokud by drsnost byla příliš velká, nemusel by záběh splnit finální očekávání ohledně kvality povrchu po záběhu. Mohlo by se zdát, že pokud před záběhem připravíme co nejjemnější povrch, po záběhu tento povrch bude ještě jemnější, ale není tomu tak. Pokud bude drsnost povrchu příliš malá, materiál sice bude mít tendenci se nejprve zabíhat, ale již po několika cyklech chodu se jeho kvalita začne zhoršovat. Tento jev je dobře patrný na studii, ve které Morales-Espejel a kol. simulovali časový průběh změny drsnosti povrchu dvou vzorků, jejichž výsledky reprezentuje Obr. 2-11.



Obr. 2-11 Časový průběh změny topografie dvou různých povrchů – upraveno [12].

Na hrubším povrchu je již v průběhu několika cyklů patrný začátek záběhu. Ještě před dosažením tisíce cyklů se topografie začíná z původní hodnoty $R_q = 191 \text{ nm}$ ustalovat na hranici $R_q = 120 \text{ nm}$. Na druhou stranu jemnější povrch má nejdříve sice podobný průběh a tendenci se zabíhat, avšak po asi 30 cyklech nabývá zhoršujícího se charakteru a po přibližně 500 cyklech je drsnost povrchu horší než na začátku.

V minulosti byl záběh oproti ostatním jevům spojeným s třením a opotřebením zkoumán méně. Především se vědci zaměřovali na sledování ustáleného stavu či dlouhodobějšího chování součástí než konkrétně na záběh. Uvádí se, že většinou od studií odrazovala komplikovanost modelování tohoto přechodného jevu. [10]

U globálně využívaných zařízení jako jsou například spalovací motory, převody nebo třecí brzdy byly vyvinuty postupy, které by při dodržení měly zajistit plynulý a efektivní záběh těchto součástí. Tyto postupy jsou často vyvíjeny několika sériemi pokusů, při kterých se zkoumá, jaké změny nastanou při určitých počátečních podmínkách, a poté se rozhodne, jaký postup je pro běžné užívání nejefektivnější. Ze zkušeností bylo navrženo několik bodů, jak zjišťovat účinnost záběhových postupů u ložisek, tedy [10]

- postupně zvyšovat zatížení nebo otáčky ložiska až do ustálení provozních podmínek,
- použití většího zatížení či otáček, než na jaké je zařízení navrženo (může vyžadovat změnu maziva či filtrů pro dodržení předepsaných podmínek),
- sledovat koncentraci odtrhnutých částic v mazivu – při jejím snížení pokládáme záběh za dokončený,
- někdy se mohou využívat také speciální maziva, která mají vyšší kyselost pro naleptání povrchu a jednodušší strhávání píků nebo obsahují jemné brusné částice.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Z rešeršní části vyplývá, že záběh je v tribologii jednou z méně probádaných odvětví. Přechodová oblast je pro modelování simulace záběhu velmi obtížná a většinou se ke studii využívá reálných pokusů a experimentů. Tyto experimenty poskytly základní podklad pro porozumění průběhu záběhové fáze. Při užití v praxi požadujeme pro záběh co nejkratší čas a očekáváme pozitivní účinek na výkon a schopnost lépe přenášet zatížení u zařízení po záběhu. Je třeba také zvolit správnou počáteční drsnost materiálu, jelikož by mohlo dojít k neuspokojivému výsledku po dokončení záběhu. Dále se po zaběhnutí zařízení doporučuje výměna provozních kapalin z důvodu obsahu částic oddělených od zabíhaného povrchu.

3.2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je porovnat chování vzorků s různou topografií povrchu při záběhu součásti v režimu smíšeného mazání a sledovat změnu třecího součinitele. Dále bude v daných časových intervalech sledována změna parametrů topografie a bude vyhodnocena tloušťka mazacího filmu. Dílčí cíle práce, které je třeba naplnit, jsou následující

- návrh experimentu,
- příprava vzorků,
- realizace experimentu,
- shromáždění naměřených dat,
- vyhodnocení časového průběhu součinitele tření,
- vyhodnocení parametrů topografie,
- vyhodnocení tloušťky mazacího filmu.

Při splnění těchto cílů budeme moci diskutovat rozdíly mezi průběhy záběhu jednotlivých vzorků a vyhodnotit účinky provedených operací při tvorbě vzorků.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Testovací vzorky

Jako testovací vzorek byla zvolena ocelová kulička z materiálu 14 209. Jedná se o normalizovaný testovací vzorek s průměrem 25,4 mm (1 anglický palec). Z možností opracování bylo určeno celkem 5 různých vzorků s různou úpravou povrchu. Úprava povrchu byla provedena brusnými papíry z karbidu křemíku o různých zrnitostech – SiC400, SiC600 a SiC1500. Opracování papírem SiC400 bylo vyhotoveno ve třech provedeních. Na první vzorek byl použit pouze brusný papír, druhý vzorek byl po použití brusného papíru následně lapován a třetí vzorek byl po broušení a lapování ještě vyleštěn. Operace provedené na jednotlivých testovacích vzorcích jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Operace použité k opracování testovacích vzorků.

NÁZEV VZORKU	Brusný papír SiC400	Brusný papír SiC600	Brusný papír SiC1500	Lapování	Leštění
SiC400	X				
SiC400+lap	X			X	
SiC400+lap+pol	X			X	X
SiC600		X			
SiC1500			X		

V názvu vzorku je vždy uvedeno jeho konkrétní opracování, aby bylo jasné patrné, o jaký vzorek se jedná. Např.: SiC400+lap+pol – opracováno brusným papírem SiC400, lapováno („lap“ z anglického lapping), leštěno („pol“ z anglického polishing). Každá z uvedených operací trvala 1 min.

4.2 Zařízení pro úpravu povrchu kuličky

K výše zmíněným úpravám testovacích kuliček byla vhodně využita leštička soudečků do valivých ložisek. Její detail při výrobě vzorku zobrazuje Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Povrchová úprava kuličky.

Kulička je v zařízení upnuta mezi hroty a za současného rotačního pohybu je opracovávána brusným kotoučem, který koná kyvný a rotační pohyb. Při lapování je brusný kotouč vyměněn za hliníkový protikus s leštící pastou. Leštění bylo provedeno leštícím kotoučem doplněným také o leštící pastu.

4.3 Optický tribometr EHD5

Optický tribometr EHD5 je zařízení, na kterém byl realizován celý pokus a byl zde měřen průběh součinitele tření a tloušťka mazacího filmu. Tento tribometr (Obr. 4-2) byl zkonstruován na ÚK (Ústavu konstruování) a poskytuje možnost simulovat reálné podmínky vyskytující se v běžném provozu. Principem stroje je odvalování ocelové kuličky po safírovém disku, při vzájemném bodovém kontaktu.



Obr. 4-2 Optický tribometr EHD5.

Oba tyto komponenty mají možnost se otáčet kolem vlastní osy. Kulička je letmo upnuta na hřídel a je vsazena do prostoru pod diskem, kde se brodí v olejové lázni a svým otáčením dopravuje mazivo na místo kontaktu s diskem. Princip této metody ukazuje Obr. 4-3. Zatížení je přenášeno na disk pomocí závaží zavěšeného na dvojzvratnou páku. Disk a kulička mají každý svůj nezávislý pohon, který zajišťuje možnost regulace kinematických podmínek jako čistého valení a kladného či záporného prokluzu kuličky. Tyto kinematické podmínky popisuje tzv. *SRR* parametr, který je definován jako [13]

$$SRR = 2 \cdot \frac{(u_D - u_B)}{(u_D + u_B)}, \quad (7)$$

kde

SRR – poměr kluzu a valení [-],

u_D – rychlost otáčení disku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

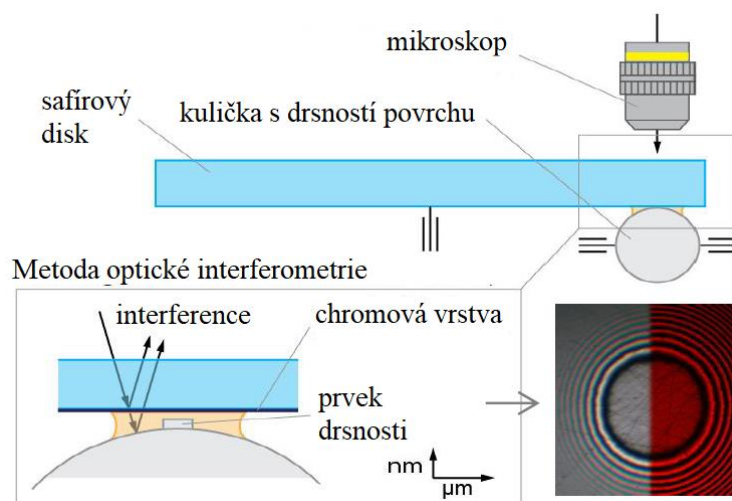
u_B – rychlost otáčení kuličky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Z výše uvedené rovnice je patrné, že pokud parametr *SRR* nabyde kladné hodnoty, je disk rychlejší než kulička. Toto nazýváme kladný prokluz. Pokud je parametr *SRR* záporný, znamená to, že kulička je rychlejší než disk a mluvíme o záporném prokluzu. Pro $SRR = 0$ mají disk a kulička totožnou rychlost otáčení, nevyskytuje se zde prokluz, ale dochází k čistému valení.



Obr. 4-3 Schéma kontaktu kuličky a disku v optickém tribometru.

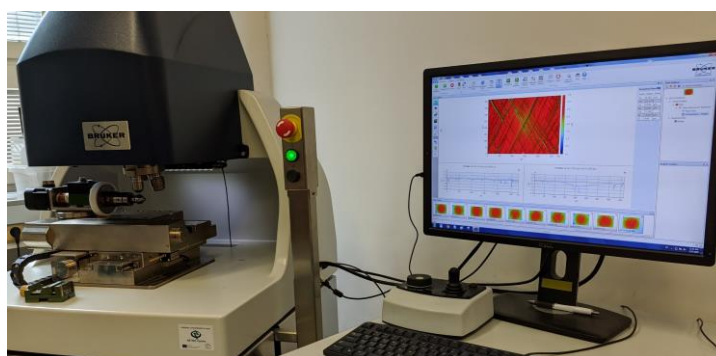
Měření tloušťky mazacího filmu na tomto zařízení je zajištěno pomocí optické interferometrie popsané na Obr. 4-4. Safírový disk je opatřen z jedné strany tenkou vrstvou chromu a z druhé strany antireflexní vrstvou. Zařízení EHD5 je vybaveno zdrojem světla, které je přivedeno na měřenou oblast, jíž je vrchlík kuličky skrze safírový disk. Chromová vrstva na povrchu disku jednu část světla odrazí a druhá část světla se odrazí až od povrchu kuličky. Toto odražené světlo putuje zpět do detekčního místa v mikroskopu. Ten je vybaven vysokorychlostní kamerou, díky které je počítačový program propojený s kamerou pomocí barevného spektra odraženého světla je schopen určit tloušťku mazacího filmu. [13]



Obr. 4-4 Schématické znázornění optické interferometrie – upraveno [13].

4.4 3D optický profilometr Bruker ContourGT-X8

Pro měření topografie byl využit 3D optický profilometr od firmy Bruker (Obr. 4-5). Pomocí něj je možno bezkontaktně měřit topografii povrchu. Opět funguje na principu interferometrie, která k měření využívá svazek světla. Ten je ve stroji rozdělen na dvě části. Jedna putuje k referenčnímu povrchu a druhá ke konkrétnímu měřenému povrchu. Obě části poté putují do objektivu, který je snímán kamerou. Ta pomocí počítačového programu vyhodnotí vzniklý interferogram a dokáže stanovit parametry topografie měřeného povrchu s přesností na 0,1 nm. [13]



Obr. 4-5 3D optický profilometr Bruker ContourGT-X8.

4.5 Počáteční podmínky a postup experimentu

V této sekci budou popsány podmínky a jednotlivé kroky pro vykonání experimentu se záběhem pěti již předpřipravených vzorků s různou topografií povrchu.

4.5.1 Počáteční podmínky experimentu

Pro možnost porovnání jednotlivých měření bylo třeba si na začátku určit počáteční podmínky dodržené při každém měření. Základní počáteční podmínky jsou uvedeny v Tab. 4-2.

Tab. 4-2 Počáteční podmínky experimentu.

Zatížení	Střední rychlost povrchů	Parametr <i>SRR</i>	Parametr mazání
N	mm/s	-	-
66	1500	0,5	0,75

Hodnota zatížení byla volena s ohledem na maximální možný Hertzův tlak působící na safírový disk, který činí 1,5 MPa. Zvolené zatížení působí Hertzův tlak přibližně 1,2 MPa. Hodnota parametru *SRR* značí 50 % kladný prokluz. Pro dodržení stejného parametru mazání bylo třeba vzhledem k rozdílné počáteční topografii vzorků předem naměřené na 3D optickém profilometru modifikovat teplotu zvoleného mazacího oleje PAO6, čímž se změnila viskozita maziva, a tím i výška mazacího filmu. Teploty maziva pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Teploty a dynamické viskozity maziva pro jednotlivé vzorky

Název vzorku	Teplota	Dynamická viskozita
	°C	Pa·s
SiC400	23	0,050
SiC400+lap	42	0,024
SiC400+lap+pol	48	0,020
SiC600	46	0,020
SiC1500	70	0,011

4.5.2 Postup při měření experimentu

V této podsekcí bude popsán postup experimentu, který byl opakován pro všech 5 vzorků identickým způsobem. Úvodním bodem je po upnutí kuličky na hřídel tak jako na Obr. 4-6, ve kterém bude po celou dobu experimentu upnuta, což je důležité z důvodu dodržení chodu ve stále stejné dráze.



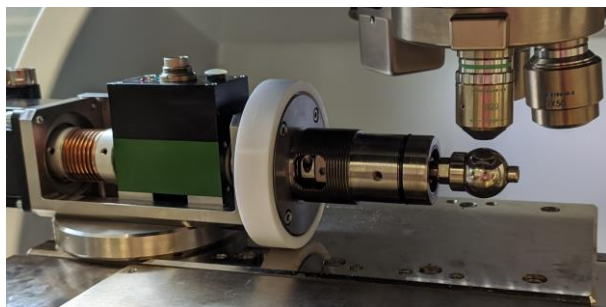
Obr. 4-6 Kulička upnutá v hřídeli.

Obr. 4-7 zobrazuje kuličku v průběhu experimentu na tribometru EHD5. Původním plánem bylo realizovat měření jedné kuličky za 60 minut chodu na optickém tribometru pro sledování změny součinitele tření. Těchto 60 minut bylo rozděleno do třech časových úseků na 10, 20 a 30 minut. Součinitel tření byl sledován v prvním úseku každé 2 sekundy, ve druhém úseku každé 4 sekundy a ve třetím úseku každých 6 sekund. Zařízení proto v každém úseku provedlo 300 bodů měření. U každého bodu měření ovšem došlo k určité časové prodlevě, což vedlo k prodloužení každého úseku o 6 minut. To ovšem v měření ničemu nevadilo. Jedinou změnou bylo prodloužení měření o 18 minut na celkových 78 minut.



Obr. 4-7 Kulička v kontaktu se safírovým diskem.

Po každém ze tří časových úseků byla vždy měřena topografie povrchu. Hřídel s kuličkou byla po vyjmutí z optického tribometru přesunuta do 3D optického profilometru, na kterém byla měřena topografie deseti míst náhodně po obvodu celé kuličky (Obr. 4-8).



Obr. 4-8 Hřídel s kuličkou při měření topografie povrchu.

Před posledním měřením topografie bylo provedeno měření tloušťky mazací vrstvy. Konečná podoba kroků dodržených při měření každého vzorku je tedy

- 1) upnutí vzorku na hřídel,
- 2) 16 min měření součinitele tření,
- 3) měření topografie,
- 4) 26 min měření součinitele tření,
- 5) měření topografie,
- 6) 36 min měření součinitele tření,
- 7) měření tloušťky mazací vrstvy,
- 8) měření topografie,
- 9) vyjmutí vzorku z hřídele.

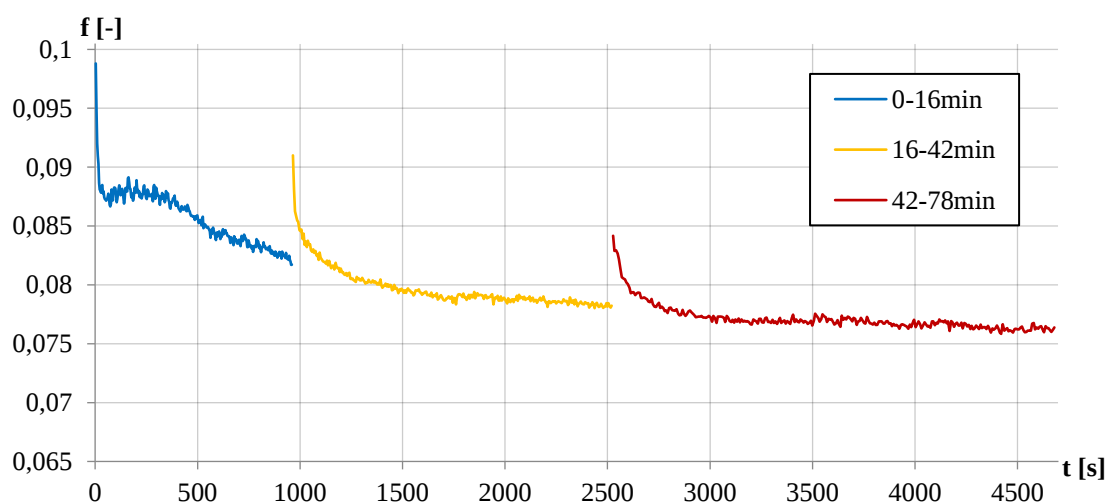
5 VÝSLEDKY

5.1 Vyhodnocení součinitele tření

Součinitel tření byl vyhodnocován ve třech časových úsecích po 16 minutách. Měření proběhlo na optickém tribometru EHD5 v režimu smíšeného mazání. Po každém časovém úseku došlo k přerušení měření a vyjmutí zkušební vzorku ze zařízení. Časový průběh součinitele tření byl zaznamenán do následujících grafů. Začátek každého úseku je doprovázen prudkým poklesem součinitele tření. Tento jev nastal, protože drsnost povrchu je vysoká a tloušťka mazacího filmu nízká. Kontakt proto nebyl ze začátku dostatečně mazán a je zde patrný velký nárůst opotřebení a třecího součinitele oproti konci minulému úseku. Po několika sekundách chodu součinitel tření začal navazovat na křivku z předchozího úseku. Jelikož tyto hodnoty byly způsobeny přerušením měření z důvodu zkoumání jiných kontrolovaných hodnot zkušební vzorku, ke kterým bylo zapotřebí využít jiného zařízení a tím pádem vyjmutí hřídele s kuličkou z tribometru, můžeme tento skok uvažovat jako reálné přerušení chodu zabíhaného stroje. Skok, který na začátku nového úseku součinitel tření učiní, způsobí ráz na součást. Proto tento skok chceme co nejnížší.

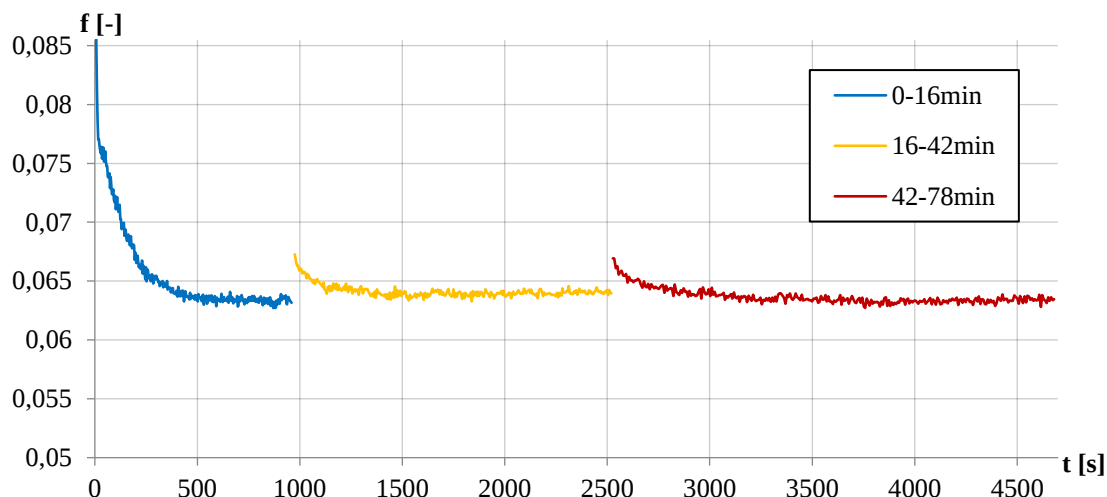
Graf 5-1 vykresluje součinitel tření jako funkci času při experimentálním měření kuličky s označením SiC400. Tato kulička byla pouze opracována brusným papírem o zrnitosti 400, a tím pádem její struktura byla velmi hrubá. Postupným strháváním výstupků materiálu na povrchu kuličky se začíná součinitel tření snižovat a dochází k záběhu povrchu. Začátek každého úseku se projevil největšími skoky ze všech testovaných součástí. Po 78 minutách experimentu měl součinitel tření znatelně menší hodnoty, ale stále vykazoval klesající tendenci. Můžeme proto předpokládat, že konec záběhu se blíží, ale ještě nenastal.

Graf 5-1 Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400.



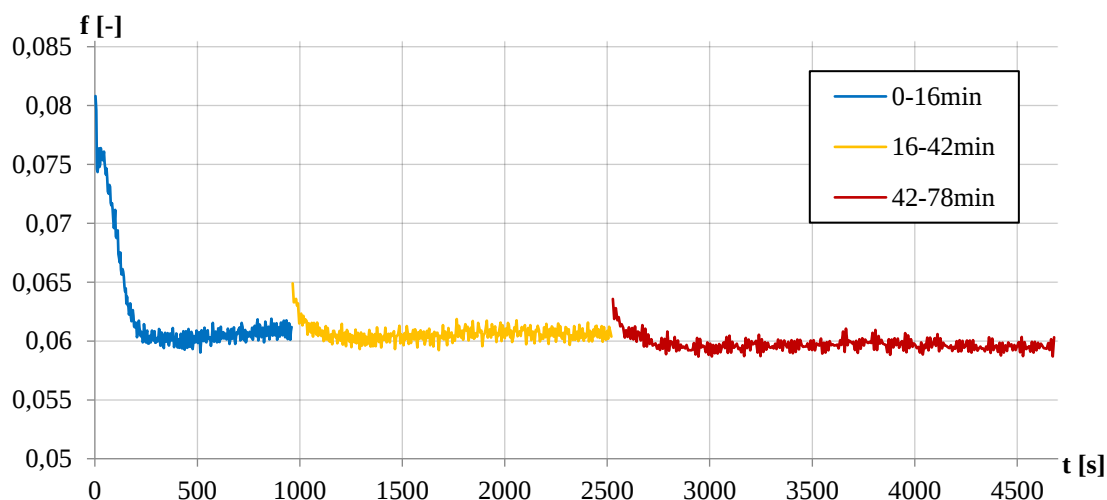
Na Grafu 5-2 je znázorněn součinitel tření v závislosti na čase po opracování zkušebního vzorku brusným papírem o zrnitosti 400 a následném lapování. Oproti předchozímu vzorku je z grafu patrné, že lapování mělo na průběh součinitele tření pozitivní vliv jak z hlediska jeho průběhu, tak z hlediska jeho velikosti i velikosti skoku součinitele tření při opětovném rozběhu zařízení. Od začátku se součinitel tření snižoval a před dosažením konce prvního úseku se ustálil. V ostatních dvou úsecích je již průběh součinitele tření téměř konstantní. Můžeme tedy předpokládat, že záběh byl dokončen již v prvním úseku.

Graf 5-2 Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400+lap.



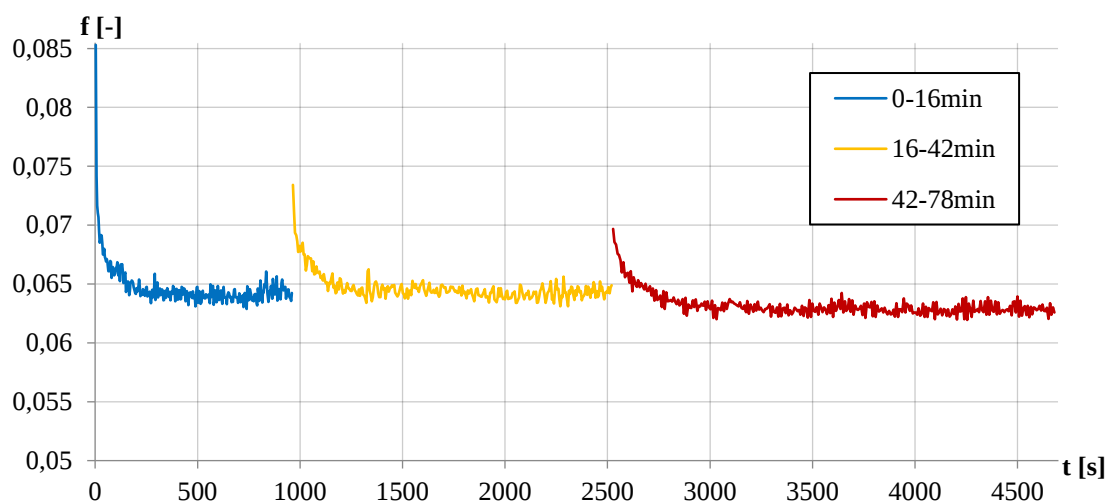
Jak ukazuje Graf 5-3, vyleštění součásti lehce sníží součinitel tření, ale hlavně se projeví na době tvorby dostatečné výšky filmu při opětovném zpuštění zařízení, která se zmenšila přibližně na polovinu. Skok součinitele tření je přibližně stejně velký, jako u předchozího vzorku. Stejně jako u lapovaného povrchu přepokládáme konec záběhu již v prvním úseku experimentu, jelikož hodnota součinitele tření je od té doby konstantní.

Graf 5-3 Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400+lap+pol.



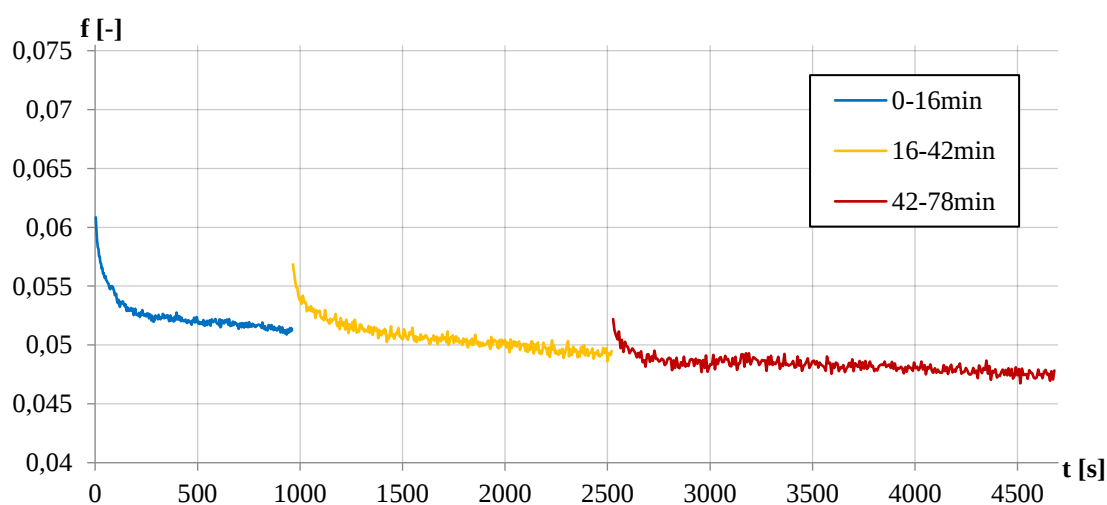
Součinitel tření na Grafu 5-4 se začíná ustalovat na velmi podobné hodnotě jako lapovaný povrch u SiC400+lap. Doba tvorby dostatečné výšky filmu a skok při opětovném spuštění jsou ovšem vyšší. Také se zdá, že součinitel tření nedosáhl své konstantní hodnoty a záběh proto nepokládáme za ukončený.

Graf 5-4 Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC600.



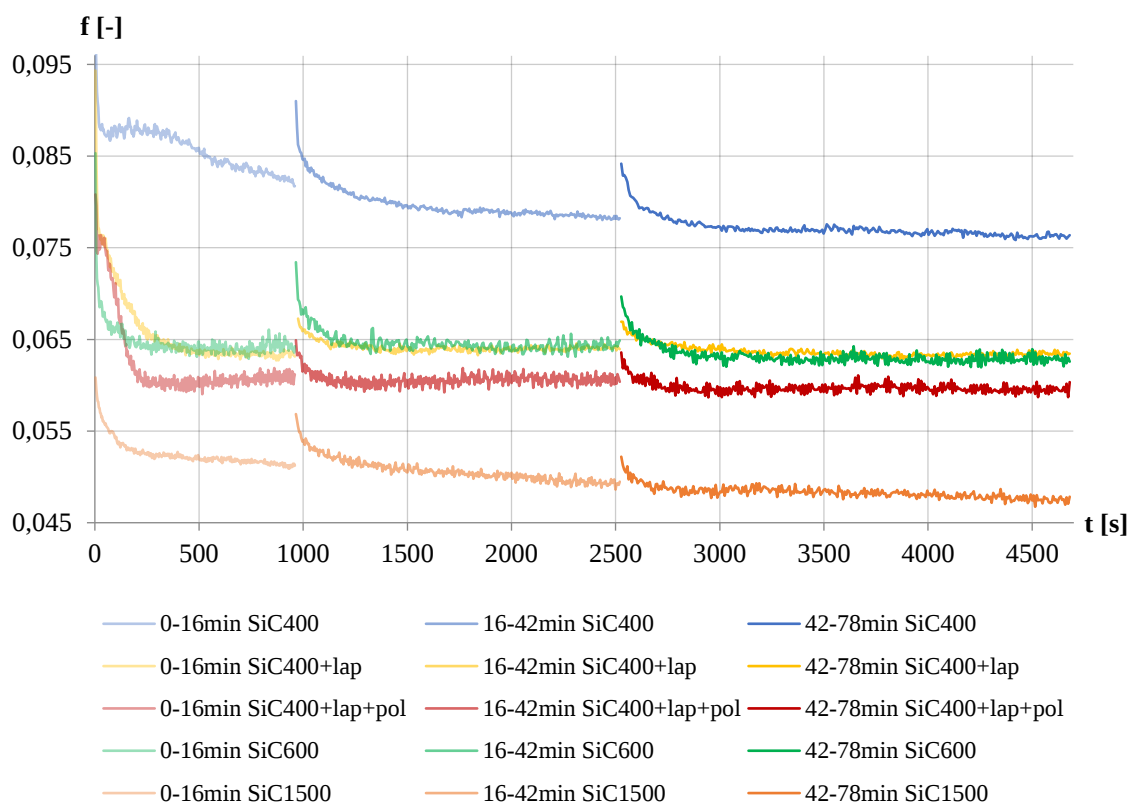
Poslední testovaný vzorek byl pouze opracován brusným papírem SiC1500. Průběh součinitele tření je zobrazen na Grafu 5-5. V porovnání s ostatními vzorky má součinitel tření nejnížší hodnoty. Skok součinitele při opětovném spuštění zařízení je podobný jako u lapovaného a leštěného povrchu, ale doba tvorby dostatečné výšky filmu se zvětšila přibližně na dobu obdobnou se vzorky SiC400 a SiC600. I zde po dobu experimentu nepřepokládáme konec záběhu, jelikož se třecí součinitel neustálil na konstantní hodnotě.

Graf 5-5 Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC1500.



Na Grafu 5-6 je znázorněno porovnání průběhů součinitele tření všech pěti vzorků. Můžeme si na něm porovnat velikosti skoku při opětovném spuštění zařízení, dobu tvorby dostatečné výšky mazacího filmu a velikosti třecích součinitelů jednotlivých vzorků.

Graf 5-6 Porovnání časových průběhů součinitele tření.

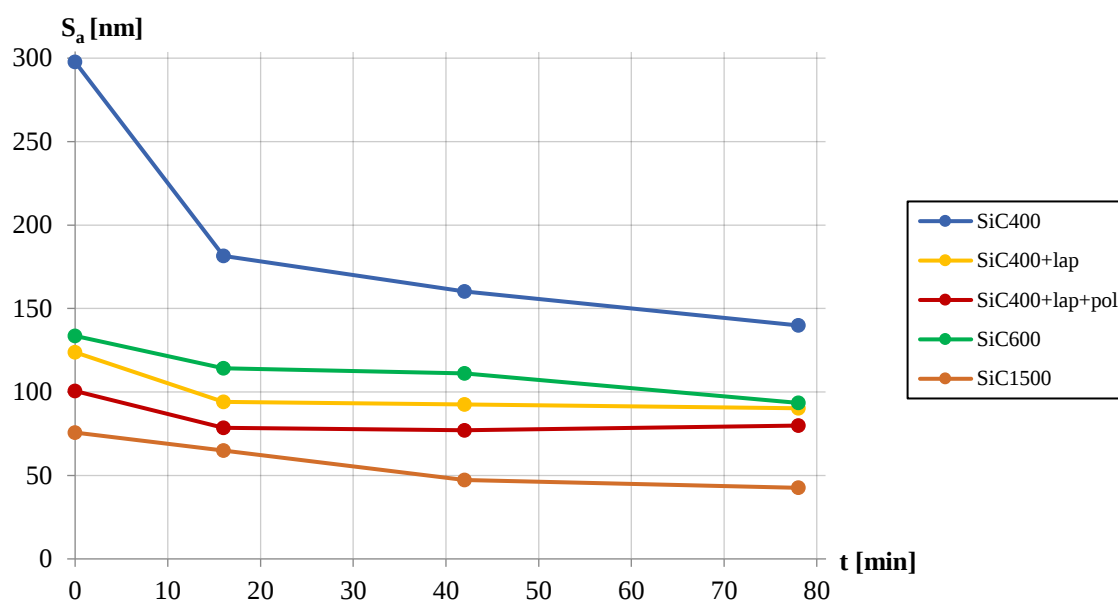


5.2 Vyhodnocení topografie povrchu

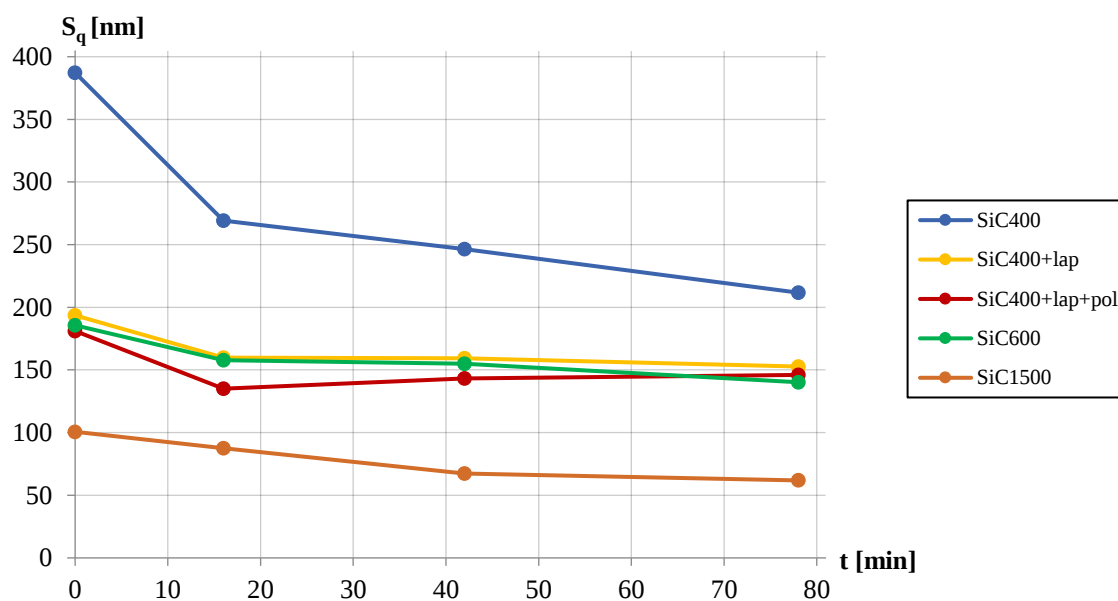
Vyhodnocení topografie povrchu probíhalo na 3D optickém profilometru ve čtyřech časových bodech vždy v dobu přerušení měření na tribometru. Z obvodu každé kuličky bylo náhodně vybráno a naměřeno deset míst, jejichž výsledky se vždy zprůměrovaly do jedné hodnoty. Následující grafy představují časový průběh základních parametrů topografie a křivky nosného podílu povrchu jednotlivých vzorků při jednotlivých časových bodech.

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu S_a na Grafu 5-7 a základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu S_q na Grafu 5-8 jsou si velice podobné. Ukazují, jak dochází k postupnému záběhu způsobeného opotřebením, které v tomto případě prakticky vždy zlepšuje povrch vzorků, možná s mírnou výjimkou SiC400+lap+pol, který zaznamenává ve druhém a třetím úseku parametru S_q nepatrné zhoršení.

Graf 5-7 Časový průběh parametru S_a .

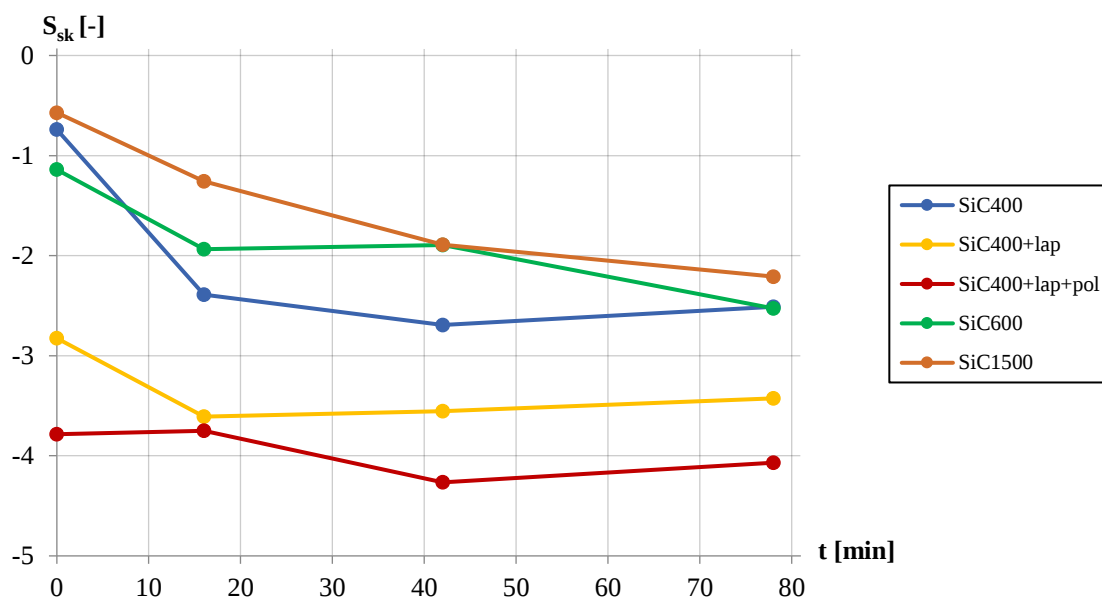


Graf 5-8 Časový průběh parametru S_q .



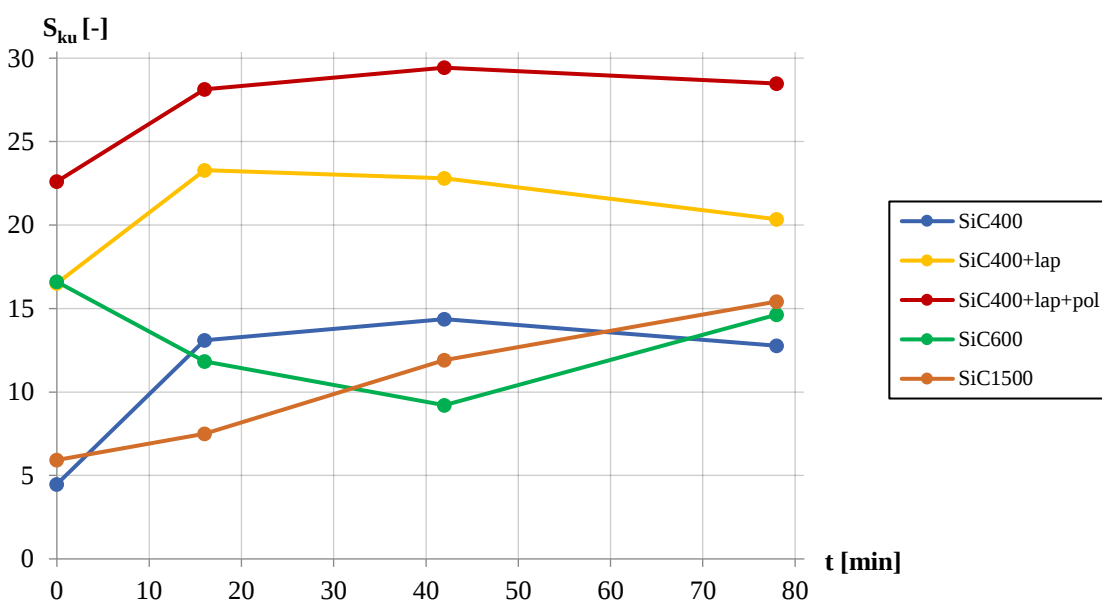
Hodnoty šikmosti na Grafu 5-9 nabývají záporných čísel. To znamená převahu údolí nad výstupky na všech našich vzorcích. Tato hodnota se postupně ještě snižuje, jelikož při záběhu dochází ke strhávání vrcholů, a tím pádem údolí získávají ještě větší převahu. Hodnoty SiC400+lap a SiC400+lap+pol se příliš nemění, jelikož vrcholy byly již strhnuty lapováním, popřípadě leštěním.

Graf 5-9 Časový průběh parametru S_{sk} .



Hodnoty špičatosti z Grafu 5-10 značí větší množství vrcholů či údolí než to, které by vedlo na normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

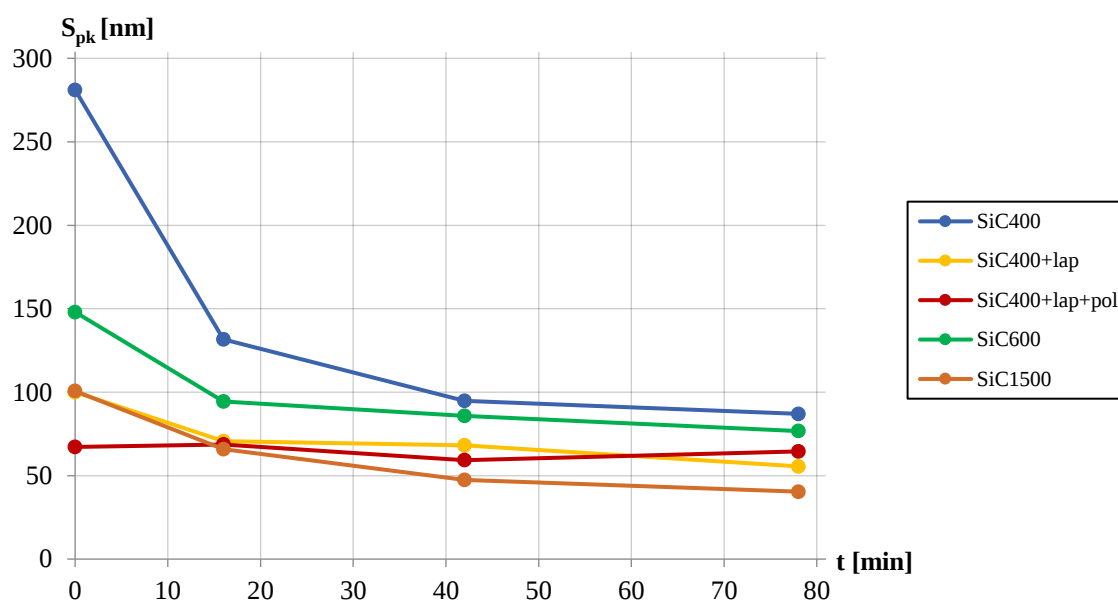
Graf 5-10 Časový průběh parametru S_{ku} .



Nejvíce se tomuto rozdělení blíží vzorek SiC400 před průběhem záběhu. Postupným strháváním výstupků narůstá počet nepřiměřených údolí. Jedinou výjimkou je vzorek SiC600, který se začne nejdříve normálnímu rozdělení přibližovat a na konci pokusu se vrátí na přibližně stejnou hodnotu, na které se nacházel na začátku. Vzorky SiC400+lap a SiC400+lap+pol mají výstupky stržené již z přípravy vzorků, a proto mají tuto hodnotu nejvyšší, respektive druhou nejvyšší. Vzorky opracované brusným papírem nemají jednoznačný průběh této funkce, ale můžeme si povšimnout že lapování a leštění nezměnilo trend křivky pro SiC400.

Redukovaná výška výstupků (píků) znázorněna na Grafu 5-11 se u povrchů opracovaných brusnými papíry se strháváním vrcholů snižuje. U SiC400+lap+pol byly vrcholky strženy při přípravě povrchu vzorků procesem lapování a leštění a průběh hodnot pro tento vzorek má téměř konstantní charakter.

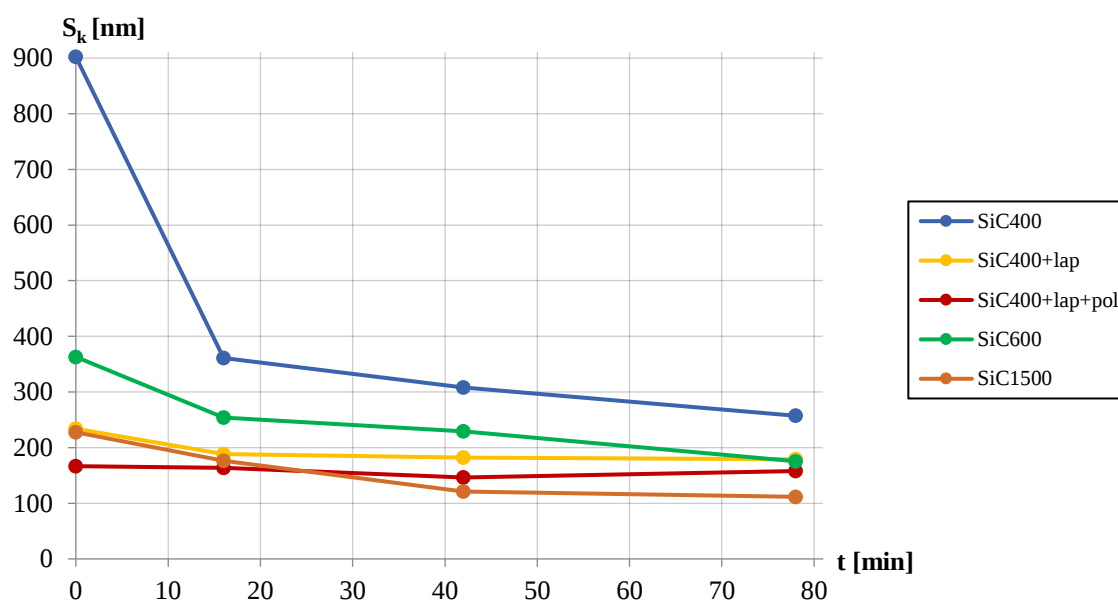
Graf 5-11 Časový průběh parametru S_{pk} .



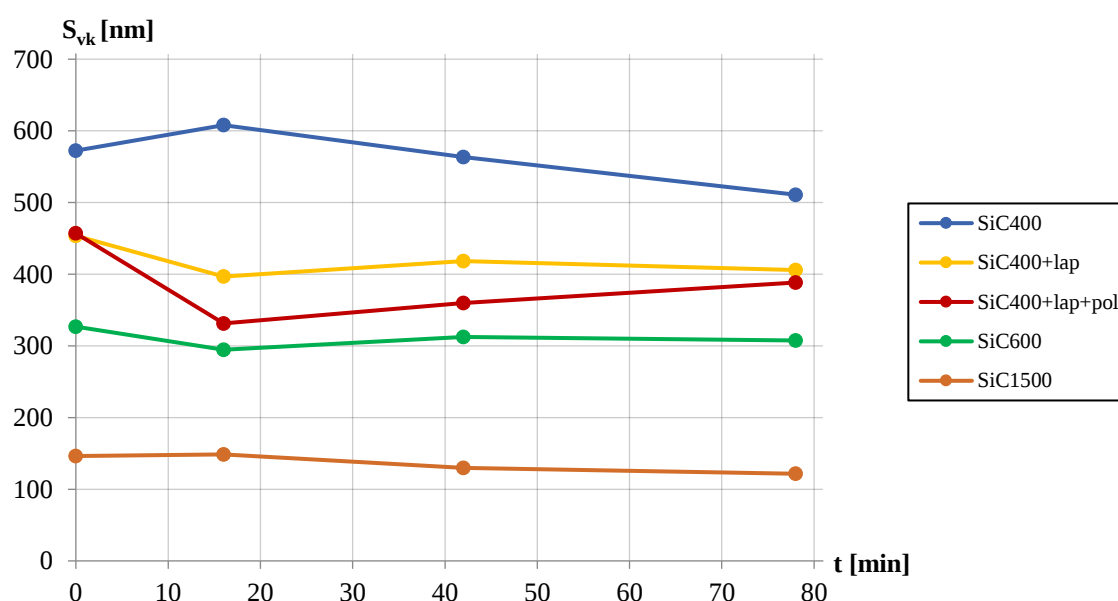
Podobně tomu je i s výškou jádra na Grafu 5-12. Opotřebení postihuje nejen výstupky, ale i oblast povrchu, která je v této metodice považována za nosné jádro tohoto povrchu. Se strháváním vrcholů se snižuje i výška jádra. Všechny vzorky mají tedy téměř identický průběh, jako u grafu S_{pk} a SiC400+lap+pol má tím pádem opět téměř konstantní hodnoty.

Na Grafu 5-13 je vidět změna redukované hloubky údolí. Při záběhu se tato hodnota téměř nemění, s výjimkou SiC400+lap+pol, jehož redukovaná hloubka se v prvním úseku zmenšila, a poté opět vzrostla.

Graf 5-12 Časový průběh parametru S_k .

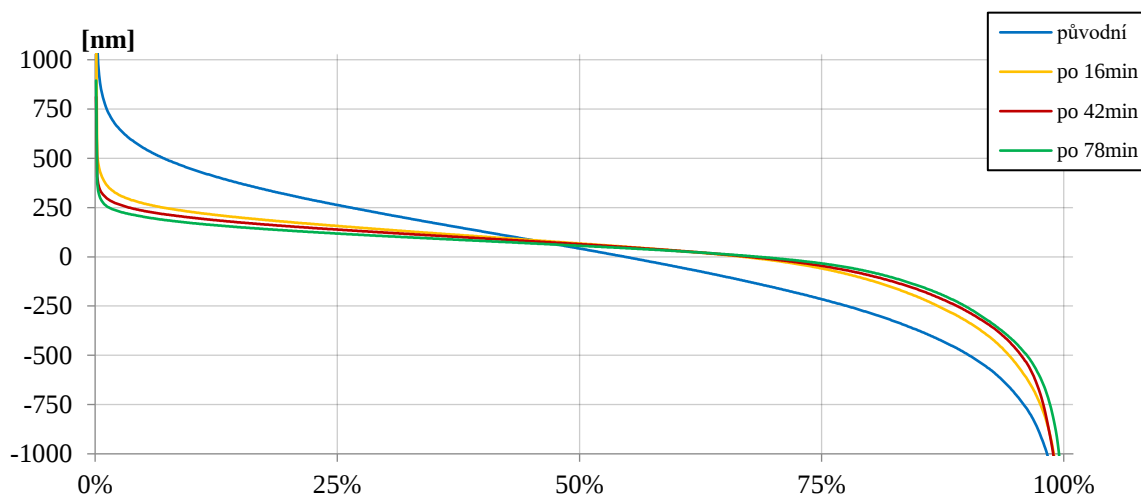


Graf 5-13 Časový průběh parametru S_{vk} .

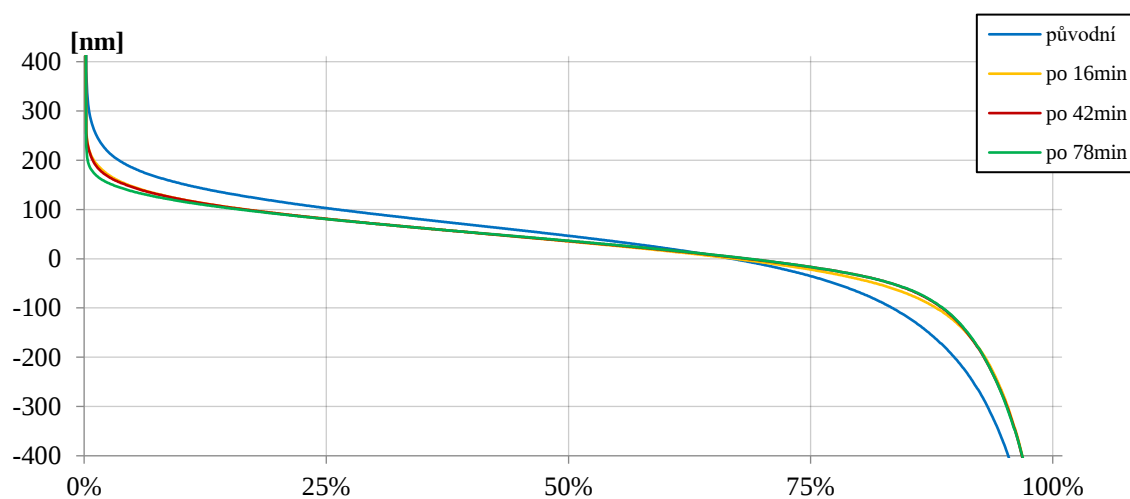


Grafy 5-14 až 5-18 představují křivky nosného podílu povrchu jednotlivých vzorků po uplynutí určitých časových úseků. Jejich hranice 50 % povrchu je posunuta nad hodnotu základní roviny profilu, což značí větší převahu údolí na těchto vzorcích. Zároveň můžeme pozorovat postupné přibližování těchto křivek k hodnotě základní roviny profilu, a to znamená vyrovňávání rozložení profilu. V tomto případě největší progres ve vyrovňání profilu prodělal vzorek SiC400, avšak nejvíce se rovině základního profilu blíží vzorek SiC1500. Lapovaný, respektive leštěný povrch vykazuje z důvodu stržených vrcholů větší posunutí nad základní rovinu oproti ostatním vzorkům.

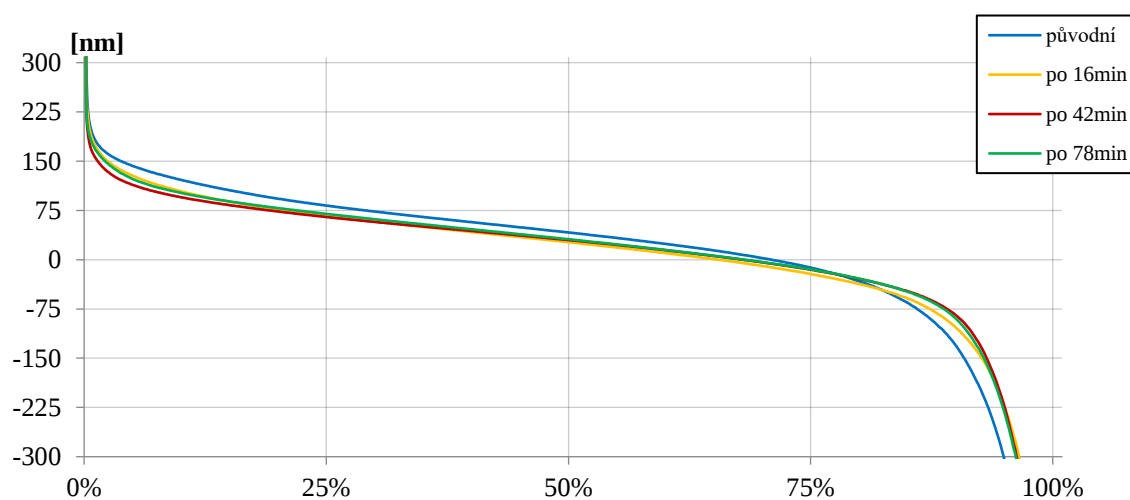
Graf 5-14 Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400.



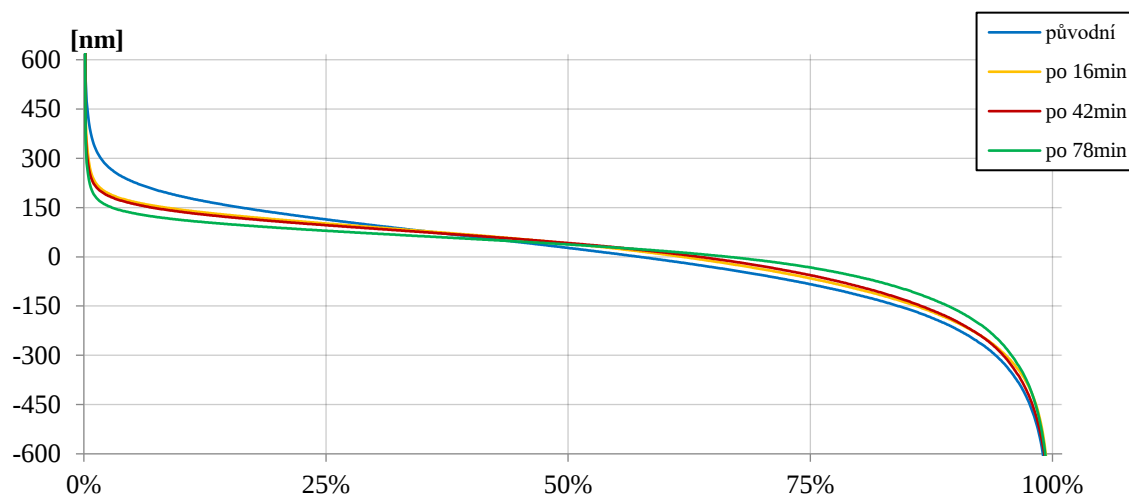
Graf 5-15 Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400+lap.



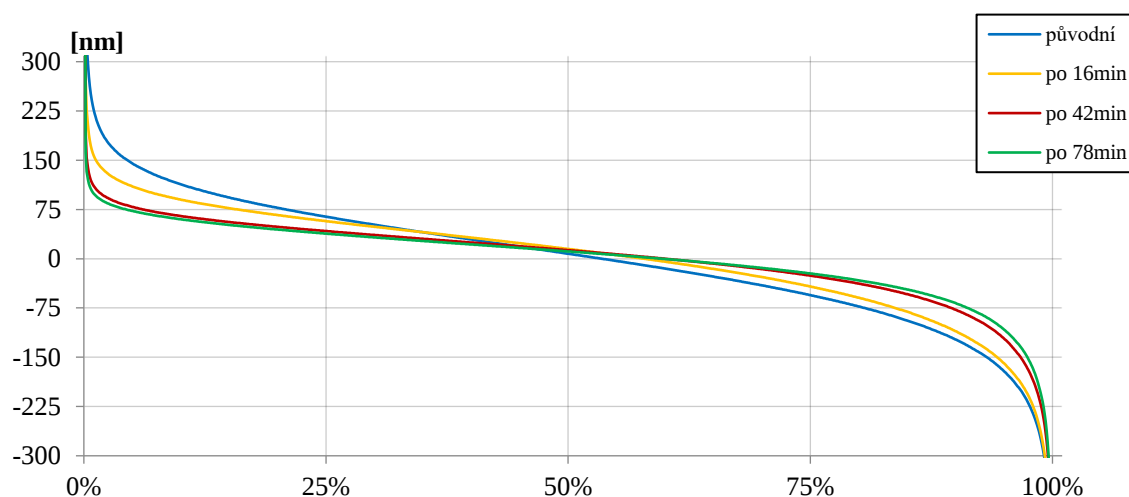
Graf 5-16 Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400+lap+pol.



Graf 5-17 Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC600.



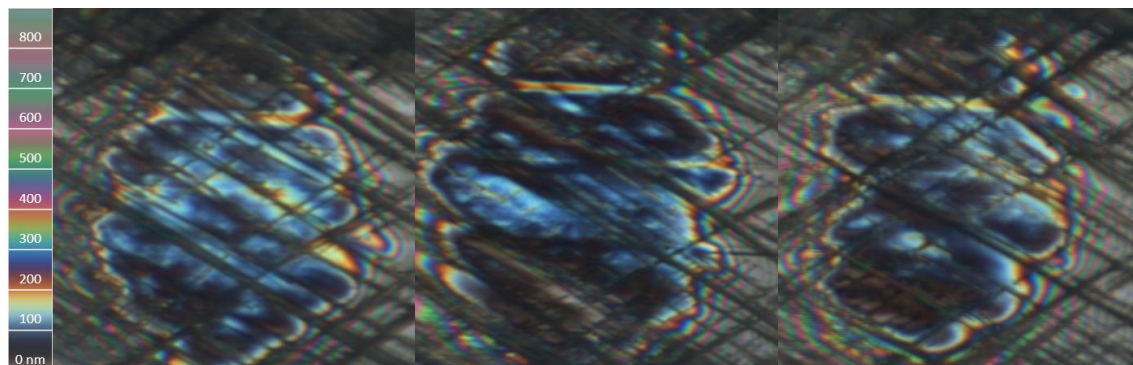
Graf 5-18 Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC1500.



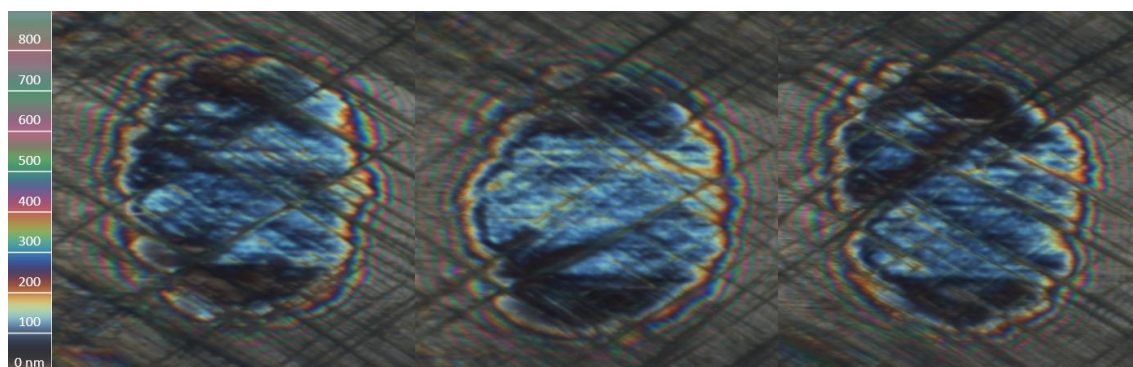
5.3 Vyhodnocení tloušťky mazacího filmu

Tato sekce se věnuje zkoumání výšky mazacího média a jeho porovnání s predikovanou hodnotou. Dále bude vyhodnocena míra ovlivnění mazacího filmu a procentuální podíl plochy kontaktu s výškou filmu menší než jedna třetina predikované hodnoty výšky mazacího filmu.

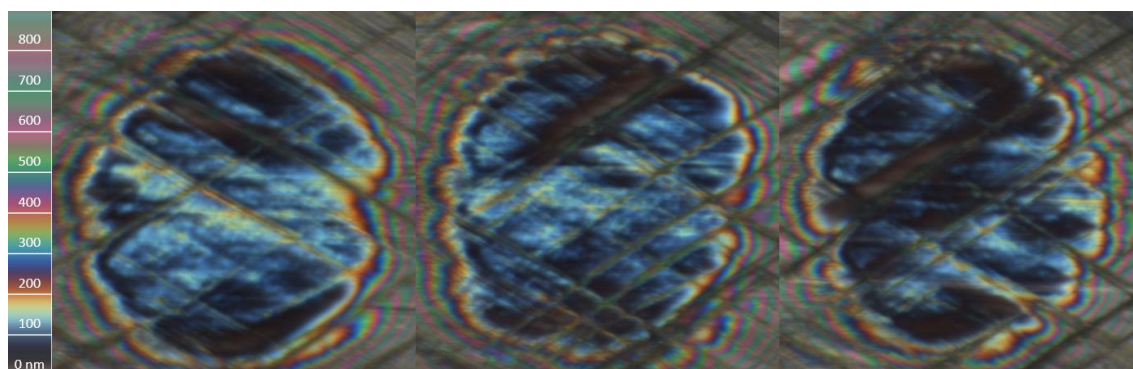
Na Obr. 5-1 až 5-5 jsou snímky mazaného kontaktu při realizaci experimentu, na kterých lze přibližně podle škály výšky mazacího filmu, umístěné vlevo od snímků, tuto výšku odečíst. Výšku mazacího filmu ovlivňuje topografie povrchu, jelikož predikovaná hodnota se počítá pro ideálně hladké těleso. Tlak vyvinutý pro vytvoření mazacího filmu se sníží, jelikož mikroskopické drážky na povrchu od obrábění materiálu ovlivní tlakové pole a výsledná výška mazacího filmu je poté menší.



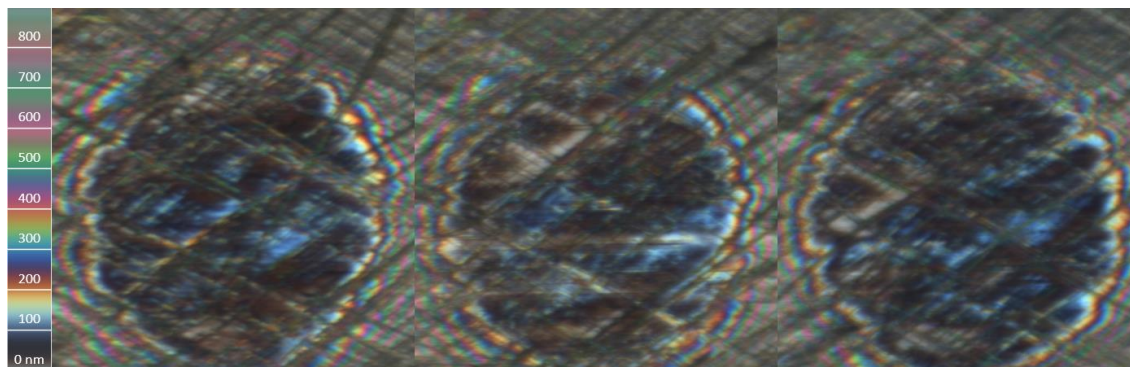
Obr. 5-1 Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400.



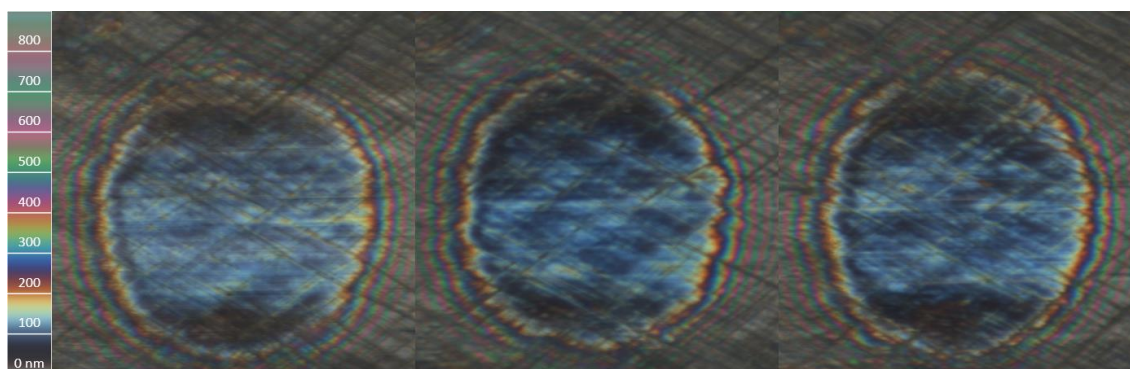
Obr. 5-2 Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400+lap.



Obr. 5-3 Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400+lap+pol.



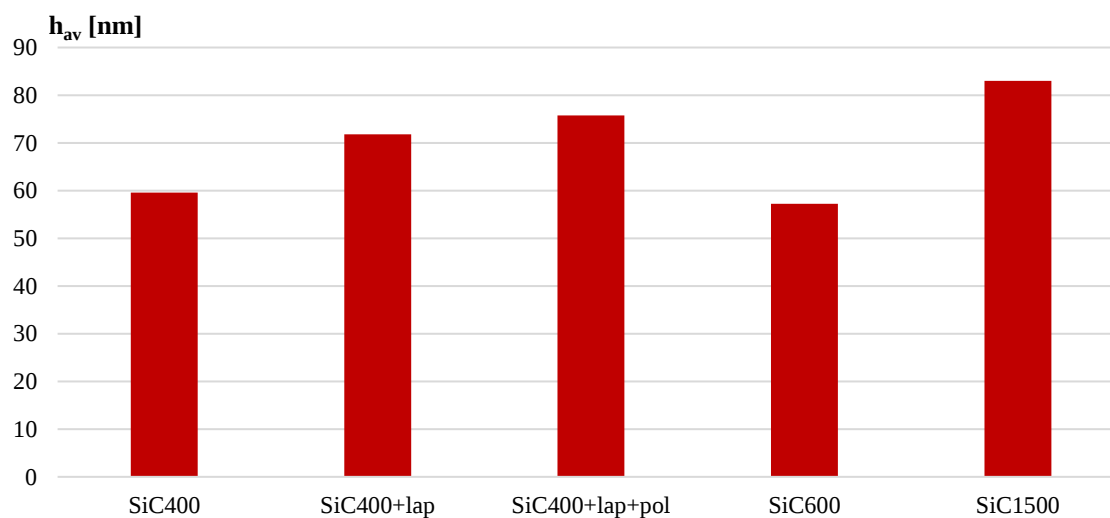
Obr. 5-4 Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC600.



Obr. 5-5 Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC1500.

Graf 5-19 ukazuje u jednotlivých vzorků reálnou průměrnou výšku mazací vrstvy. Ta je velmi ovlivněna topografií povrchu. Hodnoty mazacího filmu predikované výpočtem dle [14] totiž nezahrnují drsnost povrchu, jsou vypočteny za pomoci viskozity maziva pro jednotlivé vzorky, jelikož pro dodržení parametru mazání bylo třeba pomocí regulace teploty tyto viskozity pro každý vzorek měnit.

Graf 5-19 Střední tloušťka mazacího filmu v místě kontaktu jednotlivých vzorků.



Jak ukazuje Graf 5-20, ovlivnění výšky mazacího média je přímo úměrné parametru topografie S_q . To je způsobeno souvislostí parametru mazání s hodnotou S_q , a pokud budeme jako v našem případě chtít dodržet stejný parametr mazání, nárůst procentuální míry ovlivnění bude narůstat se zvětšováním výšky základního profilu, tj. se zhoršováním parametru topografie S_q tohoto povrchu. Procentuální míra ovlivnění tloušťky se dá spočítat z následující rovnice

$$\text{míra ovlivnění} = 1 - \frac{h_{av}}{h_c}, \quad (8)$$

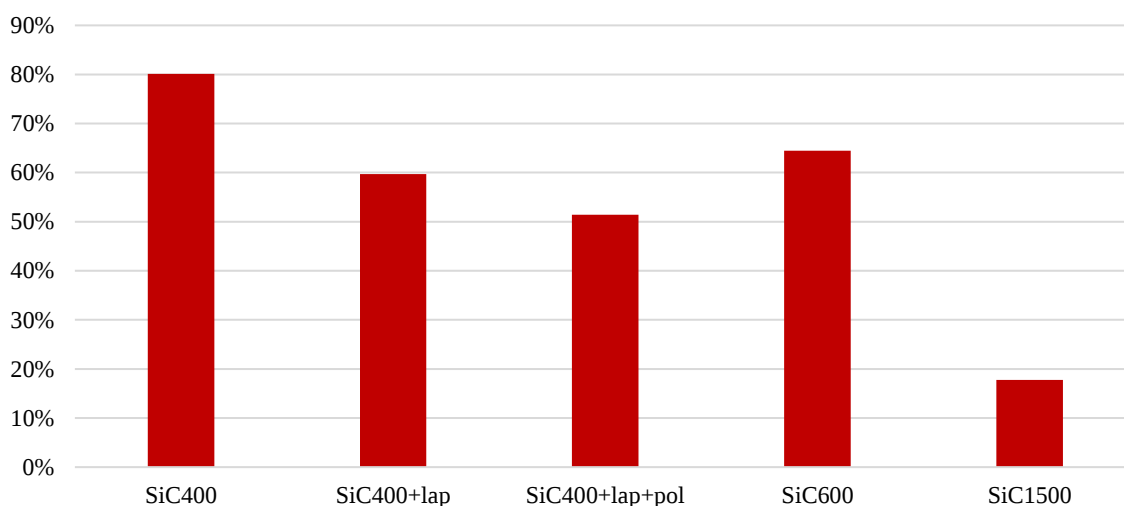
kde

míra ovlivnění – [%],

h_{av} – střední tloušťka mazacího filmu [nm],

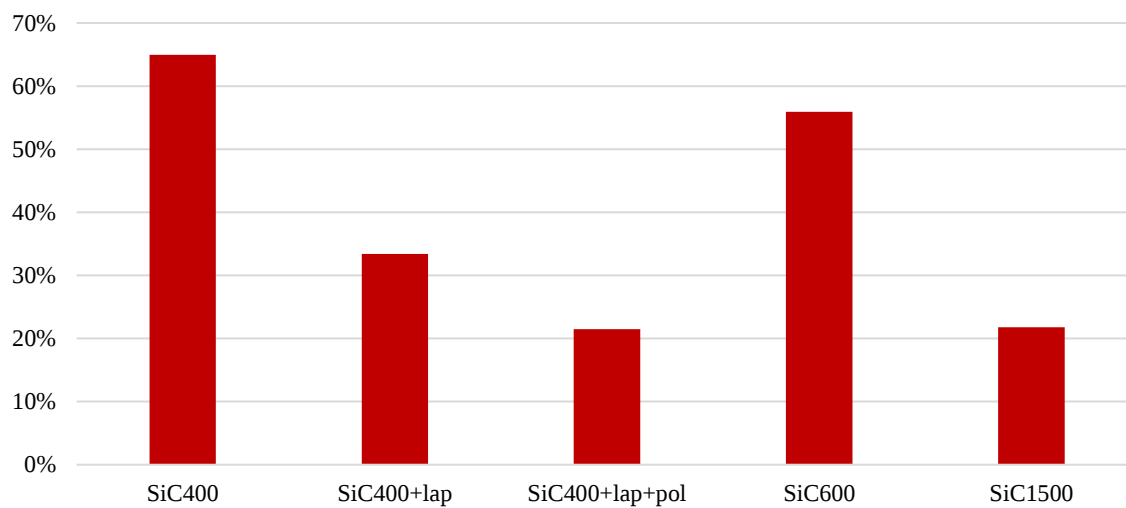
h_c – predikovaná centrální tloušťka mazacího filmu [nm].

Graf 5-20 Míra ovlivnění tloušťky mazacího filmu drsností povrchu.



Graf 5-21 ukazuje, kolik procent povrchu kontaktu nepřesáhlo ani třetinu predikované výšky mazacího filmu. Tato hodnota je stejně jako hodnota na předchozím grafu provázána s drsností povrchu. Projeví se zde ovšem způsob opracování povrchu. Míra ovlivnění tloušťky filmu leštěného povrchu SiC400+lap+pol byla téměř třikrát větší než míra ovlivnění vzorku SiC1500. Ačkoliv leštěný vzorek nedosáhl očekávané výšky mazacího filmu, jeho výška je téměř z 80 % nad hranicí 1/3 predikované hodnoty.

Graf 5-21 Procentuální podíl kontaktu s tloušťkou $\leq 1/3 h_c$.



6 DISKUZE

6.1 Vliv způsobu opracování vzorku na součinitel tření

Dle výsledků uvedených v sekci 5.1 můžeme rozhodnout o vhodnosti operací použitých k opracování materiálu z hlediska jednotlivých posuzovaných veličin. Těmito veličinami jsou velikost součinitele tření, skok součinitele tření při opětovném rozběhu zařízení a rychlost promazání kontaktu.

Z hlediska velikosti součinitele tření je nejvhodnější variantou vzorek SiC1500 a nejméně vhodnou variantou SiC400. Pokud ovšem vzorek SiC400 lapujeme, třecí součinitel se sníží až k hodnotě součinitele tření vzorku SiC600. Leštění se na součiniteli tření příliš neprojevilo.

Opětovný rozběh zařízení způsobí nejmenší skok součinitele tření u leštěného vzorku, který také nejrychleji dokáže promazat svůj kontakt, a tím přesunout hodnoty součinitele tření zpět na konstantní hodnotu.

6.2 Vliv způsobu opracování vzorku na topografii povrchu

Z grafů v sekci 5.2 můžeme odvodit, jak souvisí způsob opracování povrchu vzorku s jeho topografií.

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu S_a a základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu S_q se snižují s jemnějším brusným papírem. Lapování a leštění sice sníží hodnotu těchto parametrů, ale nijak se neprojeví na průběhu křivky změny těchto parametrů v porovnání se vzorky opracovanými pouze brusným papírem. Ke snížení těchto parametrů proto postačí vyšší jemnost papíru.

Odchylka od normálního rozdělení z hlediska šikmosti S_{sk} je u povrchů opracovaných brusným papírem velmi podobná. Strhávání vrcholů na povrchu vzorku u lapování a leštění způsobilo převládající údolí. Strhané vrcholky již z výroby ovlivní také špičatost S_{ku} . Její hodnota je u lapovaných a leštěných vzorků vyšší než u vzorků opracovaných brusným papírem. Vliv strhaných vrcholů dokazují také parametry redukované výšky píku S_{pk} a výšky jádra S_k . Z hlediska průběhu těchto parametrů můžeme tvrdit, že lapování a leštění má na jejich hodnoty velký vliv a přispívá k rychlejšímu ustálení těchto hodnot či k převaze údolí nad výstupky v rozložení povrchu.

6.3 Vliv způsobu opracování vzorku na tloušťku mazacího filmu

Sekce 5.3 je věnována porovnání jednotlivých mazaných kontaktů z hlediska výšky mazacího filmu. Pokud chceme dodržet stejný parametr mazání, je třeba měnit viskozitu pomocí teploty maziva jednotlivých vzorků. To ovšem způsobí značné odchýlení od predikované hodnoty z důvodu ztráty tlaku v kontaktu. Tuto ztrátu tlaku způsobují mikrodrážky způsobené opracováním brusným papírem. Tyto drážky, a tím pádem ztrátu tlaku, můžeme částečně eliminovat lapováním a leštěním. Leštěný povrch se v experimentu z hlediska mazání kontaktu jevil jako nejlepší a optimální volba opracování povrchu, a proto je pro mazání kontaktu tato operace velmi důležitá.

6.4 Vliv způsobu opracování vzorku na záběh

V sekci 2.6 věnované záběhu byl zmíněn způsob rozpoznání ukončení záběhu. Tím je ustálení součinitele tření na konstantní hodnotě. Lapovaný a leštěný povrch SiC400+lap, respektive SiC400+lap+pol, vykazují ustálenou hodnotu součinitele tření již téměř od počátku experimentu. Strhávání píků při lapování zásadně ovlivnilo způsob záběhu a o našich vzorcích můžeme prohlásit, že jsou zaběhnuté. O vzorcích opracovaných brusnými papíry, tedy SiC400, SiC600 a SiC1500 by toto tvrzení bylo pravděpodobně nesprávné. Hladký safírový disk nedokáže strhávat výstupky a zarovnávat povrch dostatečně efektivně a snižování součinitele tření je pouze velmi pozvolné. K ustálení třecího součinitele zde za dobu experimentu nedošlo a konec záběhu tedy nenastal.

7 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl proveden experiment záběhu pěti vzorků s různým opracování a topografií povrchu v režimu smíšeného mazání. Způsob opracování jednotlivých vzorků byl volen za cílem jejich vzájemného porovnání. Proto byly zvoleny tři zrnitosti brusných papírů, přičemž povrch opracovaný nejhrubším papírem byl vyhotoven ve třech verzích, kdy jedna byla opracována pouze tímto papírem, druhá byla po použití brusného papíru lapována a třetí po brusném papíru a lapování nakonec vyleštěna. Zkoumán byl tedy i vliv volby opracování na jednotlivé parametry pokusu. V průběhu experimentu byl vyhodnocován časový průběh součinitele tření a tloušťky mazacího filmu. V určitých časových intervalech byl vždy experiment přerušen a byla zkoumána změna parametrů topografie jednotlivých vzorků. Tímto přerušením experimentu vždy došlo po opětovném spuštění zařízení ke skokovému nárůstu součinitele tření, při kterém dochází k nárůstu třecí síly, a tím k rázu. Toto bylo způsobeno okamžikem promazávání kontaktu a vzniku mazacího filmu. Z experimentu vyplynulo, že pro ovlivnění parametrů topografie S_a a S_q je nejjednodušší změnou snížení či zvýšení zrnitosti brusného papíru, jelikož další operace v podobě lapování či leštění nemají na průběh změny těchto parametrů při záběhu vliv. Jejich vliv se začne projevovat až při posuzování jiných parametrů topografie, kdy se strhávání výstupků z povrchu materiálu ukázalo jako žádoucí, jelikož lapování a leštění díky tomu dokázalo urychlit záběh součásti. Dále bylo zjištěno, že lapování a leštění sníží skok součinitele tření a urychlí promazání kontaktu a vytvoření mazacího filmu. Mazací film byl oproti predikované hodnotě nejméně ovlivněn na nejjemnějším povrchu. Lapování a leštění dokázalo tento mazací film nejlépe zpracovat, jelikož mělo největší podíl povrchu nad 1/3 predikované výšky mazacího filmu ze všech vzorků.

Výstupy plynoucí z této bakalářské práce tedy jsou

- standartně měřenou a udávanou hodnotu S_a stačí regulovat změnou zrnitosti při opracování brusným papírem,
- ostatní parametry topografie prokázaly pozitivní účinky lapování a leštění při záběhu součásti,
- měření součinitele tření prokázalo ukončení záběhu vzorků SiC400+lap a SiC400+lap+pol již po několika prvních minutách experimentu,
- hrubá struktura povrchů opracovaných pouze brusným papírem způsobila, že záběh po dobu měření nebyl dokončen,
- zvýšení zrnitosti brusného papíru sníží míru ovlivnění predikované výšky mazacího filmu,
- lapování a leštění pozitivně ovlivní mazací film.

Další studie by mohla zahrnovat delší čas experimentu pro zkoumání konce záběhu u vzorků s opracováním pomocí brusných papírů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 4. vyd. Amsterdam: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2014. s. 852. ISBN 978-0-12-397047-3.
2. HARTL, Martin. *Konstruování strojů, stojní součásti*. (4. přednáška) Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
3. ÚSTAV KONTRUOVÁNÍ. *Tribologie*. (2. přednáška) Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
4. ŠPERKA, Petr. *Tribologie*. (9. přednáška) Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
5. KERNS, Jeff. *What's the Difference Between Types of Wear?* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/materials/article/21831957/whats-the-difference-between-types-of-wear>.
6. SPIKES, H. A. *Mixed lubrication – an overview*. Lubrication Science, 1997. Roč. 9, č. 3, s. 221-253.
7. WOYDT, Mathias a Rolf WÄSCHE. *The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens*. Wear, 2010. Roč. 268, s. 1542-1564.
8. KŘUPKA, Ivan. *Studium elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav*. Habilitační práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 121
9. MICHIGAN METHODOLOGY, LLC. *Michigan Metrology Glossary of Texture Parameters* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.michmet.com/Texture_parameters.htm.
10. WANG, Q. Jane a Yip-Wah CHUNG. *Encyclopedia of Tribology*. New York: Springer Science+Business Media, 2013. s. 4139. ISBN 978-0-387-92896-8.
11. 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.
12. MORALES-ESPEJEL, G. E., V. BRIZMER a E. PIRAS. *Roughness evolution in mixed lubrication condition due to mild wear*. Journal of Engineering Tribology, 2015. Roč. 229, č. 11, s. 1330-1346.

13. ZAPLETAL, Tomáš. *Vliv povrchových rýh na přechod ke smíšenému mazání* [online]. [cit. 2020-04-19]. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2016. s. 89. Vedoucí práce Petr Šperka. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=125976.
14. HAMROCK, Bernard J. a Duncan DOWSON. *Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts: part III—fully flooded results*. Journal of lubrication technology, 1977. Roč. 99, č. 2, s. 264-275.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratk

<i>3D</i>	trojdimenzionální
<i>lap</i>	lapováno
<i>např.</i>	například
<i>Obr.</i>	obrázek
<i>pol</i>	leštěno
<i>PAO6</i>	mazací olej polyalphaolefin 6
<i>SiC400</i>	brusný papír z karbidu křemíku o zrnitosti 400
<i>SiC600</i>	brusný papír z karbidu křemíku o zrnitosti 600
<i>SiC1500</i>	brusný papír z karbidu křemíku o zrnitosti 1500
<i>Tab.</i>	tabulka
<i>tj.</i>	to je
<i>tzv.</i>	takzvaný/á/é
<i>ÚK</i>	Ústav konstruování

9.2 Seznam použitých symbolů a veličin

<i>A</i>	plocha ohraničující vyhodnocovanou oblast
<i>f</i>	součinitel tření
<i>F</i>	síla
<i>h_c</i>	predikovaná centrální tloušťka mazacího filmu
<i>h_{min}</i>	minimální výška mazacího filmu
<i>h_{av}</i>	střední tloušťka mazacího filmu
<i>m</i>	metr
<i>min</i>	minuta
<i>mm</i>	milimetr

MPa	megapascal
N	newton
nm	nanometr
nm^2	čtvereční nanometr
p	tlak na čep
Pa	pascal
rad	radián
R_q	průměrná kvadratická odchylka profilu
s	sekunda
S_a	aritmetický průměr výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
S_{ku}	špičatost čtvercem omezené stupnice povrchu
S_q	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
SRR	poměr kluzu a valení
S_{sk}	šířmost čtvercem omezené stupnice povrchu
t	čas
u_B	rychlost otáčení kuličky
u_D	rychlost otáčení disku
$Z(x,y)$	funkce představující výšku profilu vůči základní rovině
η	dynamická viskozita maziva
Λ	parametr mazání
μm	mikrometr
ω	úhlová rychlost čepu
$^{\circ}C$	stupeň Celsia
$\%$	procento

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

10.1 Seznam obrázků

Obr. 2-1	Režimy mazání [3].	15
Obr. 2-2	Původní Stribeckova křivka – upraveno [7].	15
Obr. 2-3	Stribeckova křivka podle Gümbelovy/Herseyho teorie – upraveno [1].	16
Obr. 2-4	a) Konformně a b) nekonformně zakřivený třecí povrch [8].	16
Obr. 2-5	Křivka, kde součinitel tření závisí na parametru mazání λ – upraveno [7]..	17
Obr. 2-6	Neprůkaznost použití parametrů S_a a S_q – upraveno [9].	18
Obr. 2-7	Typické příklady šikmosti a špičatosti – upraveno [10].	19
Obr. 2-8	Křivka nosného podílu povrchu (vpravo) – upraveno [10].	20
Obr. 2-9	Funkční parametry na křivce nosného podílu povrchu – upraveno [10].	21
Obr. 2-10	Změna drsnosti povrchu při záběhu součásti – upraveno [11].	21
Obr. 2-11	Časový průběh změny topografie dvou různých povrchů – upraveno [12].	22
Obr. 4-1	Povrchová úprava kuličky.	26
Obr. 4-2	Optický tribometr EHD5.	26
Obr. 4-3	Schéma kontaktu kuličky a disku v optickém tribometru.	27
Obr. 4-4	Schématické znázornění optické interferometrie – upraveno [13].	28
Obr. 4-5	3D optický profilometr Bruker ContourGT-X8.	28
Obr. 4-6	Kulička upnutá v hřídeli.	30
Obr. 4-7	Kulička v kontaktu se safírovým diskem.	30
Obr. 4-8	Hřídel s kuličkou při měření topografie povrchu.	30
Obr. 5-1	Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400.	42
Obr. 5-2	Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400+lap.	42
Obr. 5-3	Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC400+lap+pol.	42
Obr. 5-4	Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC600.	43
Obr. 5-5	Snímky mazaného kontaktu vzorku SiC1500.	43

10.2 Seznam grafů

Graf 5-1	Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400.	32
Graf 5-2	Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400+lap.	33
Graf 5-3	Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC400+lap+pol.	33
Graf 5-4	Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC600.	34
Graf 5-5	Časový průběh součinitele tření u vzorku SiC1500.	34
Graf 5-6	Porovnání časových průběhů součinitele tření.	35
Graf 5-7	Časový průběh parametru S_a	36
Graf 5-8	Časový průběh parametru S_q	36
Graf 5-9	Časový průběh parametru S_{sk}	37
Graf 5-10	Časový průběh parametru S_{ku}	37
Graf 5-11	Časový průběh parametru S_{pk}	38
Graf 5-12	Časový průběh parametru S_k	39
Graf 5-13	Časový průběh parametru S_{vk}	39
Graf 5-14	Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400.	40
Graf 5-15	Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400+lap.	40
Graf 5-16	Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC400+lap+pol.	40
Graf 5-17	Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC600.	41
Graf 5-18	Změna křivky nosného podílu povrchu u vzorku SiC1500.	41
Graf 5-19	Střední tloušťka mazacího filmu v místě kontaktu jednotlivých vzorků.	43
Graf 5-20	Míra ovlivnění tloušťky mazacího filmu drsností povrchu.	44
Graf 5-21	Procentuální podíl kontaktu s tloušťkou $\leq 1/3 h_c$	45

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Operace použité k opracování testovacích vzorků.	25
Tab. 4-2	Počáteční podmínky experimentu.....	29
Tab. 4-3	Teploty a dynamické viskozity maziva pro jednotlivé vzorky.....	29