
ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu cílené modifikace topografie nekonformních třecích povrchů na utváření mazacího filmu. Utváření mazacího filmu pro různou hloubku mikro-vtisků bylo sledováno vysokorychlostní záznamovou technikou za podmínek čistého valení i při prokluzu třecích povrchů. Získané výsledky ukázaly, že vhodnou volbou mikro-textury lze zvýšit průměrnou tloušťku mazacího filmu aniž by došlo k jeho protržení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cílená modifikace topografie, tloušťka mazacího filmu, prokluz, vysokorychlostní záznamová technika.

SUMMARY

Diploma thesis describes analysis of influence of surface texturing on non-conformal rubbing surfaces. High speed camera was used to observe the effect of micro-dents of various depths on film thickness under pure rolling and rolling/sliding conditions. It can be concluded from the obtained results that micro-texture of suitable sizes can results in film thickness increase without lubrication film breakdown.

KEYWORDS

Surface texturing, lubrication film thickness, rolling/sliding, high speed camera.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PUCHNER, J. *Vliv cílené modifikace topografie na elastohydrodynamické mazací filmy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury, pod odborným vedením doc. Ing. Ivana Křupky, Ph.D.

V Brně, dne 16.5.2008.

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat především panu doc. Ing. Ivanu Křupkovi, Ph.D. za odborné vedení. Dále děkuji všem, kteří mi byli nápomocni při realizaci mé diplomové práce.

OBSAH

Obsah	11
Úvod	12
1 Přehled současného stavu poznání.....	13
1.1 Režimy mazání	13
1.1.1 Mezné mazání	14
1.1.2 Smíšené mazání.....	14
1.1.3 Elastohydrodynamické mazání	15
1.1.4 Hydrodynamické mazání.....	15
1.2 Tření a opotřebení třecích povrchů	16
1.3 Cílená modifikace topografie třecích povrchů.....	17
1.3.1 Konformní povrchy	17
1.3.2 Nekonformní povrchy	19
2 Formulace řešeného problému a jeho analýza	22
3 Vymezení cílů práce	23
4 Návrh metodického přístupu k řešení	24
5 Analýza a interpretace získaných údajů	25
5.1 Cílená modifikace topografie třecích povrchů.....	25
5.1.1 Vytváření důlků pomocí nanosekundového laseru	25
5.1.2 Vytváření mikro-vtisků Rocwellovým vnikacím tělískem	30
5.2 Vliv cílené modifikace topografie povrchu na mazací film	30
5.2.1 Průchod mikro-vtisků mazaným kontaktem za podmínek čistého valení	32
5.2.2 Vliv prokluzu na utváření mazacího filmu v okolí mikro-vtisků	34
6 Závěr.....	41
Seznam použitých zdrojů.....	42
Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	44
Seznam obrázků a grafů	45
Seznam tabulek	47

ÚVOD

V dnešní době je kladen požadavek na minimalizaci ztrát téměř na každý mechanismus. Největší procento ztrát je tvořeno tepelnými ztrátami, které jsou převážně spojeny s třením. Tření je zásadním způsobem ovlivňováno mazivem. Mazací film od sebe odděluje třecí povrchy, čímž dochází k významnému snížení tření a opotřebení. Přístupy ke snížení tření a opotřebení třecích povrchů jsou založeny na modifikaci třecích povrchů či maziv. Tato práce je zaměřena na cílenou modifikaci nekonformně zakřivených třecích povrchů a její vliv na tloušťku mazacího filmu a tím snížení tření a opotřebení.

Cílenou modifikaci chápeme jako vytvoření mikro-textury na třecím povrchu, což může napomáhat snížení tření a opotřebení třecích povrchů. Avšak v případě nekonformních třecích povrchů způsobuje přítomnost mikro-textury také redukci tloušťky mazacího filmu. Tato redukce způsobuje v některých případech až kolaps mazacího filmu. Proto je nutné při studiu cílené modifikace nekonformních třecích povrchů studovat průchod mikro-textury celou kontaktní oblastí.

Cílem diplomové práce je tedy posoudit vliv cílené modifikace topografie na utváření mazacího filmu při užití vysokorychlostní záznamové techniky.



Obr.1 Soudečkové ložisko dvouřadé [1]

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

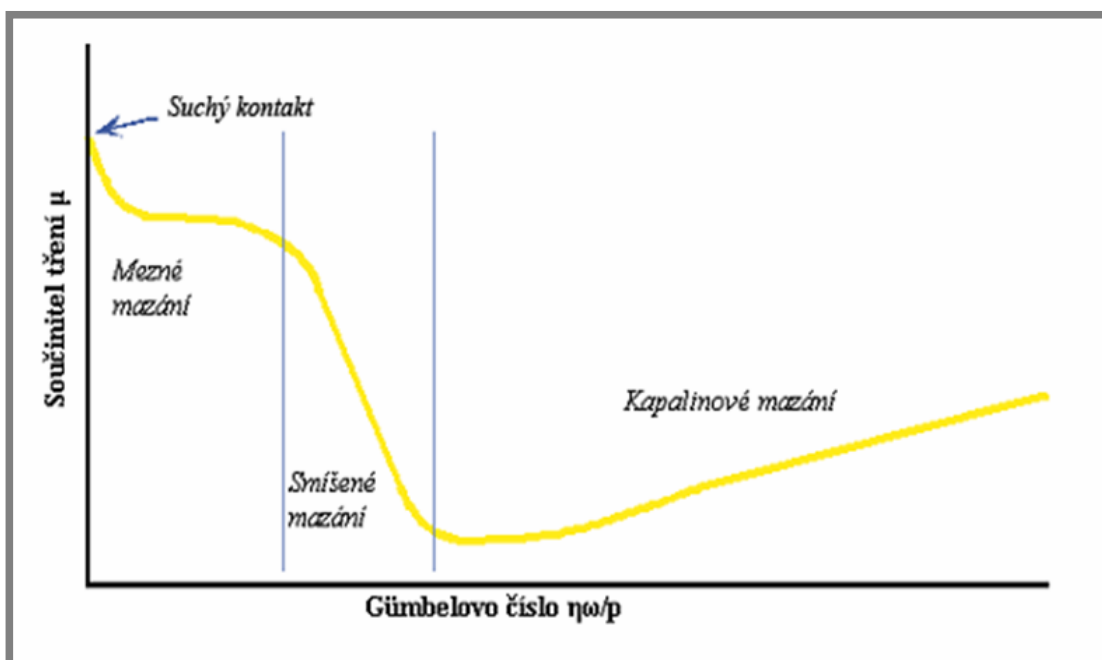
1.1 Režimy mazání

1.1

Mazání je proces, který zásadním způsobem ovlivňuje velikost tření a opotřebení třecích povrchů v relativním pohybu. Mazání je spojeno s přítomností maziva, které slouží primárně k oddělení a ochraně třecích povrchů. Mazivo však zastává celou řadu dalších funkcí, například odvod tepla, odplavení volných částic vzniklých opotřebením a jiné.

Z hlediska způsobu oddělení třecích povrchů rozeznáváme dva základní druhy tření (mazání) a to tření suché a tekutinové. Při suchém mazání dochází k přímé interakci mezi třecími povrchy. Kdežto při tekutinovém mazání dochází k oddělení třecích povrchů spojitou vrstvou viskózní tekutiny (kapalinou, nebo plynem) [3].

Jednotlivé režimy mazání můžeme rozlišovat podle Gümbelova čísla. Gümbelovo číslo je bezrozměrná veličina daná součinem: $\eta \cdot \omega / p$, kde η je dynamická viskozita, ω je úhlová rychlost a p je tlak. Se zvyšující se hodnotou Gümbelova čísla dochází k přechodu od suchého mazání do oblasti mezního, dále do oblasti smíšeného mazání, až ke kapalinovému mazání. Přechody mezi jednotlivými režimy mazání mohou být znázorněny pomocí Stribeckovy křivky. Stribeckova křivka (obr.2.) vyjadřuje závislost Gümbelova čísla na součiniteli tření [3,4].



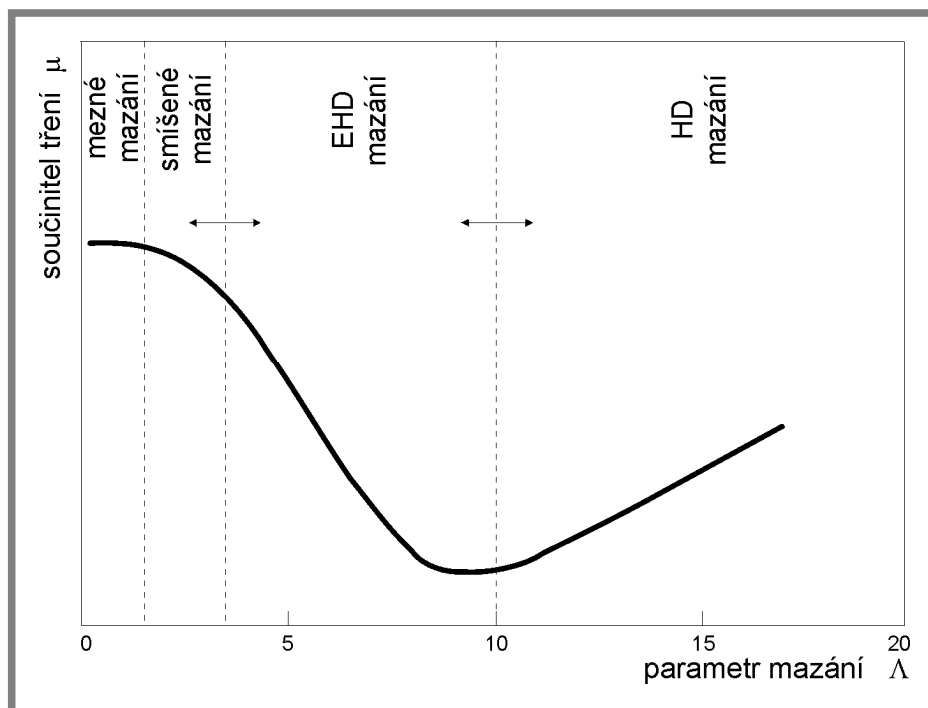
Obr.2 Stribeckova křivka [2]

Dalším významným parametrem z hlediska režimů mazání je parametr mazání [4]. Parametr mazání je definován jako

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

kde $h_{\min}$ je minimální tloušťka mazacího filmu, R_{red} je redukovaná drsnost třecích povrchů a R_{a1} a R_{a2} jsou střední aritmetické odchylky profilů třecích povrchů. Závislostí součinitele tření μ na parametru mazání Λ (obr.3) je možné popsat následující režimy mazání:

- mezné mazání
- smíšené mazání
- elastohydrodynamické mazání
- hydrodynamické mazání



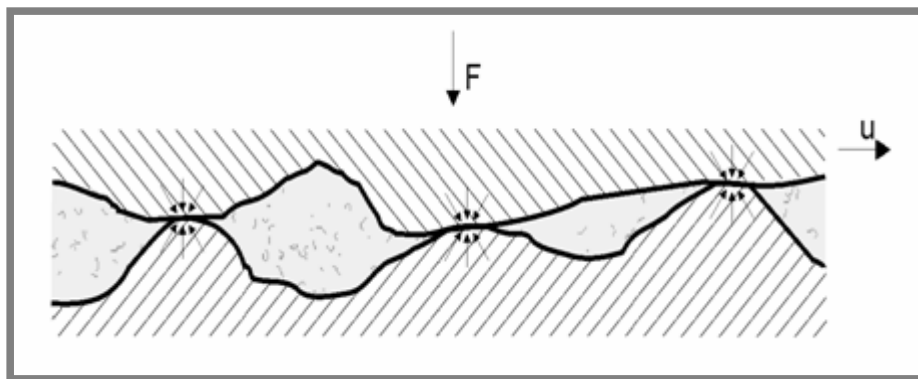
Obr.3 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ [4]

1.1.1 Mezné mazání

Za podmínek vysokého zatížení a nízkých rychlostech třecích povrchů dochází k meznému mazání. Při mezném mazání jsou si třecí povrchy natolik blízko, že k interakci jejich povrchových nerovností brání již jen mezná vrstva maziva. Mezný film vzniká fyzikální adsorpcí, chemisorpcí či chemickými reakcemi maziva s třecími povrchy. Mezný film má odlišnou strukturu a vlastnosti maziva i třecích povrchů.

1.1.2 Smíšené mazání

Při velkém zatížení, změnách směru pohybu a při relativně malých rychlostech třecích povrchů dochází k smíšenému mazání. Smíšené mazání je typické nedokonalým oddělením třecích povrchů vrstvou maziva a tedy dochází k bezprostřednímu styku mezi nerovnostmi třecích povrchů. Jedná se tedy o kombinaci mezného mazání v místě interakcí nerovností třecích povrchů a kapalinového mazání ve zbylých částech kontaktu (obr.4).

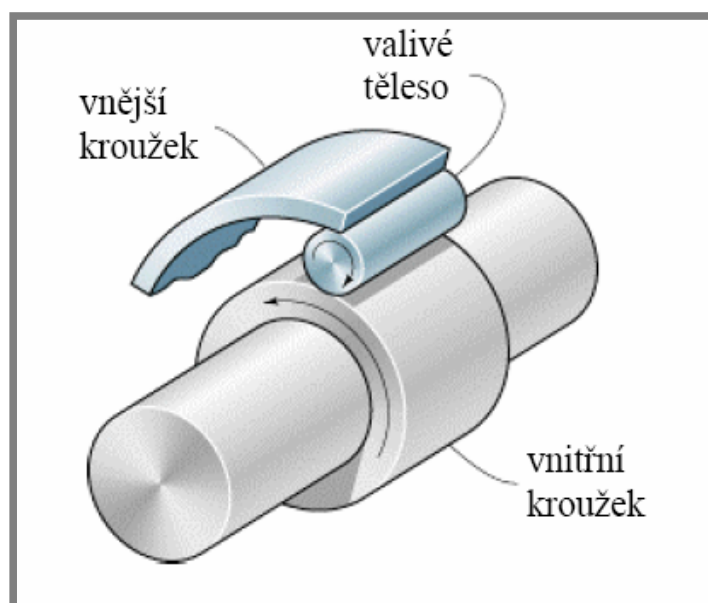


Obr.4 Smišené mazání [4]

1.1.3 Elastohydrodynamické mazání

1.1.3

K elastohydrodynamickému (EHD) mazání dochází zpravidla mezi velmi zatíženými, nekonformně zakřivenými povrchy (obr.5) ve vzájemném pohybu. Elastohydrodynamický režim mazání je druh kapalinového mazání, při kterém dochází k elastické deformaci třecích povrchů řádově stejné velikosti, jako je tloušťka hydrodynamického mazacího filmu.

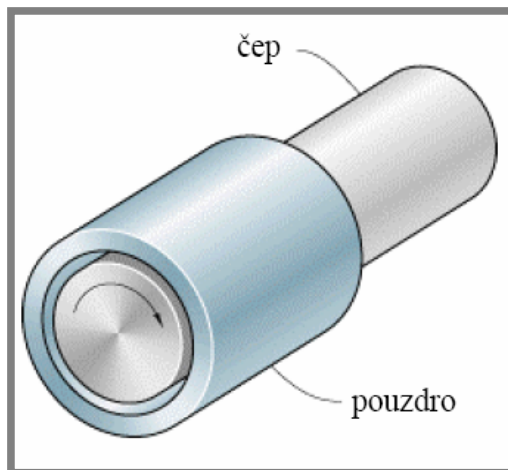


Obr.5 Nekonformní povrch [5]

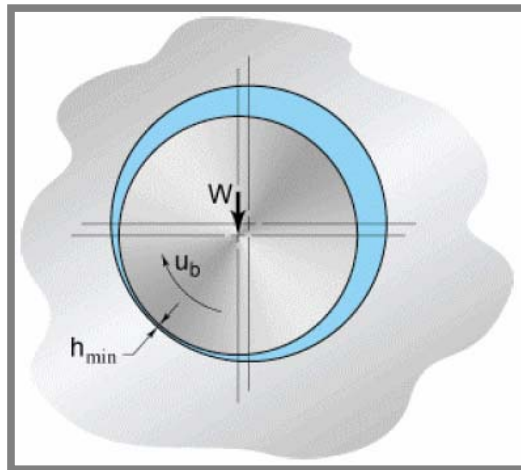
1.1.4 Hydrodynamické mazání

1.1.4

O hydrodynamickém mazání hovoříme v případě konformních povrchů (obr.6), za podmínek vysokých rychlostí a relativně malých zatíženích. Při hydrodynamickém mazání (obr.7) jsou od sebe třecí povrchy plně odděleny souvislou vrstvou maziva.



Obr. 6 Konformní povrch[5]



Obr. 7 Hydrodynamické mazání[5]

1.2 Tření a opotřebení třecích povrchů

Nejmenší hodnoty součinitele tření a velikosti opotřebení třecích povrchů je dosahováno při elastohydrodynamickém mazání. Avšak u většiny strojů dochází při rozběhu k postupnému přechodu od mezního mazání, přes smíšené, až k elastohydrodynamickému mazání. Z tohoto důvodu je vedena snaha snížit tření a opotřebení v režimech mezního a smíšeného mazání, ale také snaha rozšířit pásmo elastohydrodynamického mazání. Zmíněné snahy se projevují posunem Stribeckovy křivky a je jich dosahováno několika způsoby:

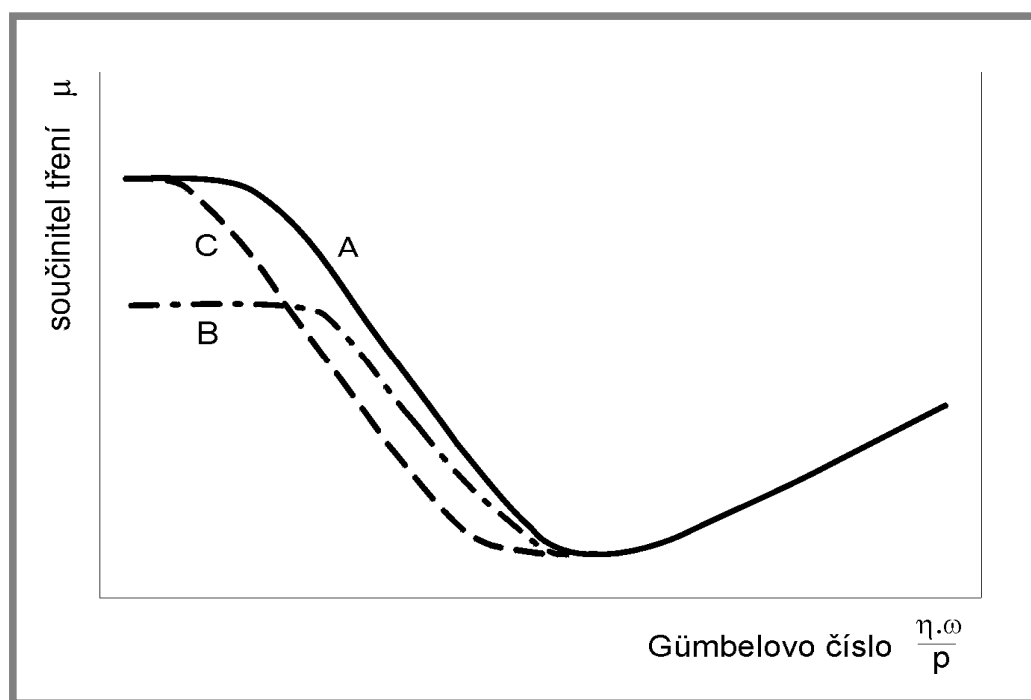
a) snížení drsnosti třecích povrchů

Jednou ze základních cest je snížení drsnosti třecích povrchů, avšak tato cesta není vždy dostupná ať už z hlediska vhodných dokončovacích metod obrábění, či nákladů na výrobu.

b) použití zušlechťujících přísad

Prakticky každé mazivo dnes obsahuje celou řadu zušlechťujících přísad. Zušlechťující přísady obecně pomáhají vytvářet mezní film snižující tření a opotřebení třecích povrchů čímž posouvají Stribeckovu křivku. Z hlediska typu vytvářeného mezního filmu rozlišujeme tři základní typy [4]:

- Zušlechťující přísady napomáhající vytvářet mezní film ovlivňující drsnost třecích povrchů
- Zušlechťující přísady napomáhající vytvářet mezní film charakteru pevné a hladké vrstvy (křivka B, obr.8)
- Zušlechťující přísady napomáhající vytvářet mezní film charakteru několika nanometrů tlusté vrstvy vysoce viskózní tekutiny (křivka C, obr.8)



Obr.8 Stribeckova křivka při použití různých maziv [4]:

- A) Mazivo bez přísad
- B) Mazivo s přísadami pomáhajícími vytvářet pevný mezný film
- C) Mazivo s přísadami pomáhajícími vytvářet kapalný mezný film

Existují i další způsoby jak ovlivnit pásma jednotlivých režimů mazání. Jedním z nich je v poslední době zvláště diskutovaná a aplikovaná cílená modifikace topografie třecích povrchů. Z tohoto důvodu bude následující kapitola věnována právě cílené modifikaci topografie třecích povrchů.

1.3 Cílená modifikace topografie třecích povrchů

1.3

Modifikací topografie třecích povrchů rozumíme vytvoření soustavy mikro-nerovností s cílem zlepšit tribologické vlastnosti mazaného kontaktu. Modifikaci topografie třecích povrchů lze rozdělit podle zakřivení třecích povrchů na modifikaci topografie nekonformních a konformních povrchů. Modifikace topografie konformních povrchů je již řadu let využívána v průmyslové praxi a zdá se být dostatečně prozkoumána. Otázka nekonformně zakřivených povrchů je stále otevřená a zabývá se jí celá řada výzkumných týmů po celém světě. Z uvedeného důvodu budou konformní povrchy zmíněny jen okrajově a důraz bude kladen na nekonformní povrchy. Budou také nastíněny technologie cílené modifikace topografie třecích povrchů a jejich vliv na velikost tření a opotřebení.

1.3.1 Konformní povrchy

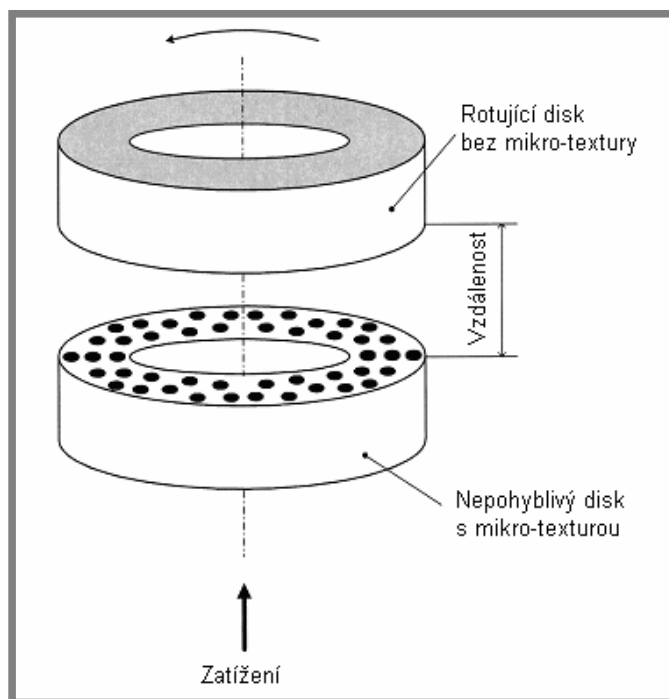
1.3.1

Mnoho rozličných metod a postupů modifikace topografie třecích povrchů bylo zkoumáno a použito k vytvoření mikro-textury za účelem snížení tření a opotřebení [6]. Z nich nejpoužívanější je technologie dnes nazývána jako „Laser Surface Texturing“, zkráceně LST [7]. LST technologie využívá extrémní rychlosti laseru,

kteřá umožňuje krátké výrobní časy modifikovaných povrchů. Metoda LST je rovněž šetrná k životnímu prostředí a umožňuje velmi dobrou kontrolu tvaru a velikosti mikro-důlků. Laser může bez problémů zpracovávat materiály jako je kalená ocel, keramika a polymery.

Při výzkumu vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů bylo zjištěno, že textura tvořená mikro-důlky může snížit tření a opotřebení třecích povrchů. Toto zlepšení tribologických vlastností je připisováno funkci mikro-důlku, který může sloužit jednak jako mikro-hydrodynamické ložisko při kapalinovém nebo smíšeném mazání, jako mikro-zásobník maziva při hladovění a v neposlední řadě jako mikro-kapsa zachycující volné částice, vzniklé následkem opotřebení třecích součástí.

Při styku konformních povrchů nastává převážně hydrodynamické mazání, ale se změnou provozních podmínek může docházet i ke smíšenému a meznému mazání. Snaha o zlepšení tribologických vlastností při styku konformních povrchů vedla k aplikaci a výzkumu cílené modifikace topografie třecích povrchů. Bylo pozorováno, že při vytvoření pole kruhových mikro-důlků došlo k rozšíření pásma hydrodynamického režimu mazání a také bylo významně redukováno tření při mezném a smíšeném mazání. Výzkum ukázal, že zásadní vliv na chování tření a opotřebení má tvar, hloubka a hustota mikro-důlků [8]. Použití mikro-textury s vhodně zvolenými parametry mikro-důlků může vést i k několikanásobnému zvýšení životnosti. Například měření provedené izraelskou petrochemickou společností prokázala, že mechanické těsnění (obr.9) v čerpadle s upravenou texturou vydrželo čtyřikrát déle než původní mechanické těsnění [7]. Dalšími příklady využití cílené modifikace textury na konformních površích jsou například vložky válců spalovacích motorů a pístní kroužky.

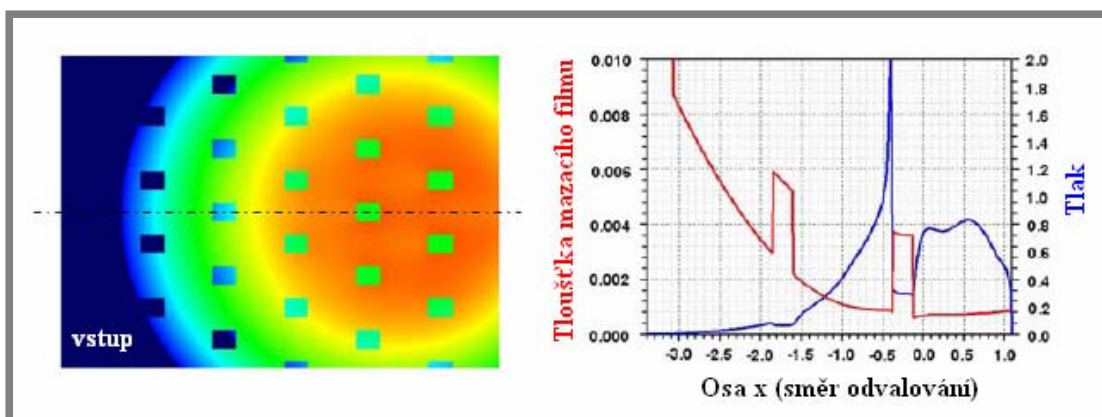


Obr.9 Mechanické těsnění [7]

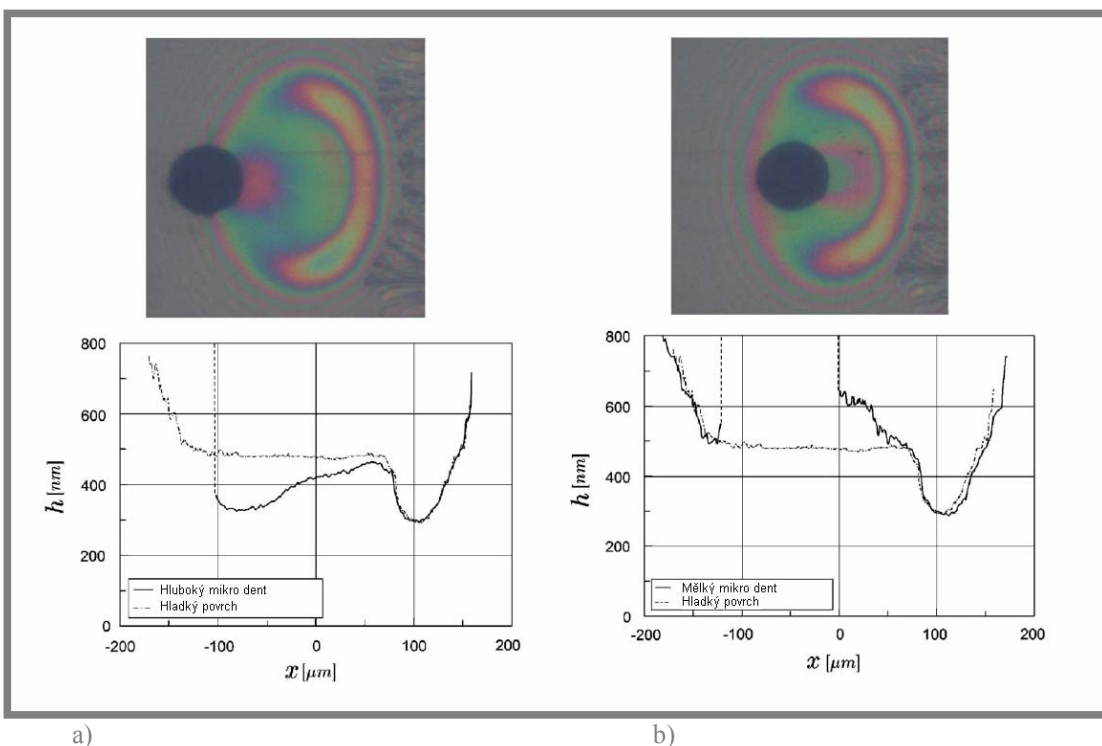
1.3.2 Nekonformní povrchy

Při kontaktu nekonformně zakřivených třecích povrchů se nejčastěji setkáváme s elastohydrodynamickým nebo smíšeným režimem mazání. Z tohoto důvodu byl výzkum zaměřen na tyto režimy mazání.

Teoretickými studiemi bylo prokázáno, že tvar, hustota a hloubka mikro-nerovností mají zásadní vliv na dosažené tribologické vlastnosti. N. Ren a kol. [9] ukázali, že z hlediska průměrné tloušťky mazacího filmu se jako nejvhodnější tvar se jeví úzké a krátké mikro-rýhy orientované kolmo na směr pohybu třecího povrchu. Při jejich aplikaci bylo nejvíce redukováno tření (obr.10). Tyto závěry byly potvrzeny experimentálními studiemi, které využívaly kruhové mikro-důlky o různém průměru a hloubce.

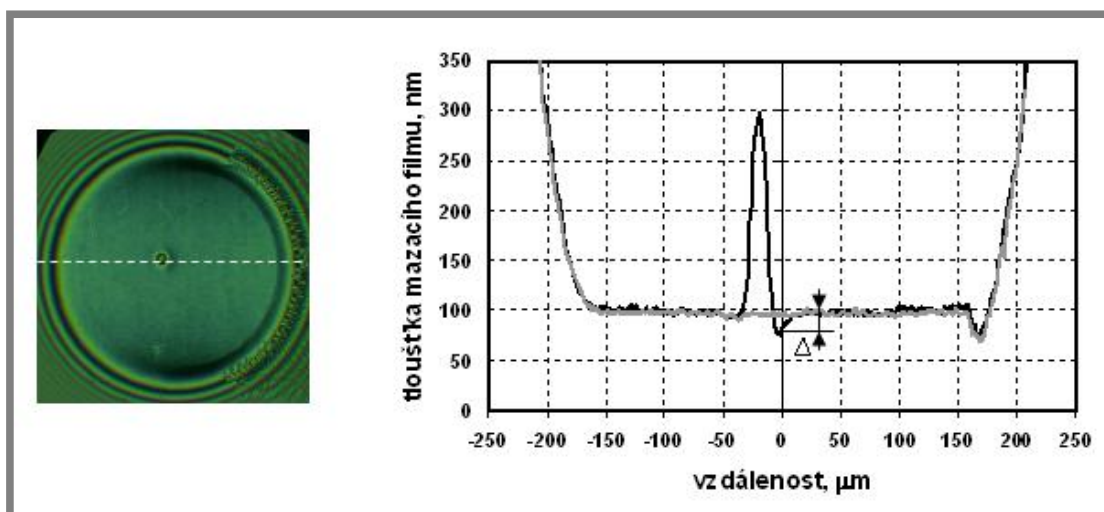


Obr.10 Vliv cílené modifikace topografie na tloušťku mazacího filmu a tlak v mazacím filmu [9]

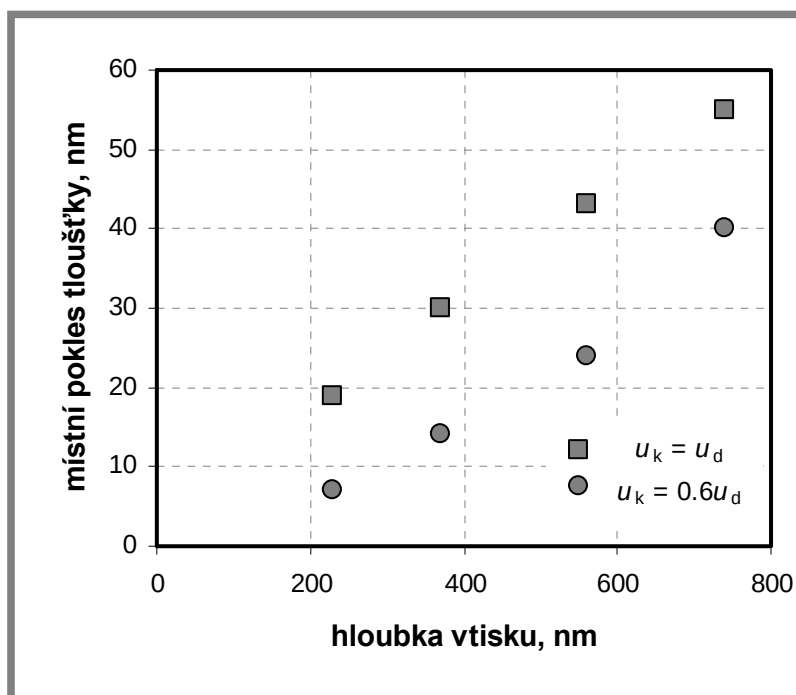


Obr.11 Vliv hlubokého a) mělkého; b) hlubokého mikro-důlku na tloušťku mazacího filmu [10]

Výsledky experimentů ukázaly, že mělké kruhové mikro-důlky o menších průměrech mohou pozitivně ovlivňovat tření a opotřebení. Viskozita oleje zachyceného v mikro-důlku prudce roste při průchodu kontaktem a mazivo je tak uzavřeno v mikro-důlku. Tento vysoce viskózní mazací film je vytlačován ven z mikro-důlku v důsledku rozdílných rychlostí třecích povrchů, elasticky deformuje kontaktní povrchy a tím ovlivňuje tloušťku mazacího filmu [10]. Zlepšení tribologických vlastností bylo pozorováno zejména za provozních podmínek, kdy se povrch s mikro-texturou pohybuje rychleji než povrch bez textury [11,12]. Naopak při stejných rychlostech povrchů, nebo v případech kdy se povrch bez mikro-textury pohybuje rychleji než povrch s texturou, dochází i k místnímu poklesu tloušťky mazacího filmu (obr. 12 a 13).



Obr.12 Místní pokles tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-důlku při plném valení [11]



Obr.13 Pokles tloušťky mazacího filmu Δ ; u_k – rychlost kuličky s texturou, u_d – rychlost skleněného kotouče [11]

Velikost této redukce tloušťky filmu maziva roste s rostoucí hloubkou mikro-důlků [11] a hluboké mikro-důlky tak mohou způsobit i kolaps mazacího filmu (obr.11) [10]. Avšak místní snížení tloušťky mazacího filmu není jediným negativním faktorem, který musí být zohledněn. Přítomnost mikro-důlků v kontaktní oblasti výrazně ovlivňuje rozložení tlaku v mazacím filmu a tím i velikost podpovrchového napětí, což může vést ke kontaktní únavě třecích povrchů [13]. Právě z tohoto důvodu zůstává otázka modifikace nekonformních povrchů stále diskutovanou problematikou.

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Z dosavadního výzkumu cílené modifikace topografie nekonformních třecích povrchů vyplývá, že po její aplikaci může být dosaženo pozitivního vlivu na tření a opotřebení třecích povrchů. Tohoto pozitivního vlivu na tření a opotřebení je dosahováno nárůstem tloušťky mazacího filmu. Nebyl však pozorován pouze nárůst tloušťky mazacího filmu, ale také redukce mazacího filmu. Rozhodující vliv na nárůst i redukci mazacího filmu měla hloubka a tvar mikro-textury. Bylo pozorováno, že redukce tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-textury rostla s rostoucí hloubkou mikro-textury [11]. Hluboké mikro-důlky tak způsobovaly i kolaps mazacího filmu [10]. V dosavadních studiích však nebyl popsán průběh mikro-textury celou kontaktní oblastí. A to proto, že dosavadní studie používaly k experimentálním studiím 3CCD kameru, která není vhodná k záznamu průchodu mikro-textury celou kontaktní oblastí. Avšak k objasnění nárůstu i redukce tloušťky mazacího filmu je zapotřebí zaznamenat a následně vyhodnotit průběh mikro-textury celou kontaktní oblastí.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

3

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit vliv mikro-textury na tloušťku mazacího filmu při jejím průchodu celou kontaktní oblastí mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy. To předpokládalo použití vysokorychlostní CMOS kamery pro studium utváření mazacího filmu za podmínek čistého valení i prokluzu třecích povrchů.

K dosažení zmíněného cíle bylo nutné provést následující dílčí cíle:

- Vytvoření mikro-textury
- Série experimentů pro čisté valení
- Série experimentů při prokluzu s kladným koeficientem prokluzu
- Série experimentů při prokluzu se záporným koeficientem prokluzu
- Vyhodnocení sérií experimentů

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Řešení zmíněného problému spočívalo ve vytvoření mikro-textury na vybraném vzorku, experimentálním měření a jeho vyhodnocení.

K vytvoření mikro-textury byly k dispozici dvě zařízení. Jednak nanosekundový Nd:YAG laser Ústavu fyzikálního inženýrství a jednak zařízení s Rockwellovým indentorem, které bylo k dispozici v laboratoři tribologie Ústavu konstruování.

Experimentální měření bylo možné realizovat na experimentálním zařízení v laboratoři tribologie Ústavu konstruování. K záznamu experimentálního měření je použita vysokorychlostní CMOS kamera. Tato kamera umožnila zaznamenat dostatečný počet snímků k vyhodnocení vlivu mikro-textury na tloušťku mazacího filmu, při jejím průchodu celou kontaktní oblastí.

Záznamy z experimentů bylo možné vyhodnotit díky softwarovému vybavení tribologické laboratoře a tak posoudit vliv mikro-textury na tloušťku mazacího filmu při průběhu mikro-textury kontaktní oblastí.

5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

5

5.1 Cílená modifikace topografie třecích povrchů

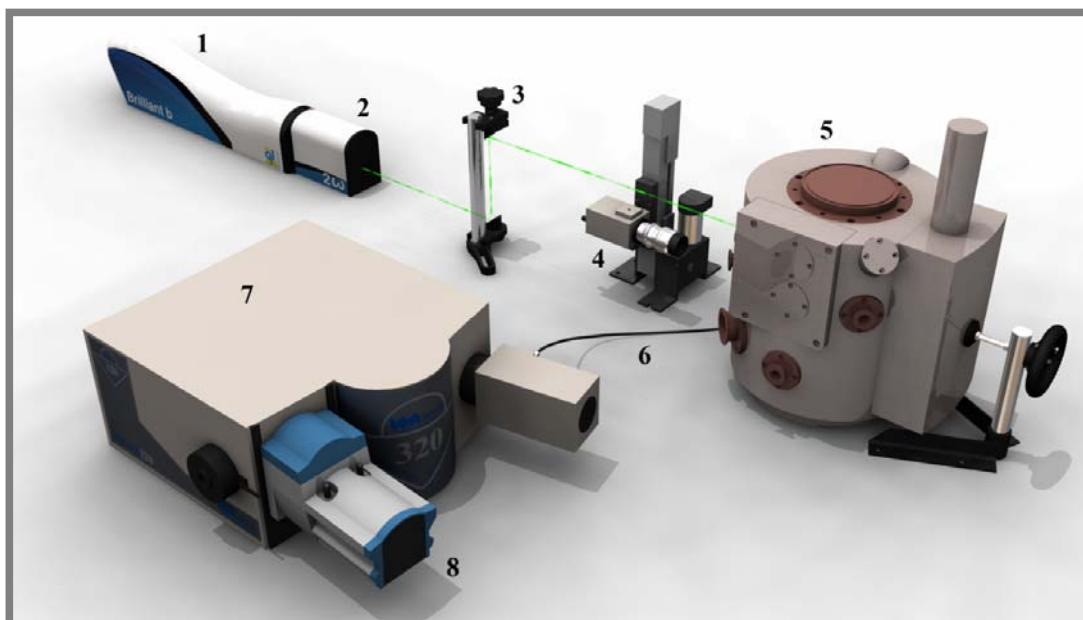
5.1

K vytváření požadované mikro-textury na třecích površích bývají využívány femtosekundové lasery [10], avšak dostupnost femtosekundových laserů je značně omezená, z hlediska jejich vysoké ceny a vytiženosti. Tudíž nebylo možné provést časově náročné experimenty na zjištění vhodného nastavení femtosekundového laseru k získání vhodného tvaru geometrie mikro-důlků a následného vytvoření pole mikro-důlků. Proto byl k vytváření použit nanosekundový laser s tím, že v případě neúspěchu budou mikro-důlky vytvořeny pomocí Rockwellova identoru.

5.1.1 Vytváření důlků pomocí nanosekundového laseru

5.1.1

K vytvoření pole mikro-důlků bylo použito experimentální zařízení pro laserovou spektroskopii LIBS/LIFS v Laboratoři laserové spektroskopie a metod holografického zobrazování na Ústavu fyzikálního inženýrství. Uspořádání experimentálního zařízení je uvedeno na obr.14. K vytvoření mikro-důlků byl použit pulzní Nd:YAG laser (Brilliant B, Quantel, Francie) pracující na druhé harmonické frekvenci (532 nm), šířka pulzu laseru ~5 ns, s průměrem laserového svazku 8 mm a opakovací frekvenci 10 Hz. Zaostření laserového paprsku umožnily křemenné čočky s ohniskovou vzdáleností 16 a 30 mm. Vzorek byl umístěn v ablační komoře. Ablace probíhala za atmosférického tlaku na vzduchu. Zaostření a posun vzorku byl umožněn pomocí translátoru (s přesností 2 μm ve směru x, y, z). Správné ustavení vzorku do ohniskové vzdálenosti fokusačního objektivu a ablační procesy byly kontrolovány CCD kamerou [14].



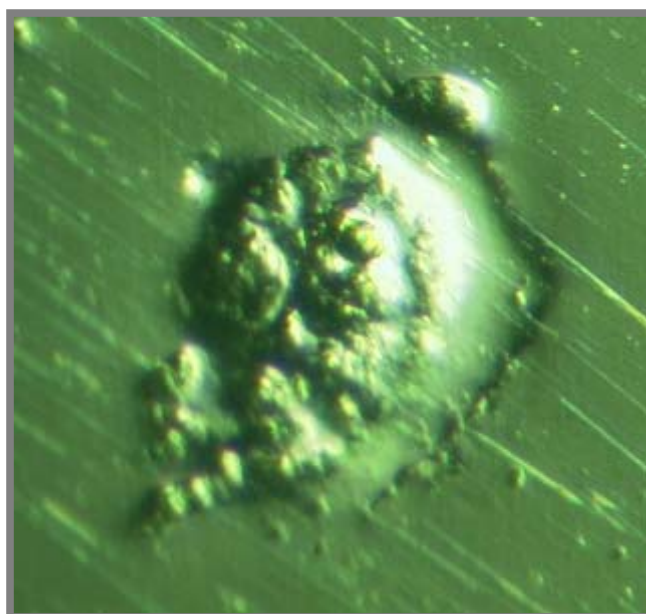
Obr.14 Experimentální uspořádání pro vytváření mikro-důlků nanosekundovým laserem: 1- Nd:YAG laser, 2 – modulátor druhé harmonické frekvence, 3 – periskop, 4 – CCD kamera, 5 – ablační komora, 6 – optický kabel, 7 – monochromátor, 8 – ICCD detektor [14]

Byly provedeny vstupní experimenty s cílem určit vhodné nastavení laseru k získání mikro-důlků o patřičné velikosti a geometrii. Jako vzorek byla použita ocelová kulička AISI 52100 o průměru 25,4 mm s drsností povrchu R_a 0,01. K určení vhodného nastavení laseru byla nastavována energie laserového svazku a počet pulzů.

V průběhu první série měření s cílem vytvořit mikro-důlky pomocí laseru byla nastavována energie laserového svazku 100 mJ, 55 mJ a 22 mJ pro 1, 2 a 3 pulzy (tab.1). Při zmíněném nastavení došlo pouze k ovlivnění zasaženého místa laserem, avšak nedošlo k ablaci materiálu a vytvoření mikro-důlků nebylo dosaženo (obr.15).

Tab.1 Energie laserového svazku a počet pulzů jednotlivých měření

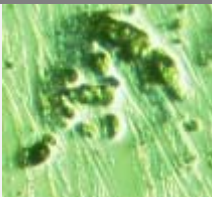
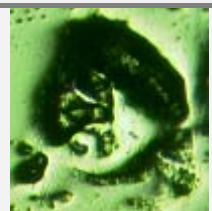
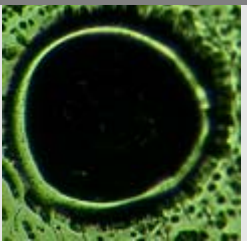
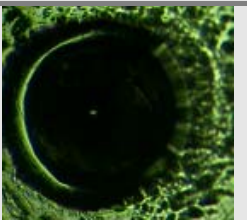
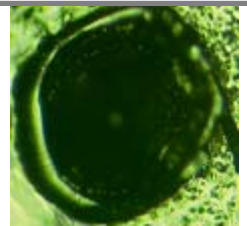
Energie laserového svazku [mJ]	100			55			22		
Počet pulzů [-]	1	3	5	1	3	5	1	3	5

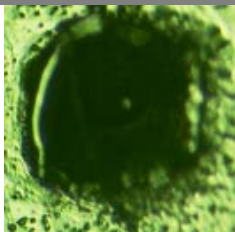
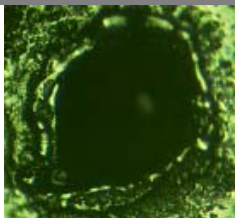


Obr. 15 Místo zasažené jedním laserovým pulzem o energii 22 mJ po přešetření

V další sérii měření bylo použito většího počtu pulzů při různé energii laserového svazku, podrobně v tab.2. V tomto případě došlo v některých případech k ablaci v místě zasaženém laserem, jak je možné vidět na obrázcích v tab.2.

Tab.2 Snímky vzorku zasaženého laserem při dané energii laserového svazku a počtu pulzů

Energie jednoho pulzu [mJ]	Počet pulzů [-]	Snímek zasaženého místa
100	20	
	50	
	100	
200	20	
	50	
	100	
50	100	

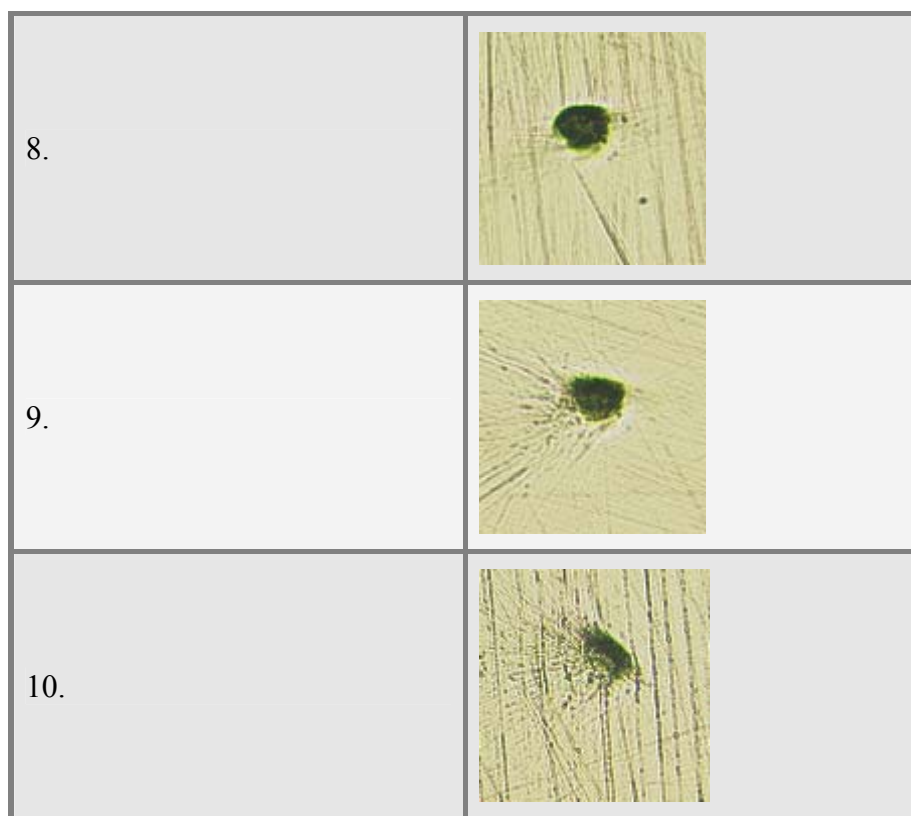
50	200	
	500	

S ohledem na vhodný tvar byl vybrán mikro-důlek, vytvořený zasažením povrchu vzorku 50 pulzy laserového svazku o energii 200 mJ. Jelikož mikro-důlky vytvořené ablací materiálu zasaženého laserovým paprskem mají rozdílnou odrazivost od okolního povrchu, nelze stanovit jejich geometrii pomocí optických měřicích metod [15]. Je však možné změřit průměr mikro-důlku na povrchu vzorku. Naměřená hodnota průměru mikro-důlku byla prvním důkazem o nevhodnosti použitého laseru. Průměr mikro-důlku dosáhl 175 μm , kdežto průměry mikro-důlků využívaných ke snížení tření a opotřebení ve styku nekonformních povrchů se pohybují pod hodnotou 50 μm [11,12,15]. To je dáno požadavkem umístit více mikro-důlků do kontaktní oblasti jejíž průměr v experimentálním zařízení pro studium mazacích filmů je okolo 350 μm .

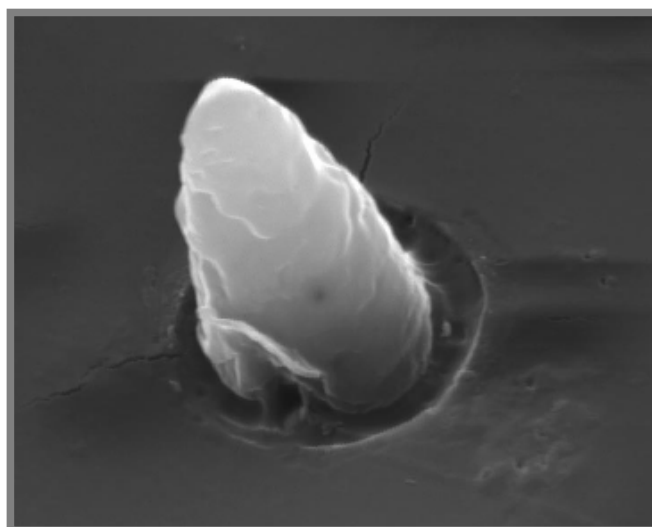
Pro posouzení tvaru mikro-důlku byl třecí povrch s mikro-důlkem podroben opakovanému leštění (celkem v deseti krocích) a v průběhu pozorován tvar geometrie mikro-důlku (tab.3). Leštění bylo realizováno diamantovou pastou s velikostí zrn 0 - 1 μm . Jedná se o zdlouhavou a nepřesnou technologii k dosažení cíle, nicméně postačila k prvotnímu určení tvaru geometrie mikro-důlku.

Tab.3 Vybrané snímky z postupného výbrusu mikro-důlku vytvořeného laserovým paprskem o energii 200 mJ a 50 pulzy

Krok leštění	Snímek mikro-důlku po leštění
2.	



Bylo zjištěno, že tvar geometrie mikro-důlku vytvořeného použitým laserem nebyl vhodný a to z hlediska nehomogenního dna mikro-důlku. Dno mikro-důlku (tab.3 – 10.krok leštění) bylo obdobné jako u nevydařených pokusů o vytvoření mikro-důlků (tab.2 – 100 mJ při 20 pulzech). To je zřejmě způsobeno nevhodnou geometrií laserového svazku, jak ukázali mimo jiné Dumitru a kol [16]. Při optimálním tvaru laserového svazku je totiž možné získat mikro-důlek vhodného tvaru (obr.16). S dostupným typem laseru se to však ukázalo jako nemožné a další vytváření mikro-důlků bylo realizováno pomocí Rockwellova vnikacího tělíska.



Obr.16 Negativ mikro-důlku [16]

5.1.2 Vytváření mikro-vtisků Rocwellovým vnikacím tělískem

Po vyhodnocení použitého pulzního Nd:YAG laseru jako nevhodného, byla k vytvoření mikro-textury využita aparatura s Rockwellovým vnikacím tělískem v laboratoři tribologie Ústavu konstruování. Zařízení vyniká zejména svojí jednoduchostí. Využívá mikroskop, kde je na místo objektivu umístěn přípravek s vnikacím tělískem společně s tenzometrickým snímačem. Vlastní vytvoření mikro-vtisku probíhá manuálním otáčením jemného posuvu mikroskopu. Jako vnikací tělísko byl použit diamantový kužel běžně využívaný při měření tvrdosti podle Rockwella, s vrcholovým úhlem 120° s poloměrem zaoblení špičky 0,2 mm. Vnikací tělísko je umístěno v přípravku s tenzometrickým snímačem, díky němuž byla přesně odečítána zatěžovací síla. Jako vzorek byla použita ocelová kulička AISI 52100 o průměru 25,4 mm s drsností povrchu $R_a 0,01$. Pro vytvoření mikro-vtisků byla zvolena zatěžná síla 6 N a 12 N. Síle 6 N přibližně odpovídá hloubka 470 nm a průměr 32 μm . Síle 12 N přibližně odpovídá hloubka 950 nm a průměr 45 μm [13]. Přehledně byla geometrie vtisků zapsána do tab.4. Rozteč mezi jednotlivými vtisky byla 75 μm .

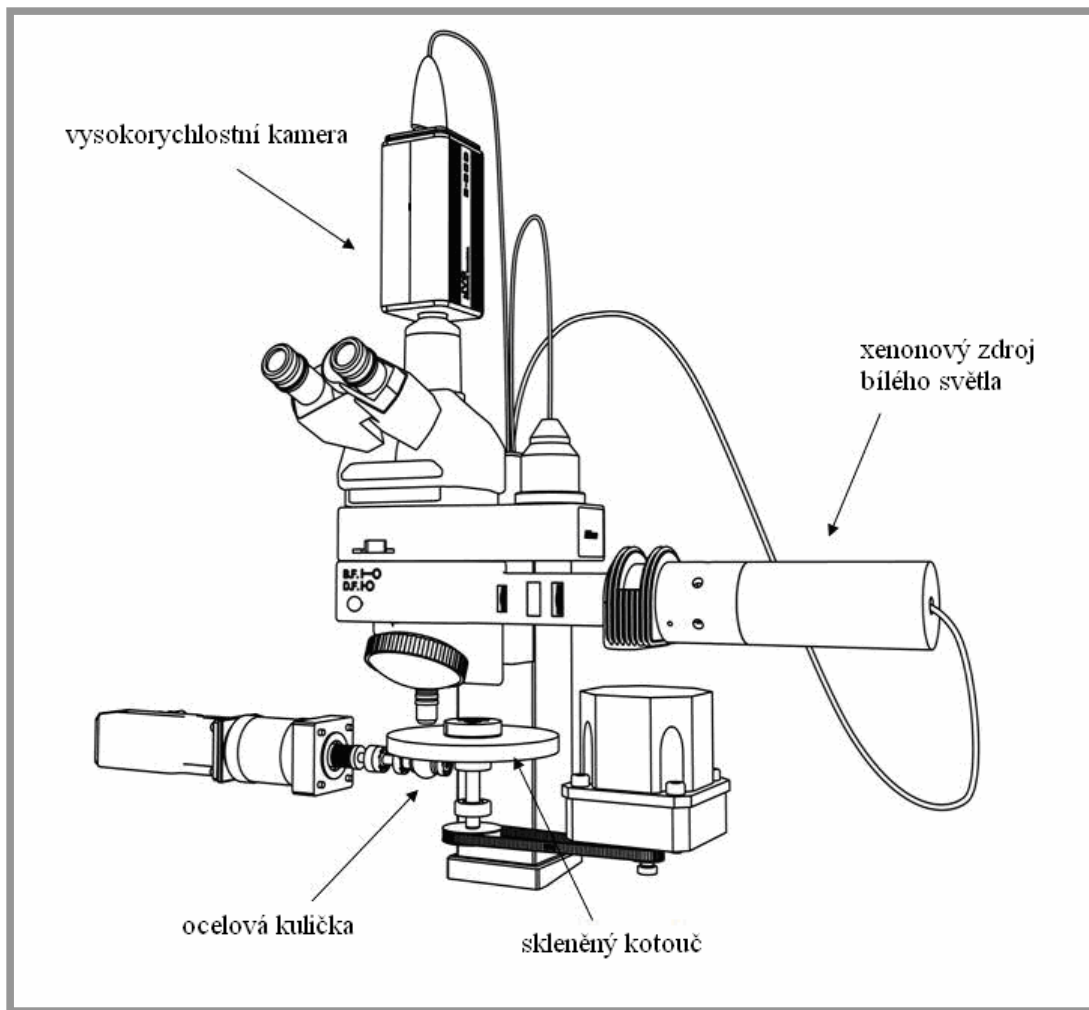
Tab.4 Geometrie vtisků

Síla [N]	Hloubka [nm]	Průměr [μm]
6	470	32
12	950	45

5.2 Vliv cílené modifikace topografie povrchu na mazací film

K tribologickým experimentům bylo použito experimentální zařízení (obr.3), které je k dispozici na Ústavu konstruování. V tomto tribometru je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou, kde osy rotace třecích povrchů jsou navzájem kolmé. Spodní plocha skleněného kotouče je pokryta polopropustnou vrstvou chrómu, zatím co horní plocha skleněného kotouče protiodrazivou vrstvou. Skleněný kotouč je umístěn na dvojzvrtné páce společně se závažím, čímž je zatěžován kontakt. Jak skleněný kotouč, tak ocelová kulička jsou nezávisle poháněny servomotory přes planetové převodovky, čímž je dosahována požadovaná velikost prokluzu [17].

Mazaný kontakt byl pozorován mikroskopem za pomoci světelného zdroje a vysokorychlostní kamery. Jako světelný zdroj byl použit xenonový zdroj bílého světla o výkonu 1 kW. Snímání kontaktu bylo zajištěno pomocí vysokorychlostní kamery X-Stream VISION XS-3 umožňující zaznamenávat 630 snímků za sekundu při rozlišení 1280x1024 pixelů. Ke stanovení tvaru mazacího filmu z chromatických interferogramů byla použita kolorimetrická interferometrie, měřicí metoda umožňující stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu s vysokou přesností (1 nm) a prostorovou rozlišitelností [18].



Obr.17 Experimentální zařízení [11]

Zásadním přínosem oproti předcházejícím studiím je použití vysokorychlostní CMOS kamery X-Stream VISION XS-3. Vysokorychlostní kamera snímá barevný obraz jedním čipem s Bayerovým filtrem. Bayerův filtr napodobuje chování lidského oka a propouští 25% červené, 50% zelené a 25% modré barvy čímž vzniká ztráta 2/3 informací o barvě. Většina vědeckých týmů zabývajících se výzkumem cílené modifikace topografie nekonformních třecích povrchů využívá tříčipové kamery CCD, neboli 3CCD kamery. Tyto kamery mají tři samostatné CCD čipy. Každý z CCD čipů je určen ke snímání jedné ze základních barev (červené, zelené, modré). Tímto způsobem je dosahováno výborné kvality snímků ve srovnání s jednočipovou kamerou. Avšak snímací frekvence těchto kamer se zdaleka nepřibližuje frekvenci vysokorychlostních CMOS kamer [19,20,21].

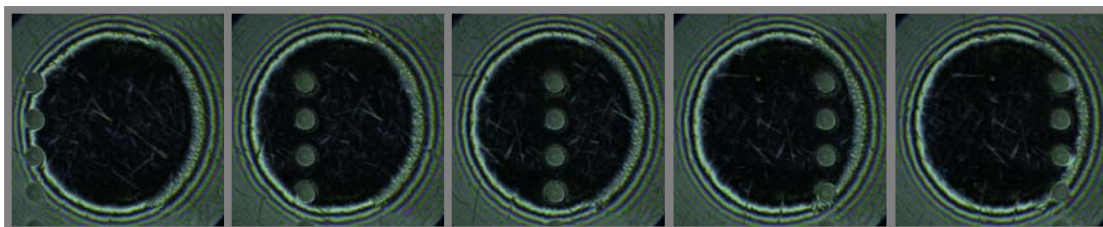
Synchronizace vysokorychlostní CMOS kamery s kuličkou byla provedena Ing. Petrem Svobodou. Takže bylo možné snímat konkrétní sekvenci při průchodu mikrovrtisků mazaným kontaktem [22].

Ve spolupráci s Ing. Petrem Svobodou byla provedena sada měření s cílem ukázat vliv povrchových nerovností na utváření tenkého mazacího filmu. Mazaný kontakt ve styku kuličky s vytvořenou mikro-texturou se skleněným kotoučem byl pozorován za použití vysokorychlostní CMOS kamery. Byl použit základový minerální olej o viskozitě 0,15 Pa.s, SUNOCO L.S. B/S. Při znázornění snímků kontaktní oblasti bylo

dodrženo pravidlo, že vstup do kontaktní oblasti je vždy na levé části snímku, výstup z kontaktní oblasti tudíž na pravé straně snímku. První polovina mikro-vtisku vstupující do kontaktní oblasti jako první, je označována jako čelo mikro-vtisku a druhá polovina vtisku jako zadní část mikro-vtisku. Bokem kontaktní oblasti jsou nazývány oblasti v blízkosti polohy minimální tloušťky mazacího filmu.

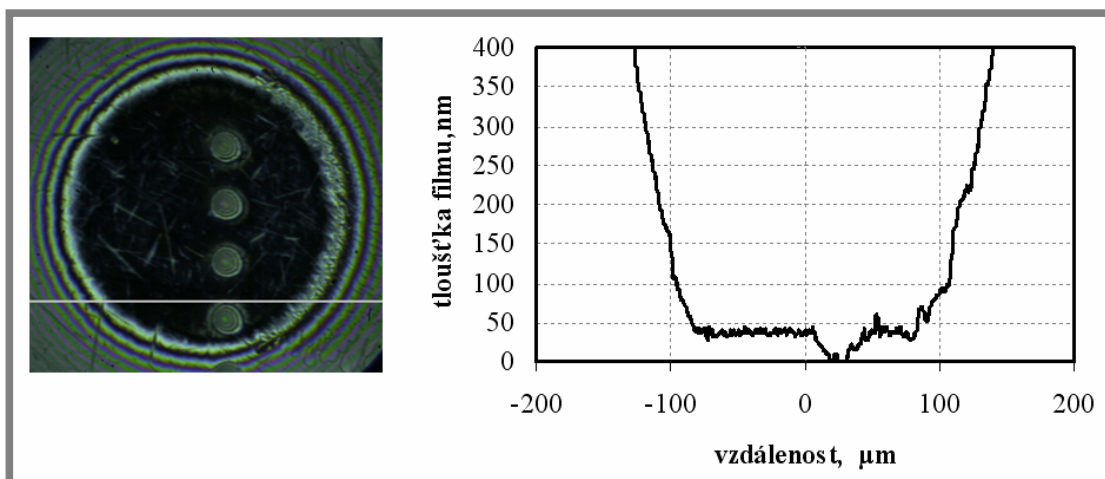
5.2.1 Průchod mikro-vtisků mazaným kontaktem za podmínek čistého valení

V první etapě experimentů byl studován vliv velikosti mikro-vtisků na tenký mazací film při čistém valení. O čistém valení hovoříme v případě, že se oba třecí povrchy pohybují stejnou rychlostí. Při studiu vlivu mikro-vtisků o hloubce 950 nm na tloušťku mazacího filmu bylo možné, díky vysokorychlostní CMOS kameře, pozorovat průchod řady mikro-vtisků celou kontaktní oblastí. Následně bylo možné vyhodnotit vliv mikro-vtisku na tloušťku mazacího filmu při jeho průchodu kontaktní oblastí. Vybrané snímky chromatických interferogramů jsou zobrazeny na obr.18.



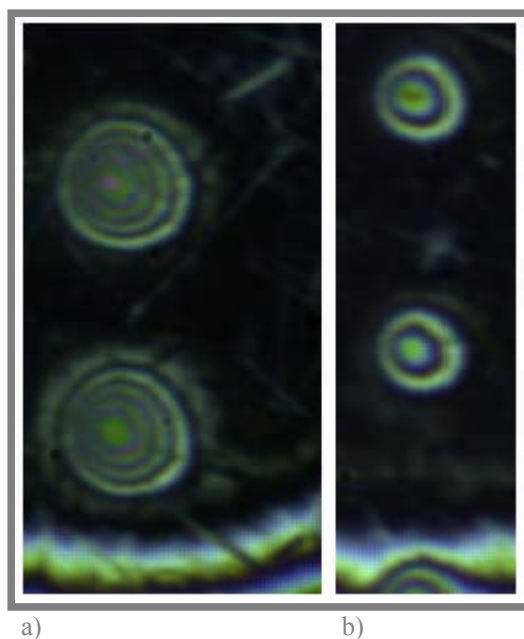
Obr.18 Chromatické interferogramy kontaktu za čistého valení $F=22\text{ N}$; $u=0,00177\text{ ms}^{-1}$; $f=440\text{ Hz}$; $\exp.=2272\text{ }\mu\text{s}$; rozlišení 1260×1024 ; hloubka mikro-vtisku 950 nm

V souladu s předchozími studiemi byla pozorována redukce tenkého mazacího filmu při průchodu mikro-vtisků kontaktní oblastí. V případě mikro-vtisků blízkých bokům kontaktní oblasti klesla tloušťka mazacího filmu v místě redukce až na nulovou hodnotu a docházelo tak k protržení mazacího filmu (obr.6). V případě prostředních mikro-vtisků byla redukce nižší a tloušťka mazacího filmu se pohybovala okolo 5 až 7 nm. Průměrná tloušťka tenkého mazacího filmu neovlivněného mikro-vtiskem odpovídala hodnotě 40-45 nm. Z čehož vyplývá, že pokles tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-vtisků může být až 45 nm.



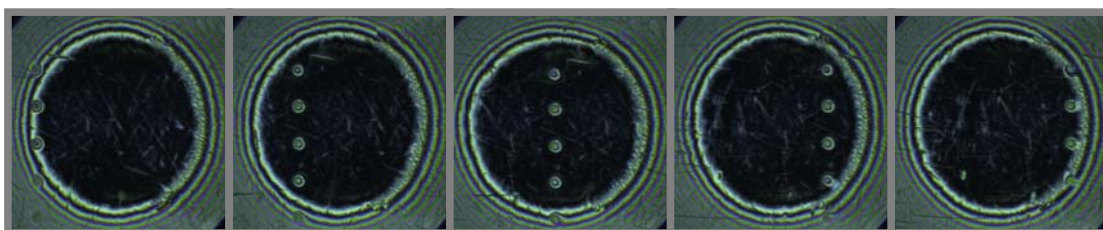
Obr.19 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm

Tvar oblasti s redukovanou tloušťkou mazacího filmu připomíná půlměsíc obepínající téměř celé čelo mikro-vtisku. Výjimku tvořily mikro-vtisky blízké boku kontaktní plochy, kde redukována plocha opisovala mikro-vtisk přibližně úhlem 270° (obr.20a). Tato redukce se vytvořila ihned po vstupu mikro-vtisku do kontaktní oblasti a zůstala nezměněná při průchodu kontaktem až do místa výstupu z kontaktní oblasti.

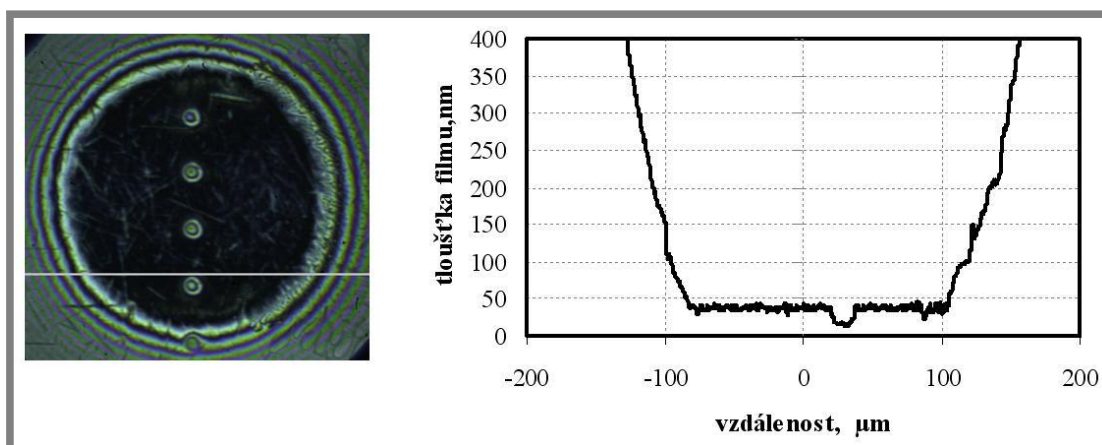


Obr.20 Detail ze snímků mikro-vtisku v kontaktní oblasti o hloubce a) 950 nm a b) 470 nm

Vzhledem ke skutečnosti, že v předcházejících studiích byl prokázán vliv hloubky mikro-vtisku na velikost redukce tloušťky mazacího filmu, byl i v této práci pozorován průchod mělkých mikro-vtisků mazaným kontaktem. Vybrané snímky chromatických interferogramů zachycené při průchodu řady mikro-vtisků o hloubce 470 nm kontaktní oblastí jsou zobrazeny na obr.21. Při vyhodnocení snímků byla opět pozorována redukce tloušťky mazacího filmu, avšak tloušťka mazacího filmu se pohybovala okolo 12 až 14 nm (obr.22) a nedošlo tedy k protržení mazacího filmu.



Obr.21 Chromatické interferogramy kontaktu za čistého valení $F=22$ N; $u=0,00177$ ms⁻¹; $f=440$ Hz; $\exp.=2272$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 470 nm



Obr.22 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm

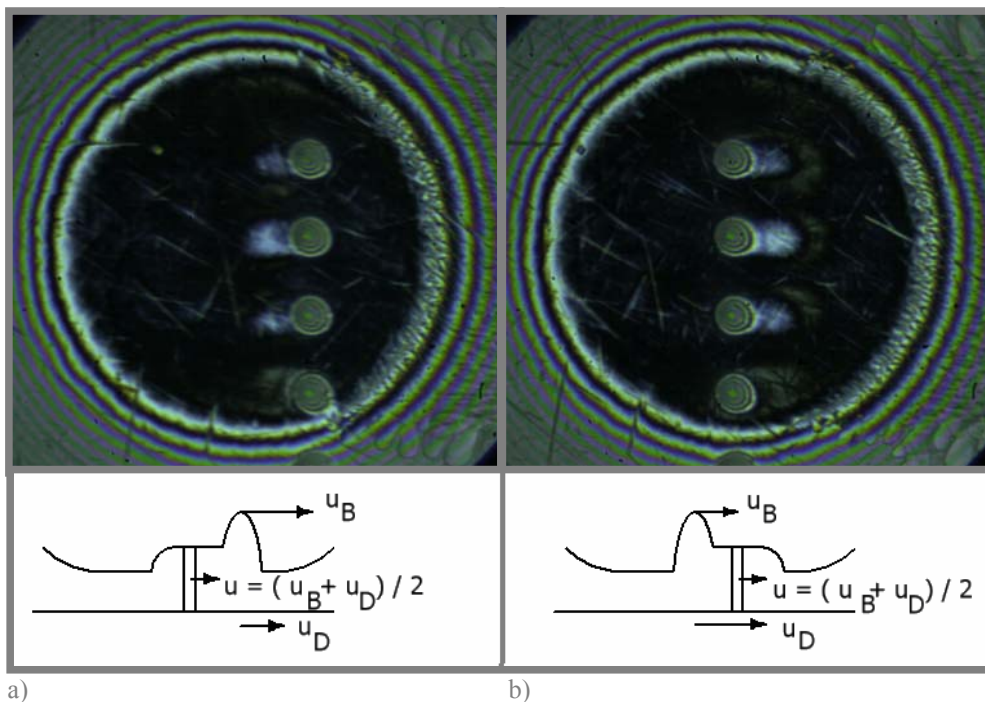
Uvedené výsledky experimentů získané za podmínek čistého valení potvrdily negativní vliv hlubokých mikro-vtisků, které mohou způsobit až protržení mazacího filmu. Dále byl ukázán i významný vliv umístění mikro-vtisku v kontaktní oblasti. Avšak nekonformní povrchy se zpravidla nenacházejí v čistém valení, ale v relativním prokluzu. Proto byly další experimenty zaměřeny na studium vlivu mikro-textury na tloušťku mazacího filmu mezi nekonformními povrchy pohybujícími se rozdílnými rychlostmi.

5.2.2 Vliv prokluzu na utváření mazacího filmu v okolí mikro-vtisků

V případě, že jsou rychlosti dvou po sobě se odvalujících třecích povrchů různé, hovoříme o prokluzu. Prokluz můžeme definovat pomocí parametru prokluzu

$$\Sigma = \frac{2(u_D - u_B)}{(u_D + u_B)} \quad (2)$$

kde u_D označuje rychlost skleněného kotouče v místě kontaktu a u_B označuje rychlost povrchu kuličky. Ze vztahu vyplývá, že pokud je koeficient prokluzu kladný pohybuje se skleněný kotouč rychleji než kulička. Pokud je koeficient prokluzu záporný pohybuje se kulička rychleji než skleněný kotouč. Při prokluzu třecích povrchů dochází k ovlivnění distribuce maziva. A to tak že mazivo zachycené v mikro-vtisku je z něj vytlačováno ven a buď zaostává nebo předbíhá mikro-vtisk rychlostí odpovídající velikosti střední aritmetické hodnoty rychlosti skleněného kotouče a rychlosti kuličky.

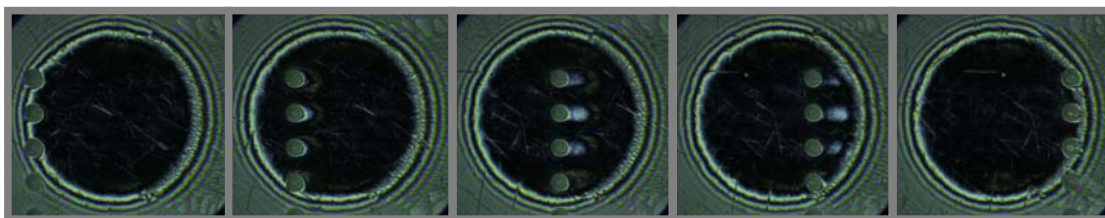


Obr.23 Tvar mazacího filmu v okolí mikro-vtisku při a) $\Sigma < 0$ a b) $\Sigma > 0$

V případě, že se kulička pohybuje rychleji než skleněný kotouč, můžeme pozorovat místní nárůst tloušťky mazacího filmu za mikro-vtiskem (obr.23a), zatímco v případě, že se skleněný kotouč pohybuje rychleji než kulička mazivo vytlačeno z mikro-vtisku ovlivňuje oblast před mikro-vtiskem (obr.23b).

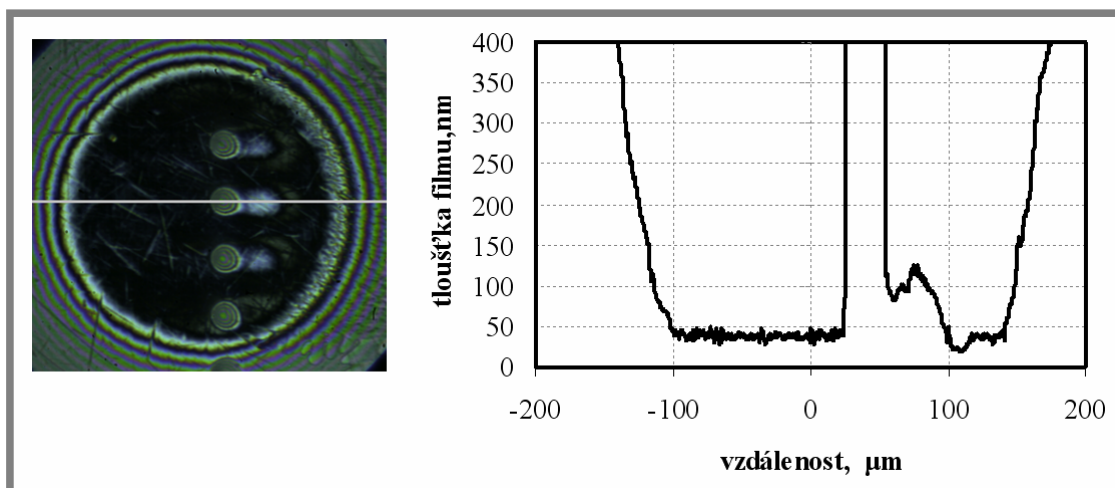
Z výsledků získaných za podmínek čistého valení je zřejmé, že hluboké mikro-vtisky (950 nm) způsobují protržení mazacího filmu. Z tohoto důvodu bylo experimentální měření při vzájemném prokluzu třecích povrchů provedeno nejprve na těchto hlubokých mikro-vtiscích. Z něho byly odvozeny předpoklady chování pro případ mělkých mikro-textur a na toto chování byly následně zaměřeny experimenty s mělkými mikro-vtisky.

Jak již bylo zmíněno dříve, v případě, že se skleněný kotouč pohybuje rychleji než kulička, je parametr prokluzu kladný. Na obr.24 jsou ukázány vybrané interferogramy ukazující průchod hlubokých mikro-vtisků mazaným kontaktem při prokluzu $\Sigma = 0,5$. Z interferogramů je zřejmé místní zvýšení tloušťky mazacího filmu před mikro-vtisky. Oblast nárůstu tloušťky mazacího filmu je na snímcích identifikovatelná svojí bílou barvou. Velikost ovlivněné oblasti se v průběhu průchodu mikro-vtisku kontaktem zvětšuje s tím, jak se zvětšuje rozdíl dráhy, kterou urazí mazací film a povrch kuličky.

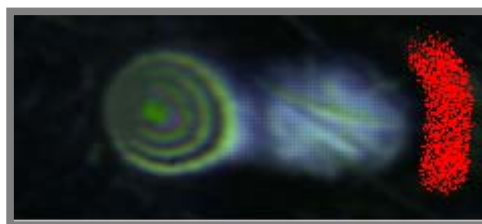


Obr.24: Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = 0,5$; $F=22$ N; $u_B=0,00132$ ms⁻¹; $f=450$ Hz; exp.=2222 μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 950 nm

Místní nárůst tloušťky mazacího filmu dosahoval hodnot až 120 nm (obr.25). Avšak místní nárůst mazacího filmu není jediným jevem, který můžeme pozorovat při průchodu hlubokého mikro-vtisku kontaktem. Jak bylo uvedeno výše pro podmínky čistého valení, dochází i k redukci mazacího filmu. Rovněž tato oblast, nacházející se před oblastí místního nárůstu mazacího filmu, se při průchodu mikro-vtisku zvětšuje. Na obr.26 je tato oblast zvýrazněna červenou barvou.

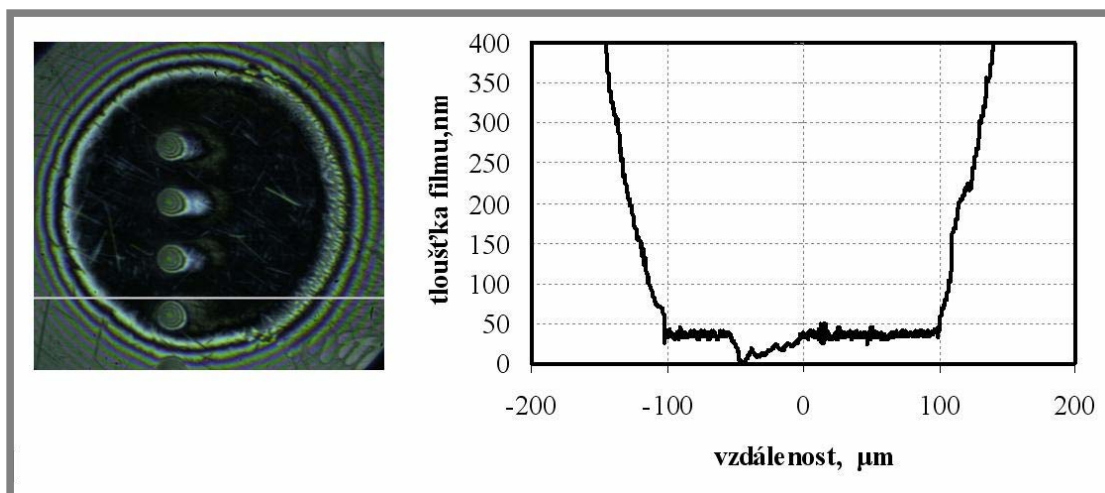


Obr.25 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm; při $\Sigma = 0,5$.



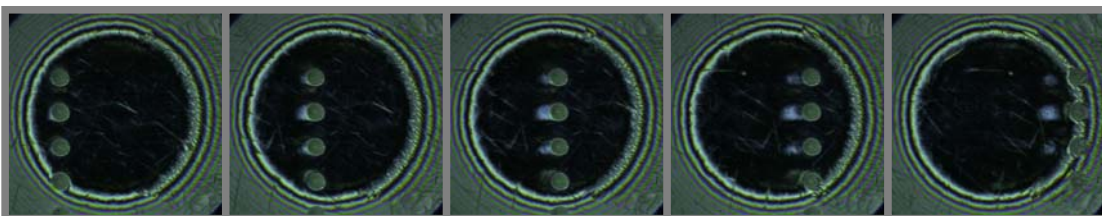
Obr.26 Detail redukce tloušťky mazacího filmu při $\Sigma = 0,5$.

Tento jev je zejména patrný, pokud se mikro-vtisk nachází na okraji mazaného kontaktu. V důsledku bočního výtoku dochází k výrazné destrukci mazacího filmu a ke styku třecích povrchů (obr.27). V případě, že se mikro-vtisk nachází v dostatečné vzdálenosti od boků kontaktní plochy, dochází k redukci tloušťky mazacího filmu až na 12 nm. Tato redukce byla téměř neměnná při průchodu mikro-vtisku kontaktní oblastí. Průměrná tloušťka mazacího filmu byla opět jako u čistého valení 45 nm.

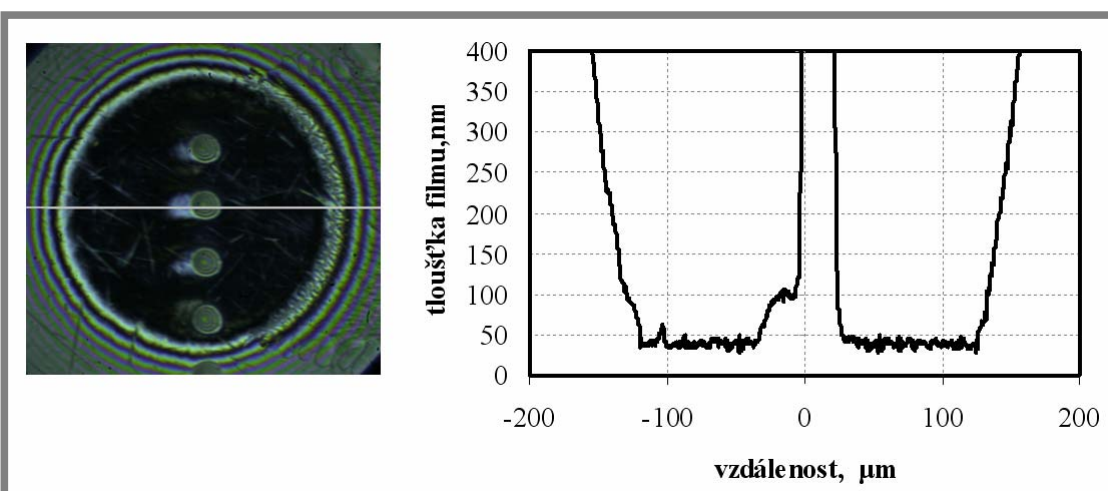


Obr.27 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v okolí mikro-vtisku o hloubce 950 nm, při $\Sigma = 0,5$

Poněkud odlišné chování mikro-vtisků bylo pozorováno v případě když se kulička pohybovala rychleji než skleněný kotouč. Mazivo zachycené v mikro-vtiscích zaostávalo za mikro-vtisky a vytvářelo místní nárůst tloušťky mazacího filmu. Tento nárůst tloušťky mazacího filmu je na interferogramech opět identifikovatelný svojí bílou barvou (obr.28). Na rozdíl od předcházejícího případu však nedoprovází tento jev redukce tloušťky mazacího filmu (obr.29). To však pouze v případě, že se mikro-vtisk nenacházel v blízkosti okraje mazaného kontaktu. Zde opět pozorujeme destrukci mazacího filmu.

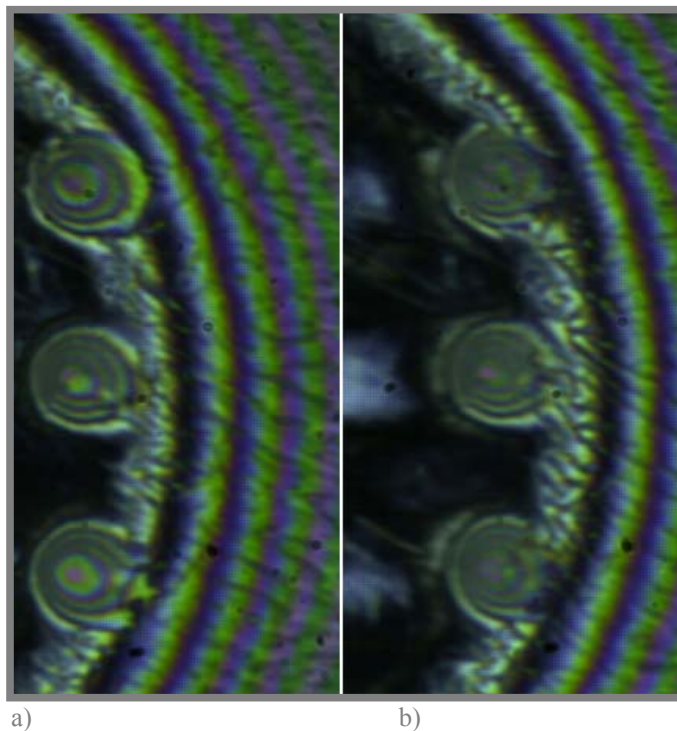


Obr.28 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = -0,5$; $F=22 \text{ N}$; $u_B=0,00133 \text{ ms}^{-1}$; $f=450 \text{ Hz}$; $\text{exp.}=2222 \text{ μs}$; rozlišení 1260×1024 ; hloubka mikro-vtisku 950 nm.



Obr.29 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm, při $\Sigma = -0,5$

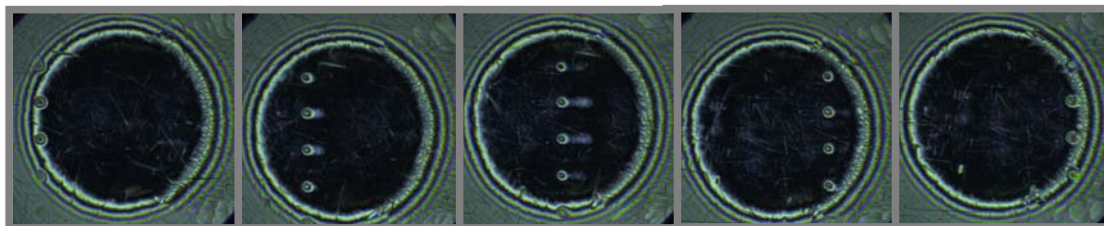
Další odlišnost byla zaznamenána při výstupu mikro-vtisků z kontaktní oblasti (obr.30). V tomto okamžiku byla pozorována redukce mazacího filmu v okolí zadní části mikro-vtisků. Zmíněná redukce způsobila pokles mazacího filmu na hodnotu kolem 8 nm.



a) b)
Obr.30 Rozdílný vliv mikro-vtisku při jejich výstupu z kontaktní oblasti při a) $\Sigma = 0,5$; b) $\Sigma = -0,5$

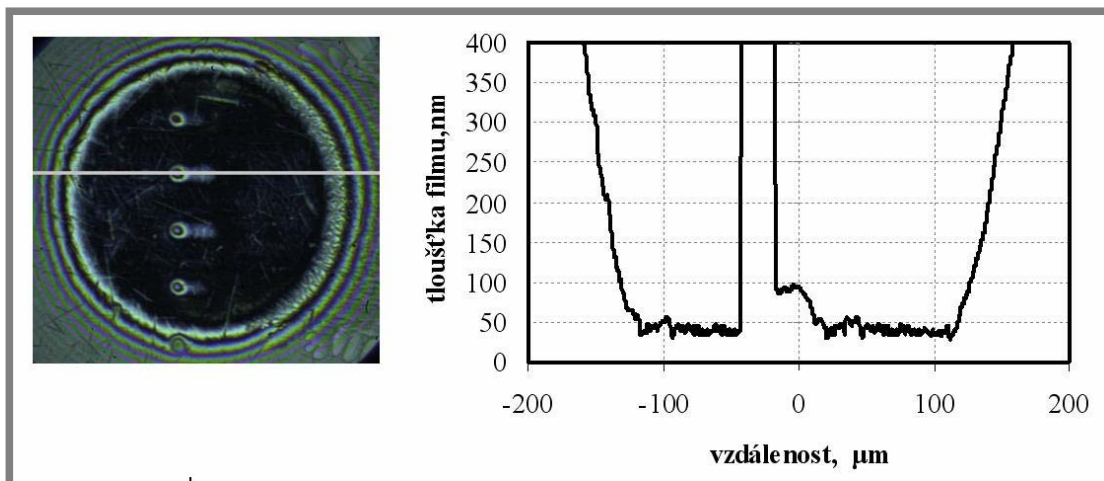
Výše uvedené výsledky prokázaly přínos vysokorychlostní záznamové techniky pro studium chování třecích povrchů s cíleně modifikovanou topografií. Podařilo se ukázat, že při vzájemném prokluzu způsobují hluboké mikro-vtisky protržení mazacího filmu. Jako kritické místo se ukázaly být okraje kontaktní oblasti. Těchto poznatků bylo využito při plánování experimentů s mělkými mikro-vtisky.

Na obr. 31 jsou ukázány vybrané snímky zachycující průchod řady mělkých mikro-vtisků (470 nm) kontaktní oblastí při prokluzu $\Sigma = 0,5$. Oblast nárůstu tloušťky mazacího filmu je na snímcích chromatických interferogramů rozpoznatelná svojí světle šedou barvou. Z interferogramů je zřejmé, že oblast ovlivněná mělkými mikro-vtisky je menší ve srovnání s hlubokými mikro-vtisky. To je způsobeno menším průměrem mělkého mikro-vtisku.

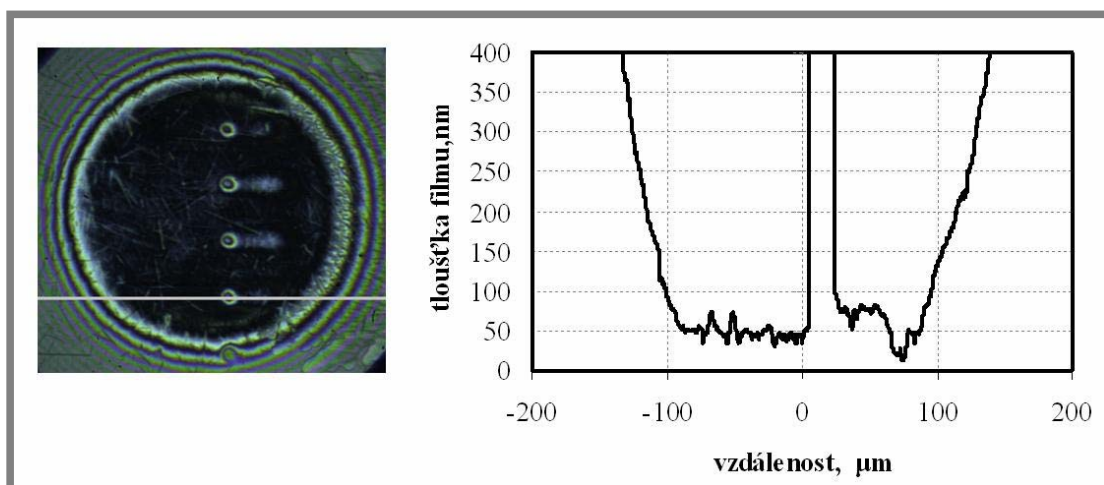


Obr.31 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = 0,5$; $F=22$ N; $u_B=0,00133$ ms⁻¹; $f=450$ Hz; $\exp.=2222$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 470 nm

Nárůst tloušťky mazacího filmu je rovněž o málo menší ve srovnání s hlubokými mikro-vtisky. V případě mikro-vtisků uprostřed kontaktu dosahovala tloušťka mazacího filmu 88-95 nm (obr.32). V případě mikro-vtisků v blízkosti boků kontaktní oblasti narostla tloušťka mazacího filmu na 75-82 nm (obr.33).



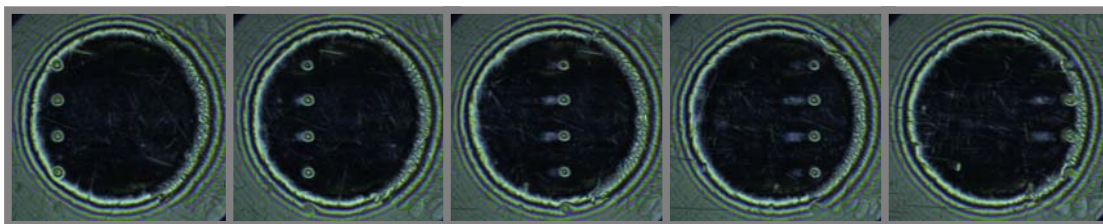
Obr.32 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = 0,5$



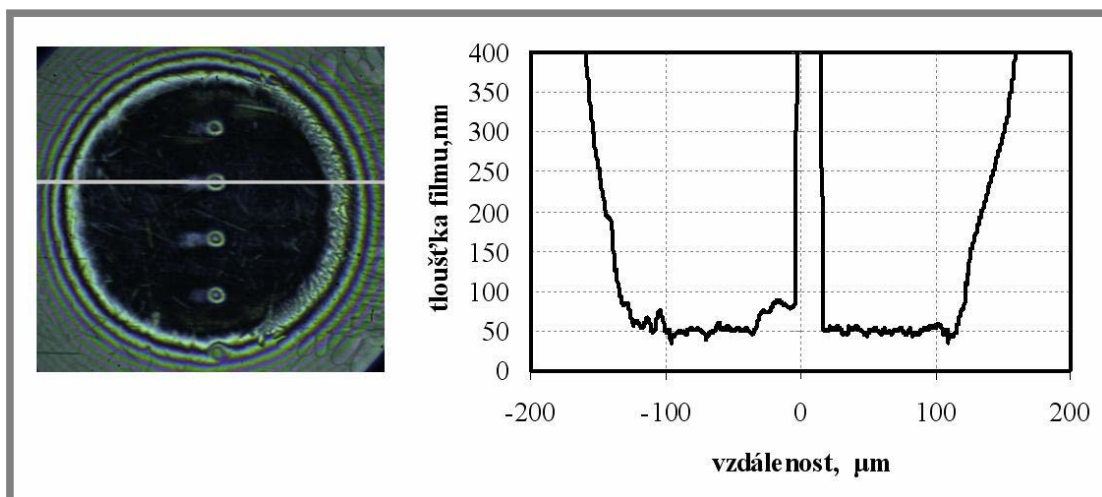
Obr.33 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = 0,5$

Současně se však zmenšila i velikost redukce tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-vtisků, která mnohdy zanikla v okolních nerovnostech. Drsný povrch způsobuje fluktuace tloušťky mazacího filmu a relativně malá redukce tloušťky mazacího filmu se zde snadno ztratí.

Při průchodu řady mělkých mikro-vtisků kontaktní oblastí při prokluzu $\Sigma = -0,5$ byl pozorován již předvídatelný nárůst tloušťky mazacího filmu. Tento nárůst byl opět dán rozdílnou rychlostí třecích povrchů v místě kontaktu (obr.34 a 35).



Obr.34 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = -0,5$; $F=22$ N; $u_B=0,002217$ ms⁻¹; $f=450$ Hz; $\exp.=2222$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 470 nm



Obr.35 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = -0,5$

Díky poznatkům ze studia hlubokých mikro-vtisků byla při vyhodnocení redukce mazacího filmu v okolí mikro-vtisků pro $\Sigma = -0,5$ věnována zvýšená pozornost okamžiku, kdy řada mikro-vtisků opouští kontaktní oblast. I u mělkých mikro-vtisků byla v tomto okamžiku pozorována redukce mazacího filmu, avšak nedošlo k protržení mazacího filmu. V místě této redukce klesla tloušťka mazacího filmu až na 7 nm. Přičemž průměrná tloušťka mazacího filmu byla 45 nm. Nebyla pozorována žádná jiná redukce tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-vtisků než ta při výstupu mikro-vtisků z kontaktní oblasti. Navíc lze předpokládat, že s dalším snížením hloubky mikro-vtisku dojde ke snížení tohoto negativního jevu.

Cílená modifikace topografie nekonformních třecích povrchů představuje jednu z možných cest jak dosáhnout snížení tření a opotřebení třecích povrchů. Snížení tření a opotřebení je v tomto případě dosahováno nárůstem tloušťky mazacího filmu. Avšak kromě tohoto nárůstu může docházet i k nežádoucí redukci tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-vtisků.

Náplní diplomové práce bylo experimentální studium vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacího filmu při použití vysokorychlostní CMOS kamery. Právě díky vysokorychlostní CMOS kameře bylo možné zaznamenat průchod mikro-vtisků celou kontaktní oblastí a následně posoudit vliv mikro-vtisků na tloušťku mazacího filmu.

Výsledky experimentů získané za podmínek čistého valení potvrdily negativní vliv hlubokých mikro-vtisků, které mohou způsobit až protržení mazacího filmu. Dále byl ukázán i významný vliv umístění mikro-vtisku v kontaktní oblasti.

Při vzájemném prokluzu byl pozorován předpokládaný nárůst tloušťky mazacího filmu s tím, že se velikost oblasti ovlivněné nárůstem tloušťky mazacího filmu v průběhu průchodu mikro-vtisku kontaktem zvětšuje, jak se zvětšuje rozdíl dráhy, kterou urazí mazací film a povrch kuličky. Byla také pozorována redukce tloušťky mazacího filmu, jejíž velikost se lišila v závislosti na poloze mikro-vtisku v kontaktní oblasti. Z tohoto poznatku vyplývá jednoznačný přínos využití vysokorychlostní záznamové techniky. Redukce byla zvláště patrná, jestliže se mikro-vtisk nacházel na okraji kontaktní oblasti. V důsledku bočního výtoku dochází až k destrukci mazacího filmu v případě hlubokých mikro-vtisků. V případě mělkých mikro-vtisků se redukce zmenšila natolik, že mnohdy zanikla v okolních nerovnostech. Drsný povrch totiž způsobuje fluktuace tloušťky mazacího filmu a relativně malá redukce tloušťky mazacího filmu se zde snadno ztratí.

Zmíněnými experimenty a jejich vyhodnocením byly úspěšně splněny dílčí cíle práce i cíl hlavní. Ze získaných výsledků lze usuzovat, že při použití mělkých mikro-vtisků nedochází k protržení mazacího filmu a lze dosáhnout nárůstu tloušťky mazacího filmu. Nárůstu tloušťky mazacího filmu by mohlo být využito při reverzaci či rozběhu stroje. Proto by bylo dobré zaměřit další studie na případ rozběhu a reverzace. Za těchto podmínek by mohla funkce mikro-textury vést k výraznému posunu ve smyslu snížení tření a opotřebení třecích povrchů. Je však třeba zohlednit i vliv mikro-vtisků na kontaktní únavu materiálu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MM Průmyslové spektrum, Model tření jako nástroj pro konstruktéry,
URL:<<http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/23/2373.jpg>>
[cit. 2008-05-03]
- [2] SynLube,URL:<<http://www.synlube.com/images/imagew12.gif>>
[cit. 2007-12-17]
- [3] Štěpina, V., Veselý, V.: *Maziva v tribologii*. 1. vydání. Bratislava: VEDA, 1985. 407 s.
- [4] Hartl, M.: *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2001. 53 s. Habilitační práce
- [5] VUT v Brně, Ústav Konstruování, prezentace předmětu Konstruování strojů–stojní součásti, přednáška 4, Tření, mazání a opotřebení
URL: < <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>>
[cit. 2007-12-17]
- [6] Pokorná, J., *Cílená modifikace třecích povrchů snižující tření a opotřebení*. Brno, VUT-FSI, 2007;
- [7] Etsion, I.: *State of the Art in Laser Surface Texturing*, Trans ASME Journal of tribology,127, 2005, s. 248-253
- [8] Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G.: Etsion, I.: *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*,Tribology International, 38, 2005, s. 219-225
- [9] Ren, N., Nanbu, T., Yasuda, Y., Zhu, D., Wang, Q.: *Micro textures in Concentrated-Conformal-Contact Lubrication: Effect of Distribution Patterns*, Tribol Lett, 28, 2007, s. 275-285
- [10] Mourier, L., Mazuyer, D., Aubrecht, A.A., Donnet, C.: *Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts*, Tribology International, 39, 2006, s.1745–1756
- [11] Krupka, I., Hartl, M.: *Effect of Surface Texturing on Very Thin Film EHD Lubricated Contacts*, Tribology Transactions, v tisku
- [12] Křupka I, et al.: *Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts*. Tribiol Int (2008), doi:10.1016/j.triboint.2007.11.016
- [13] Šamánek, O.: *Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních částí*,Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [14] Galiová, M., Kaiser, J., Novotný, K., Novotný, J., Malina, R., Zehnálek, J., Adam, V., Kizekc, R. :*Využití techniky laserem indukované ablace pro analýzu iontů těžkých kovů u rostlin vystavených vlivu iontů těžkých kovů*, Chemické listy, zasláno k publikaci
- [15] Křupka, I., Hartl, M.: *The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films*, Tribology International, 40, 2007, s.1100–1110
- [16] Dumitru, G., Romano, V., Weber, H.P., Haefke, H., Gerbig, Y., Pflüger, E.: *Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications*, Applied Physics A: Materials Science & Processing, 70, 2000, s.485-487

- [17] Vybavení Tribologické laboratoře, Ústav konstruování,
Vysoké učení technické v Brně
<URL:http://uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_tribologie/vybaveni>
[cit. 2008 – 03 – 01]
- [18] Hartl, M., Křupka, I., Poliščuk, R., Liška, M., Molimard, J., Querry, M.,
Vergne, P.: *Thin Film Colorimetric Interferometry*, Tribol. Trans., 44, 2001,
s.270-276.
- [19] Wikipedia.org – otevřená encyklopedie
URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter> [cit.2008-03-01]
- [20] Wikipedia.org – otevřená encyklopedie
URL:<<http://en.wikipedia.org/wiki/Three-CCD>> [cit. 2008-03-01]
- [21] Wikipedia.org – otevřená encyklopedie URL:
<http://en.wikipedia.org/wiki/High_speed_camera> [cit. 2008-03-17]
- [22] Svoboda, P.: *Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní
barevnou kamerou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního
inženýrství, 2008. 30 s. Vedoucí pojednání ke státní závěrečné zkoušce: Doc.
Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$\exp$ [μs]	- doba expozice jednoho snímku
F [N]	- zatěžující síla kuličky
f [Hz]	- frekvence vysokorychlostní CMOS kamery
$h_{\min}$ [nm]	- minimální tloušťka mazacího filmu
p [Pa]	- tlak
R_{a1} [μm]	- střední aritmetická odchylka profilů třecího povrchu
R_{a2} [μm]	- střední aritmetická odchylka profilů třecího povrchu
R_{red} [μm]	- redukovaná drsnost třecích povrchů
u_B [m.s ⁻¹]	- rychlost povrchu kuličky
u_D [m.s ⁻¹]	- rychlost skleněného kotouče v místě kontaktu
λ [-]	- parametr mazání
Σ [-]	- koeficient prokluzu
η [Pa.s]	- dynamická viskozita,
ω [s ⁻¹]	- úhlová rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr.1 Soudečkové ložisko dvouřadé [1]	12
Obr.2 Stribeckova křivka [2]	13
Obr.3 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ [4]	14
Obr.4 Smíšené mazání [4]	15
Obr.5 Nekonformní povrch [5]	15
Obr. 6 Konformní povrch [5]	16
Obr.7 Hydrodynamické mazání [5]	16
Obr.8 Stribeckova křivka při použití různých maziv [4]	17
Obr.9 Mechanické těsnění [7]	18
Obr.10 Vliv cílené modifikace topografie na tloušťku mazacího filmu a tlak v mazacím filmu[9]	19
Obr.12 Místní pokles tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-důlku při plném valení [11]	20
Obr.13 Pokles tloušťky mazacího filmu Δ ; u_k – rychlost kuličky s texturou, u_d – rychlost skleněného kotouče [11]	20
Obr.14 Experimentální uspořádání pro vytváření mikro-důlků nanosekundovým laserem: 1- Nd:YAG laser, 2 – modulátor druhé harmonické frekvence, 3 – periskop, 4 – CCD kamera, 5 – ablační komora, 6 – optický kabel, 7 – monochromátor, 8 – ICCD detektor[1]	25
Obr. 15 Místo zasažené jedním laserovým pulzem o energii 22 mJ po přešetření	26
Obr.16 Negativ mikro-důlku [16]	29
Obr.17 Experimentální zařízení [11]	31
Obr.18 Chromatické interferogramy kontaktu za čistého valení $F=22$ N; $u=0,00177$ ms ⁻¹ ; $f=440$ Hz; $\exp.=2272$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka vtisku 950 nm	32
Obr.19 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm	33
Obr.20 Detail ze snímků mikro-vtisku v kontaktní oblasti o hloubce a) 950 nm a b) 470 nm	33
Obr.21 Chromatické interferogramy kontaktu za čistého valení $F=22$ N; $u=0,00177$ ms ⁻¹ ; $f=440$ Hz; $\exp.=2272$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka vtisku 470 nm	34
Obr.22 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm	34
Obr.23 Tvar mazacího filmu v okolí mikro-vtisku při a) $\Sigma < 0$ a b) $\Sigma > 0$	35
Obr.24: Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = 0,5$; $F=22$ N; $u_B=0,00132$ ms ⁻¹ ; $f=450$ Hz; $\exp.=2222$ μ s; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 950 nm	36
Obr.25 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm; při $\Sigma = 0,5$	36
Obr.26 Detail redukce tloušťky mazacího filmu při $\Sigma = 0,5$	36
Obr.27 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v okolí mikro-vtisku o hloubce 950 nm, při $\Sigma = 0,5$	37

Obr.28 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = -0,5$; F=22 N; $u_B=0,00133 \text{ ms}^{-1}$; $f= 450 \text{ Hz}$; $\text{exp.}=2222 \text{ } \mu\text{s}$; rozlišení 1260x1024; hloubka vtisku 950 nm	37
Obr.29 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 950 nm, při $\Sigma = -0,5$	38
Obr.30 Rozdílný vliv mikro-vtisku při jejich výstupu z kontaktní oblasti při $\Sigma = 0,5$; b) $\Sigma = -0,5$	38
Obr.31 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = 0,5$; F=22 N; $u_B=0,00133 \text{ ms}^{-1}$; $f= 450 \text{ Hz}$; $\text{exp.}=2222 \text{ } \mu\text{s}$; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 470 nm	39
Obr.32 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = 0,5$	39
Obr.33 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = 0,5$	40
Obr.34 Chromatické interferogramy kontaktu při $\Sigma = -0,5$; F=22 N; $u_B=0,002217 \text{ ms}^{-1}$; $f= 450 \text{ Hz}$; $\text{exp.}=2222 \text{ } \mu\text{s}$; rozlišení 1260x1024; hloubka mikro-vtisku 470 nm	40
Obr.35 Vybraný interferogram a profil tloušťky filmu v místě mikro-vtisku o hloubce 470 nm, při $\Sigma = -0,5$	40

SEZNAM TABULEK

Tab.1 Energie laserového svazku a počet pulzů jednotlivých měření	26
Tab.2 Snímky vzorku zasaženého laserem při dané energii laserového svazku a počtu pulzů	27
Tab.3 Vybrané snímky z postupného výbrusu mikro-důlku vytvořeného laserovým paprskem o energii 200 mJ a 50 pulzu	28
Tab.4 Geometrie vtisků	30