



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV CÍLENÉ MODIFIKACE TŘECÍCH POVRCHŮ NA SOUČINITEL TŘENÍ U NEKONFORMNÍCH POVRCHŮ

INFLUENCE OF THE SURFACE TEXTURING OF NON-CONFORMAL SURFACES
AT THE FRICTION COEFFICIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KAREL PIŠŤÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DANIEL KOUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Karel Pišťáček

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

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

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

Vliv cílené modifikace třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů

v anglickém jazyce:

Influence of the surface texturing of non-conformal surfaces at the friction coefficient

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza vlivu cílené modifikace třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů užitím optického tribometru

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
- 4.Vymezení cílů práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Analýzu a interpretaci získaných údajů
- 7.Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva, technická dokumentace.

Typ práce: analytická

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

Etsion, I., Laser Surface Texturing – Measure to Reduce Friction, In: Proceeding of the 14th International Colloquium on Tribology, Esslingen, 2004, s.329-333.

Akamatsu et al, Influence of surface roughness skewness on rolling contact fatigue life, Trib. Trans.,1992, 35, s. 745-750.

Suh, N.P., Mosleh, M., Howard, P.S. Control of friction. Wear. 1994, vol. 175, no. 1-2, s. 151-158. ISSN 0043-1648.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem cílené modifikace topografie povrchu na součinitel tření u nekonformních povrchů. V rámci práce byly provedeny úpravy optického tribometru pro účely měření tření v kontaktu mezi kuličkou a rovinným diskem. Součinitel tření byl stanovován na základě velikosti krouticího momentu na kuličce, který byl měřen snímačem krouticího momentu. Pro záznam a zpracování signálu ze snímače byl vytvořen software, díky kterému je možné provádět měření součinitele tření pro zvolené podmínky (zatížení kontaktu, rychlosti třecích povrchů a prokluz). Experimenty byly prováděny s hladkou a texturovanou kuličkou, skleněným a ocelovým diskem, při různých rychlostech a kluzně valivých poměrech. Pro zjištění vlivu cílené modifikace topografie třecího povrchu na součinitel tření bylo provedeno srovnání velikosti součinitele tření hladké a texturované kuličky. Bylo zjištěno, že mikrotextura má na součinitel tření jen nepatrný vliv.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tření, topografie povrchu, nekonformní povrchy, EHD mazání.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the influence of the surface texturing of non-conformal surfaces at the friction coefficient. In the work were made adjustment of experimental apparatus for measuring friction in the contact between ball and flat disk. Friction coefficient was calculated by the size of the torque on the ball, which was measured by the torque sensor. For recording and processing signal from the sensor was designed software that makes it possible to measure the coefficient of friction for selected conditions (loading of contact, speed of rubbing surfaces and rolling-sliding conditions). Experiments were carried out with smooth and textured ball, glass, and steel disc at different speeds and rolling-sliding conditions. To determine the effect of the influence of the surface texturing at the friction coefficient the size of the coefficient of friction of smooth and textured ball was compared. It was found that the microtexture of the friction coefficient has little effect.

KEYWORDS

Friction, surface texturing, non-conformal contact, EHD film thickness.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIŠŤÁČEK, K. *Vliv cílené modifikace třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 66s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně jako autorskou práci, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Koutného, Ph.D. a za použití uvedené literatury.

V Brně dne:.....

.....

Karel Pišňáček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Danielu Koutnému Ph.D. za cenné rady a odborné vedení. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Šperkovi, za vyhodnocení 3D topografie povrchu kuličky a panu Ing. Martinu Zimmermanovi, který mi byl nápomocen při vyhodnocování tloušťky mazacího filmu.

OBSAH

ÚVOD	11
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
1.1 Procesy tření obecně	12
1.2 Nekonformní povrchy	14
1.3 Modifikace topografie třecích povrchů	15
1.3.1 Techniky modifikace třecích povrchů (vytváření mikrostruktur)	15
1.3.2 Vytváření textury pomocí laseru (LST - Laser Surface Texturing)	15
1.4 Výzkum cílené modifikace třecích povrchů	17
1.4.1 Mikrostrukutra jako zásobník maziva	17
1.4.2 Vliv rozměrů mikrostruktury	18
1.4.3 Vliv geometrie a hustoty rozmístění mikrostruktury	19
1.4.4 Metody virtuální simulace	21
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	23
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	24
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	25
4.1.1 Popis stávajícího zařízení	25
4.1.2 Popis snímače krouticího momentu	25
4.2 Návrh příruby pro snímač a výběr pojistné spojky	26
4.2.1 Návrh příruby - varianta 1	26
4.2.2 Návrh příruby - varianta 2	27
4.2.3 Pojistná spojka	27
4.3 Vytvoření počítačového programu	27
4.3.1 Přepočet napětí ze snímače na krouticí moment	28
4.3.2 Výpočet součinitele tření	28
4.3.3 Vyhodnocení měřených dat a stanovení součinitele tření	29
4.4 Zprovoznění a odladění měřicího řetězce	29
4.4.1 Zprovoznění měřicího řetězce	29
4.4.2 Odladění měřicího řetězce	30
4.4.3 Použitelnost snímače	31
4.5 Parametry nezbytné pro vyhodnocení měření	32
4.5.1 Zatížení kontaktu	32
4.5.2 Rychlosti třecích povrchů	34
4.6 Kontaktní tělesa	37
4.6.1 Disk	37
4.6.2 Kulička s hladkým povrchem	38
4.6.3 Kulička s miktotexturou	39
5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	42
5.1 Konstrukční řešení úpravy tribometru	42
5.2 Software pro měření	44
5.2.1 Načtení napětí do softwaru	44
5.2.2 Možnosti programu	45
5.2.3 Parametry pro nastavení tribometru	45
5.3 Zprovoznění a odladění měřicího řetězce	46
5.3.1 Zpracování napětí ze snímače	47
5.4 Měření tření s hladkými povrchy	49
5.4.1 První měření	50

5.4.2	Druhé měření	52
5.5	Měření tření s modifikovaným povrchem kuličky	52
5.5.1	Výsledky měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky v kontaktu se skleněným diskem	53
5.5.2	Výsledky měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky v kontaktu s ocelovým diskem	54
5.5.3	Srovnání součinitele tření pro skleněný a ocelový disk	56
5.5.4	Měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky s viskóznějším mazivem	57
6	DISKUSE	60
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	63
	SEZNAM TABULEK	65
	SEZNAM PŘÍLOH	66

ÚVOD

Součásti, jejichž povrchy jsou v relativním pohybu, jsou vystaveny vzájemnému namáhání a opotřebení [6]. Z důvodu minimalizací ztrát energie je u těchto povrchů požadováno co nejnižší tření. Tření je po dlouhou dobu úspěšně snižováno používáním maziv, snižováním drsnosti třecích povrchů a materiály s nízkým součinitelem tření. Tyto způsoby umožnily značné zlepšení tribologických vlastností zvláště při ustálených provozních podmínkách, kdy zpravidla nedochází ke vzájemnému styku povrchů. Nicméně mnoho strojních součástí pracuje v neustálených podmínkách způsobených: náhlým zvýšením zatížení, změnou geometrie v čase (vačky) a především změnou rychlosti třecích povrchů (rozběh areverzace pohybu). Tyto změny způsobují v krajních případech přerušování soudržné vrstvy maziva v kontaktu, kdy dochází k přímému styku povrchů a tedy ke zvýšenému tření a opotřebení. Hledáním dalších způsobů zlepšujících tribologické vlastnosti povrchů bylo zjištěno, že tyto vlastnosti mohou být dále zlepšeny cílenou modifikací topografie třecích povrchů (záměrné vytváření textury, přesně stanovených rozměrů, na třecích površích). Funkce textury spočívá v dopravení maziva do kontaktní oblasti v „kritických“ fázích chodu strojních součástí (tj. v době přerušování soudržné tloušťky mazacího filmu). Čímž dojde ke snížení tření, opotřebení a následnému zvýšení životnosti třecích povrchů.

Zatímco cílená modifikace konformně zakřivených třecích povrchů již byla úspěšně uvedena do praxe (např. pístní kroužky, vložky válců spalovacích motorů nebo mechanická těsnění), cílená modifikace nekonformně zakřivených třecích povrchů je stále v oblasti základního výzkumu. Je způsoben tím, že ve styku modifikovaných, nekonformně zakřivených třecích povrchů má na utváření mazacího filmu vliv hned několik aspektů. Výzkumem bylo prokázáno, že „příznivý“ přínos textury ve styku nekonformně zakřivených třecích povrchů je tedy ovlivněn několika proměnnými. Mezi tyto proměnné patří zejména poměr mezi hloubkou a průměrem dentu, hustota rozmístění jednotlivých dentů, a v neposlední řadě také poměr mezi samotnými rozměry kontaktních těles.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Procesy tření obecně

Významným faktorem vzájemného chování dvou pohybujících se těles je tření. Podle rychlosti pohybu a jeho druhu můžeme rozeznat různé druhy tření. Nauka o vzájemném působení povrchů při jejich vzájemném (relativním) pohybu se nazývá tribologie. Třecí projevy a účinky závisí na řadě faktorů, jako je styková plocha, látka, která je mezi stykovými plochami, a blízkým okolím. Vysvětlení principu tribologického procesu je spojováno se vznikem třecí síly a částic opotřebení. [9]

Třecí síla je z pohledu mikromodelu způsobována:

1. difúzí molekul a atomů vzájemně se dotýkajících povrchů, kdy vznikají mikrosvary mezi stýkajícími se výstupky nerovností a dochází k adhezi označované jako molekulární působení
2. zachytáváním se mikronerovností povrchů, které může nastat i přes další částice, které se dostaly mezi povrchy, kdy síla působí pružné a plastické deformace a dochází k abrazi, která je označována jako mechanické působení.

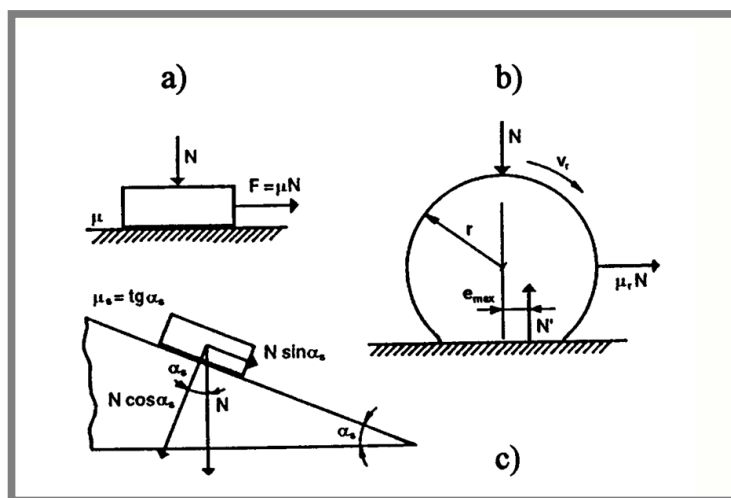
Z hlediska makromodelu je tření chápáno jako odpor proti pohybu vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti styku jejich povrchů tečném směru k povrchům. Toto tření je označováno jako vnější tření. [9]

Vnější tření se rozlišuje na:

- kluzné (smykové, vlečné)
- valivé

Základní vztah popisující smykové tření (Obr. 1-1 a) je označován jako Coulombův zákon.

$$\mu = \frac{F}{N}$$



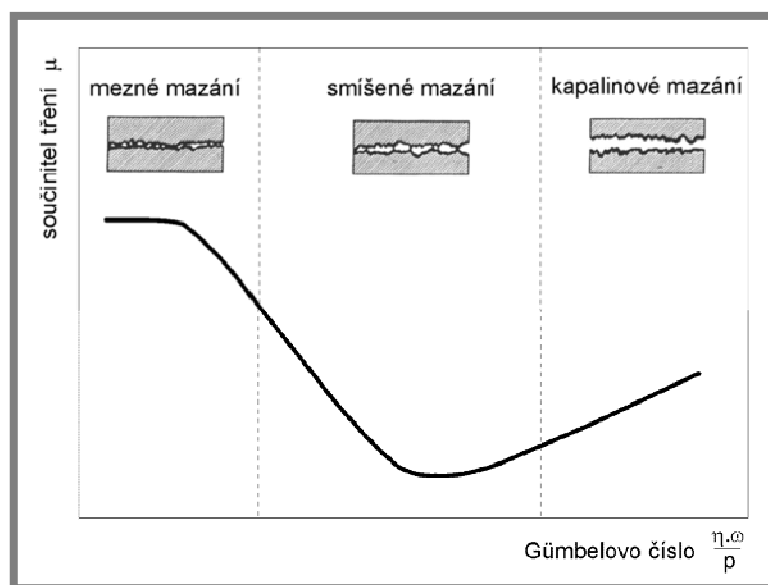
Obr. 1-1 Definice tření; kluzné a), valivé b), statické c) [9]

Síla, která udržuje těleso v rovnoměrném pohybu, je vzhledem k třecí síle záporně orientovaná a má menší hodnotu než síla, která je nutná pro uvedení téhož tělesa do pohybu. Proto také součinitel tření za klidu (statický součinitel tření μ_s) je větší než součinitel tření za pohybu (kinetický součinitel tření μ). Statický součinitel tření tělesa na nakloněné rovině je určen sklonem roviny, kdy se těleso uvede samovolně do rovnoměrného pohybu (Obr. 1-1 c). Kinetický součinitel kluzného tření s rostoucí rychlostí relativního pohybu klesá. [9]

Valivé tření je z hlediska makromodelu charakterizováno ramenem valivého odporu e_{\max} (Obr. 1-1 b). Pro sílu potřebnou k pohybu valením F_r platí:

$$F_r = N \cdot \mu_r = N \cdot \frac{e_{\max}}{r}$$

V praxi jsou často obě tělesa oddělena vrstvou maziva a pak jedná o tření s mazivem, kde můžeme rozlišit tři základní režimy mazání (mazání mezní, smíšené a kapalinové viz Obr. 1-2).



Obr. 1-2 Stribeckova křivka [6]

Oblast mezního (suchého) mazání přechází do smíšeného mazání, které se při oddělení nejvyšších vrcholů nerovností mazivem mění na kapalinové.

V technické praxi je častým jevem stav, kdy dochází při tření za přítomnosti maziva k občasným dotykům povrchových mikronerovností stýkajících se povrchů. Tyto případy se označují jako smíšené tření. Jako mezní tření bývá označován limitní případ smíšeného resp. kapalinného tření, kdy tloušťka vrstvy kapalného maziva je velmi malá. Při režimu mezního mazání dochází k bezprostřední interakci mezi třecími povrchy (nastává i při mazání tuhými mazivy).

Kapalinové mazání je režim mazání, při kterém dochází k oddělení třecích povrchů koherentním mazacím filmem a dále může být rozděleno na: mazání hydrostatické, hydrodynamické, elastohydrodynamické a mazání vytlačovaným filmem. [6]

Při kapalinovém tření prakticky nenastane opotřebení povrchu těles. Třecí síla je v tomto případě dána tečnými napětími v kapalině na povrchu tělesa. Pro rovnoměrně rozložené tečné napětí τ a plochu povrchu A je tečná třecí síla dána vztahem [9]

$$F_t = A \cdot \tau$$

Pro tečné napětí v kapalině platí podle Newtonova zákona vztah:

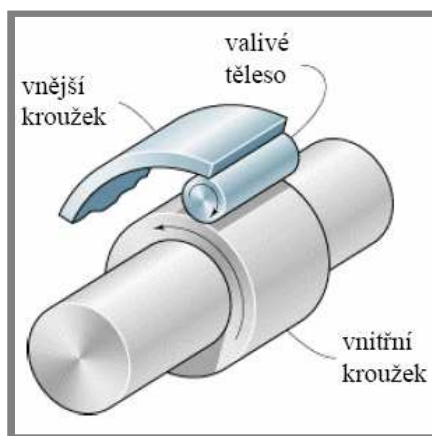
$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}$$

Při smíšeném a suchém tření nastane přímý kontakt některých výstupků a mikronerovností třecích ploch. V místě přímého kontaktu kovových povrchů může vzniknout mikrosvar, jako projev adheze. Může dojít k rytí výstupkem jedné plochy do druhé, jako projev abraze. Při mnohonásobném opakování pružné deformace povrchu může nastat rozvoj mikrotrhlínky jako projev povrchové únavy. Všechny tyto účinky způsobují uvolňování a přemísťování částic z povrchů a vznik produktů opotřebení. Postupně tak dochází ke změnám tvaru a rozměrů třecích ploch. [9]

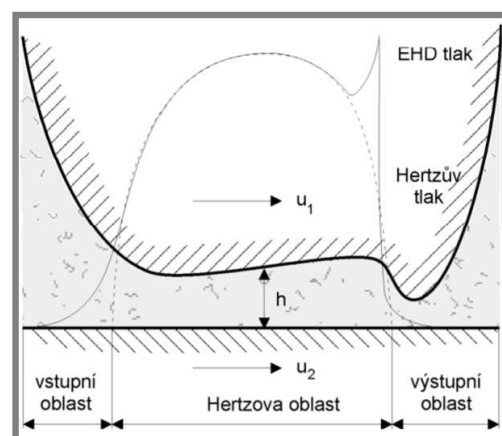
1.2 Nekonformní povrchy

Velká část strojních součástí pracuje v podmínkách elastohydrodynamického (EHD) mazání, kdy elastické deformace povrchů jsou řádově stejně velké jako tloušťka hydrodynamického mazacího filmu. Viskozita maziva v kontaktní oblasti se výrazně zvyšuje vlivem vysokého kontaktního tlaku.

EHD režim mazání nastává při styku nekonformně zakřivených povrchů, jejichž styková plocha je velmi malá (styčná plocha je až o tři řády menší než v případě konformních povrchů). Přenášená zatížení bývají relativně velká a se zvětšováním zatížení roste i velikost kontaktní plochy. Příkladem jsou valivá ložiska, ozubené převody a vačky. [6]



Obr. 1-3 Příklad nekonformně zakřiveného povrchu [6]



Obr. 1-4 Rozložení tlaku v EHD kontaktu [6]

1.3 Modifikace topografie třecích povrchů

Za cílenou modifikaci třecích povrchů lze považovat záměrné vytváření textury, přesně stanovených rozměrů, na třecích površích za účelem zlepšení tribologických vlastností.

Nejnámější a nejstarší komerčně využívanou úpravou povrchu je honování vložek válců spalovacích motorů. [4]. Základní výzkumné práce, různých modifikací třecích povrchů pro tribologické aplikace jsou prováděny výzkumnými skupinami po celém světě a také i na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně.

Studie jsou většinou prováděny na experimentálních zařízeních typu kuličky na disku (ball-on-disk), nebo na zařízeních se dvěma rotujícími kotouči, jejichž osy mohou být rovnoběžné, nebo mimoběžné. Experimentální výzkumy jsou převážně založeny na myšlence, že textura na povrchu slouží jako mikronádrž (dopravující zvýšený podíl maziva do kontaktní oblasti), nebo také jako mikropast zadržující částice opotřebením. Obvykle je optimalizace rozměrů textury prováděna na základě metody „pokus, omyl“ a to zejména v režimu suchého tření nebo v režimu tzv. hladovění, kde doposud neexistuje teoretické řešení.

Klíčovými faktory ovlivňující tribologické chování cíleně modifikovaných třecích povrchů (a tím jejich příznivý nebo negativní přínos) je velikost a hustota rozložení jednotlivých mikrokapes. Každá z těchto mikro-prohlubní může sloužit jako mikrohydrodynamické ložisko v případě úplného kapalinového nebo smíšeného režimu mazání, mikro-zásobník maziva v případech tzv. hladovění, nebo jako mikro-kapsy sloužící k zachycování částic opotřebením.[2][4]

1.3.1 Techniky modifikace třecích povrchů (vytváření mikrostruktur)

1.3.1

V průběhu několika posledních let bylo vyvinuto mnoho metod a technik vytváření mikrostruktur, jako jsou například různé procesy obrábění („klasické“ nebo abrazivní), leptání, litografie, plastická deformace povrchu (vtiskem hrotu definovaných rozměrů), a nejčastěji pomocí laseru. Použití výše vyjmenovaných metod závisí zejména na jejich efektivitě a materiálu třecích povrchů. [2]

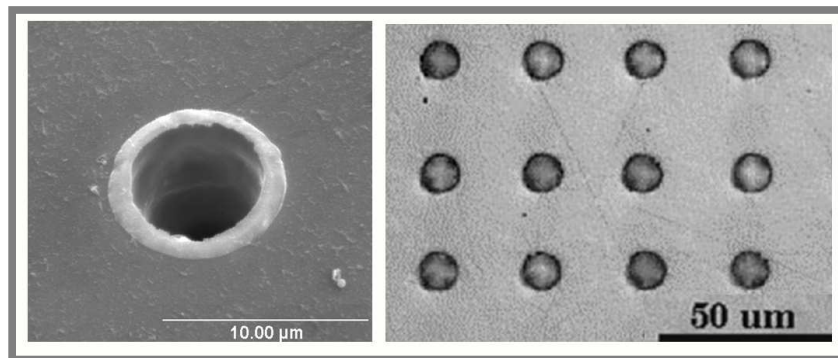
1.3.2 Vytváření textury pomocí laseru (LST - Laser Surface Texturing)

1.3.2

Dosud nejslibnější a nejpokročilejší technikou je vytváření mikrotextury pomocí laseru. Metoda se používá více než 10 let v magnetických záznamových zařízeních, kde struktura slouží pro zamezení „přilepení“ čtecí hlavy k vlastnímu záznamovému médiu (pásce nebo plotně disku) při jeho rozběhu.

Výroba mikrotextury laserem je velice rychlá (v porovnání s jinými metodami), šetrná k životnímu prostředí a umožňuje vynikající kontrolu nad tvarem a velikostí vytvářené textury (je tedy vhodná pro libovolné tvary mikrostruktur). Další výhodou laseru je, že jím mohou být zpracovávány různé materiály (například kalená ocel, keramika, nebo polymery). Pro dosažení mikrostruktury požadovaných rozměrů je nezbytné přesné řízení hustoty energie paprsku. [2][4]

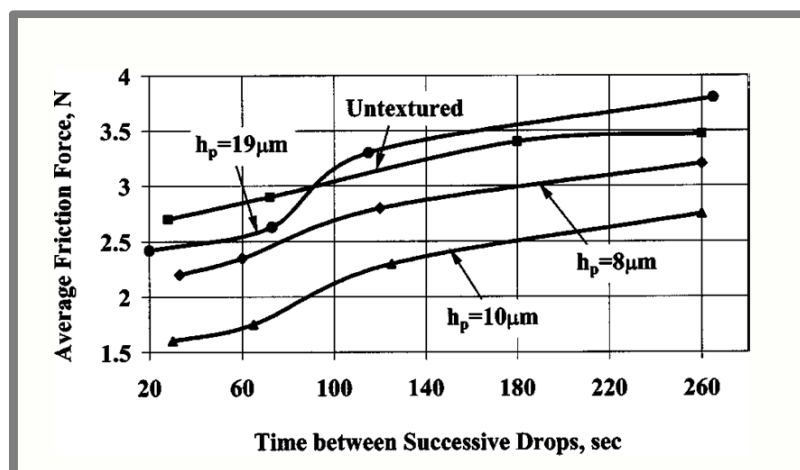
Typickým rysem textury vytvořené pomocí laseru je obruba zatuhlého materiálu kolem hrany mikrokrátera (Obr. 1-5). Tento nežádoucí jev lze do jisté míry minimalizovat optimalizací parametrů laseru, a dále pak dodatečným přešetřením texturovaného povrchu. [2]



Obr. 1-5 Textura vytvořená pomocí laseru (před a po přeleštění) [2]

Laserový paprsek může být zaměřen na určité místo a ultrakrátkými pulzy (řádově femtosekundy) lze dosáhnout velmi přesného odstranění materiálu v místě každého jednotlivého kráteru zvlášť (nevhodné pro výrobu mikrostruktury složené z miliónů kráterů a tedy i pro průmyslovou výrobu). Dalším způsobem využití laseru pro výrobu mikrostruktur je zacílení paprsku přes masku (šablonu), která má tvar požadované textury. [2][4]

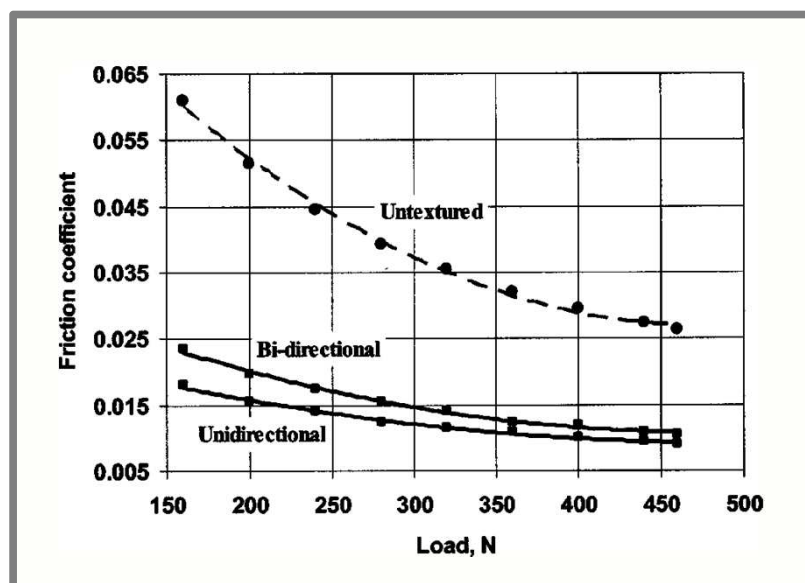
Přínosy použití LST na pístních kroužcích byly teoreticky i experimentálně potvrzeny v [3], kde textura s „optimálními parametry“ dokázala v režimu plného kapalinového mazání snížit tření o 30% v porovnání s netexturovanými pístními kroužky. Navíc bylo také zjištěno, že „optimální“ textura má příznivý přínos i v režimu tzv. hladovění, kdy krátery slouží jako mikrozásobníky maziva.



Obr. 1-6 Velikost součinitele tření pro různé hloubky dentů (h_p) [3]

Potenciál laserem vytvořené textury byl také prokázán v čerpadlech, kde čerpaná tekutina slouží zároveň jako mazivo pro ložiska. Bylo zjištěno, že textura vytvořená na části povrchu může podstatně zvýšit únosnost použitých ložisek.

Výsledky zkoušek ve vodě (při 1500 a 3000 ot/min) ukázaly, že texturované ložisko vykazovalo, v celém rozsahu zatížení, přibližně 3x menší tření než v případě netexturovaného ložiska.



Obr. 1-7 Srovnání velikosti součinitele tření netexturovaného a texturovaného povrchu při jednosměrném a obousměrném pohybu [3]

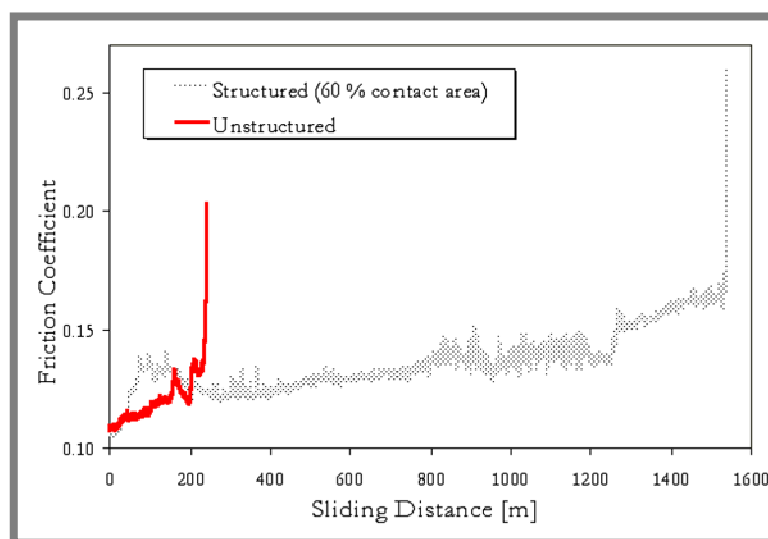
1.4 Výzkum cílené modifikace třecích povrchů

1.4

1.4.1 Mikrostrukutra jako zásobník maziva

1.4.1

G. Dumitru [2] zkoumal vliv s laserem upraveného povrchu na velikost tření s omezeným množstvím maziva. Na základě vyhodnocení vzdálenosti, po kterou si dokázal zkoumaný povrch „zachovat“ nízký součinitel tření (limitní hodnota pro zastavení testu byla stanovena hodnota součinitele tření $\mu=0,5$) zjistil, že zatímco u neupraveného povrchu součinitel tření přesáhl limitní hodnotu přibližně už po 210 m, povrch s mikrostrukturou si dokázal „zachovat“ nízký součinitel tření na vzdálenosti přesahující 1500 m. Došlo tedy k více než 7-mi násobnému navýšení doby, po kterou třecí povrchy dokázaly pracovat, aniž by muselo být aplikováno další mazivo.



Obr. 1-8 Závislost součinitele tření na kluzné vzdálenosti pro povrch bez mikrostrukutra a povrch s mikrostrukturou [2]

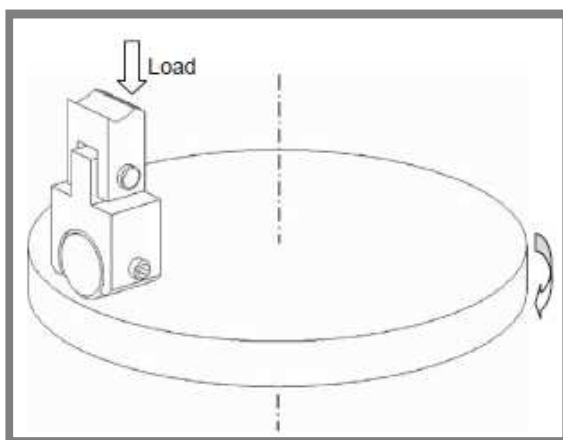
Jiná studie byla vypracována A. Blatterem [1], který zkoumal vliv mikrostruktury, tvořené drážkami různých rozměrů, na třecí vlastnosti safírového disku. V případě hrubého drážkování došlo, vlivem výrazného opotřebení kontaktní oblasti na kuličce, k zaplnění drážek částicemi opotřebení čímž byl eventuální přínos struktury znehodnocen. Navíc vlivem opotřebení (zploštění) kuličky došlo i ke změně elastohydrodynamického režimu mazání na režim hydrodynamický. U jemného drážkování žádné opotřebení kuličky nenastalo, v důsledku čehož zůstaly drážky „volné“ pro mazivo a mikrostruktura tak mohla plnit svou funkci zásobníku maziva. Provedené srovnávací testy odhalily, že přítomnost jemných drážek snížila tření a současně prodloužila životnost třecích povrchů při kluzném pohybu. Získané výsledky prokazují příznivý přínos mikrostruktury vhodné velikosti a tvaru na tribologické chování, i přestože nebyly drážky vytvořeny po celém povrchu disku. Existují také spekulace o tom, že mikrostruktura vytvořená po celém povrchu součásti nemusí dále snižovat tření a zvyšovat životnost. Tzn., že mikrostruktura vytvořená na celém povrchu může působit kontraproduktivně. Pokud jde o rozměry a orientaci mikrostruktury vůči směru pohybu každá konkrétní aplikace bezpochyby vyžaduje jejich specifickou optimalizaci. Výše uvedené studie jasně ukazují, že funkce mikrostruktury jako zásobníku maziva má nezanedbatelný vliv na zlepšení tribologických vlastností.

1.4.2 Vliv rozměrů mikrostruktury

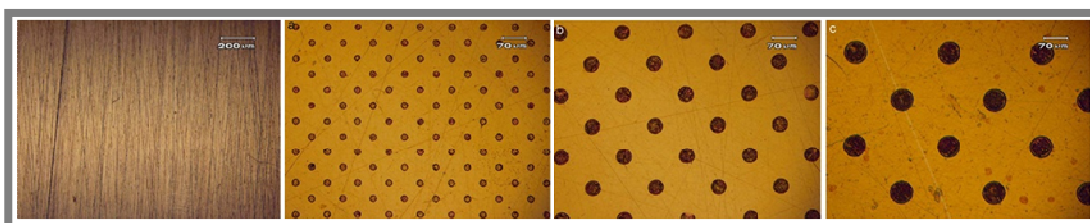
Velikost mikrostruktury povrchu se stává důležitým parametrem při její optimalizaci, především při nízké rychlosti a vysokém zatížení třecích povrchů. Experimentální studium zaměřené na vliv hloubky mikrotextury na utváření mazacího filmu ve styku nekonformních povrchů provedli I. Křupka, M. Hartl [10], kteří chování mazacího filmu v EHD kontaktu mezi rovinným diskem a texturovanou kuličkou prováděli kolorimetrickou interferometrií za podmínek kluzně-valivého pohybu. Přítomnost hlubokých dentů v mazaném kontaktu měla za následek snížení tloušťky mazacího filmu ve směru proudění maziva. U textury, s menší hloubkou dentů, nebylo takovéto snížení tloušťky mazacího filmu významné, a tedy účinek textury na utváření mazacího filmu byl příznivější. Přičemž pro záporný kluzně-valivý poměr (kdy povrch disku se pohybuje pomaleji než povrch kuličky s texturou) neměla hloubka dentů na snížení tloušťky mazacího filmu žádný významný vliv. Výsledky této studie tedy ukazují, že mikrotextura může zlepšit tribologické vlastnosti u vysoce zatížených elastohydrodynamicky mazaných kontaktů, avšak při použití textury na tomto typu povrchů musí být také brána v úvahu hloubka mikrotextury. Předpokládá se, že by příznivý přínos textury na mazaný kontakt mohl být významnější v případě reverzace pohybu nebo při rozběhu strojních součástí, kdy tloušťka mazacího filmu je velmi malá, a textura by tak mohla napomoci ke zvýšení životnosti těchto povrchů tím, že by denty mohly sloužit jako mikrozásobníky maziva, které by dopravovaly do kontaktu více maziva, a nedocházelo by tedy ke zvýšenému opotřebení povrchů.

Xiaolei Wang [15] prováděl experimenty za účelem prošetření vlivu velikosti kráterů na tření v liniovém kontaktu, kde každou mikrostrukturu tvořilo pole kráterů se stejným pokrytím třecího povrchu (7%) a se stejným poměrem hloubky k průměru. Průměr jamek byl vyroben v rozsahu 20, 40 a 60 μm (Obr. 1-10). Kontakt byl realizován stykem ocelového válečku a mosazného rovinného disku (Obr. 1-9) a test

probíhal za čistého kluzu. Výsledky ukázaly, že snížení tření bylo dosaženo pouze u disku se strukturou tvořenou jamkami o průměru 20 μm .



Obr. 1-9 Schematické znázornění zařízení [15]



Obr. 1-10 Mikroskopické snímky povrchu testovacího válečku a vyšetřovaných textur [15]

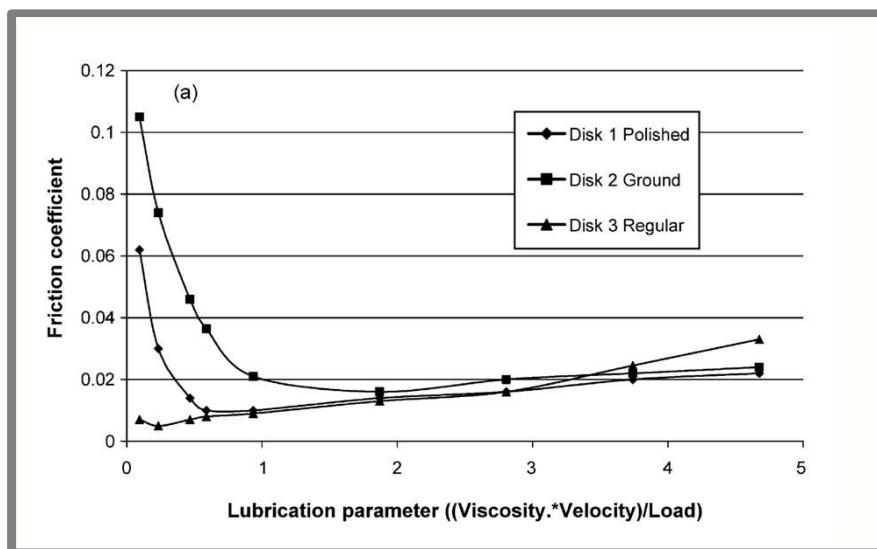
Na základě získaných, nepříliš uspokojivých, výsledků byly provedeny srovnávací numerické simulace, které prokázaly, že na zvýšení tloušťky mazacího filmu nemá zásadní vliv pouze poměr mezi průměrem a hloubkou jamek (jako je tomu v případě styku konformních povrchů), ale také poměr mezi průměrem jamek a poloměrem válečku (respektive druhého kontaktního tělesa). [15]

1.4.3 Vliv geometrie a hustoty rozmístění mikrostruktury

Dalším parametrem, který ovlivňuje „výkonnost“ texturovaného povrchu je geometrie a hustota rozmístění mikrostruktury. Studii zaměřenou na posouzení vlivu geometrie mikrostruktury na změnu režimu mazání provedla L. Galda [5], která zkoumala povrchy se strukturou tvořenou jamkami ve tvaru slzy (se dvěma různými poměry mezi hloubkou a délkou) a strukturou tvořenou kruhovými jamkami. Struktury byly vyrobeny v rozsahu 7,5-20 % pokrytí povrchu. Výsledky ukázaly, že pouze textura tvořená prohlubněmi „vhodného“ tvaru, pokrytí a velikosti dokázala zlepšit třecí charakteristiky ve srovnání s broušeným povrchem (režim mazání byl příznivě ovlivněn pouze u povrchů, u kterých hustota rozmístění jednotlivých jamek byla menší než 20%). Se závěrů je tedy patrné, že klíčovými faktory ovlivňujícími režim mazání je také geometrie a hustota rozmístění jednotlivých jamek.

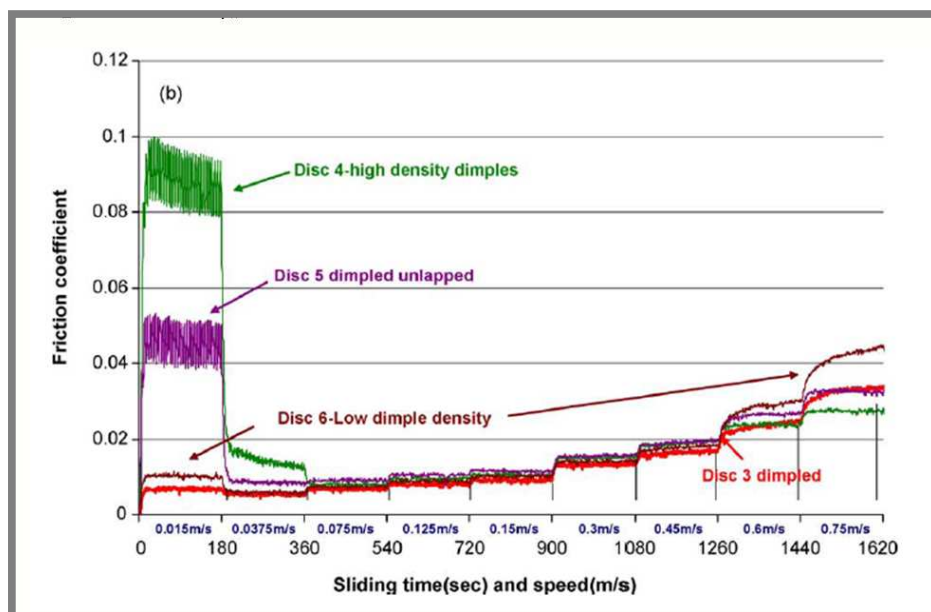
Vliv laserem vytvořené textury na posun mazacího režimu v kontaktu mezi vrchlíkem kuličky a rovinným diskem zkoumal také A. Kovalchenko [8], který pozoroval rozšíření oblasti hydrodynamického režimu mazání v případě

texturovaných povrchů. Bylo také zjištěno, že díky textuře došlo ke snížení tření v porovnání s netexturovaným povrchem, se srovnatelnou drsností povrchu. Přičemž nejvýraznějšího snížení tření bylo dosaženo za nízkých rychlostí třecích povrchů (Obr. 1-11 Disk3 Regular), v případě kdy bylo použito textury, která měla nižší hustotu pokrytí třecího povrchu, a současně, na níž byly odstraněny zvýšené hrany (způsobené technologií výroby – viz kapitola Vytváření textury pomocí laseru) na okrajích mikrokráterů.



Obr. 1-11 Závislost součinitele tření na parametru mazání [8]

Avšak při vysokých rychlostech vykazovaly povrchy s texturou, v porovnání s netexturovanými povrchy, vyšší součinitel tření (Obr. 1-12). Z čehož mimo jiné vyplývá, že při texturování povrchů, musí být zohledněny provozní podmínky, při kterých „budou pracovat“.



Obr. 1-12 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti, pro různé hustoty textury [8]

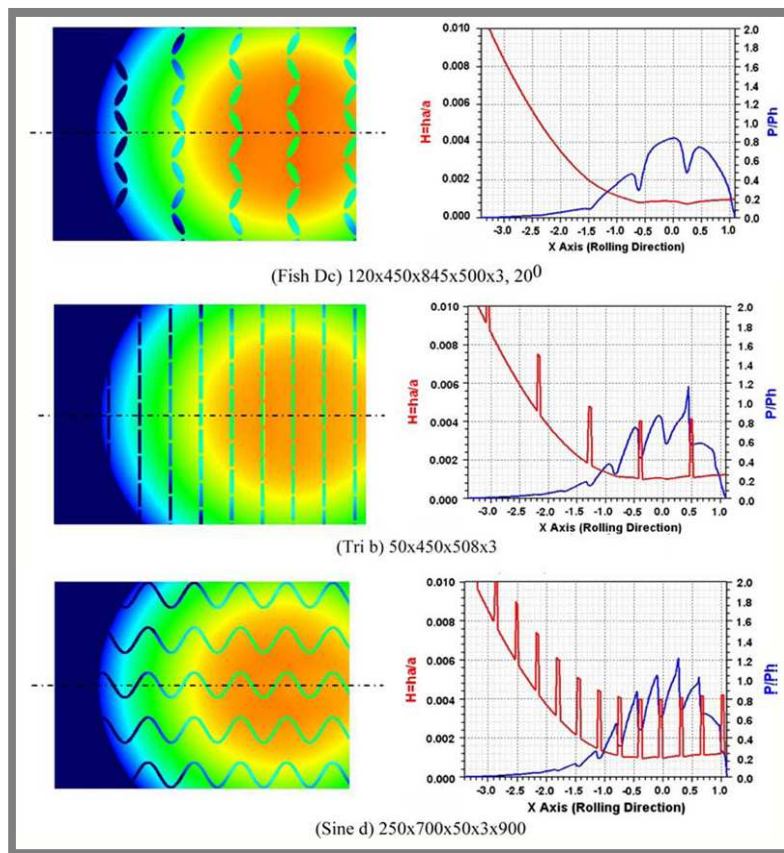
1.4.4 Metody virtuální simulace

Rozvoj cílené modifikace povrchů vyžaduje důkladné porozumění chování mazacího filmu v jejich kontaktu. Optimální textura, která bude mít příznivý přínos pro konkrétní provozní podmínky a aplikaci, může při jiných provozních podmínkách vykazovat zcela odlišné chování. Nepochybně popsat všechny detaily, vlivů topografie povrchu, potřebné pro návržení optimální textury pomocí stochastického modelování je velmi nesnadné, protože komplexní zhodnocení dané textury vyžaduje provedení a analýzu rozsáhlého množství experimentů. Bezpochyby jsou takovéto experimenty také nákladné a časově náročné.

Nejefektivnějším prostředkem pro rámcové rozdělení vhodnosti různých typů textur mohou být právě metody založené na virtuálním modelování, které umožňují generování libovolného tvaru textury a „testování“ chování takto upravených povrchů z několika hledisek. Neméně důležitou skutečností numerických simulací je možnost podrobného sledování a spolehlivého porovnávání výsledných charakteristik mazacích filmů v souvislosti s texturou. [11]

Ning Ren [11] se zabýval numerickými simulacemi skupiny virtuálně vytvořených textur (mělkých vzorů) a zkoumání jejich vlivu na chování mazacího filmu v eliptickém kontaktu. Ve studii se zaměřil na výběr optimálního rozložení, orientaci a rozměry (především poměr mezi šířkou a délkou) textury na základě jejich „mazacího výkonu“. Pro simulaci byly vybrány textury ve tvaru rybí kosti, sinusoidy, trojúhelníku a voštinové struktury.

Výsledky studie ukázaly, že pro daný materiál, geometrii a dané podmínky simulace jsou nejvhodnější ty textury, které vytvářejí největší hydrodynamický vztlak (tedy největší tloušťku filmu), a jimiž jsou krátké drážky s malým poměrem mezi šířkou a délkou (Obr. 1-13 Fish Dc, Tri b), sinusové drážky s malým poměrem mezi vlnovou délkou a amplitudou (Obr. 1-13 Sine d). Z výsledků je tedy patrné, že poměr mezi šířkou a délkou je nepřímo úměrný tloušťce filmu tzn. větší tloušťka mazacího filmu je generována texturou s menším poměrem. Dále bylo zjištěno, že orientace textury má jen zanedbatelně malý vliv na zvýšení tloušťky mazacího filmu v kontaktu.



Obr. 1-13 Různé typy textur a jejich vliv na tloušťku mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktní oblasti [11]

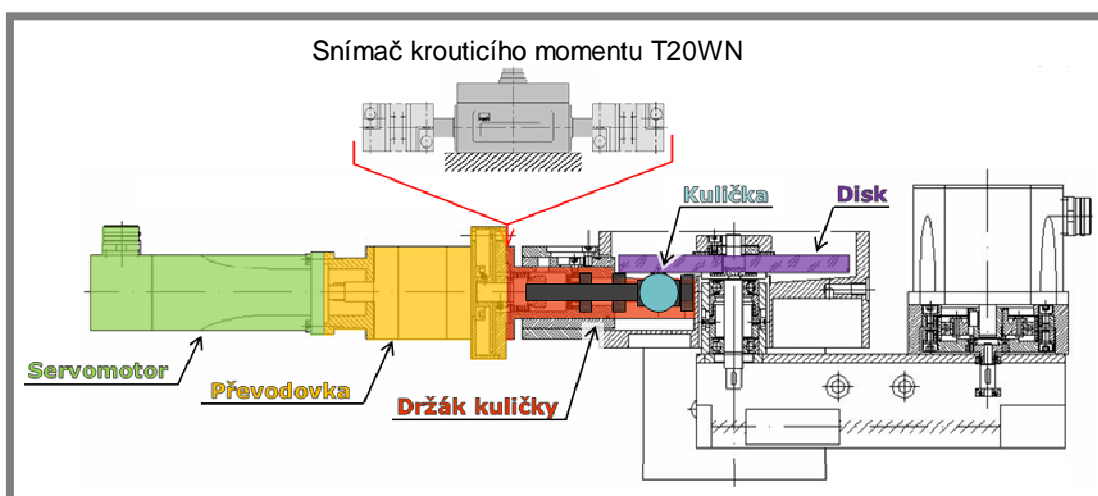
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

2

Zatímco cílená modifikace konformně zakřivených třecích povrchů již byla úspěšně uvedena do praxe (např. pístní kroužky, vložky válců spalovacích motorů nebo mechanická těsnění), cílená modifikace nekonformně zakřivených třecích povrchů je stále v oblasti základního výzkumu. Poslední výzkum v oblasti cílené modifikace topografie třecích povrchů u nekonformních povrchů prokázal, že mikrotexturou, se vhodně navrženými rozměry a geometrií, lze snížit tření při styku těchto povrchů a to především v režimu mezního mazání.

Zjištění vlivu cílené modifikace třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů představuje realizaci a vyhodnocení experimentů s hladkými a modifikovanými třecími povrchy na zařízení, které umožňuje měření velikosti tření. Na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně doposud nebyl výzkum tření u nekonformních povrchů realizován z důvodu chybějícího vybavení, na kterém by bylo možné velikost tření měřit. Pro účely měření tření má být upraveno a zprovozněno stávající zařízení (optický tribometr) s využitím snímače krouticího momentu T20WN.

Základní myšlenkou měření tření na tribometru je stanovení velikosti třecí síly v kontaktu mezi rotujícím diskem a kuličkou pomocí snímače krouticího momentu. Realizace této myšlenky spočívá ve vřazení snímače mezi kuličku a její pohon, kdy na základě velikosti krouticího momentu, průměru kuličky a zatížení je možné stanovit velikost tření (respektive třecí síly) v kontaktu mezi kuličkou a diskem.



Obr. 2-1 Umístění snímače krouticího momentu

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Hlavním cílem práce je zjištění vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů. Dosažení tohoto cíle bude vyžadovat splnění následujících dílčích cílů:

- Návrh příruby pro snímač krouticího momentu a výběr vhodné pojistné spojky
- Vytvoření počítačového programu pro záznam a vyhodnocení měřených dat
- Zprovoznění a odladění měřicího řetězce
- Realizaci měření součinitele tření s nemodifikovaným (hladkým) povrchem
- Realizaci měření součinitele tření s modifikovaným (texturovaným) povrchem
- Srovnání výsledků z měření součinitele tření pro hladký a texturovaný povrch

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

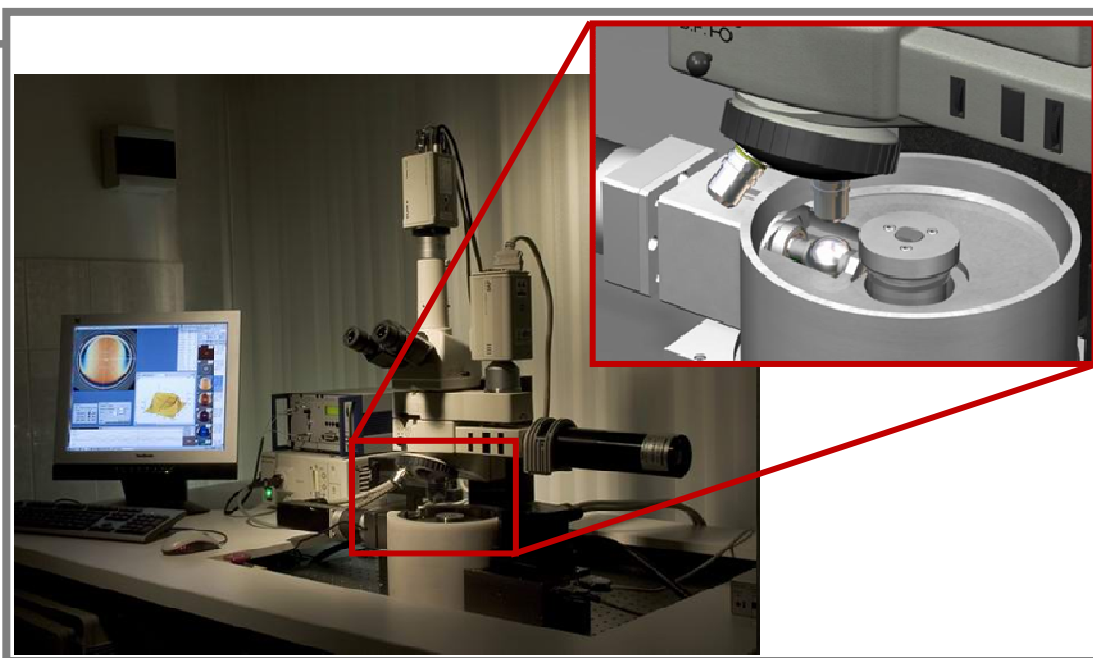
4

Nejprve bude třeba provést úpravu a zprovoznění stávajícího zařízení pro účely měření tření využitím snímače krouticího momentu. Pro úpravu tribometru bude nutné navrhnout přírubu pro snímač, která umožní jeho připojení mezi stávající držák kuličky a převodovku, a vybrat vhodnou pojistnou spojku. Pro zprovoznění tribometru pro účely měření tření bude potřeba vytvořit software pro „zpracování“ napětí ze snímače a záznam měření. Dále bude nutné realizovat zapojení snímače, provést kontrolu správné funkce snímače a celkově odladit měřící řetězec. Pro zjištění vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů bude nutné realizovat měření součinitele tření pro hladký a modifikovaný třecí povrch. Pro srovnání výsledků bude nutné zajistit stejné provozní podmínky.

4.1 Popis stávajícího zařízení

4.1

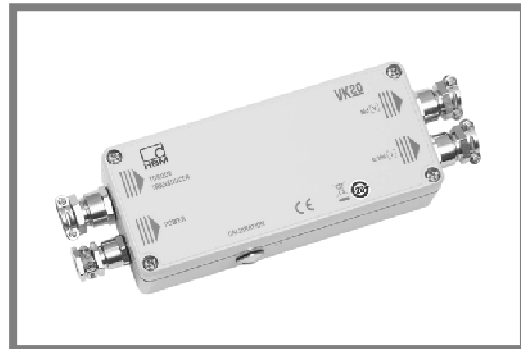
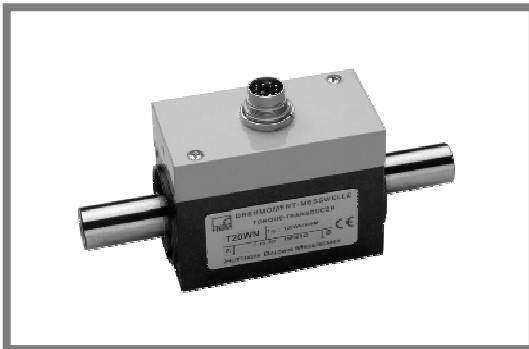
K modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách a studiu chování mazacích filmů je na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně používán experimentální simulátor - optický tribometr (Obr. 4-1). Tenký mazací film je vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným diskem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojitelné páce. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny servomotory, které jsou řízeny programovatelnými měniči frekvence. To umožňuje experimentální modelování provozních podmínek vyskytujících se ve strojních uzlech. [16]



Obr. 4-1 Experimentální simulátor [16]

Pro měření tření mezi kuličkou a diskem má být použito snímače krouticího momentu T20WN s měřicím rozsahem $1\text{Nm} \pm 0,2\%$ od výrobce Hottinger Baldwin Messtechnik (Obr. 4-2). K napájení a zapojení snímače je dodávána propojovací

krabice VK20 (Obr. 4-3). Snímač je opatřen válcovými konci hřídelů (průměr 6 mm na měřené a průměr 8 mm na poháněné straně snímače). Výstupní napětí ze snímače je $\pm 10V$ v závislosti na směru zatížení (tzn. $1 Nm \approx 10 V$). Snímač kroticího momentu musí být připojen k měřenému kontaktnímu tělísku (kuličce) pomocí vhodné pojistné spojky, která zajistí ochranu snímače před jeho přetížením.



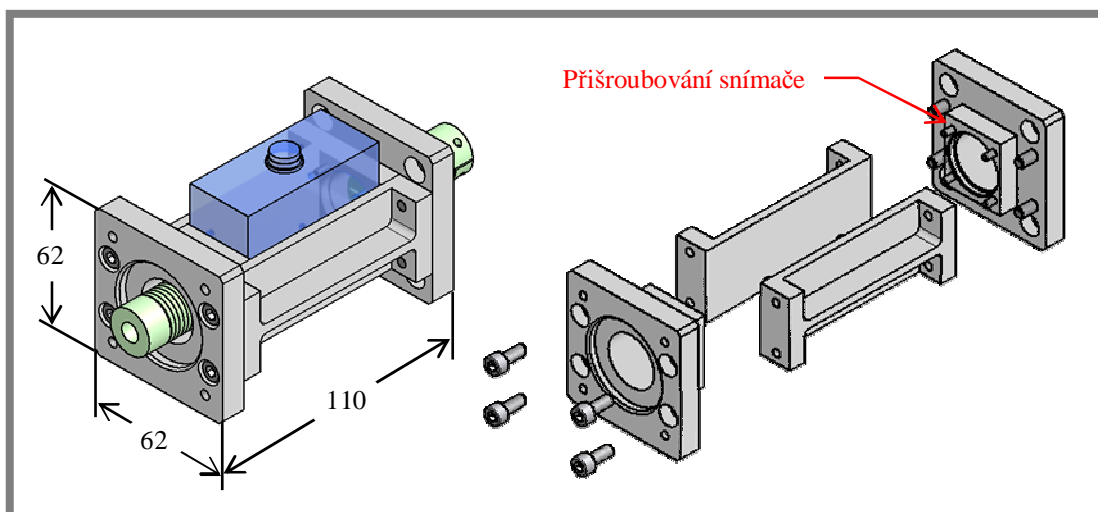
Obr. 4-2 Snímač kroticího momentu T20WN [18] Obr. 4-3 Propojovací krabice VK20 [18]

4.2 Návrh příruby pro snímač a výběr pojistné spojky

Pro návrh příruby a výběr pojistné spojky je nezbytné provést zmapování stávajícího stavu optického tribometru a zajistit výkresovou dokumentaci těch částí, ke kterým bude příruba se snímačem a pojistná spojka připojena. Před realizací výroby příruby je nutné vypracovat návrhy konstrukčních variant řešení příruby a vybrat optimální variantu.

4.2.1 Návrh příruby - varianta 1

První varianta příruby pro snímač byla navržena ze čtyř částí tvořených dvěma čelními díly (sloužícími pro přišroubování k převodovce na jedné straně a pro přišroubování k držáku kuličky na straně druhé) a dvěma vzpěrami. Přičemž v tomto řešení je snímač přišroubován k pravému čelnímu dílu pomocí čtyř šroubů. Rozměry jednotlivých dílů byly navrženy tak, aby výstupní konce hřídelů snímače opatřené vlnovcovými spojkami bylo možné připojit na výstupní hřídel převodovky a držáku kuličky.



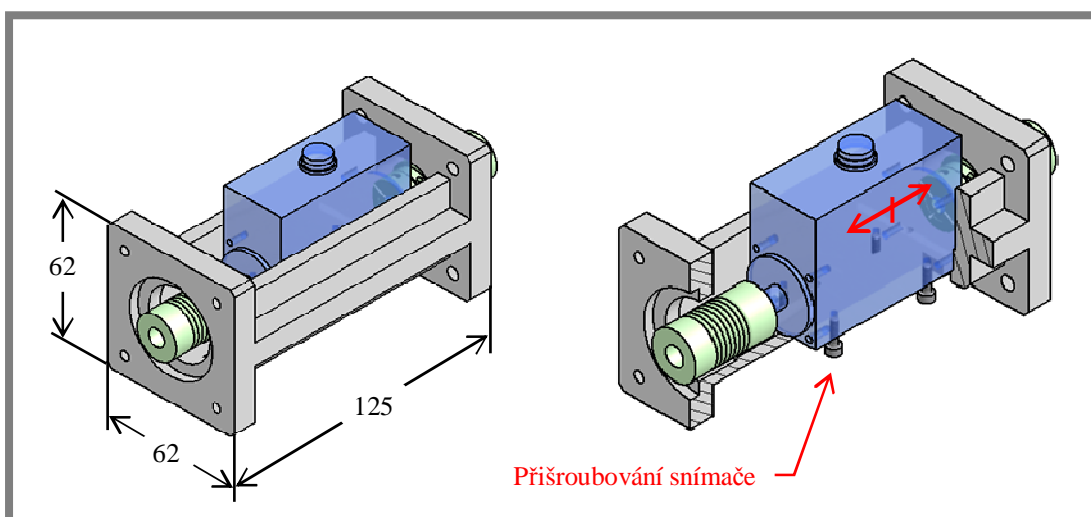
Obr. 4-4 Příruba pro snímač kroticího momentu - varianta 1

Nevýhodou tohoto řešení je obtížný přístup k ustavovacím šroubům přípojovacích spojek, při vložení nebo vyjmutí snímače nutno rozebrat přírubu a možnost vzniku nesouososti vlivem sestavení jednotlivých dílů. Nevýhodou je také značná složitost výroby a náročnost na přesnost. Vzhledem k mnoha nevýhodám byla vytvořena druhá varianta.

4.2.2 Návrh příruby - varianta 2

4.2.2

Při návrhu další varianty příruby pro snímač bylo vycházeno z tvaru první varianty s ohledem na odstranění jejich nedostatků. V tomto řešení je příruba zhotovena jako celistvá (z jednoho dílu). Aby bylo možné vložit snímač do této celistvé příruby, musela být její délka prodloužena na 125mm. Pro zajištění snadnějšího připojování snímače mezi převodovku a držák kuličky je zde pro přišroubování k přírubě využito otvorů na spodní části snímače, které umožňují jeho posouvání (Obr. 4-5). Oba přípojovací konce příruby jsou vyrobeny, tak aby byla zajištěna jejich souosost.



Obr. 4-5 Příruba pro snímač krouticího momentu – varianta2

Výhody této varianty vycházejí z odstranění nevýhod první varianty (tedy usnadnění přístupu k ustavovacím šroubům spojek, snížení počtu dílů a snížení složitosti výroby).

4.2.3 Pojistná spojka

4.2.3

Vzhledem k tomu, že maximální dovolený krouticí moment na snímači je 1 Nm, je nutné vybrat pojistnou spojku, která umožní přerušení přenosu krouticího momentu na snímač při překročení jeho maximálního dovoleného momentu (tedy musí dojít k jejímu rozpojení při překročení krouticího momentu 1 Nm). Dále musí spojka vybrána tak, aby ji bylo možné instalovat do stávajícího držáku kuličky (její vnější průměr nesmí přesáhnout 25 mm).

4.3 Vytvoření počítačového programu

4.3

Protože pro zprovoznění tribometru pro účely měření tření je potřeba vytvořit software sloužící pro „zpracování“ napětí ze snímače a provádění záznamu měření na počítači (vybrané programovací prostředí LabVIEW, umožňuje pomocí měřicí karty

NI USB-9006 přenos signálu ze snímače do počítače) musí být v programu umístěn prvek, který umožní načítání signálu z měřicí karty. Pro stanovení velikosti součinitele tření je nutné v programu použít vztahu pro přepočítání snímaného signálu (napětí) na krouticí moment a následně na součinitel tření.

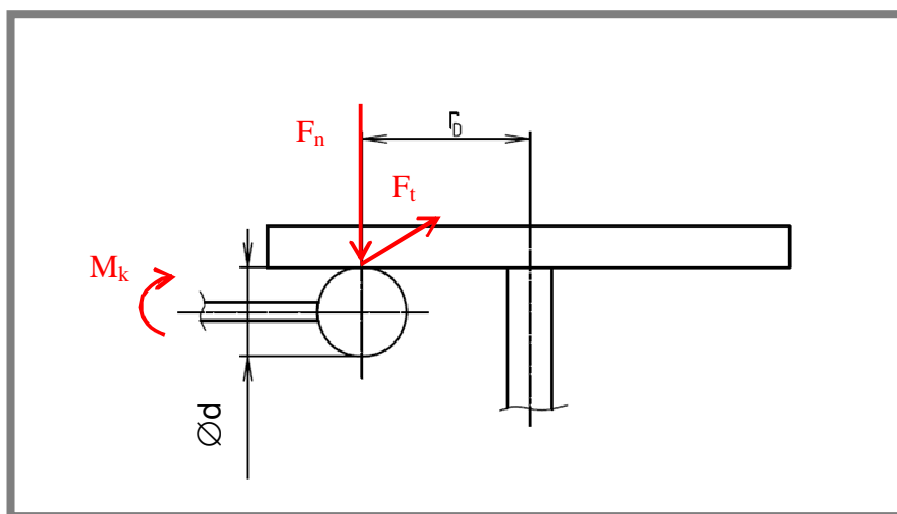
4.3.1 Přepočítání napětí ze snímače na krouticí moment

Protože výstupem ze snímače je napětí ve [V] bylo nutné pro určení velikosti krouticího momentu v [Nm] výstupní napětí přepočítat dle vztahu:

$$M_k [Nm] = \frac{M_k [V]}{10} \quad (1)$$

4.3.2 Výpočet součinitele tření

Jak už bylo zmíněno myšlenkou měření tření na tribometru je stanovení velikosti třecí síly v kontaktu mezi rotujícím diskem a kuličkou pomocí snímače krouticího momentu, kdy na základě velikosti krouticího momentu, průměru kuličky a zatížení je možné stanovit velikost tření (respektive třecí síly) v kontaktu mezi kuličkou a diskem. Proto je potřeba sestavit rovnici, dle které je možné vypočítat velikost součinitele tření na základě výše zmíněných parametrů. Výpočet součinitele tření je potom možné provést na základě silových poměrů v kontaktu mezi kuličkou a diskem viz Obr. 4-6 (kde F_n je zatížení v kontaktu a M_k je krouticí moment vyvozený třecí silou F_t).



Obr. 4-6 Silové poměry v kontaktu

Dle Obr. 4-6 pro krouticí moment lze napsat:

$$M_k = F_t \cdot \frac{d}{2} \quad (2)$$

Pro třecí sílu potom platí:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_k}{d} \quad (3)$$

Součinitel tření je dán vztahem:

$$\text{---} \quad (4)$$

Po dosazení Rovnice 3 do Rovnice 4 je potom součinitel tření dán vztahem:

$$\text{---} \quad (5)$$

4.3.3 Vyhodnocení měřených dat a stanovení součinitele tření

4.3.3

Pro stanovení součinitele tření při daném zatížení, prokluzu a unášivé rychlosti je potřeba zaznamenat časový úsek vykazující ustálený průběh. Protože při měření může také docházet ke kolísání aktuálně zaznamenávané hodnoty součinitele tření v závislosti na otočení kuličky nebo disku, je pro stanovení součinitele tření (při daných podmínkách) potřeba vypočítat průměrnou hodnotu součinitele tření ze zaznamenaného úseku.

4.4 Zprovoznění a odladění měřicího řetězce

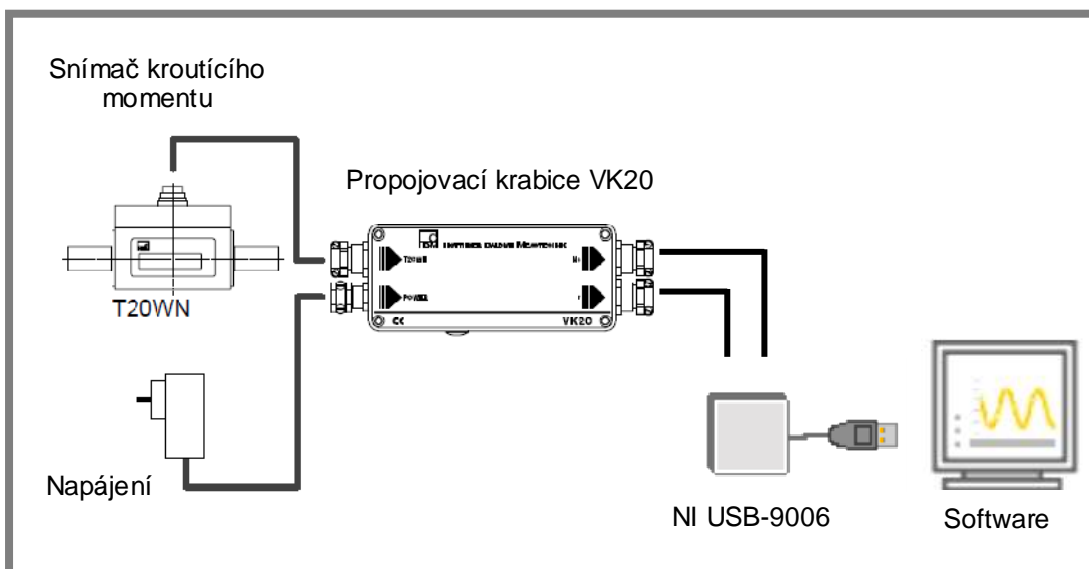
4.4

Vzhledem k tomu, že se jedná o prvotní zprovoznění optického tribometru pro účely měření tření je nezbytné mimo jiné realizovat zkušební a ověřovací měření s hladkými třecími povrchy.

4.4.1 Zprovoznění měřicího řetězce

4.4.1

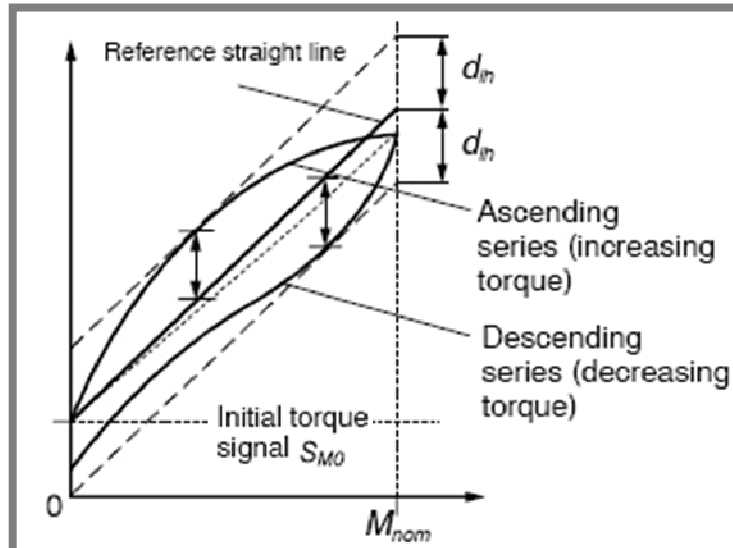
Pro zprovoznění měřicího řetězce je nutné provést zapojení všech částí měřicího řetězce. Měřicí řetězec sestává se snímače krouticího momentu T20WN, propojovací krabice VK20, měřicí karty NI USB-9006, kabeláže a softwaru (Obr. 4-7.).



Obr. 4-7 Schéma zapojení měřicího řetězce

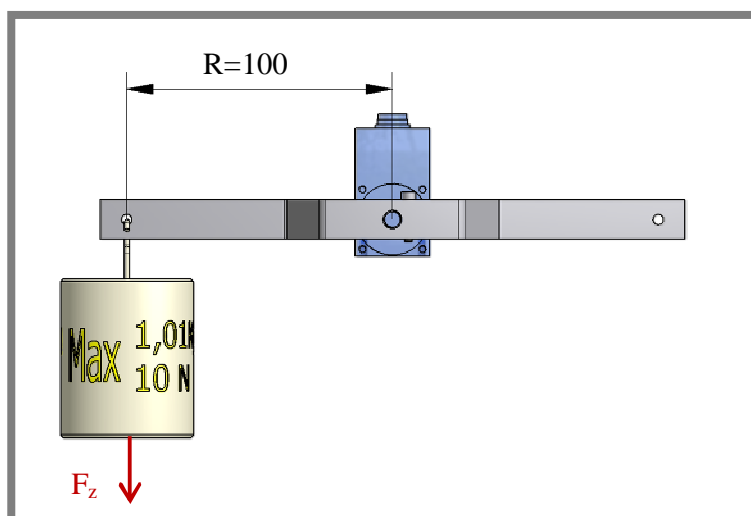
4.4.2 Odladění měřícího řetězce

Protože snímač při nezatíženém stavu vykazuje určitou počáteční hodnotu napětí (viz Obr. 4-8 S_{M0}), je pro správné stanovení velikosti krouticího momentu toto počáteční odečíst (tj. aby snímač v nezatíženém stavu vykazoval nulovou hodnotu napětí).



Obr. 4-8 Odchytky výstupního napětí v průběhu zátěžného cyklu [18]

Pro kontrolu správnosti zapojení snímače (zda vykazuje „správnou“ hodnotu krouticího momentu) a stanovení velikosti počátečního napětí je potřeba vyrobit „testovací“ rameno, s pomocí kterého je možné jednoduchým způsobem vyvodit krouticí moment o známé velikosti, kdy velikost vyvozeného krouticího momentu je možné vypočítat z délky ramene a hmotnosti použitého závaží (viz dále). Pozn. z důvodu vyváženosti musí být rameno vyrobeno symetricky podle osy otáčení. Tvar ramene je nezbytné pro minimalizaci přídavného ohybového momentu od zatěžujícího závaží vyrobit tak, aby otvory pro závaží ležely v rovině ložiska měřícího konce snímače (průměr hřídelky 6mm).



Obr. 4-9 Zatížení testovacího ramene

Dle Newtonova pohybového zákona sílu vyvozenou tělesem o hmotnosti m platí:

$$F_z = m \cdot g \quad (6)$$

Krouticí moment lze vypočítat dle vztahu:

$$M_k = F_z \cdot R \quad (7)$$

Po dosazení Rovnice 6 do Rovnice 7 potom:

$$M_k = m \cdot g \cdot R \quad (8)$$

Pozn.: Vyvození nominálního krouticího momentu 1Nm představuje zatížení ramene (o délce $R=100$ mm) závažím o hmotnosti 1Kg.

Postup při ověření správnosti zapojení snímače pomocí „testovacího“ ramene

Při ověřování správnosti zapojení snímače je nutné hřídelku na poháněném konci snímače (průměr 8mm) zajistit proti pootočení, zatížit rameno závažím a porovnat hodnotu krouticího momentu zaznamenanou snímačem s hodnotou vypočtenou.

4.4.3 Použitelnost snímače

4.4.3

Pro vymezení použitelnosti snímače krouticího momentu byl proveden orientační výpočet minimální velikosti zátěžné síly v kontaktu mezi kuličkou a diskem. Při výpočtu byla použita přesnost snímače, která je 1Nm $\pm 0,2\%$. Velikost krouticího momentu, který odpovídá 0,2% je tedy $M_k=0,002$ Nm. Dále byla pro výpočet stanovena minimální předpokládaná velikost součinitele tření $\mu=0,02$.

Pro třecí sílu dle Rovnice 2 platí:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_k}{d} \quad (9)$$

Dle Rovnice 4 je zatížení v kontaktu:

$$F_n = \frac{F_t}{\mu} \quad (10)$$

Po dosazení Rovnice 9 do Rovnice 10 je potom zatížení v kontaktu:

$$F_n = \frac{2 \cdot M_k}{d \cdot \mu} \quad (11)$$

Kde po dosazení:

$$F_n = \frac{2 \cdot 0,002}{0,0254 \cdot 0,02} = \underline{\underline{7,9N}}$$

Hranice použitelnosti snímače je tedy (při zvoleném součiniteli tření $\mu=0,02$) pro zatížení v kontaktu 8N. Aby bylo možné dosáhnout relevantních výsledků při měření, je tedy nezbytné zatížit kontakt silou minimálně 80N.

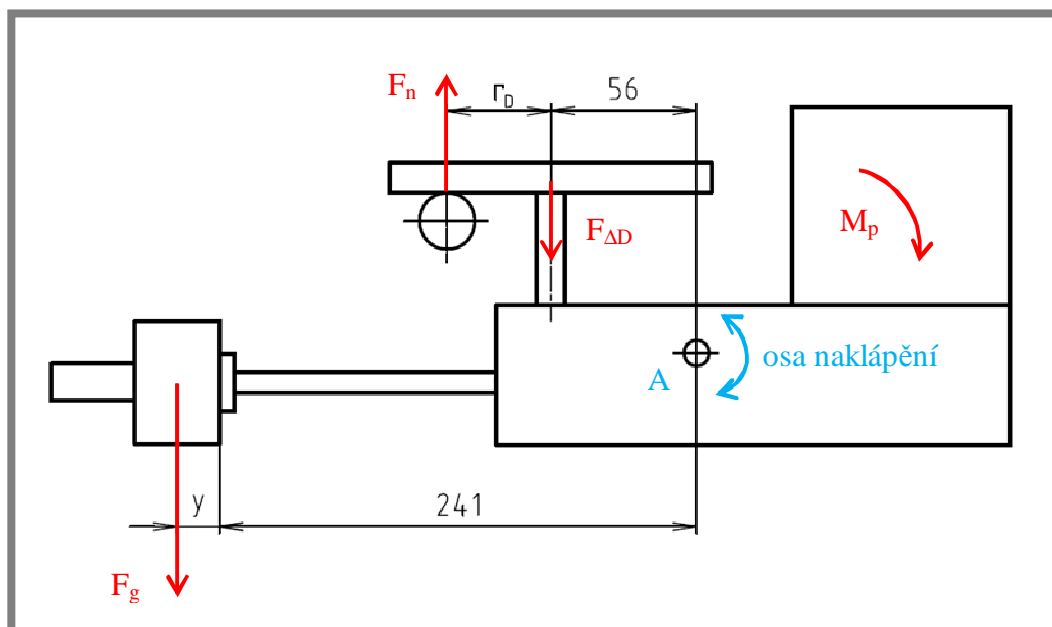
Jak je patrné z Obr. 4-8 maximální odchylka snímače (0,002Nm) při zatěžování je přibližně ve 45% nominálního momentu tzn., že při očekávané velikosti krouticího momentu 0,2Nm (20% nominálního momentu) je možno s dostatečnou přesností měřit i při nižším zatížení než 80N.

4.5 Parametry nezbytné pro vyhodnocení měření

Pro vyhodnocení výsledků z měření tření na tribometru je nutné znát zatížení v kontaktu a rychlosti třecích povrchů (kuličky a disku). Proto potřeba sestavit rovnice, dle kterých je možné nastavit požadované podmínky při měření (zatížení kontaktu a rychlosti třecích povrchů). V následujících kapitolách je výpočet a způsob nastavení těchto parametrů na tribometru popsán podrobněji. Níže uvedené rovnice byly implementovány do softwaru pro měření.

4.5.1 Zatížení kontaktu

Stanovení velikosti zatížení v kontaktu mezi kuličkou a skleněným disku je standartě prováděno výpočtem z velikosti kontaktní oblasti na základě Hertzovy teorie. Vzhledem k tomu že při měření bude používáno i ocelového (neprůhledného) disku není tento způsob určení velikosti zatížení v kontaktu možný. Proto byl vytvořen postup, který umožní vyvození zvolené velikosti zatížení v kontaktu na základě polohy závaží na tyči zatěžujícího mechanismu. Mechanismus zatěžování kontaktu je schematicky zobrazen na Obr. 4-10. Rozměry jednotlivých částí zatěžujícího mechanismu byly převzaty z výkresové dokumentace tribometru.



Obr. 4-10 Mechanismus zatěžování kontaktu

Kde:

$F_{\Delta D}$ síla způsobená rozdílem hmotnosti skleněného a ocelového disku

F_n zatížení v kontaktu

F_z síla vyvozená závažím
 M_p e moment způsobený nevyvážeností zatěžovacího mechanismu
 r_D poloměr disku, na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou

Protože zatěžovací mechanismus není vyvážený a není jej možné jednoduchým způsobem vyvážit, bylo nutné nejprve provést stanovení velikosti momentu M_p . Výpočet momentu M_p byl proveden na základě momentové rovnováhy, kde zatížení v kontaktu F_n bylo vypočteno „standardním“ způsobem (změření velikosti kontaktní oblasti a vypočtením zatížení v kontaktu F_n na základě Hertzovy teorie).

Dle Newtonova pohybového zákona sílu vyvozenou tělesem o hmotnosti m platí:

$$F = m \cdot g \quad (12)$$

Při stanovení momentu M_p , pro momentovou rovnováhu k bodu A, platí:

$$\sum M = 0$$

$$M_g - M_n - M_p = 0 \quad (13)$$

Po dosazení:

$$m \cdot g \cdot (y + 241) - F_n \cdot (r_D + 56) - M_p = 0 \quad (14)$$

Vyjádřením z Rovnice 14 pro moment M_p platí:

$$M_p = m \cdot g \cdot (y + 241) - F_n \cdot (r_D + 56) \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že při stanovení momentu M_p byl použit skleněný disk, bylo nutné pro případ použití ocelového disku (při měření byl používán skleněný a ocelový disk) zohlednit rozdíl mezi hmotností skleněného disku m_{sD} a skutečně použitého disku m_{pD} (rozdíl mezi hmotnostmi reprezentuje síla $F_{\Delta D}$). Pozn.: pokud je při měření použit skleněný disk je potom $F_{\Delta D} = 0$.

Dle Newtonova pohybového zákona pro sílu $F_{\Delta D}$ potom platí:

$$F_{\Delta D} = (m_{pD} - m_{sD}) \cdot g \quad (16)$$

Dle Obr. 4-10 potom moment vyvozený silou $F_{\Delta D}$:

$$M_m = F_{\Delta D} \cdot 56 \quad (17)$$

Po dosazení Rovnice 16 do Rovnice 17:

$$M_m = (m_{pD} - m_{sD}) \cdot g \cdot 56 \quad (18)$$

Při výpočtu polohy těžiště závaží, pro momentovou rovnováhu k bodu A, platí:

$$\sum M = 0$$

$$M_g - M_n - M_p + M_m = 0 \quad (19)$$

Po dosazení:

$$m \cdot g \cdot (y + 241) - F_n \cdot (r_D + 56) - M_p + (m_{pD} - m_{sD}) \cdot g \cdot 56 = 0 \quad (20)$$

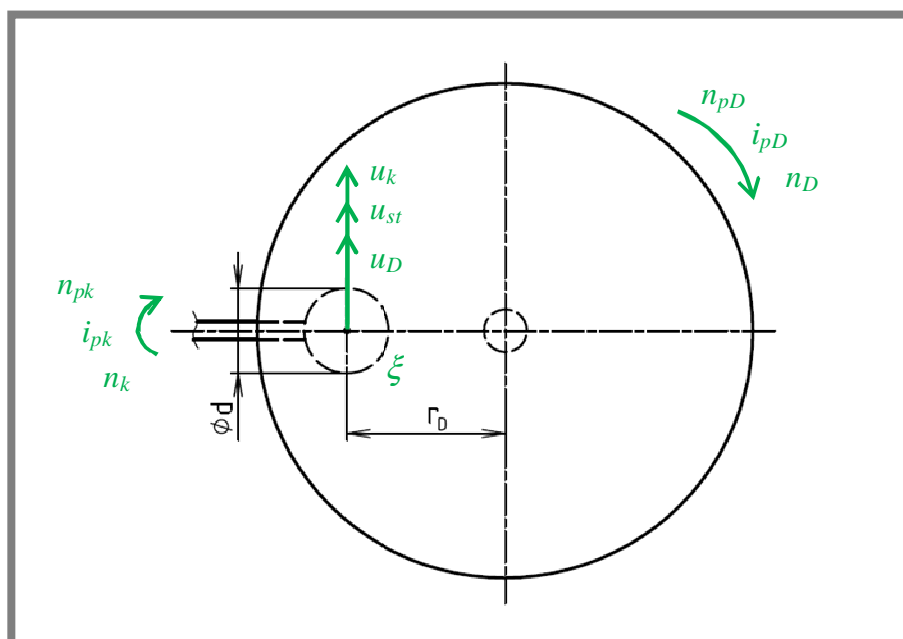
Vyjádřením z Rovnice 20 pro polohu těžiště závaží y platí:

$$y = \frac{F_n \cdot (r_D + 56) + M_p - (m_{pD} - m_{sD}) \cdot g \cdot 56}{m \cdot g} - 241 \quad (21)$$

4.5.2 Rychlosti třecích povrchů

Otáčky kuličky a disku je možné na tribometru nastavit díky nezávislému pohonu servomotory a měniči frekvence na přesně požadované hodnoty. Pracovní rozsah servopohonů je 0-3000ot/min. Maximální otáčky kuličky a disku závisí na převodových poměrech použitých převodovek (převodovka mezi pohonem kuličky a kuličkou, převodovka mezi pohonem disku a diskem). Standardně jsou obvodové rychlosti třecích povrchů dodatečně vypočítávány na základně nastavených otáček a není tak možné nastavit „rozumnou“ hodnotu obvodové rychlosti.

Tloušťka mazacího filmu a tedy i velikost tření závisí z pohledu rychlostí třecích povrchů zejména na střední unášivé rychlosti maziva v kontaktu. Důležitým parametrem je také vzájemný prokluz třecích povrchů. Aby bylo možné provádět měření pro předem zvolenou střední unášivou rychlost, byl vytvořen postup, kdy na základě zvolené střední unášivé rychlosti a prokluzu jsou vypočteny otáčky zadávané na servopohonu kuličky a servopohonu disku. Pro tento výpočet je nezbytné znát převodové poměry použitých převodovek (pro pohon kuličky a disku) a rozměry kontaktních těles (průměr kuličky a poloměr disku, na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou). Rychlostní poměry v kontaktu mezi kuličkou a diskem jsou znázorněny na Obr. 4-11.



Obr. 4-11 Rychlostní poměry v kontaktu mezi kuličkou a diskem

Kde:

- u_{st} střední unášivá rychlost
- u_k obvodová rychlost kuličky
- u_D obvodová rychlost disku
- ξ prokluz
- n_{pk} otáčky servopohonu kuličky
- i_{pk} převodový poměr převodovky použité pro pohon kuličky
- n_k otáčky kuličky
- d průměr kuličky
- n_{pD} otáčky servopohonu disku
- i_{pD} převodový poměr převodovky použité pro pohon disku
- n_D otáčky disku
- r_D poloměr disku, na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou

Výpočet otáček servopohonu kuličky:

Obvodová rychlost obecně:

$$u = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{d}{2} \quad (22)$$

Převodový poměr obecně:

$$i_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (23)$$

Prokluz:

$$\xi = 2 \cdot \frac{u_D - u_k}{u_D + u_k} \quad (24)$$

Střední unášivá rychlost:

$$u_{st} = \frac{u_D + u_k}{2} \quad (25)$$

Pro obvodovou rychlost kuličky dle Rovnice 25 platí:

$$u_k = 2 \cdot u_{st} - u_D \quad (26)$$

Vyjádřením z Rovnice 24 je potom obvodová rychlost disku:

$$u_D = \frac{-u_k \cdot (2 + \xi)}{(\xi - 2)} \quad (27)$$

Po dosazení Rovnice 27 do Rovnice 26 je obvodová rychlost kuličky rovna:

$$u_k = \frac{u_{st} \cdot (2 - \xi)}{2} \quad (28)$$

Vyjádřením z obecných vztahů Rovnice 22a Rovnice 23 otáčky kuličky n_k a otáčky pohonu kuličky n_{pk} potom:

$$n_k = \frac{u_k}{\pi \cdot d} \quad (29)$$

$$n_{pk} = n_k \cdot i_{pk} \quad (30)$$

Pro výsledný vztah pro výpočet otáček servopohonu kuličky platí:

$$n_{pk} = \frac{u_{st} \cdot (2 - \xi)}{\pi \cdot d} \cdot i_{pk} \quad (31)$$

Výpočet otáček servopohonu disku:

Pro obvodovou rychlost disku dle Rovnice 25 platí:

$$u_D = 2 \cdot u_{st} - u_k \quad (32)$$

Po dosazení Rovnice 28 do Rovnice 32 je obvodová rychlost disku rovna:

$$u_D = 2 \cdot u_{st} - \frac{u_{st} \cdot (2 - \xi)}{2} \quad (33)$$

Vyjádřením z obecných vztahů Rovnice 22 a Rovnice 23 otáčky disku n_D a otáčky pohonu disku n_{pD} potom:

$$n_D = \frac{u_D}{\pi \cdot 2 \cdot r_D} \quad (34)$$

$$n_{pD} = n_D \cdot i_{pD} \quad (35)$$

Pro výsledný vztah pro výpočet otáček servopohonu disku platí:

$$n_{pD} = \frac{2 \cdot u_{st} - \frac{u_{st} \cdot (2 - \xi)}{2}}{\pi \cdot 2 \cdot r_D} \cdot i_{pD} \quad (36)$$

Pozn.: poloměr disku, na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou, je možné nastavit polohou držáku kuličky v tělesu tribometru. Stanovení poloměru je prováděno nastavením vrchlíku kuličky na střed objektivu mikroskopu pomocí mikrometru, odečtením hodnoty z mikrometru x výpočtem dle vztahu Rovnice 37 (vztah je odvozen na základě kalibrace polohy objektivu mikroskopu a tělesa tribometru).

Poloměr dráhy na disku:

$$r_D = 40 + x - 14,65 \quad (37)$$

4.6 Kontaktní tělesa

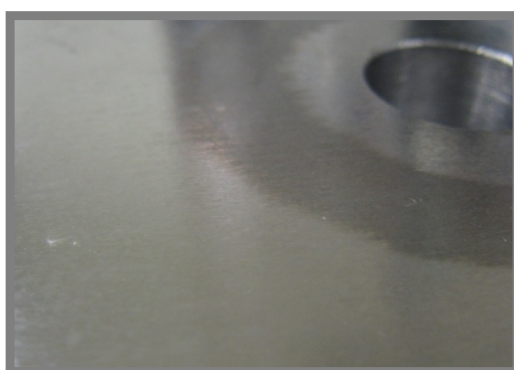
4.6

Jak už bylo popsáno výše, na tribometru je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným diskem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé.

4.6.1 Disk

4.6.1

Protože je na tribometru standardně používáno pouze skleněného disku s opticky hladkým povrchem je pro provedení srovnání součinitele tření hladkých třecích povrchů nutné vyrobit ocelový disk s broušeným povrchem (s prokazatelně vyšší drsností povrchu), u kterého lze očekávat vyšší tření a na základě tohoto předpokladu je tak možné posoudit „funkčnost“ a citlivost takto upraveného zařízení. Navíc pro vyvození „dostatečného“ krouticího momentu (viz kapitola *Použitelnost snímače*) by musel být skleněný disk zatížen vysokým zatížením, které by mohlo způsobit jeho destrukci.



Obr. 4-12 Ocelový disk

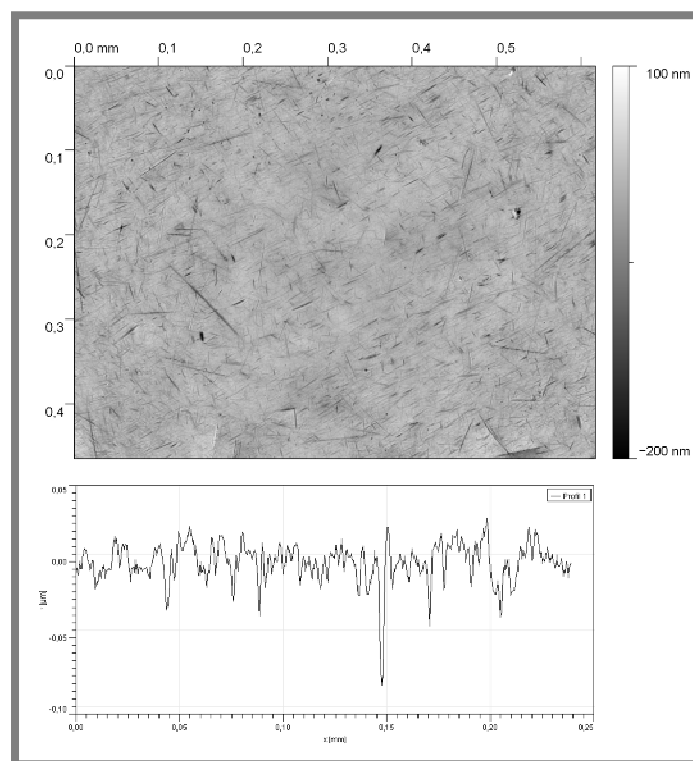
4.6.2 Kulička s hladkým povrchem

Pro měření tření nekonformně zakřiveného povrchu je vybrána ocelová kulička AISI 52100s průměrem 25,4mm a drsností povrchu udávanou výrobcem $Ra=0,01$.

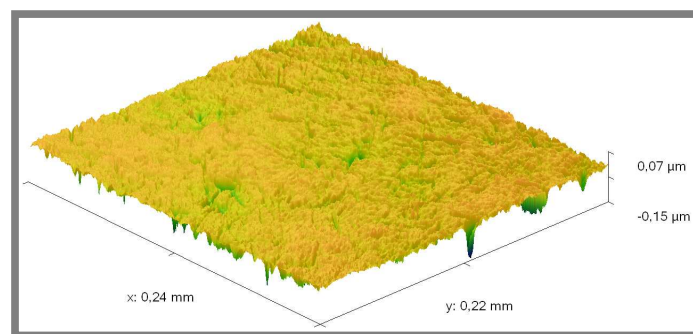
Struktura povrchu hladké kuličky

Pro získání přesnějšího parametrického popisu povrchu a vizualizaci topografie povrchu byla využita interferometrie s řízenou změnou fáze (optická bezkontaktní metoda měření 3D topografie povrchu).

Výšková mapa povrchu kuličky a výškový profil v řezu je zobrazen na Obr. 4-13. Prostorové rozmístění nerovností a struktury povrchu je znázorněna na Obr. 4-14. Další statistické veličiny popisující strukturu povrchu hladké kuličky jsou uvedeny v Tab. 4-1.



Obr. 4-13 Struktura povrchu hladké kuličky



Obr. 4-14 Struktura povrchu hladké kuličky – 3D výřez

Tab. 4-1 Statistické veličiny popisující strukturu povrchu hladké kuličky

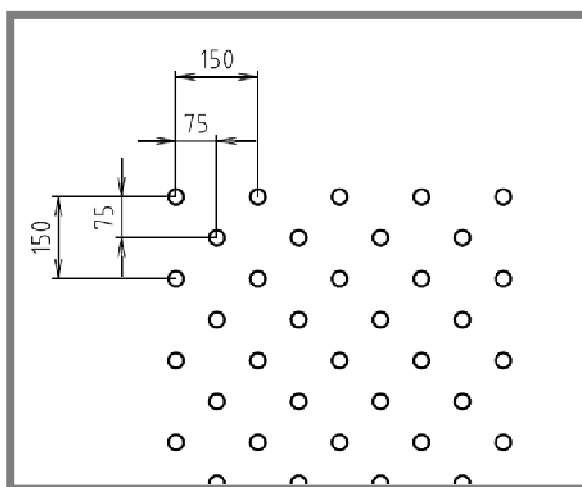
Veličina	Hodnota	Jednotka
Střední hodnota drsnosti:	0,6	nm
Minimum:	-150,7	nm
Maximum:	87,4	nm
Medián:	2,7	nm
Ra:	10,8	nm
Rms:	14,7	nm
Šikmost:	-1,49	-
Špičatost:	5,37	-

4.6.3 Kulička s miktotexturou

4.6.3

Aby bylo možné uskutečnit měření součinitele tření cíleně modifikovaného třecího povrchu bylo nutné na povrchu kuličky zhotovit miktotexturu. Pro posouzení vlivu cílené modifikace topografie povrchu na součinitel tření bude potřeba provést srovnání výsledků měření pro hladký a modifikovaný povrch kuličky.

Pro miktotexturu bylo zvoleno rozmístění dentů do čtvercového pole se vzdáleností mezi sousedními řadami 75 μ m, vzdálenost mezi denty ve směru rotace kuličky je tedy také 75 μ m (Obr. 4-15). Pro dostatečné pokrytí kontaktní oblasti bylo vytvořeno celkem 9 řad. Velikost zatěžující síly při vytváření dentů byla zvolena na 8N.



Obr. 4-15 Rozmístění dentů na povrchu kuličky (rozměry jsou uvedeny v μ m)

Modifikace povrchu kuličky byla provedena Rockwellovým vnikacím tělískem (indentorem) na zařízení, které je na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně zkonstruováno speciálně pro tyto účely. Vytváření textury s požadovanými rozměry je zajištěno počítačem řízenými krokovými motory, které polohují texturované těleso (v tomto případě kuličku) a indentor. Vyvinutí zatěžující síly stanovené velikosti je řízeno tenzometrickým snímačem síly se zpětnou vazbou na řídicí program. Rockwellovo vnikací tělísko má vrcholový úhel kuželové části 120° a poloměr zaoblení špičky 0,2mm.



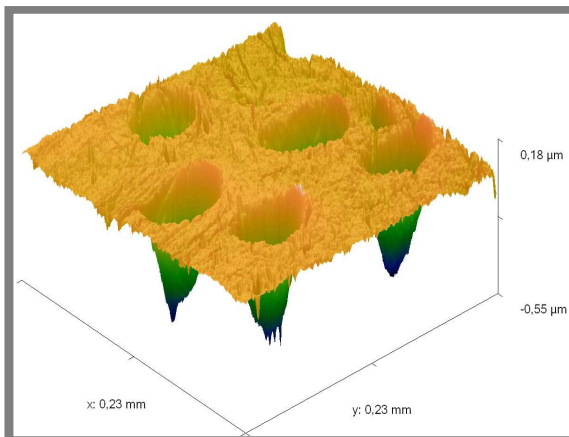
Obr. 4-16 Zařízení pro výrobu mikrotextury

Výroba textury probíhá tak, že nejdříve je vytvořena jedna řada dentů po obvodu kuličky a poté je pomocí mikrometru provedeno její posunutí pro výrobu druhé řady (v tomto případě posunutí o $75\mu\text{m}$). Před započatím vytváření dentů byla kulička upnuta a přilepena do držáku kuličky sloužícího současně pro výrobu dentů a samotné měření. Ustavení a zjištění přesné polohy vrchlíku kuličky (výchozího referenčního bodu) bylo provedeno pomocí mikrometrů umístěných na posuvném stole. (Pozn. přesná poloha vrchlíku kuličky je důležitá pro vytvoření dentů tak, aby procházely kontaktní oblastí při dotyku s diskem).

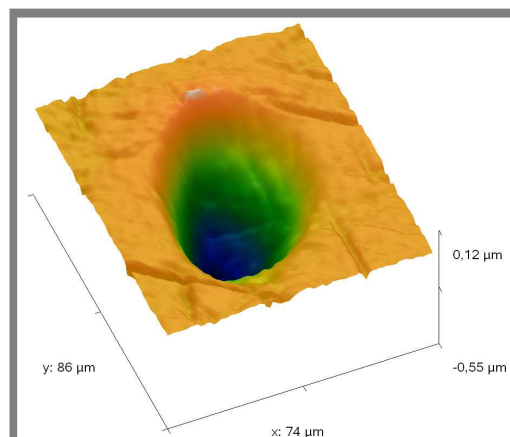
Mikrotextura byla vytvořena pouze na polovině obvodu kuličky, aby bylo možné porovnat velikost tření hladkého a modifikovaného povrchu při nízkých rychlostech přímo (tzn. při nízké rychlosti bude doba po kterou se kulička otočí o polovinu otáčky dostatečně dlouhá pro stanovení velikosti tření). V jedné řadě, která pokryje polovinu obvodu kuličky bylo tedy vytvořeno 265 dentů. Při zvolených devíti řadách mikrotexturu tvořilo celkem 2385 dentů. Časová náročnost výroby mikrotextury byla 12 dní.

Struktura povrchu texturované kuličky

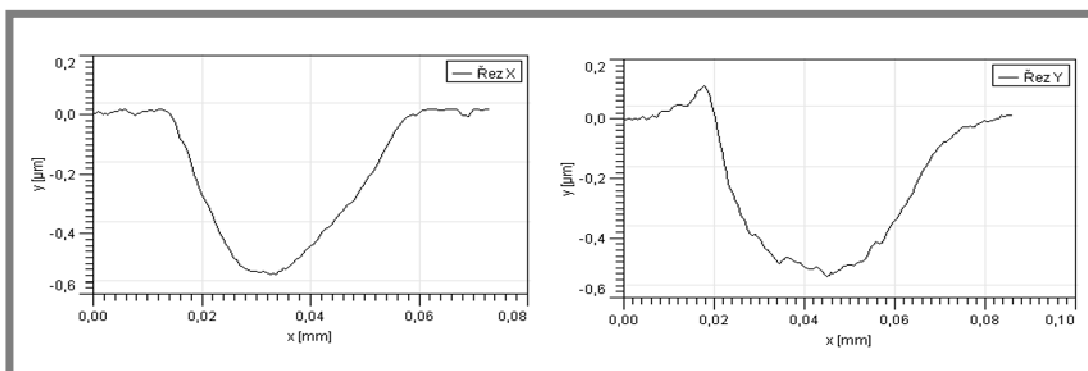
Výsledná mikrotextura vytvořená indentorem je zobrazena na Obr. 4-17, detail dentu potom na Obr. 4-18. Výškový profil jednoho vytvořeného dentu dále pak na Obr. 4-19. Průměr dentů byl přibližně $45\mu\text{m}$ a hloubka $0,6\mu\text{m}$.



Obr. 4-17 Vytvořené pole dentů



Obr. 4-18 Detail dentu



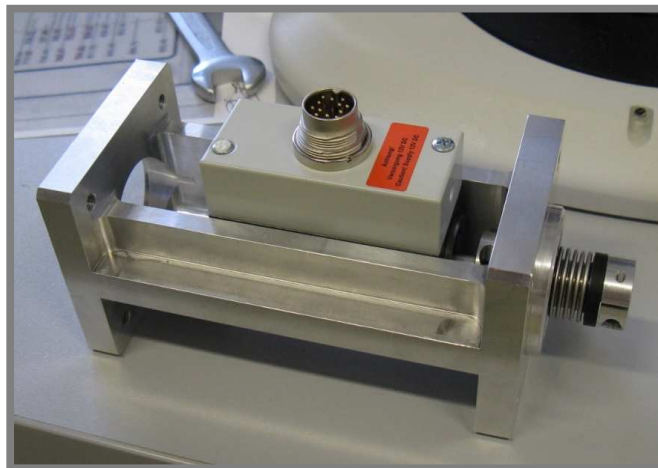
Obr. 4-19 Výškový profil vytvořeného dentu v ose x a y

Jak je patrné z obrázku Obr. 4-17 nepodařilo se vyrobit mikrotexturu s požadovaným rozmístěním do čtvercového pole a to z důvodu nepřesného nastavení počátku každé druhé řady. Především denty v okrajových částech vytvořeného pásu textury vykazovaly jasně zřetelnou nesymetrii a navršení materiálu na jedné jejich straně (viz Obr. 4-19). Tato nesymetrie byla způsobena tím, že hrot indentoru při vytváření dentů na okraji pásu textury nesměruje přímo do středu kuličky, čímž dojde k jeho částečnému vychýlení a vytlačení materiálu jedním směrem.

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

5.1 Konstrukční řešení úpravy tribometru

Na základě posouzení výhod vypracovaných konstrukčních návrhů přírub byla pro realizaci výroby příruby vybrána varianta č.2.



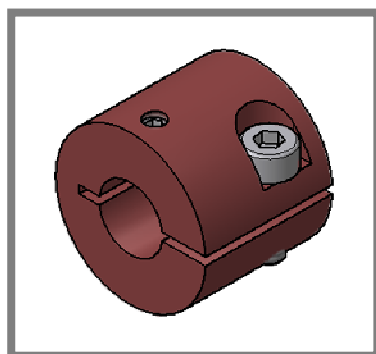
Obr. 5-1 Vybrané konstrukční řešení příruby

Jako pojistná spojka byla vybrána spojka model SK2 (1 Nm) od výrobce R+W. Tato spojka umožňuje nastavitelnost „rozpojovacího“ momentu v rozsahu 0,4-1 Nm a její rozměry jsou: \varnothing 23 x 42 mm.

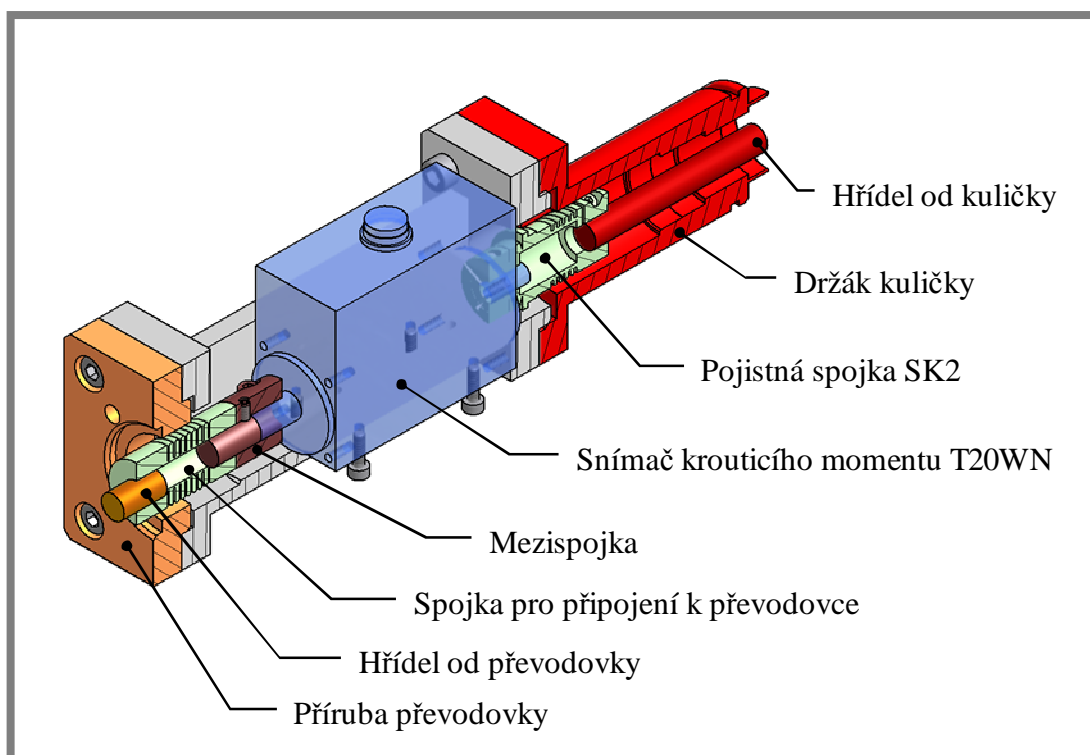


Obr. 5-2 Pojistná spojka SK2 (1Nm) [17]

Při připojování příruby se snímačem k převodovce bylo zjištěno, že i přes navržené rezervy v polohování přípojných spojek, spojka od převodovky nedosahuje na hřídel snímače. Bylo to způsobeno tím, že připojovaná převodovka byla opatřena snímačem otáček, který v době návrhu příruby nebyl zakreslen ve výkresové dokumentaci, ze které bylo vycházeno. Pro propojení těchto konců hřídelů byla vyrobena přídavná mezispojka (Obr. 5-3), která slouží k prodloužení poháněného konce hřídele snímače (Obr. 5-4). Použití jediné dlouhé spojky propojující výstupní konec hřídele převodovky s hřídelí snímače přímo, by zapříčinilo komplikace při „jiných“ měřeních na tribometru bez snímače, protože standardně je vlnovcová spojka na výstupním konci hřídele převodovky přišroubovaná permanentně z důvodu obtížného přístupu k ustavovacímu šroubu.

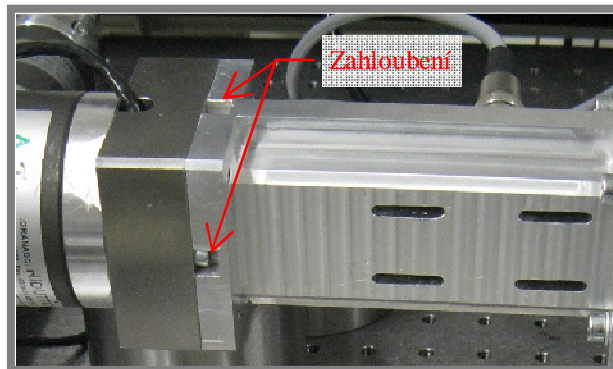


Obr. 5-3 Mezispojka



Obr. 5-4 Připojení snímače

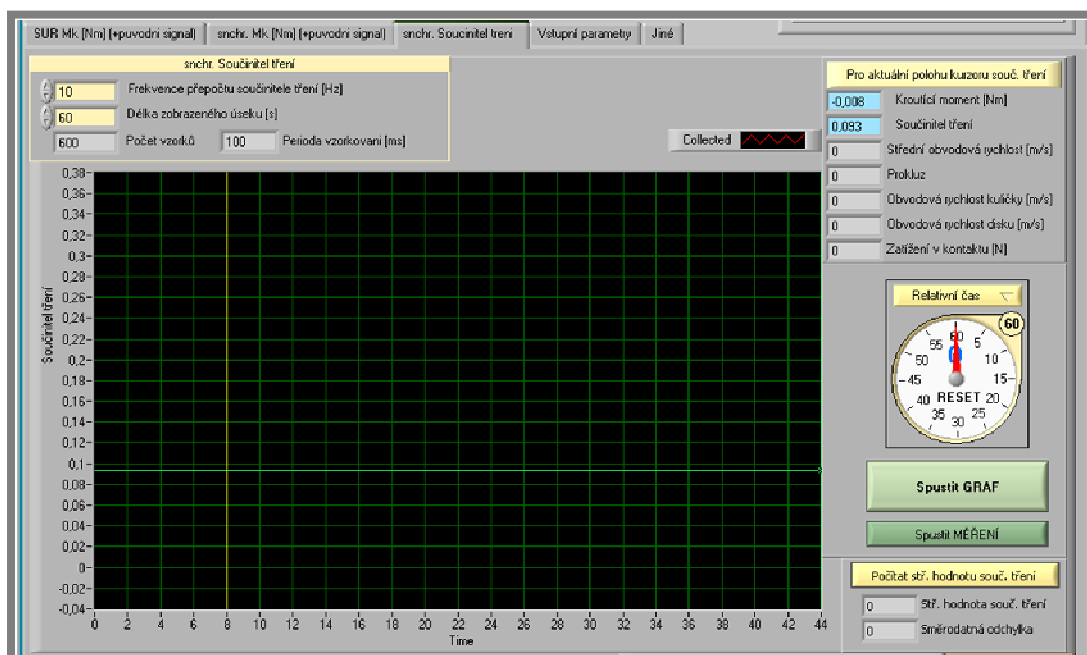
Jako další problém při připojování příruby snímače k převodovce opatřené snímačem otáček se ukázaly nezapuštěné hlavy šroubů, které zabraňovaly vzájemnému dosednutí čel přírub. Aby bylo možné tyto dvě části vzájemně sesadit, byly dodatečně na čele příruby snímače vyrobeny zahloubení pro přečnívající hlavy šroubů (viz Obr. 5-5).



Obr. 5-5 Zahloubení pro přečnivající hlavy šroubů

5.2 Software pro měření

Software se skládá z ovládacího panelu a vlastního grafického kódu, který zajišťuje vlastní funkčnost programu (celý ovládací panel a blokové schéma viz příloha). Základní výstupní částí programu je graf se záznamem měření (Obr. 5-6). K vyhodnocení napětí (respektive krouticího momentu) ze snímače krouticího momentu a k výpočtu parametrů nezbytných pro nastavení tribometru (otáčky servopohonu kuličky, servopohonu disku a zatížení v kontaktu) při měření, byly použity rovnice odvozené v přecházejících kapitolách.

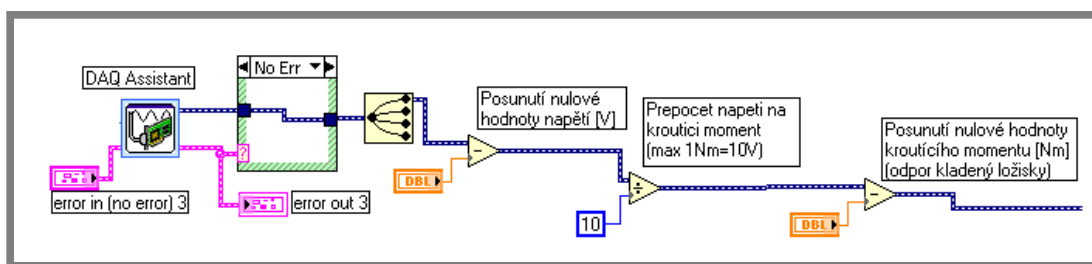


Obr. 5-6 Ovládací panel s grafem a se zobrazovanými základními parametry měření

5.2.1 Načtení napětí do softwaru

Pro načítání napětí z měřicí karty (NI USB-9006) do softwaru je použit vstupní prvek (DAQ Assistant), který umožňuje nastavení vzorkovací frekvence snímaného signálu (vzorkovací frekvence byla nastavena na 1000Hz). Filtrace vstupního signálu (napětí) je do algoritmu programu zařazena až po posunu a přepočtu napětí z důvodu možnosti pozdějšího načtení a analýzy nevyfiltrovaného napětí (v případě, že by

filtrace byla zaražena na začátek algoritmu programu nebylo by možné uložit nevyfiltrované napětí a jeho pozdější analýza).



Obr. 5-7 Přepocet napětí na kroutící moment a posunutí na nulovou hodnotu

5.2.2 Možnosti programu

Program byl vytvořen tak, aby bylo možné uložit (a načíst) záznam z měření včetně aktuálního zatížení, rychlostí třecích povrchů a prokluzu pro případné pozdější vyhodnocení a analýzu záznamu. Pozn. pro uložení záznamu bylo využito interního formátu prostředí LabVIEW (.lvm).

5.2.2



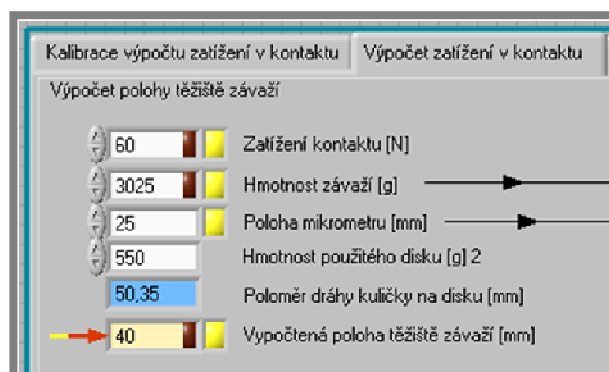
Obr. 5-8 Načtení a uložení záznamu měření

Záznam měření je možné uložit také do textového souboru (.txt) pro zpracování naměřených dat z měření v tabulkovém procesoru. Pozn. počet uložených hodnot (řádků souboru) závisí na zvolené vzorkovací frekvenci přepočtu součinitele tření a délce úseku zobrazeného v grafu.

5.2.3 Parametry pro nastavení tribometru

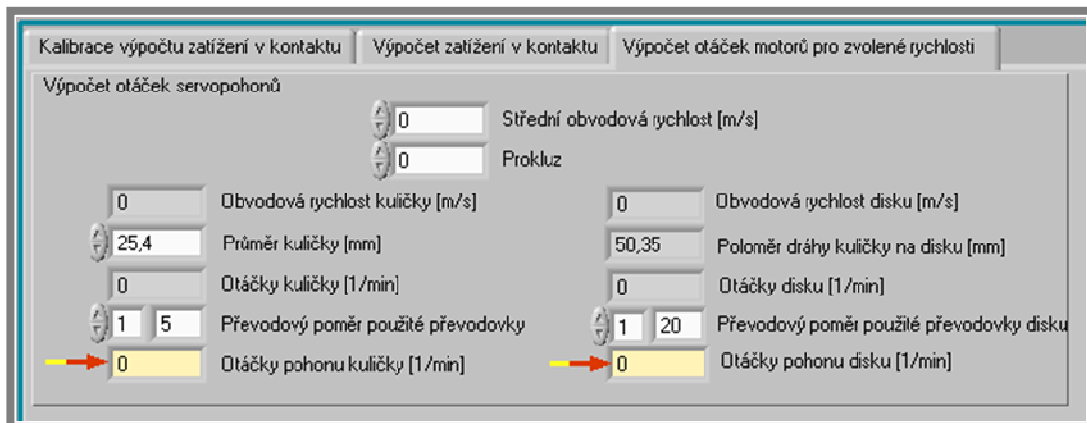
Vzhledem k tomu, že byl vytvořen postup, který umožňuje vyvození přesně zvolené síly v kontaktu na základě polohy závaží na tyči zatěžujícího mechanismu, jsou v programu vstupními parametry pro výpočet polohy těžiště závaží: zvolené zatížení v kontaktu, hmotnost použitého závaží a poloha nastavení vrchlíku kuličky vůči středu otáčení disku (poloměr dráhy kuličky na disku). Tento poloměr je vypočítáván na základě polohy mikrometru (viz kapitola *Zatížení v kontaktu*).

5.2.3



Obr. 5-9 Výpočet polohy závaží pro zvolené zatížení kontaktu

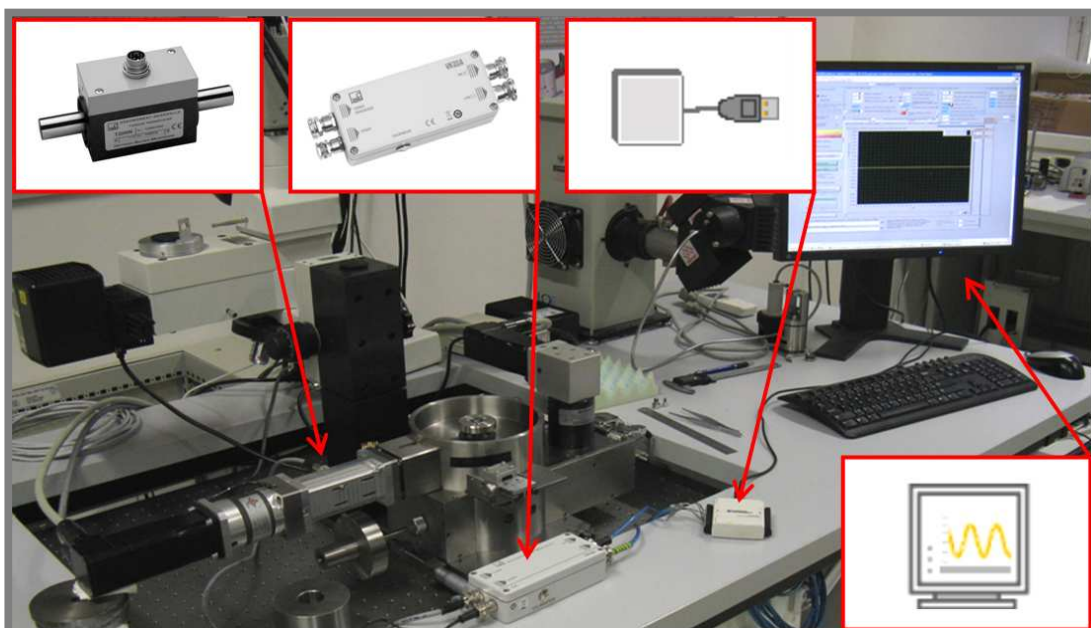
Pro dosažení zvolené rychlosti třecích povrchů a prokluzu je nutné na tribometru zadat vypočtené otáčky servopohonu kuličky a disku.



Obr. 5-10 Výpočet otáček servopohonu kuličky a disku

5.3 Zprovoznění a odladění měřicího řetězce

Zapojení měřicího řetězce bylo provedeno dle schématu na Obr. 4-7. Zapojení propojovací krabice a snímače bylo provedeno dle návodu uvedeného v dokumentaci snímače.



Obr. 5-11 Realizace zapojení měřicího řetězce

Ověření správnosti zapojení snímače bylo provedeno pomocí „testovacího“ ramene, kdy rameno bylo připevněno na hřídelku na měřícím konci snímače (průměr 6mm), hřídelka na poháněném konci snímače (průměr 8mm) byla zajištěna proti pootočení, a rameno bylo zatíženo závažím o známé hmotnosti. Hodnoty krouticího momentu vypočtené na základě hmotnosti použitého závaží a délky ramene (dle rovnice

Rovnice 8) a hodnoty krouticího momentu zaznamenané snímačem jsou uvedeny v následující tabulce.



Obr. 5-12 Snímač s „testovacím“ ramenem

Tab. 5-1 Hodnoty krouticích momentů vypočtené a naměřené snímačem

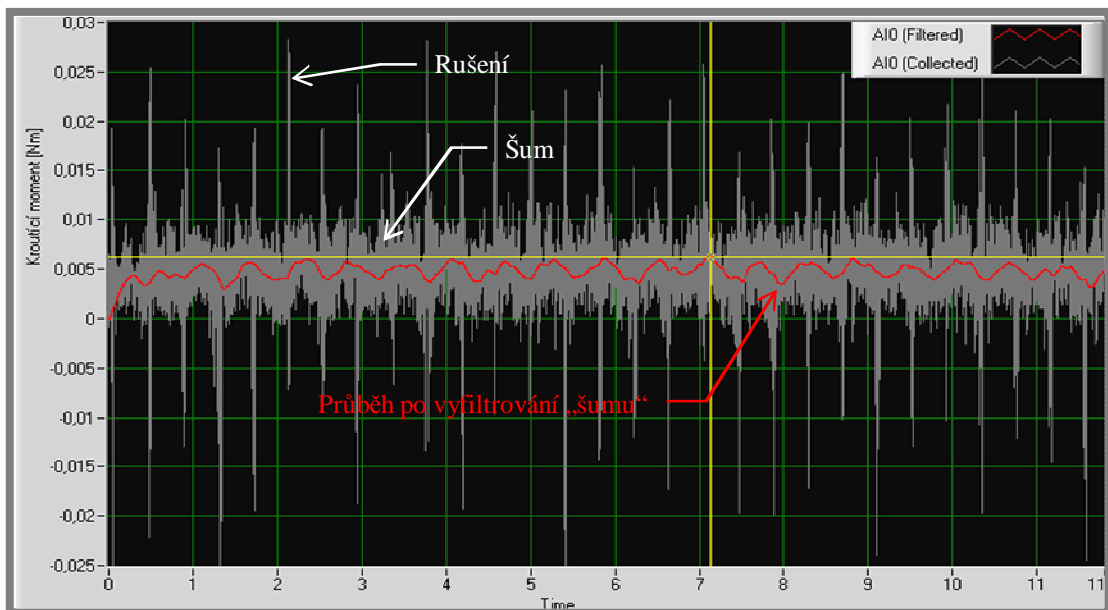
Směr zatížení	Vypočtená hodnota krouticího momentu (Nm)	Naměřená hodnota krouticího momentu (Nm)
Kladný	0,043	+0,043
	0,079	+0,077
	0,561	+0,559
Záporný	0,043	-0,044
	0,079	-0,080
	0,561	-0,563

Porovnáním naměřených hodnot lze konstatovat, že zapojení snímače a odečtení počátečního napětí bylo provedeno správně, protože naměřené hodnoty se od hodnot vypočtených odlišují v rámci přesnosti snímače (tedy $\pm 0,002$ Nm).

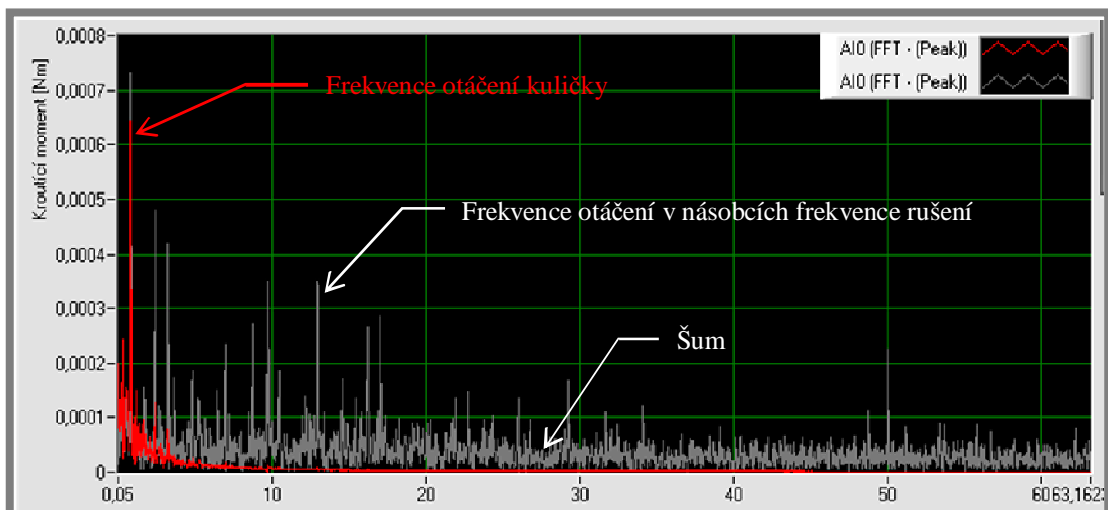
5.3.1 Zpracování napětí ze snímače

Protože napětí ze snímače vykazovalo zřetelný „šum“ (Obr. 5-13 barva šedá) bylo provedeno jeho vyfiltrování (Obr. 5-13 barva červená). Vyhodnocením frekvenčních spekter pro různé otáčky kuličky bylo zjištěno, že se v signálu vedle frekvencí odpovídající šumu vyskytovala také frekvence, která odpovídala frekvenci otáčení kuličky (Obr. 5-14).

5.3.1

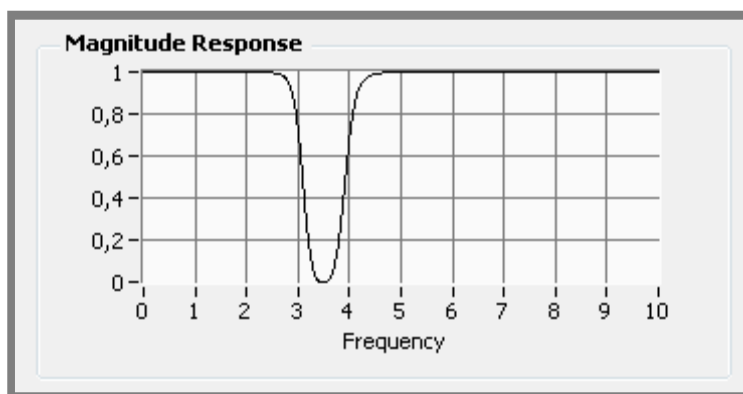


Obr. 5-13 Záznam ze snímače kroutícího momentu



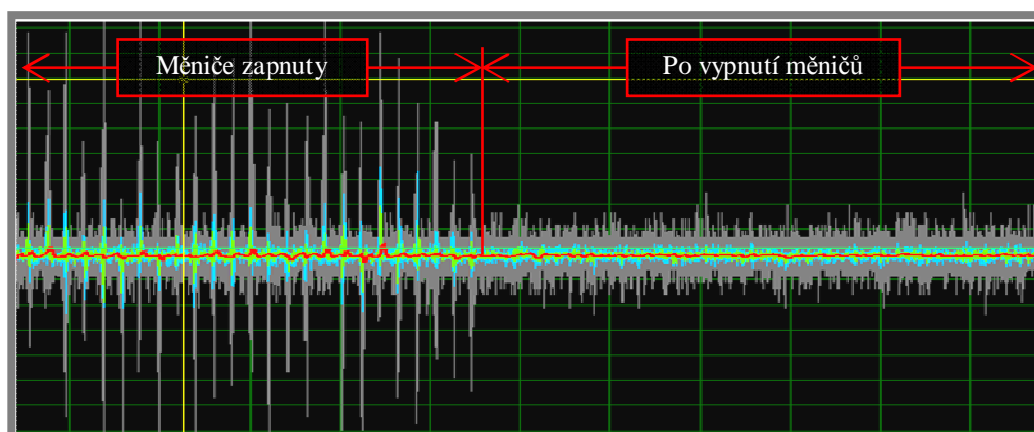
Obr. 5-14 Frekvenční spektrum signálu

Protože se nepodařilo zjistit a odstranit příčiny ovlivnění zaznamenaného signálu otáčením kuličky (stejný problém se vyskytoval i po výměně převodovky s jiným převodovým poměrem) řešením byla eliminace frekvence otáčení kuličky v signálu použitím filtru, kde filtrovaná frekvence odpovídá frekvenci otáčení kuličky.



Obr. 5-15 Přechodová funkce pro vyfiltrování frekvence otáčení kuličky

Dále se ve frekvenčním spektru vyskytovaly také maxima v násobcích frekvence odpovídající frekvenci „zákmitů“. Protože hodnota tohoto násobku byla pro různé otáčky kuličky stejná, bylo usouzeno, že se jedná o vnější rušení. Tento předpoklad se potvrdil při vypnutí frekvenčních měničů Obr. 5-16.



Obr. 5-16 Záznam signálu před a po vypnutí měničů

Při „odladování“ měření tření v kontaktu mezi rotující kuličkou a diskem bylo zjištěno, že snímač i přes provedené posunutí počátečního napětí vykazuje určitou hodnotu krouticího momentu i v případě kdy kulička není zatížena ale pouze se otáčí (Obr. 5-13). Bylo shledáno, že tento zaznamenaný krouticí moment je odpor vyvozený ložisky držáku kuličky. Pro zpřesnění stanovení velikosti součinitele tření, a minimalizaci chyb při opakování měření, bylo nutné velikost krouticího momentu odpovídající odporu ložisek také odečíst. Pozn. v softwaru řešeno posunem vstupního krouticího momentu ze snímače o hodnotu odpovídající odporu ložisek – tzn. že při měření byl proveden nejdříve záznam krouticího momentu při nezatížené kuličce, provedeno odečtení s poté byla kulička zatížena.

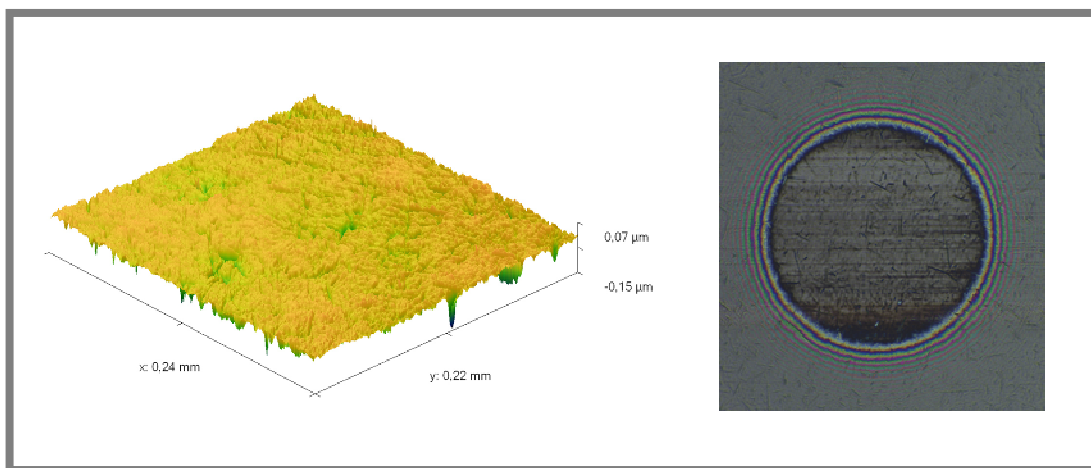
5.4 Měření tření s hladkými povrchy

Pro ověření funkčnosti tribometru upraveného pro měření tření, opakovatelnosti měření byly první měření provedeny pouze s hladkou kuličkou (průměr 25,4mm, drsnost povrchu $R_a=0,01\mu\text{m}$), skleněným diskem s opticky hladkým

povrchem a ocelovým diskem s broušeným povrchem. Měření probíhalo při teplotě 20°C, při které je dynamická viskozita použitého oleje RENOLIN MA22 0,038 Pa/s (další vlastnosti použitého oleje jsou uvedeny v Tab. 5-2). Zatížení v kontaktu bylo 60N čemuž odpovídá velikost kontaktní oblasti 450μm. Měření bylo provedeno pro prokluz 0,5. Střední unášivá rychlost byla volena s ohledem na dostatečné popsání závislosti tření na rychlosti. Pozn. záporná hodnota prokluzu znamená, že povrch kuličky se pohybuje vyšší rychlostí než povrch disku a naopak. V případě, kdy je prokluz roven nule jde o čisté valení.

Tab. 5-2 Vlastnosti použitého oleje [19]

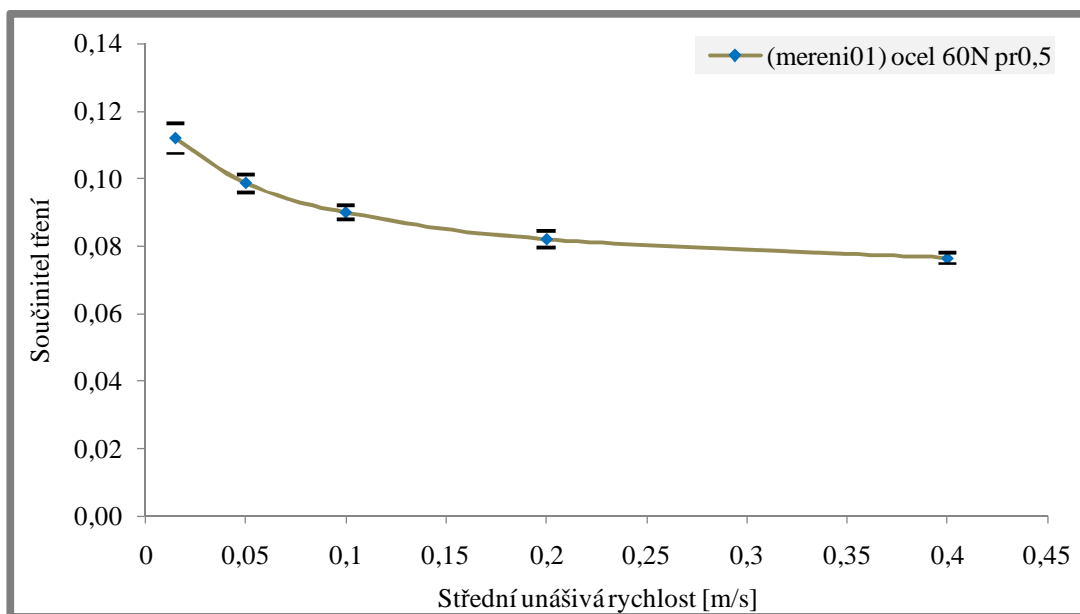
Vlastnosti	Jednotka	MA 22	MA 68
Viskozitní třída dle ISO	-	VG 22	VG 68
Číslo barvy	-	0,5	1,0
Hustota při 15 °C	kg/m ³	863	883
Kinematická viskozita při 40 °C	mm ² /s	22	68
Kinematická viskozita při 100 °C	mm ² /s	4,3	8,6
Viskozitní index	-	min. 95	min. 95
Bod vzplanutí	°C	199	237
Bod tuhnutí	°C	-15	-11
Číslo kyselosti	mgKOH/g	0,03	0,05
Reakce vodného výtěpku	-	neutrální	neutrální
Obsah vody	%	neobsahuje	neobsahuje
Obsah nerozpustných látek	-	neobsahuje	neobsahuje



Obr. 5-17 Topografie hladkého povrchu kuličky

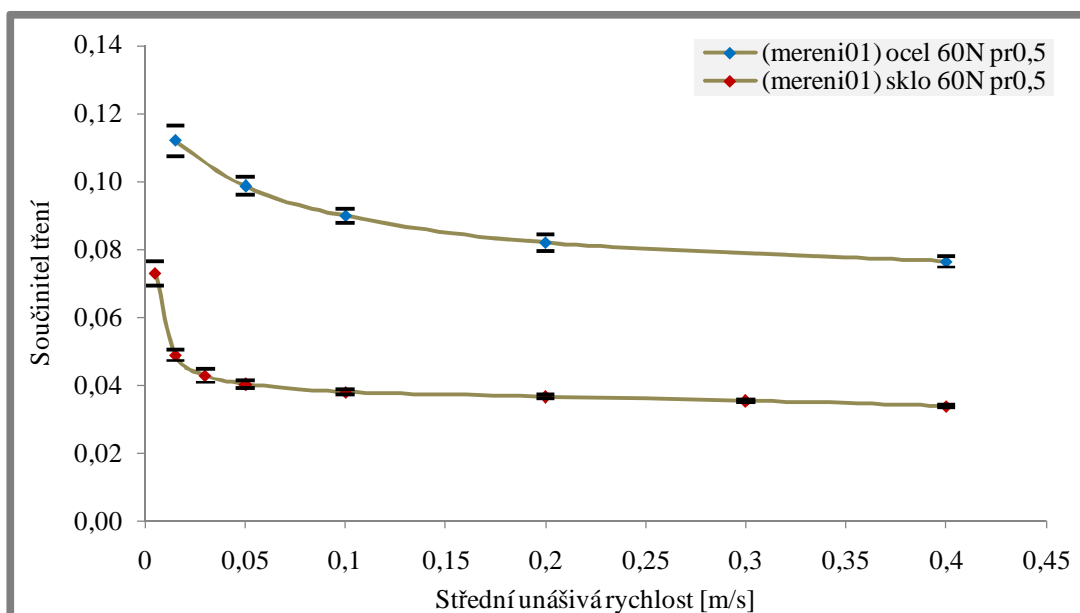
5.4.1 První měření

První měření s ocelovým diskem bylo provedeno pro střední unášivou rychlost 0,015; 0,05; 0,2; 0,3 a 0,4m/s. Závislost součinitel tření na unášivé rychlosti po výpočtu průměrné hodnoty součinitele tření je na Obr. 5-18.



Obr. 5-18 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový disk z prvního měření při zatížení kontaktu 60N a prokluzu 0,5

Měření se skleněným diskem bylo provedeno pro unášivé rychlosti 0,005; 0,015; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 a 0,4m/s protože po vynesení závislosti součinitele tření na střední unášivé rychlosti ocelového disku (Obr. 5-18) bylo zjištěno, že při měření byla zvolena vysoká počáteční rychlost a změna velikosti součinitele tření mezi rychlostmi 0,015 a 0,05 m/s byla malá (nebylo tak dosaženo mezného mazání).

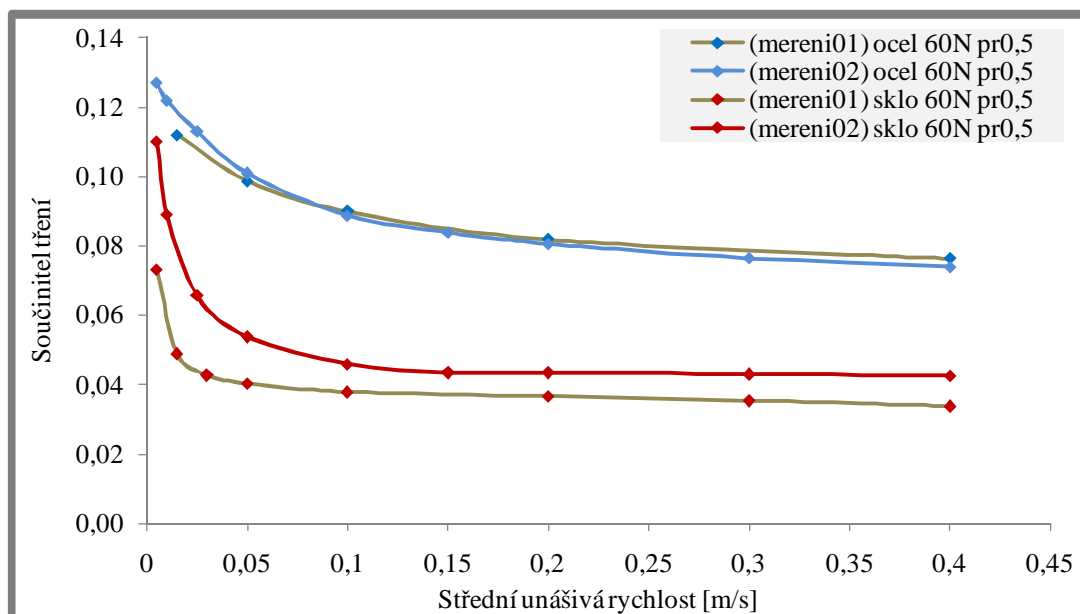


Obr. 5-19 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový a skleněný disk z prvního měření při zatížení kontaktu 60N a prokluzu 0,5

Porovnáním součinitele tření mezi ocelovým a skleněným diskem (Obr. 5-19) je patrné, že ocelový disk s pouze broušeným povrchem vykazuje dvojnásobně vyšší součinitel tření oproti skleněnému disku s opticky hladkým povrchem.

5.4.2 Druhé měření

Na základě výsledků získaných při prvním měření, další měření součinitele tření ocelového a skleněného disku bylo provedeno pro již stejné unášivé rychlosti (0,005; 0,015; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 a 0,4m/s). Výsledky z tohoto měření (Obr. 5-20) byly porovnány s výsledky získanými při prvním měření (Obr. 5-19).



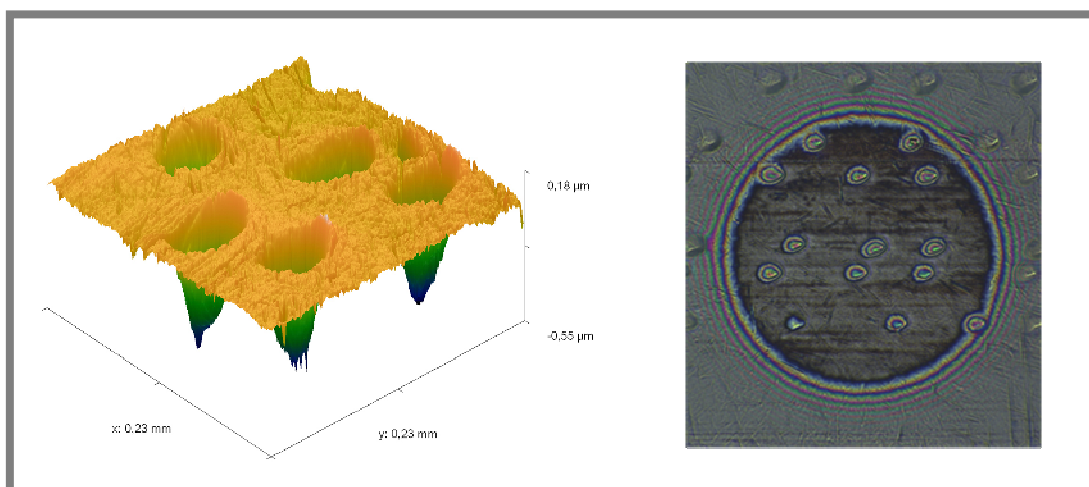
Obr. 5-20 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový a skleněný disk z prvního a druhého měření při zatížení 60N a prokluzu 0,5

I vzhledem k tomu, že při prvním měření tření na ocelovém disku byla zvolena vyšší počáteční rychlost tak při porovnání vynesných hodnot lze konstatovat, že vzájemné odchylky jsou v mezích přesnosti snímače. U součinitele tření skleněného disku změřeného při prvním a druhém měření je situace odlišná. Jak je patrné z (Obr. 5-20) hodnoty součinitele tření se u všech rychlostí liší přibližně o 20%. Po detailním prozkoumání povrchu skleněného disku bylo zjištěno, že disk má na určitém poloměru (po celém jeho obvodu) již značně poškozený povrch, a na kterém byl při měření nastaven vrchlík kuličky.

5.5 Měření tření s modifikovaným povrchem kuličky

Měření tření s modifikovaným povrchem bylo provedeno s texturovanou kuličkou (průměr 25,4mm, drsnost povrchu $R_a=0,01\mu\text{m}$, průměr dentů $45\mu\text{m}$ a hloubka $0,6\mu\text{m}$), skleněným diskem s opticky hladkým povrchem a ocelovým diskem s broušeným povrchem. Měření probíhalo při teplotě 20°C , při které je dynamická viskozita použitého oleje RENOLIN MA22 $0,038\text{ Pa}\cdot\text{s}$. Zatížení v kontaktu bylo 60 N čemuž odpovídá velikost kontaktní oblasti $450\mu\text{m}$. Měření bylo provedeno pro prokluz -0,5 a -2 (čistý kluz). Protože byla mikrotextura vytvořena pouze na polovině obvodu kuličky bylo měření provedeno pouze pro obvodové rychlosti kuličky do

0,03 m/s, kdy bylo ještě možné rozpoznat v záznamu měření rozdíl mezi jejím texturovaným a hladkým povrchem (pozn. obvodové rychlosti kuličky 0,03 m/s odpovídají otáčky kuličky 22,6 ot/min).

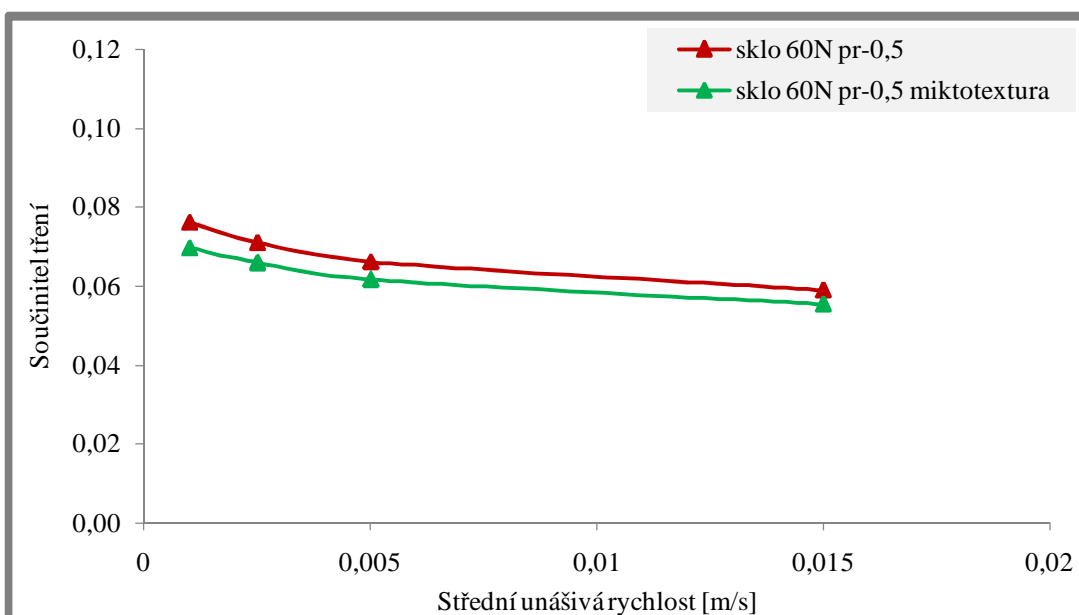


Obr. 5-21 Topografie modifikovaného povrchu kuličky

5.5.1 Výsledky měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky v kontaktu se skleněným diskem

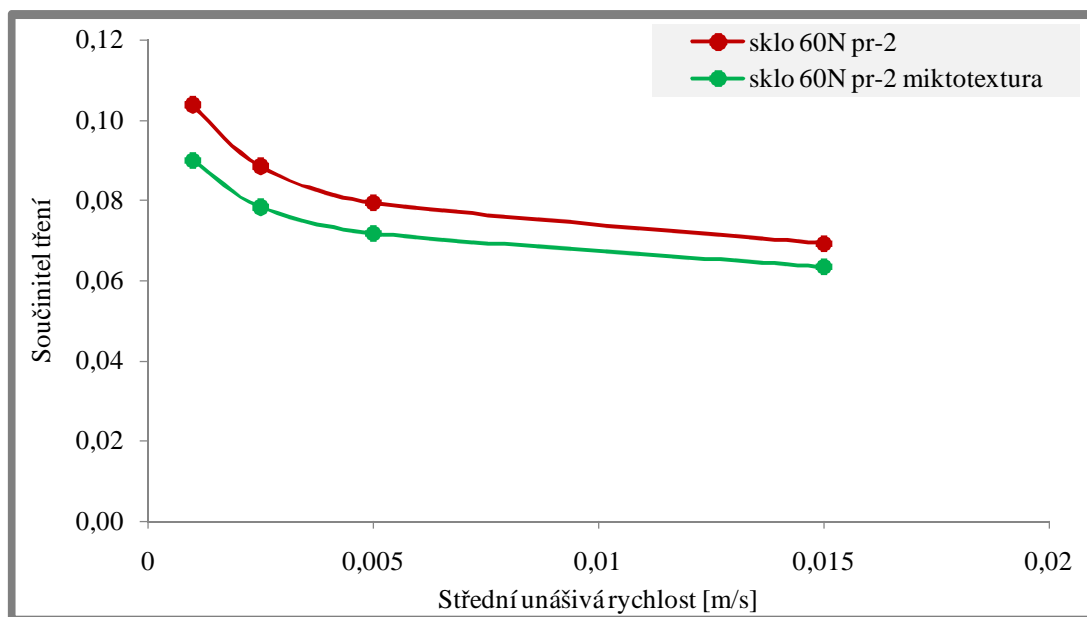
5.5.1

Jak je patrné z porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu za kluzně valivých podmínek (prokluz -0,5 Obr. 5-22) díky mikrotextuře došlo jen k nepatrnému ke snížení tření. Ke snížení tření došlo u všech měřených rychlostí přibližně o 8-6%. Je to způsobeno tím, že v kontaktu je díky pohybujícím se oběma povrchům vytvářena přibližně stejná tloušťka maziva. Se vzrůstající rychlostí docházelo k poklesu součinitele tření z důvodu nárůstu tloušťky maziva.



Obr. 5-22 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -0,5

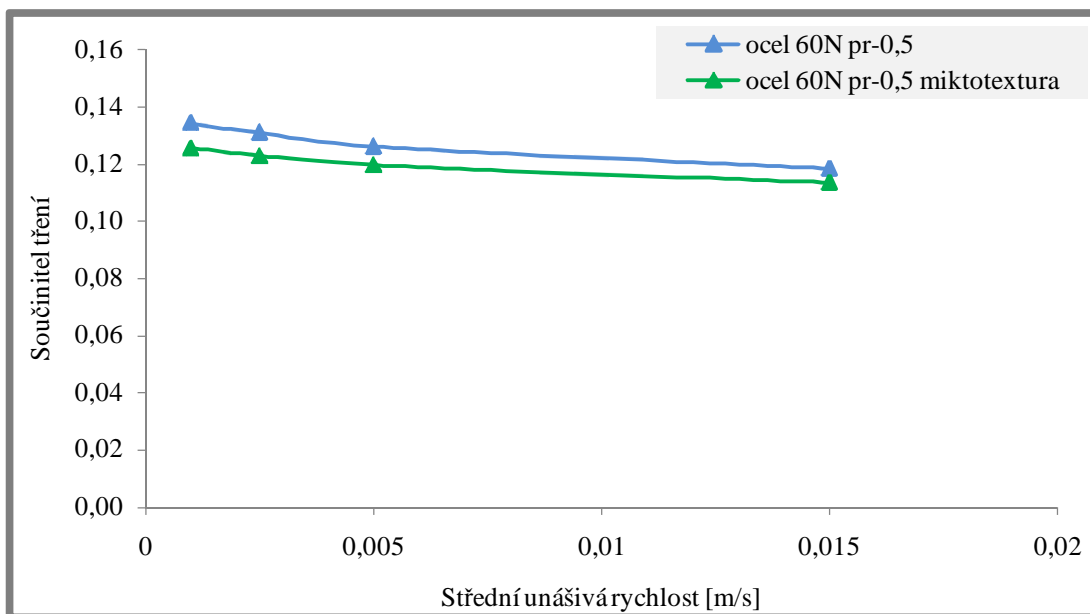
Za podmínek čistého kluzu (prokluz -2 Obr. 5-23) vykazoval součinitel tření vyšších hodnot, protože do kontaktu nebylo vtahováno téměř žádné mazivo a docházelo tak k tzv. meznému mazání. Se vzrůstající rychlostí docházelo k výraznějšímu poklesu součinitele tření než za kluzně valivých podmínek (prokluz -0,5 Obr. 5-22) protože došlo k přechodu z režimu mezného mazání do režimu smíšeného mazání. Díky mikrotextuře došlo za podmínek čistého kluzu k výraznějšímu snížení tření. Rozdíl mezi součinitelem tření hladkého a texturovaného povrchu byl přibližně 13-8%. Se vzrůstající rychlostí se tento rozdíl snižoval díky tomu, že v kontaktu docházelo k výraznějšímu navýšení tloušťky maziva a vliv mikrotextury jako zásobníku maziva se začal snižovat.



Obr. 5-23 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -2

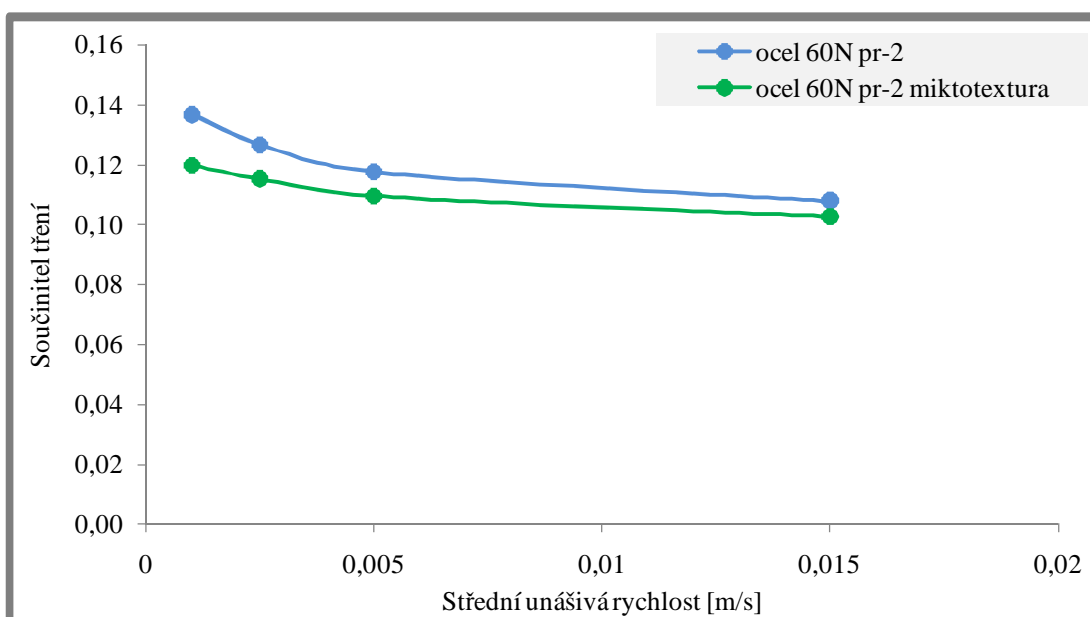
5.5.2 Výsledky měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky v kontaktu s ocelovým diskem

Při měření součinitele tření s ocelovým diskem bylo dosaženo podobných výsledků jako u skleněného disku a to jak při prokluzu -0,5 tak i při prokluzu -2. Při kluzně valivých podmínkách (prokluz -0,5 Obr. 5-24) docházelo s rostoucí rychlostí k mírnému poklesu součinitele tření. Díky mikrotextuře došlo ke snížení tření u všech měřených rychlostí přibližně jen o 6-4%.



Obr. 5-24 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření s ocelovým diskem při zatížení 60N a prokluzu -0,5

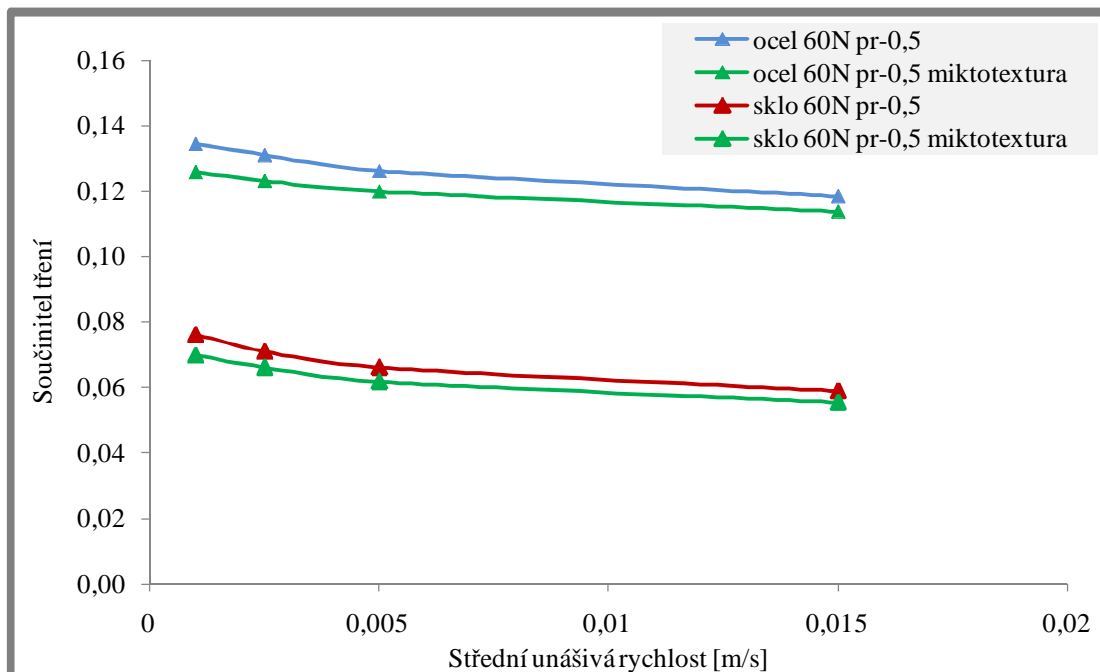
Za podmínek čistého kluzu (prokluz -2 Obr. 5-25) docházelo s rostoucí rychlostí k výraznějšímu poklesu součinitele tření ze stejných důvodů jako při použití skleněného disku. Rozdíl mezi součinitelem tření hladkého a texturovaného povrchu byl přibližně 12-5%. S tím, že k největšímu snížení tření došlo při nejnižší rychlosti (v režimu mezního mazání), kdy díky mikrotextuře bylo do kontaktní oblasti dopravováno zvýšené množství maziva.



Obr. 5-25 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření s ocelovým diskem při zatížení 60N a prokluzu -2

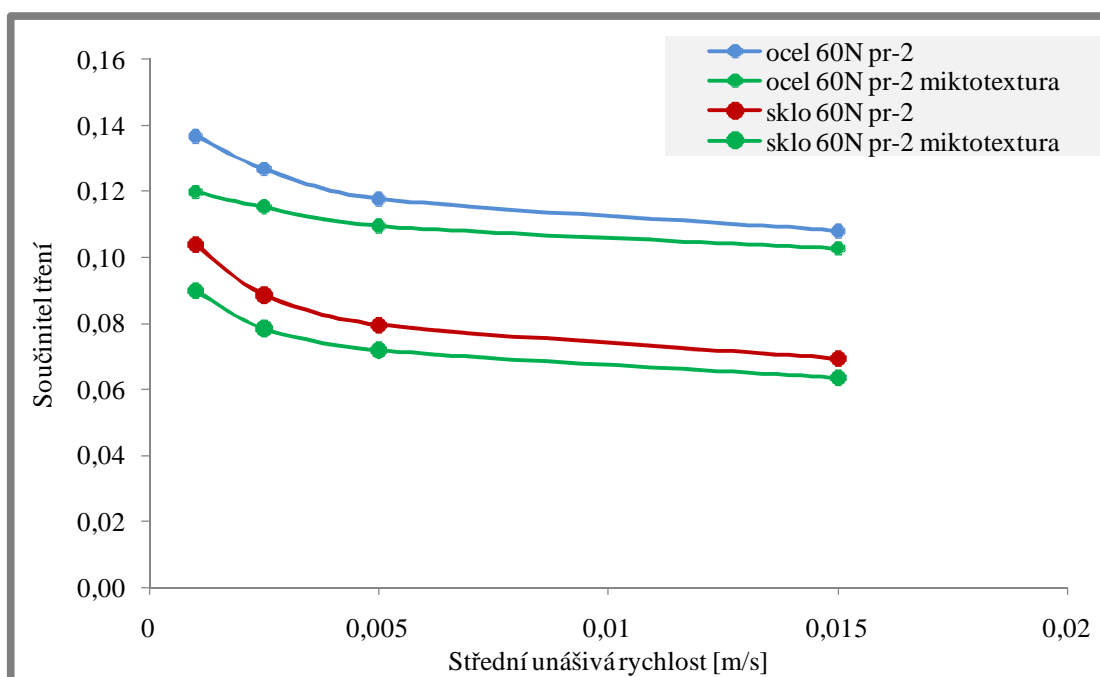
5.5.3 Srovnání součinitele tření pro skleněný a ocelový disk

Jak už bylo popsáno výše, při kluzně valivých podmínkách (prokluz -0,5) došlo díky miktorextruře jen k nepatrnému snížení tření a to jak v případě použití skleněného, tak i v případě použití ocelového disku Obr. 5-26.



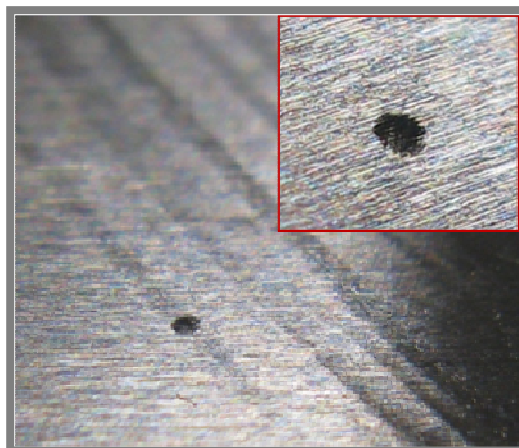
Obr. 5-26 Srovnání součinitele tření při prokluzu -0,5 pro skleněný a ocelový disk

Při čistém kluzu (prokluz -2) došlo díky miktorextruře k výraznějšímu snížení tření, přičemž největší vliv měla mikrotextura na snížení tření v případě kontaktu kuličky s ocelovým diskem při nízkých rychlostech Obr. 5-27.



Obr. 5-27 Srovnání součinitele tření při prokluzu -2 pro skleněný a ocelový disk

V případě čistého kluzu došlo u ocelového disku k opotřebení kontaktní oblasti (Obr. 5-28). U skleněného disku nebylo pozorováno žádné opotřebení.

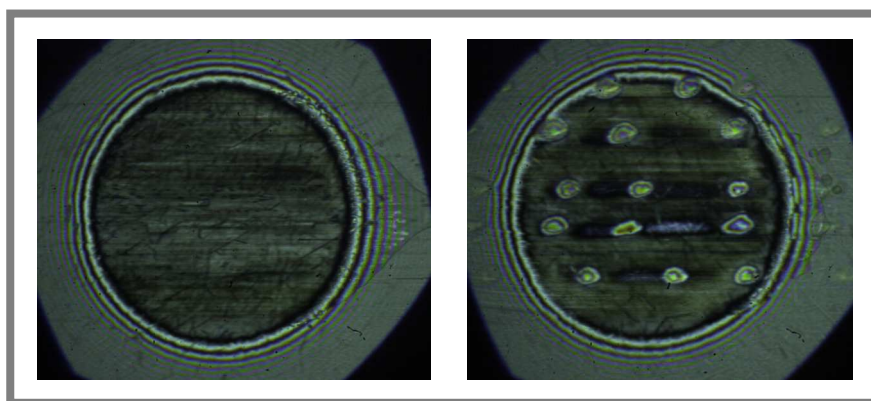


Obr. 5-28 Opotřebení ocelového disku

5.5.4 Měření součinitele tření modifikovaného povrchu kuličky s viskóznějším mazivem

5.5.4

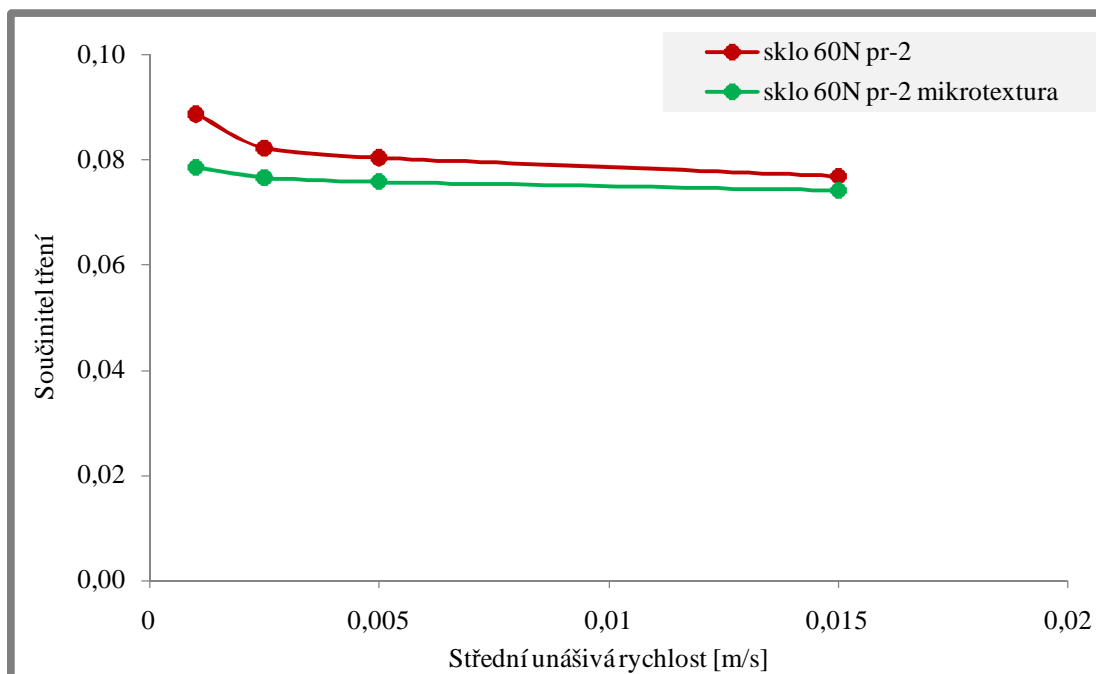
Aby bylo možné vyhodnotit i tloušťku mazacího filmu bylo realizováno také měření s viskóznějším mazivem, protože pro výše použitý olej (RENOLIN MA22) nebylo možné změřit tloušťku mazacího filmu z důvodu nízké viskozity maziva (0,038 Pa/s) a vysokého zatížení v kontaktu. Při měření s viskóznějším mazivem byl použit olej RENOLIN MA68 jehož dynamická viskozita při teplotě 20°C je 0,142 Pa/s (další parametry jsou uvedeny v Tab. 5-2). Protože tloušťku mazacího filmu je možné vyhodnotit jen se skleněným diskem, bylo měření součinitele tření s tímto olejem provedeno pouze se skleněným diskem při zatížení 60N a při prokluzu -2. Tloušťky mazacího filmu byly stanoveny vyhodnocením chromatických interferogramů (Obr. 5-29) pomocí kolometrické interferometrie.



Obr. 5-29 Chromatické interferogramy pro hladký a texturovaný povrch kuličky

V případě použití viskóznějšiho maziva (Obr. 5-30) došlo vlivem mikrotextury ke snížení tření při nejnižší rychlosti o 12% což je hodnota srovnatelná s hodnotou dosaženou v případě použití maziva s nižší viskozitou (tedy 13%). Avšak s rostoucí

rychlostí měla mikrotextura na snížení tření menší vliv než v případě použití maziva s nižší viskozitou. Přičemž při nejvyšší rychlosti došlo ke snížení tření pouze o 4% oproti 8% dosažených v případě použití maziva s nižší viskozitou (Obr. 5-23). Z čehož vyplývá, že mikrotextura má při v případě použití maziva s vyšší viskozitou menší vliv na snížení tření.



Obr. 5-30 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -2 s mazivem s vyšší viskozitou

Při měření součinitele tření s mazivem RENOLIN MA68 byly naměřeny následující tloušťky mazacího filmu:

Tab. 5-3 Naměřené tloušťky mazacího filmu

Stření unášivá rychlost (m/s)	0,001	0,0025	0,005	0,015
Tloušťka mazacího filmu pro hladký povrch (nm)	3	10	17	35
Tloušťka mazacího filmu pro povrch s mikrotexturou (nm)	10	12	21	30

Z naměřených hodnot tloušťek mazacího filmu (Tab. 5-3) je patrné, že díky mikrotextuře došlo k navýšení tloušťky mazacího filmu pro všechny měřené rychlosti což je v souladu s naměřenými hodnotami součinitele tření s výjimkou rychlosti 0,015 m/s, kde byla naměřena tloušťka menší. Protože jak už bylo zmíněno výše, nepodařilo se mikrotexturu vytvořit rovnoměrně na celém povrchu kuličky a vzhledem k tomu, že součinitel tření modifikovaného povrchu vykazoval i při této rychlosti nižší hodnotu došlo pravděpodobně k nereprezentativnímu výběru chromatického interferogramu, ze kterého byla tloušťka vyhodnocována. Tloušťka mohla být také chybně vyhodnocena z důvodu již značně opotřebeného povrchu kuličky, kdy vyhodnocení tloušťky mazacího filmu z chromatických interferogramů pomocí kolometrické interferometrie v kontaktu nevyleštěného povrchu není

jednoznačné. Lze tedy říci, že pokud je v kontaktu dosažena souvislá vrstva maziva má mikrotextura menší vliv na snížení tření

6 DISKUSE

Výzkum v oblasti cílené modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů prokázal, že mikrotexturou, se vhodně navrženými rozměry a geometrií, lze snížit tření při styku těchto povrchů a to především v režimu mezného mazání, kdy mikrotextura slouží jako zásobník maziva.

V rámci práce byly provedeny úpravy optického tribometru pro účely měření tření v kontaktu mezi kuličkou a rovinným diskem. Součinitel tření byl stanovován na základě velikosti krouticího momentu na kuličce, který byl měřen snímačem krouticího momentu T20WN. Pro záznam a zpracování signálu ze snímače byl vytvořen software, díky kterému je možné provádět měření součinitele tření pro zvolené podmínky (zatížení kontaktu, rychlosti třecích povrchů a prokluz). Experimenty byly prováděny s hladkou a texturovanou kuličkou, skleněným a ocelovým diskem, při různých rychlostech a kluzně valivých poměrech. Pro zjištění vlivu cílené modifikace topografie třecího povrchu na součinitel tření bylo provedeno srovnání velikosti součinitele tření hladké a texturované kuličky. Primární cíl práce byl splněn. Nad rámec práce bylo realizováno měření tloušťky mazacího filmu.

Bylo zjištěno, že mikrotextura má na součinitel tření při kluzně valivých podmínkách jen nepatrný vliv (4-8%) a to jak v případě použití skleněného, tak i v případě použití ocelového disku. Avšak při čistém kluzu došlo díky mikrotextuře ke snížení tření přibližně o 6-13%, přičemž většího snížení tření bylo dosaženo při nejnižších rychlostech. V případě použití maziva s vyšší viskozitou, kdy byla měřena současně i tloušťka mazacího filmu, došlo vlivem mikrotextury při čistém kluzu k méně výraznému snížení tření. Snížení tření bylo doprovázeno nárůstem tloušťky mazacího filmu. Při nejnižší rychlosti, kdy nebyla v kontaktu hladkého povrchu kuličky a disku dosažena souvislá vrstva mazacího filmu, došlo díky mikrotextuře ke snížení tření o 12%. Toto snížení tření bylo doprovázené největším nárůstem tloušťky mazacího filmu. Z čehož vyplývá, že pokud je v kontaktu dosažena souvislá vrstva maziva má mikrotextura menší vliv na snížení tření.

Přestože bylo realizováno pouze omezené množství experimentů lze říci, že cílenou modifikací třecích povrchů je možné snížit tření v kontaktu nekonformně zakřivených povrchů režimu mezného mazání.

Pro přesnější kvantifikaci vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na součinitel tření u nekonformních povrchů bude nutné realizovat více experimentů s různými velikostmi a rozložením mikrotextury na třecím povrchu. Pro bližší pochopení vlivu mikrotextury v kontaktu nekonformních povrchů je nezbytné současné vyhodnocení součinitele tření a tloušťky mazacího filmu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BLATTER, A. *Lubricated friction of laser micro-patterned sapphire flats*, Tribology Letters, 1998; 4:237–241.
- [2] DUMITRU, G. *Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications*, Appl. Phys. A Materials, 2000, 70, 485–487
- [3] ETSION, I. *Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings*, Tribology Letters, 2004; 17:295–300.
- [4] ETSION, I. *State of the Art in Laser Surface Texturing*, Trans ASME Journal of Tribology 2005; 127:248–53
- [5] GALDA, L. *Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve*, Tribology International, 2009, 42:1505–1512
- [6] HARTL, M. *Tření, mazání a opotřebení*. Přednášky z předmětu 5KS (2007)
- [7] CHLACHULA, P. *Charakteristika pro popis struktury třecích povrchu*. Brno, VUT-FSI., 2007, 34 s.
- [8] KOVALCHENKO, A. *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*, Tribology International, 2005; 38:219–225
- [9] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy* [online]. 8.7.2006 [cit. 13.5.2009] URL:<tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>
- [10] KŘUPKA, I., HARTL, M. *The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films*, Tribology International, 2007, 40:1100–1110
- [11] NING, R. *Micro textures in concentrated-conformal-contact lubrication effect of distribution patterns*, Tribology Letters 2007; 28:275–285
- [12] POKORNÁ, J., *Cílené modifikace třecích povrchů snižující tření a opotřebení*. Brno, VUT-FSI., 2007, 30 s.
- [13] POPELKA, J. *Elastohydrodynamické mazání valivých ložisek*. Brno VUT-FSI., 2007, 22 s.
- [14] ŠAMÁNEK, O. *Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních částí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 68 s.
- [15] WANG, X. *Preliminary investigation of the effect of dimple size on friction in line contacts*, Tribology International, 2009, 42:1118–1123
- [16] Vybavení tribologické laboratoře [online]. Ústav konstruování FSI VUT v Brně [cit. 2.5.2010] URL:<http://www.uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_tribologie/vybaveni>
- [17] R+W výrobce hřídelových spojek [online]. *Pojistná spojka SK2* [cit. 12.4.2010] URL:<http://www.rwcouplings.com/torque-limiters/torque-limiter-sk2_t.html>
- [18] Hottinger Baldwin Messtechnik - výrobce měřicí techniky [online]. [cit. 9.5.2010] URL:<<http://www.hbm.com/en/menu/applications/torque-measurement/terms-expressions/linearity-deviation/>>
- [19] Hazmioil - prodejce maziv [online]. *RENOLIN MA* [cit. 10.5.2010] URL:<www.hazmioil.cz/PI/PIP4-0002.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$F_{\Delta D}$ [N]	- síla způsobená rozdílem hmotnosti skleněného a ocelového disku
F_n [N]	- zatížení v kontaktu
F_n [N]	- zatížení v kontaktu
F_t [N]	- třecí síla v kontaktu mezi kuličkou a diskem
F_z [N]	- síla vyvozená závažím
M_k [Nm]	- krouticí moment vyvozený třecí silou
M_p [Nm]	- moment způsobený nevyvážeností zatěžovacího mechanismu
i_{pD}	- převodový poměr převodovky použité pro pohon disku
i_{pk}	- převodový poměr převodovky použité pro pohon kuličky
n_D [min ⁻¹]	- otáčky disku
n_k [min ⁻¹]	- otáčky kuličky
n_{pD} [min ⁻¹]	- otáčky servopohonu disku
n_{pk} [min ⁻¹]	- otáčky servopohonu kuličky
r_D [m]	- poloměr disku, na kterém dochází ke kontaktu s kuličkou
u_D [m·s ⁻¹]	- obvodová rychlost disku
u_k [m·s ⁻¹]	- obvodová rychlost kuličky
u_{st} [m·s ⁻¹]	- střední unášivá rychlost
A [m ²]	- plocha povrchu
d [m]	- průměr kuličky
e_{max} [m]	- rameno valivého odporu
F [N]	- třecí síla působící proti směru pohybu
F_r [N]	- síla potřebná k pohybu valením
F_t [N]	- tečná třecí síla
N [N]	- přitlačná síla působící kolmo k směru pohybu
r [m]	- poloměr křivosti
u [m·s ⁻¹]	- rychlost proudění kapaliny v mazací vrstvě
y [m]	- souřadnice ve směru kolmém ke směru pohybu a k ploše, v níž se určuje tečné napětí
ξ	- prokluz
η [Pa.s]	- dynamická viskozita kapaliny
μ	- kinetický součinitel tření
μ_r	- součinitel valivého tření
μ_s	- statický součinitel tření
τ [Pa]	- tečné napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Definice tření; kluzné a), valivé b), statické c) [9].....	12
Obr. 1-2 Stribeckova křivka [6].....	13
Obr. 1-3 Příklad nekonformně zakřiveného povrchu [6].....	14
Obr. 1-4 Rozložení tlaku v EHD kontaktu [6].....	14
Obr. 1-5 Textura vytvořená pomocí laseru (před a po přešetření) [2].....	16
Obr. 1-6 Velikost součinitele tření pro různé hloubky dentů (h_p) [3].....	16
Obr. 1-7 Srovnání velikosti součinitele tření netexturovaného a texturovaného povrchu při jednosměrném a obousměrném pohybu [3].....	17
Obr. 1-8 Závislost součinitele tření na kluzné vzdálenosti pro povrch bez mikrostruktury a povrch s mikrostrukturou [2].....	17
Obr. 1-9 Schematické znázornění zařízení [15].....	19
Obr. 1-10 Mikroskopické snímky povrchu testovacího válečku a vyšetřovaných textur [15].....	19
Obr. 1-12 Závislost součinitele tření na kluzné rychlosti, pro různé hustoty textury [8].....	20
Obr. 1-11 Závislost součinitele tření na parametru mazání [8].....	20
Obr. 1-13 Různé typy textur a jejich vliv na tloušťku mazacího filmu a.....	22
Obr. 2-1 Umístění snímače krouticího momentu.....	23
Obr. 4-1 Experimentální simulátor [16].....	25
Obr. 4-2 Snímač krouticího momentu T20WN [18].....	26
Obr. 4-3 Propojovací krabice VK20 [18].....	26
Obr. 4-4 Příruba pro snímač krouticího momentu - varianta1.....	26
Obr. 4-5 Příruba pro snímač krouticího momentu – varianta2.....	27
Obr. 4-6 Silové poměry v kontaktu.....	28
Obr. 4-7 Schéma zapojení měřicího řetězce.....	29
Obr. 4-8 Odchytky výstupního napětí v průběhu zátěžného cyklu [18].....	30
Obr. 4-9 Zatížení testovacího ramene.....	30
Obr. 4-10 Mechanismus zatěžování kontaktu.....	32
Obr. 4-11 Rychlostní poměry v kontaktu mezi kuličkou a diskem.....	35
Obr. 4-12 Ocelový disk.....	37
Obr. 4-13 Struktura povrchu hladké kuličky.....	38
Obr. 4-14 Struktura povrchu hladké kuličky – 3D výřez.....	38
Obr. 4-15 Rozmístění dentů na povrchu kuličky (rozměry jsou uvedeny v μm).....	39
Obr. 4-16 Zařízení pro výrobu mikrotextury.....	40
Obr. 4-17 Vytvořené pole dentů.....	40
Obr. 4-18 Detail dentu.....	40
Obr. 4-19 Výškový profil vytvořeného dentu v ose x a y	41
Obr. 5-1 Vybrané konstrukční řešení příruby.....	42
Obr. 5-2 Pojistná spojka SK2 (1Nm) [17].....	42
Obr. 5-3 Mezispojka.....	43
Obr. 5-4 Připojení snímače.....	43
Obr. 5-5 Zahloubení pro přečnávající hlavy šroubů.....	44
Obr. 5-6 Ovládací panel s grafem a se zobrazovanými základními parametry měření.....	44
Obr. 5-7 Přepočet napětí na kroutící moment a posunutí na nulovou hodnotu.....	45
Obr. 5-8 Načtení a uložení záznamu měření.....	45
Obr. 5-9 Výpočet polohy závaží pro zvolené zatížení kontaktu.....	45
Obr. 5-10 Výpočet otáček servopohonu kuličky a disku.....	46
Obr. 5-11 Realizace zapojení měřicího řetězce.....	46
Obr. 5-12 Snímač s „testovacím“ ramenem.....	47
Obr. 5-13 Záznam ze snímače krouticího momentu.....	48
Obr. 5-14 Frekvenční spektrum signálu.....	48
Obr. 5-15 Přejížděcí funkce pro vyfiltrování frekvence otáčení kuličky.....	49

Obr. 5-16 Záznam signálu před a po vypnutí měničů.....	49
Obr. 5-17 Topografie hladkého povrchu kuličky	50
Obr. 5-18 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový disk z prvního měření při zatížení kontaktu 60N a prokluzu 0,5	51
Obr. 5-19 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový a skleněný disk z prvního měření při zatížení kontaktu 60N a prokluzu 0,5.....	51
Obr. 5-20 Závislost součinitele tření na rychlosti, pro ocelový a skleněný disk z prvního a druhého měření při zatížení 60N a prokluzu 0,5.....	52
Obr. 5-21 Topografie modifikovaného povrchu kuličky	53
Obr. 5-22 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -0,5.....	53
Obr. 5-23 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -2.....	54
Obr. 5-27 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření s ocelovým diskem při zatížení 60N a prokluzu -0,5.....	55
Obr. 5-28 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření s ocelovým diskem při zatížení 60N a prokluzu -2.....	55
Obr. 5-29 Srovnání součinitele tření při prokluzu -0,5 pro skleněný a ocelový disk.....	56
Obr. 5-30 Srovnání součinitele tření při prokluzu -2 pro skleněný a ocelový disk.....	56
Obr. 5-31 Opotřeбенí ocelového disku	57
Obr. 5-24 Chromatické interferogramy pro hladký a texturovaný povrch kuličky	57
Obr. 5-31 Porovnání součinitele tření hladkého a texturovaného povrchu kuličky pro měření se skleněným diskem při zatížení 60N a prokluzu -2 s mazivem s vyšší viskozitou	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Statistické veličiny popisující strukturu povrchu hladké kuličky	39
Tab. 5-1 Hodnoty krouticích momentů vypočtené a naměřené snímačem	47
Tab.5-2 Vlastnosti použitého oleje [19]	50
Tab. 5-3 Změřené tloušťky mazacího filmu	58

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

Příruba pro snímač	2-DP-01/01
Rameno	3-DP-02/01
Kostička	4-DP-02/02
Testovací rameno	3-DP-02/S
Spojka	3-DP-03/01

Software pro měření - náhled

Čelní ovládací panel
Vlastní grafický kód (blokové schéma)