

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 534*

ISSN 1213-418X

**Petr Svoboda**

**VLIV CÍLENÉ MODIFIKACE  
TOPOGRAFIE TŘECÍCH POVRCHŮ  
NA UTVÁŘENÍ MAZACÍCH FILMŮ  
ZA PODMÍNEK  
NEDOSTATEČNÉHO MAZÁNÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

**Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**

**VLIV CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE  
TŘECÍCH POVRCHŮ NA UTVÁŘENÍ MAZACÍCH FILMŮ  
ZA PODMÍNEK NEDOSTATEČNÉHO MAZÁNÍ**

EFFECTS OF SURFACE TOPOGRAPHY ON LUBRICATION FILM  
FORMATION WITHIN INSUFFICIENT LUBRICATION CONDITIONS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2016

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tribologie, modifikace topografie povrchu, tloušťka mazacího filmu, hladovění, nedostatečné mazání.

## **KEYWORDS**

Tribology, Surface topography modification Lubricant film thickness, Starvation, Insufficient lubrication.

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Oddělení výzkumu, vývoje a vnějších vztahů  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta strojního inženýrství  
Technická 2896/2  
616 69 Brno

## OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....	4
ÚVOD, MOTIVACE A CÍL PRÁCE.....	5
1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ .....	5
1.1 Mazací filmy za stacionárních provozních podmínek .....	5
1.2 Mazací filmy za nestacionárních provozních podmínek .....	7
1.3 Cílená modifikace topografie třecích povrchů.....	10
1.4 Techniky tvorby textur pro tribologické účely .....	12
1.5 Experimentální a teoretické studium cílené modifikace třecích povrchů .....	15
2. STUDIUM UTVÁŘENÍ MAZACÍCH FILMŮ ZA PODMÍNEK NEDOSTATEČNÉHO ZÁSOBOVÁNÍ KONTAKTU MAZIVEM.....	21
2.1 Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem .....	23
2.2 Vliv vstupní vrstvy maziva na tloušťku mazacího filmu v režimu nedostatečného zásobování kontaktu mazivem .....	29
2.3 Soubor článků .....	31
ZÁVĚR .....	32
SUMARY .....	33
SEZNAM LITERATURY .....	34

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA



**Petr Svoboda** je odborným asistentem na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se roku 1980 ve Zlíně. Po maturitě na Střední průmyslové škole v Uherském Hradišti studoval v letech 1999 – 2005 magisterský studijní program Strojní inženýrství, obor Aplikovaná mechanika, počítačová podpora konstruování. Studium úspěšně ukončil státní zkouškou v roce 2005 obhajobou diplomové práce „Upínací zařízení pro obrábění součástí automobilové klimatizace“. Následně zahájil postgraduální studium na Ústavu konstruování, Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, které úspěšně ukončil obhajobou disertační práce s názvem Studium přechodových jevů v mazacích filmech vysokorychlostní barevnou kamerou v roce 2009. Následně nastoupil na Ústav konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kde pracuje jako odborný asistent a zároveň vykonává funkci tajemníka pro tvůrčí činnost. Od roku 2011 působí také jako junior researcher v rámci NETME Centre.

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena na tribologii, především na oblast mazání při nestacionárních provozních podmínkách, která je spojena s podmínkami nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Dosavadní výsledky práce publikoval v osmi původních vědeckých článcích otištěných v časopisech s IF, dále v pěti původních vědeckých článcích otištěných v časopisech bez IF a v osmi příspěvcích ve sbornících světových vědeckých konferencí. Je také autorem jednoho patentu a tří užitečných vzorů. O jeho mezinárodním ohlasu svědčí 26 citací cizím autorem. Do jeho odborné činnosti rovněž spadá řešení projektů základního a aplikovaného výzkumu (GAČR, MŠMT, TAČR, atd.). Rozvíjí také spolupráci se soukromým sektorem prostřednictvím realizace smluvního výzkumu.

Pedagogické činnosti se věnuje od ukončení vysokoškolského studia. Vyučuje cvičení z předmětů Základy konstruování, Konstruování, CAD v bakalářském studijním programu Strojírenství. Podílel se na zavedení předmětu Vědecko-výzkumný projekt a jeho řízení v doktorském studijním programu Stroje a zařízení - Konstrukční inženýrství. Vede bakalářské a diplomové práce a je pravidelným členem komise pro státní závěrečné zkoušky.

## ÚVOD, MOTIVACE A CÍL PRÁCE

Aplikace poznatků o tření, opotřebením a mazání je předmětem předního zájmu dnešní moderní společnosti. Ačkoliv je tribologie relativně mladou vědní disciplínou, cílevědomé využití jejích poznatků můžeme pozorovat již v paleolitické době. Vlečení ulovených zvířat za různých povětrnostních podmínek byly patrně jedny z prvních tribologických experimentů v naší historii. Nicméně trvalo dlouho, než bylo mazání studováno pragmaticky a maziva nebyla uváděna jen jako „kuchařský recept“. Byl to Nikolai Pavlovich Petrov [1] a Osbourne Reynolds [2], kteří kolem roku 1880 rozpoznali hydrodynamickou povahu mazání a zavedli teorii kapalinového mazání, která je platná pro kapalinné mazání tlustých vrstev ( $> \text{mm}$ ). Tato teorie je však limitována tloušťkou mazacího filmu, která je vyjádřena Stribeckovou křivkou.

Teprve až ve druhé polovině dvacátého století byl v technických disciplínách vymezen význam slova tribologie a je rozvíjen intenzivní výzkum zabývající se třením, opotřebením a mazáním ve strojních soustavách. Vzniká tak mezioborová věda, která se zabývá vzájemnou interakcí povrchů při svém vzájemném pohybu nebo při svém pokusu o vzájemný pohyb, která je nazývána tribologií.

S rozvojem techniky a technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmů ve strojních soustavách. Tento proces postupného snižování tloušťky mazacího filmu má několik příčin. Mezi nejvýznamnější patří zvyšování teplot a tlaků v kontaktech, které je důsledkem zlepšování vlastností materiálů. Dále používání maziv s nižší viskozitou, které si vynutil požadavek snižování tření a tím i spotřeby energie. Dalším důvodem je také zlepšování kvality povrchů třecích prvků, které je výsledkem používání nových dokončovacích postupů a metod. Mnoho součástí pracuje spolehlivě a efektivně za podmínek, kdy je tloušťka EHD mazacího filmu pouze několik jednotek nanometrů. Nicméně, za určitých nestacionárních podmínek může docházet k redukci tloušťky mazacího filmu vlivem nedostatečného přísunu maziva až na hodnoty drsnosti kontaktních povrchů. Kontakty pracující za těchto podmínek se označují jako hladovějící, popřípadě pracující za podmínek nedostatečného zásobování mazivem. V tomto případě již může docházet ke styku nerovností třecích povrchů, které mají za následek zvýšení tření, opotřebením a tím dřívější vyřazení součástí z provozu. Tato práce by měla přispět k objasnění této problematiky a shrnout studium a metody modifikace třecích povrchů, které dokážou předcházet těmto nežádoucím účinkům v kritických fázích provozu strojních součástí.

## 1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 1.1 Mazací filmy za stacionárních provozních podmínek

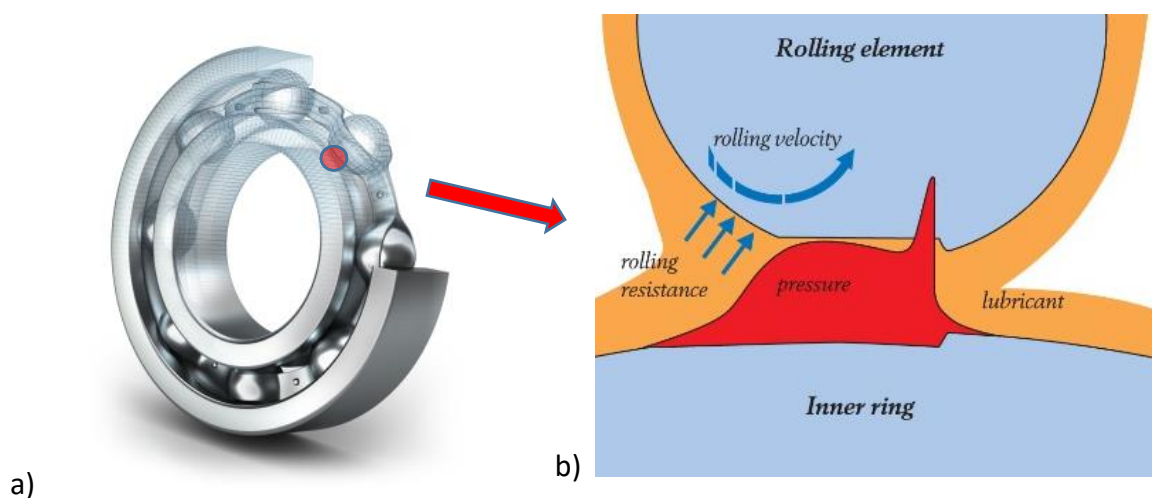
Většina vysoce zatížených strojních prvků (valivých ložisek, ozubených soukolí a vaček) pracuje za podmínek EHD mazání, kdy jsou třecí povrchy elasticky deformovány a viskozita maziva v oblasti kontaktu třecích povrchů se výrazně zvyšuje vlivem kontaktního tlaku. Tento jev nastává během deformace nekonformních povrchů při vysokém zatížení, které je přenášeno malou plochou, jako je například mezi kuličkou a vnitřním kroužkem valivého ložiska, ve styku zubů ozubených převodů, ve dvojici vačka a zdvihátko ventilu. To způsobuje dočasné zvýšení viskozity maziva, které je v tomto okamžiku zachyceno mezi deformované třecí povrchy (Obr. 1). Při relativním pohybu kontaktních těles pak dochází na rozhraní třecích povrchů k vytváření homogenního mazacího filmu, který odděluje třecí povrchy a tím snižuje jejich tření a následné opotřebením [3].

Začátek teoretického studia mazání nekonformně zakřivených třecích povrchů se datuje od počátku 20. století, kdy H. M. Martin [4] publikoval výsledky svého teoretického studia mazání ozubeného soukolí. Při řešení vycházel ze stávající hydrodynamické teorie a řešením Reynoldsovy

rovnice získal vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu (1) pro styk parabolického válce s deskou mazaného nestlačitelným izoviskozním mazivem:

$$h_{\min} = 4,896 \frac{u\eta_0 R_x}{w} \quad (1)$$

Podle tohoto vztahu se měla tloušťka mazacího filmu při běžných podmínkách pohybovat okolo 0,03  $\mu\text{m}$ , ale dosahovaná drsnost povrchu ( $R_a$ ) byla mezi 0,4 až 0,8  $\mu\text{m}$ . To však bylo v rozporu s experimentálními výsledky, které ukazovaly, že většina zubů ozubených kol nebyla v místě styku zubů opotřebena, a tedy že ve většině případů jsou v místě záběru třecí povrchy odděleny souvislou vrstvou maziva.



Obr. 1 Řez kuličkovým ložiskem [netsolhost.com] (a), rozložení tlaku a maziva v EHD mazaném kontaktu [skf.com] (b)

Tento rozpor se podařilo zcela objasnit na počátku 60. let 20. století, kdy bylo prokázáno, že chování velmi zatížených mazaných nekonformních těles ovlivňují fyzikální vlastnosti maziva i mechanické vlastnosti třecích těles [5]. Na tento režim mazání se začalo pohlížet jako na elastohydrodynamické mazání (EHL) Obr. 1b.

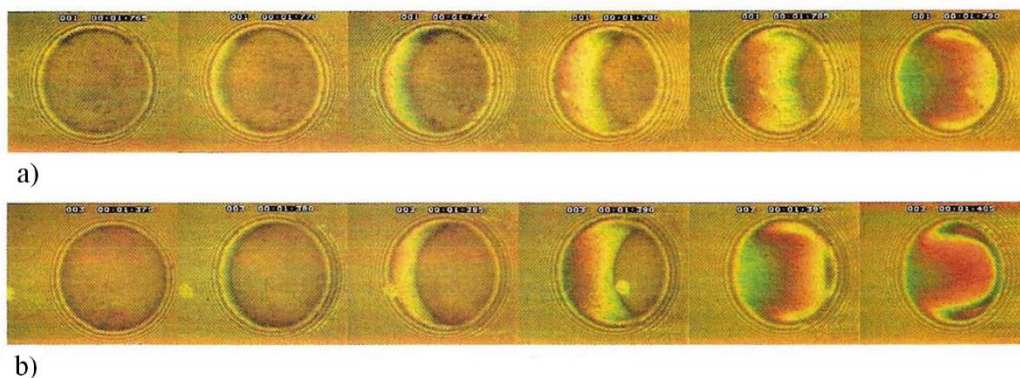
V klasické teorii EHD mazání se pro popis kontaktu používají tři základní rovnice. První, Reynoldsova rovnice, kterou lze získat z Navierových-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity, která popisuje hmotnostní průtoky způsobené gradienty tlaku v mazané oblasti. Druhá rovnice reprezentuje součet nedeformovaného tvaru kontaktní oblasti a elastických deformací třecích povrchů. Poslední rovnice vyjadřuje rovnováhu sil v kontaktu. Řešením soustavy těchto rovnic je možné získat rozložení tloušťky a tlaku mazacího filmu. Významným krokem v této oblasti byla zejména práce A. A. Lubrechta, a kol. [6]. Byl představen zcela nový numerický nástroj pro řešení problému EHD mazání pro kruhový kontakt. V porovnání s klasickým, do té doby používaným numerickým přístupem byl mnohem rychlejší a umožnil analyzovat i případy velmi zatížených bodových kontaktů. Podařilo se tak podrobně popsat a experimentálně ověřit utváření mazacích filmů mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy za ustálených provozních podmínek [7].

## 1.2 Mazací filmy za nestacionárních provozních podmínek

U mnoha strojních prvků nejsou provozní podmínky (zatížení, rychlosti třecích povrchů a jejich geometrie) konstantní, ale nestacionární – proměnné, a dochází k jejich významným změnám v čase. Za této situace již mazací film není často schopen zajistit úplné oddělení třecích povrchů, a tak dochází k jejich styku, opotřebení a následnému předčasnému vyřazení součásti z provozu. Zatímco se v odborné literatuře můžeme setkat s řadou teoretických studií zohledňujících nestacionární provozní podmínky, dosud bylo publikováno relativně málo experimentálních prací zabývajících se touto problematikou, což je způsobeno zejména dostupností vhodných měřicích metod.

Jednou z prvních teoretických studií respektující nestacionární provozní podmínky publikoval v již roce 1971 J. P. Vichard. Ve své studii [8] sestavil rovnici pro EHD liniový kontakt s proměnným zatížením v čase. Podrobnější studium dynamických efektů a případy náhlých změn rychlostí třecích povrchů přišlo teprve na konci osmdesátých let minulého století. Výzvy k řešení těchto problémů si vyžádal především dynamicky rostoucí automobilový průmysl. Mnoho výzkumných skupin po celém světě proto analyzovalo zdroje energetických ztrát uvnitř spalovacího motoru a způsoby, jakými by mohly být sníženy [9]. Bylo zjištěno, že velká část ztrát je způsobena termodynamickou účinností. Nicméně v rámci studia bylo avizováno, že značným přínosem by mohlo být také snížení mechanických ztrát v tribologickém systému motoru. Navzdory tomuto zjištění bylo dosaženo významného zlepšení v porozumění tribologického chování mnoha strojních součástí, které pracují za nestacionárních provozních podmínek.

Rozdíl mezi klasickým EHD řešením a modelem zohledňujícím nestacionární provozní podmínky představil L. Chang [10], který popsal novou metodu výpočtu tloušťky filmu pro EHD kontakty. Metoda umožňuje stanovit průběh tloušťky a tlaku pro celý cyklus stroje. Obdobné řešení prezentovali v roce 2004 také Z. M. Jin a kol. [11] u eliptického kontaktu. Ukázali, že náhlé zvýšení rychlosti má za následek výrazné změny tloušťky filmu, zatímco změna v kontaktním tlaku je stěží pozorovatelná.



Obr. 2 Série chromatických interferogramů při rozběhu třecích povrchů pro základový minerální olej, (a) čisté valení, (b) čistý prokluz [12]

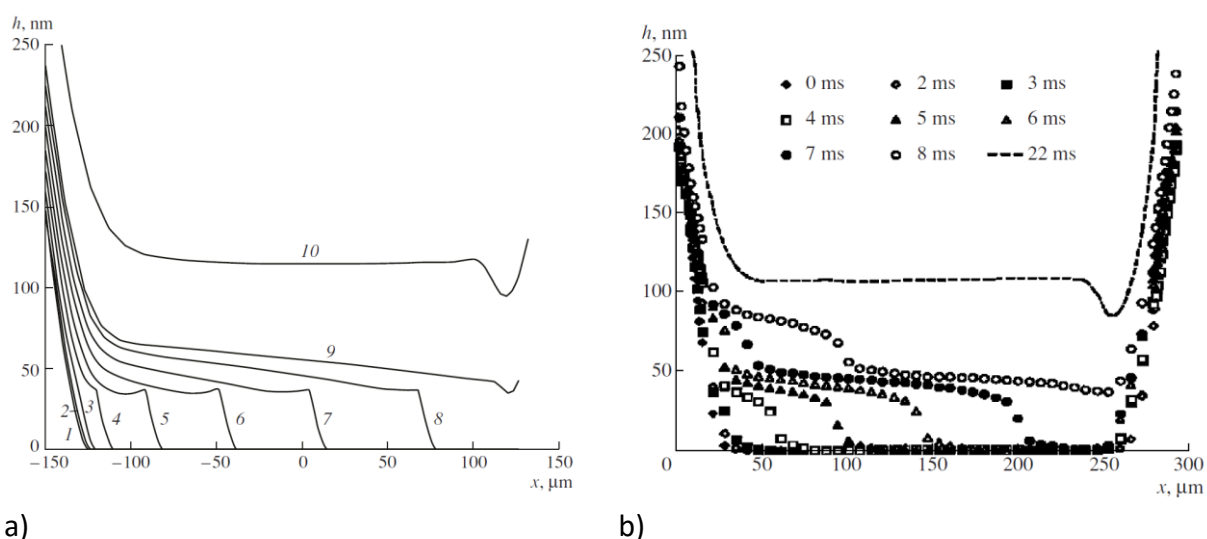
Vliv změny rychlosti na utváření mazacího filmu v EHD kontaktech studovali ve druhé polovině 90. let 20. století J. Sugimura a kol. [13]. Navrhli experimentální zařízení pro měření přechodových jevů, kde byl disk poháněn pomocí elektronicky ovládaného servomotoru, kde spektrum bylo snímáno monochromatickou CCD kamerou. Na dvou typech minerálních olejů s rozdílnou viskozitou pozorovali utváření mazacího filmu za podmínek náhlého zastavení třecích povrchů. Ve své studii rovněž simulovali další experimentální podmínky – zapnutí a vypnutí stroje, vratný pohyb, akceleraci a deceleraci pohybu třecích těles.



M. Kaneta studoval experimentálně utváření mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů za použití optické interferometrie [12]. Na Obr. 2 je ukázána série chromatických interferogramů, na kterých lze pozorovat utváření mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů pro základový minerální olej. Chromatické interferogramy byly získány při náhlém rozběhu třecích povrchů za podmínek čistého valení a čistého prokluzu.

R. P. Glovnea a H. A. Spikes studovali také experimentálně jevy při rozběhu kontaktu [14]. Popsali chování tloušťky filmu při simulaci rozběhu třecích povrchů, kde se meniskus propadu mazacího filmu pohybuje napříč kontaktem až do vytvoření kompletního mazacího filmu. Na tuto práci navázal P. P. Usov [15], který sestavil matematický model (Obr. 3a) pro stejné provozní podmínky a našel velmi dobrou shodu s experimentálním měřením [14] (Obr. 3b).

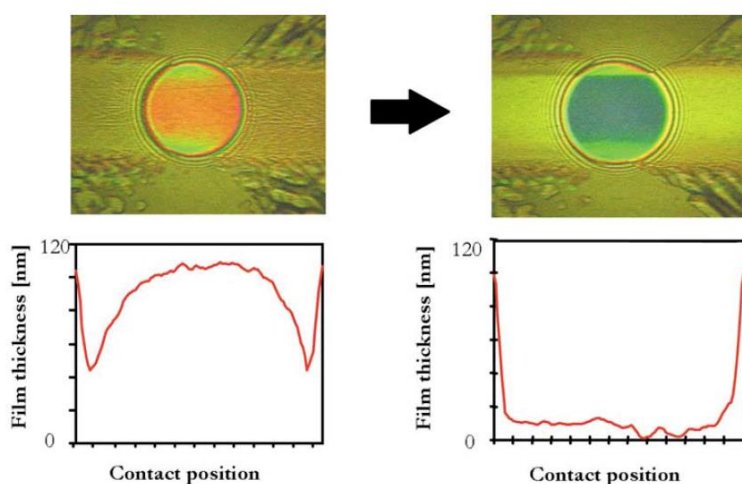
Pro zcela zaplavený režim mazání je patrné, že s rostoucí valivou rychlostí roste tloušťka mazacího filmu. Nárůst tloušťky je způsoben pohybem třecích ploch, kdy je mazivo strháváno do místa kontaktu. Na tloušťku filmu má vliv zejména rychlost třecích povrchů ale i dynamická viskozita maziva  $\eta_0$  a tlakově-viskózní koeficient  $\alpha$ . Poněkud odlišné chování můžeme pozorovat při nedostatečném zásobení kontaktem mazivem, který se v odborných publikacích popisuje obecně jako hladovějící kontakt. Takový kontakt se vyznačuje klesající tloušťkou filmu při nárůstu rychlosti nad určitou mez. Tento pokles je způsoben nedostatečným množstvím maziva ve vstupní oblasti. Malé množství maziva může být způsobeno například velkou rychlostí, kdy je mazivo po odvalení kontaktu vytlačeno z dráhy kontaktu a nestihne se doplnit zpět do kontaktní dráhy. Další příčinou může být vysoká viskozita použitého maziva. Hladovění se proto většinou vyskytuje u vysokorychlostních ložisek, nebo u ložisek mazaných plastickými mazivy.



a) Obr. 3 Rozložení tloušťky mazacího filmu během rozběhu třecích povrchů (a) numerické řešení [15], (b) experimentální přístup [14]

Na tyto experimenty navázala J. Wang a kol. [16]. Autoři studovali chování EHD mazaného kontaktu za podmínek čistého valení s krátkým vratným pohybem, který sebou přináší riziko styku třecích povrchů z důvodu nedostatečného zásobování kontaktem mazivem. Utváření mazacího filmu bylo studováno na zařízení v konfiguraci kulička-disk. Vratný pohyb byl realizován oscilací skleněného kotouče pomocí vačky s amplitudou 1 mm. Pomocí vysokorychlostní kamery zaznamenali interferogramy během celého cyklu vratného pohybu a naměřené hodnoty srovnali s výsledky teoretického řešení. Významným zjištěním bylo, že navzdory nulové rychlosti v bodě změny směru pohybu nedochází v průběhu celého cyklu k prolomení mazacího filmu a třecí povrchy jsou separovány homogenní vrstvou mazacího filmu.

Jak již bylo popsáno výše, při nedostatečném zásobení kontaktu mazivem může dojít k jeho hladovění a následnému kolapsu mazacího filmu (Obr. 4). Prvními experimentálními studii hladovějícího kontaktu se zabýval L. D. Wedeven a kol [17]. Ve své práci došli k závěru, že hladovění v EHD kontaktu je závislé na umístění vstupní hranice a centrální tloušťka filmu je v hladovějícím režimu funkcí polohy vstupního menisku od Hertzovy oblasti. Dále při svých experimentech pozorovali, že počáteční hladovění se projevuje snížením tlaku v Hertzově oblasti a tloušťka mazacího filmu se snižuje až na nulu, jak se vstupní meniskus přibližuje k Hertzově oblasti. Polohou vstupního menisku na tloušťku filmu se dále zabýval P. E. Wolveridge a kol. [18] užitím semi-analytického řešení.



Obr. 4 Chromatické interferogramy popisující kolaps mazacího filmu v EHL kontaktu [19]

Hladovění se stává postupně výraznějším, jak se valivá rychlost zvyšuje. Vliv rychlosti, viskozity a tlaku na tloušťku mazacího filmu pro hladovějící a plně zaplavený kontakt popisuje Tabulka 1.

Tabulka 1. Dopad rychlosti, viskozity a tlaku na tloušťku mazacího filmu pro hladovějící a plně zaplavený režim mazání (pro kontaktní tlaky větší než 0,1 GPa)

Vstupní veličiny	Vliv na tloušťku mazacího filmu	
	Režim hladovění	Plně zaplavený kontakt
$p \uparrow$	$h \uparrow$	$h \searrow$
$\eta_0 \uparrow$	$h \uparrow$	$h \uparrow$
$u \uparrow$	$h =$	$h \uparrow$

Y. P. Chiu [20] ukázal, že míra hladovění závisí především na tloušťce vrstvy maziva na okraji valivé dráhy. Také zjistil, že tloušťka mazacího filmu je závislá na množství maziva ve valivém systému, stejně jako na odstředivé a gravitační síle celé soustavy. Prvními kdo matematicky vyjádřili závislost polohy vstupního menisku na tloušťku filmu v hladovějícím EHD režimu byl B. J. Hamrock, D. Dowson [21] a A. P. Ranger a kol. [22]. Experimentálně studoval EHD kontakt také E. Kingsbury [23], který se zabýval „vyprahlým“ EHD mazáním. Tento mazací režim se nachází mezi hladovějícím a smíšeným režimem mazání.

Dalším přístupem ke studiu hladovějícího mazání se zabýval H. G. Elrod [24] a F. Chevalier a kol. [25]. V jejich práci je pokles tloušťky mazacího filmu vztažen na množství maziva na povrchu valivé trati. Tento parametr má tu výhodu, že je v praxi snadno měřitelný. Dalším kdo zkoumal problematiku hladovění, byl B. Jacod a kol. [26]. Ze svých pozorování došli k závěru, že u tenkých vrstev maziva mechanismy doplňování nehrají významnou roli. Tyto mechanismy vytvářejí pouze mírnou modifikaci tloušťky filmu. Tato predikce byla podepřena také experimentálním pozorováním.

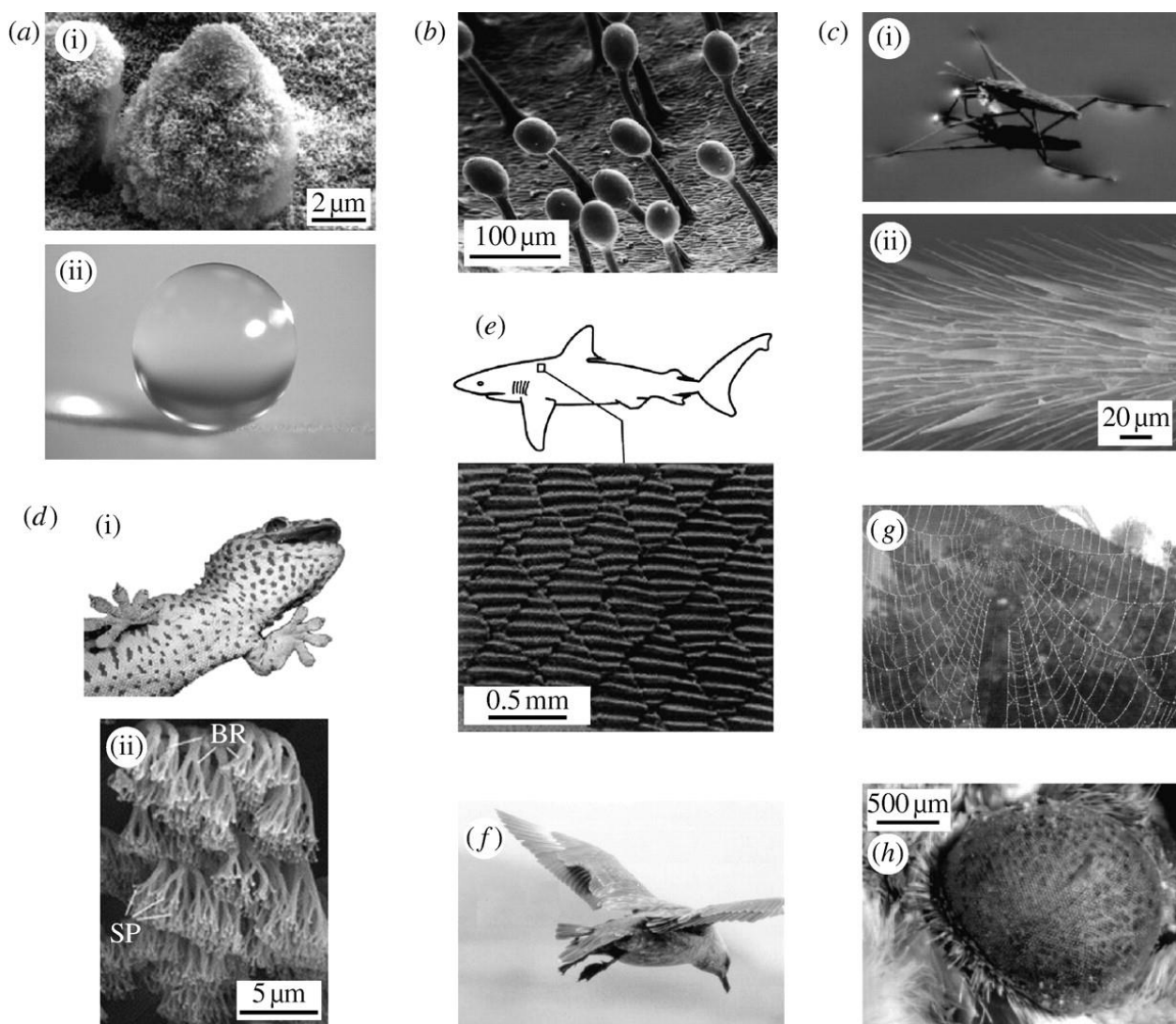
B. Damiens a kol. [27] popisuje tvorbu mazacího filmu za hladovějících EHD podmínek jako funkci množství maziva, kontaktních podmínek a elipticity kontaktu. Poměr  $M/L$  se ukazuje být jako rozhodující parametr predikující tok maziva v kontaktu do stran. Bezrozměrný parametr hladovění  $\gamma$  odvozený Chevalierem [25] byl použit k charakterizování hladovění za různých podmínek mazání v piezoelastickém režimu. Experimentální a numerické výsledky ukázaly, že bezrozměrný parametr  $\gamma$  (odpor proti toku maziva do stran) závisí na parametru  $M/L$  a je také funkcí tloušťky filmu.

Ze studií věnujících se nestacionárním provozním podmínkám je patrné, že v určitých fázích provozu strojních součástí nejsou třecí povrchy zcela odděleny souvislou vrstvou maziva. Příkladem těchto nestacionárních dějů je rozběh třecích povrchů. Při rozběhu třecích povrchů představuje počáteční vzájemný styk těles značné riziko poškození těchto povrchů. Při rozběhu nejsou totiž třecí povrchy po určitou dobu odděleny mazacím filmem. Existují různé způsoby, jak efektivně napomoci oddělit třecí povrchy při nestacionárních provozních podmínkách a tím zabránit případnému tření a opotřebením. Jedná se například o nanosení speciálních povlaků na třecí povrchy, přidání mazivostních přísad (aditiv) do mazacího oleje, cílenou modifikaci topografie třecích povrchů, atd.

Následující dvě kapitoly (1.3 a 1.4) se budou věnovat obecně cílené modifikaci topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů z pohledu inspirace přírodou a přenesení těchto poznatků do tribologie nekonformních vysoce zatížených kontaktů. Bude také objasněno, co se rozumí cílenou topografií z pohledu tribologie vysoce zatížených strojních součástí a jakými způsoby, metodami a technologiemi je možno topografii třecích povrchů vytvořit.

### **1.3 Cílená modifikace topografie třecích povrchů**

Do jisté míry je cílená modifikace topografie inspirována přírodou (Obr. 5) a inženýři v různých oblastech výzkumu se tyto technologie snaží napodobit uměle. Nicméně teprve současná úroveň vědy a techniky umožňuje lidem kopírovat to, co živočichové a rostliny již miliony let běžně využívají. Například jeden z ideálních vzorů pro dokonale nesmáčivý povrch uplatňují vodní rostliny – lotos (Obr. 5a), jež mají na svých listech hydrofobní nanovrstvu tvořenou drobnými výstupky. Tato vrstva pomáhá odpuzovat vodu a brání usazování nečistot [28], čímž se inspiroval např. výzkum v oblasti letectví při testování Boeingu 757 ecoDemonstrator. Při vývoji křídla bylo zjištěno, že pro dlouhé lety může být ušetřeno pět až šest procent paliva, pokud na náběžné hraně křídla není zachycena vrstva odumřelého hmyzu. Při výzkumu povrchu křídla inspirovaného lotosovým listem bylo pozorováno snížení počtu odumřelého hmyzu o 40 % ve srovnání s kontrolním povrchem. Stejný princip lze využít například ke snížení tření u mikroelektromechanických zařízení. B. Bhushan [29] publikoval studii, kde materiály s touto nanostrukturou mohou přispět ke snížení tření mezi třecími plochami v mikro a nanoměřítku, kde součástky nemohou být mazány stávajícím klasickým způsobem.

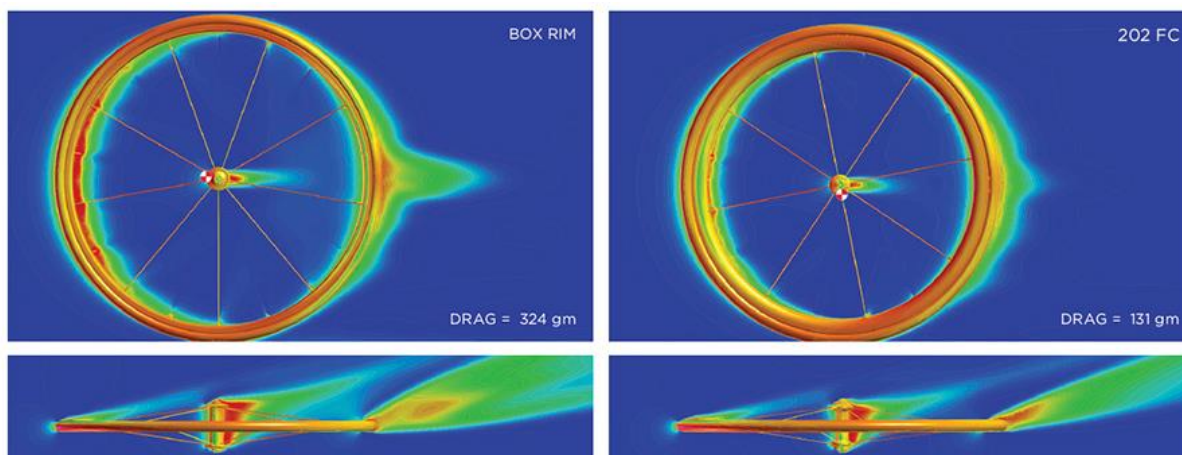


Obr. 5 Příklady z přírody: (a) Efekt lotosového listu [30], (b) topografie masožravé rostliny – adhezí efekt pro zachycení hmyzu [31], (c) bruslařka obecná a chůze po vodní hladině [32], (d) gekon – reversibilní adheze [33], (e) struktura kůže žraloka redukující odpor [34], (f) křídla ptáka při přistání, (g) pavučina z hedvábí [35], and (h) oko mýry s antireflexním účinkem [36]

Tento přístup charakterizuje také citát „Obecně vzato co je dobré pro odpuzování vody, je dobré pro snížení tření.“ kterým B. Bhushan uvádí svoji studii.

Ve sportovním odvětví výzkum prokázal, že golfový míček s texturou zvyšuje vztlak a snižuje aerodynamický odpor při letu [37], do praxe byl tento poznatek přenesen již v roce 1930. Avšak příklady najdeme i dalších sportech. Za povšimnutí stojí snaha zlepšit aerodynamiku a minimalizovat proud vzduchu indukovaný od točivého momentu silničního kola pomocí vhodného profilování a textury povrchu ráfku a osy. Tuto studii provedla firma ZIPP pomocí simulace proudění (CFD). Na Obr. 6 můžeme vidět, že texturovaný ráfek má aerodynamický odpor vzduchu 131 gramů oproti 324 gramů u konvenčního ráfku.

Další zajímavé využití inspirace přírodou lze nalézt v plaveckém sportu, kde se u profesionálních plavců využívají plavky imitující svým povrchem kůži žraloka (Obr. 5e) pro snížení odporu ve vodě [29].

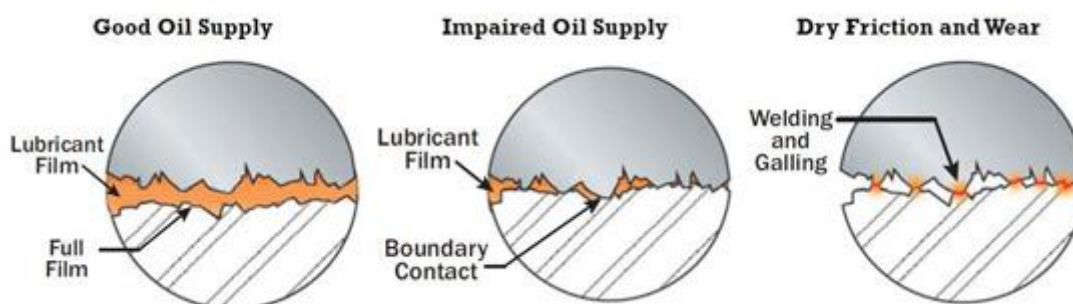


a)

b)

Obr. 6 Simulace proudění CFD [zipp.com]: (a) konvenční ráfek – aerodynamický odpor vzduchu 324 gramů, (b) ráfek s texturou – aerodynamický odpor vzduchu 131 gramů

Z pohledu tribologie nekonformních povrchů jsou pro využití cílené modifikace topografie zásadní vysoce zatížené kontakty, které nalezneme v celé řadě strojních součástí. Tyto součásti pracují v širokém spektru provozních podmínek (Obr. 7) a v některých případech také v nepříznivém prostředí (za zvýšených provozních teplot, prašné prostředí, kontaminace maziva a nedostatečné zásobování kontaktu mazivem). U těchto kontaktů je potřeba zajistit jejich bezproblémový a energeticky efektivní provoz po celou jejich životnost. Cílená topografie třecích povrchů se ukazuje jako jeden z možných prostředků, které toto mohou zajistit [38].



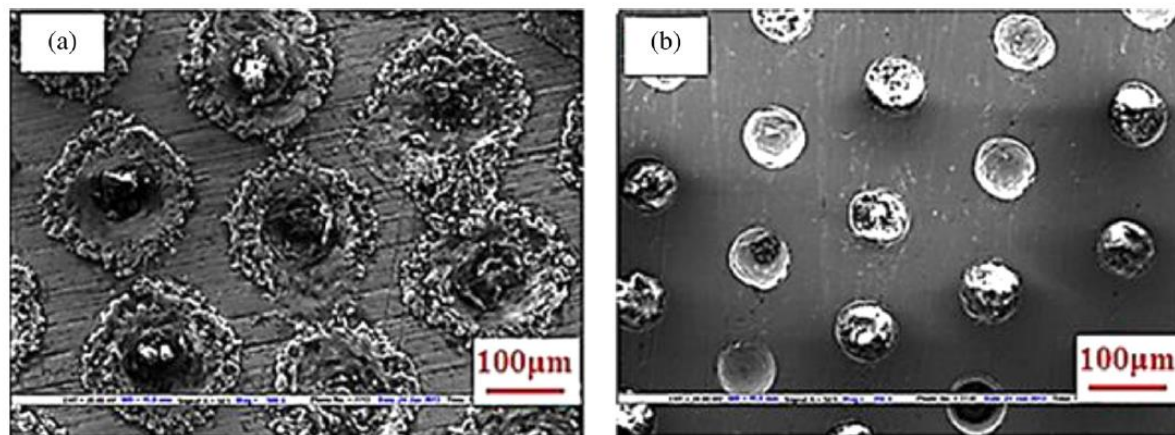
Obr. 7 Ilustrace nedostatečného zásobování kontaktu mazivem vedoucí k selhání mazacího filmu [machinerylubrication.com]

U cílené modifikace topografie třecích povrchů se jedná především o vytváření soustav mikrodůlků na třecích površích použitím různých technologií. Vytvořené mikrodůlky mohou napomoci posunout mazací režim směrem k optimálním provozním podmínkám. To znamená, že např. při rozběhu součástí, mikrodůlky s mazivem mohou napomoci při utváření mazacího filmu. Mazivo zachycené uvnitř těchto mikrodůlků může být při rozběhu třecích povrchů transportováno do kontaktu. Tyto mikrodůlky tak mohou napomoci v podmínkách, kdy není dostatek maziva v kontaktu. Vhodně zvolená textura třecího povrchu pak může vést ke zlepšení tribologických vlastností, jak už ke zlepšení mazacích schopností tenkých mazacích filmu, tak ke snížení tření a opotřebení třecích povrchů.

#### 1.4 Techniky tvorby textur pro tribologické účely

V dnešní době se nejvíce k tvorbě mikrotextrur využívá metoda „Laser Surface Texturing“, zkráceně LST [39]. Tato technologie využívá laser pro vytvoření mikrodůlků na povrchu součásti.

Metoda LST je využívána pro široké spektrum materiálů od polymerů [40] přes kovy [41], až po keramiku [42]. Laser také umožňuje vytvořit malé textury povrchu, například hloubky 200 nm a průměry 20  $\mu\text{m}$ , které mohou být vytvořeny na kovových površích za použití femtosekundového laseru [43] (Obr. 8a). Po tomto typu texturování většinou následuje dodatečné přeleštění výstupků (Obr. 8b), které vznikají během odpaření materiálu při výboji v okolí kráteru [44]. Vytváření textury laserem je v současné době úspěšně aplikováno na vložky válců a mechanická těsnění.



Obr. 8 Mikrodůlky vytvořené za pomoci femtosekundového laseru: (a) po použití femtosekundového laseru, (b) po dokončovací operaci – leštění [45]

Mnoho komponent, u kterých by šlo pomocí cílené modifikace topografie zvýšit jejich výkon pomocí mikrotextury (mikrodůleků) jsou obvykle levné, a proto vyžadují také ekonomicky efektivní metody jejich tvorby pro zvýšení tribologického výkonu. Kritéria podílející se na výběru efektivní texturovací metody se dají rozdělit následovně:

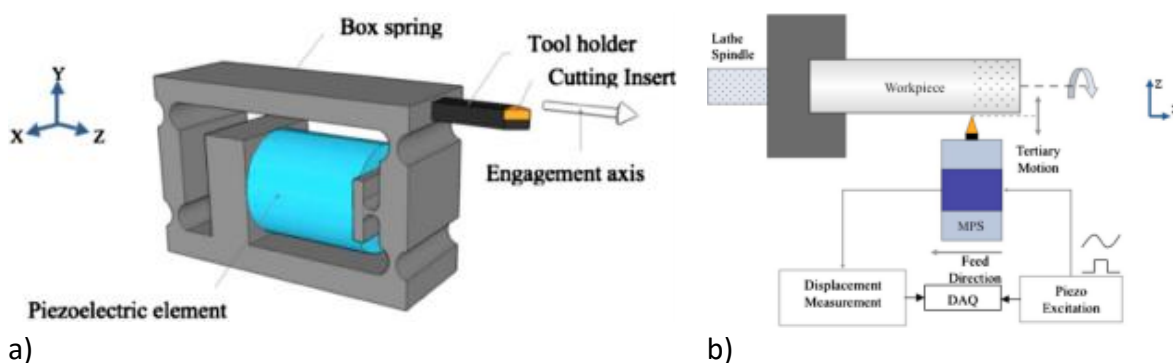
- nízké náklady na produkci mikrotextury,
- vysoká rychlost texturování,
- flexibilita z pohledu tvorby geometrie textury.

Pro masovou produkci součástí s mikrotexturou je potřeba rozvíjet moderní technologie nebo popřípadě dokončovací operace, které dokážou mikrotexturu na povrchu materiálu vytvořit. Tyto technologie by měly být levné a zároveň flexibilní, a to jak z pohledu tvaru vytvářených důleků, tak tvaru povrchů, které mají být texturovány. Současné metody pro texturování povrchů mohou být rozděleny do čtyř hlavních skupin z hlediska jejich fyzikálního principu.

- *Přidání materiálu*: textura je vytvořena přidáním materiálu na požadovaný povrch součásti, vznikne tak oblast s požadovaným reliéfem [46].
- *Odebrání materiálu*: textura je vytvořena odebráním materiálu z požadovaného povrchu součásti, vznikne tak textura tvořená důlky [47].
- *Přesun materiálu*: plastickou deformací povrchu dojde k redistribuci materiálu z částí povrchů k ostatním [48].
- *Přirozená tvorba textury*: textura se vytvoří samovolně za pomoci částic opotřebení, které jsou obsaženy v mazivu, postupným zamačkáváním do povrchu při průchodu kontaktem [49].

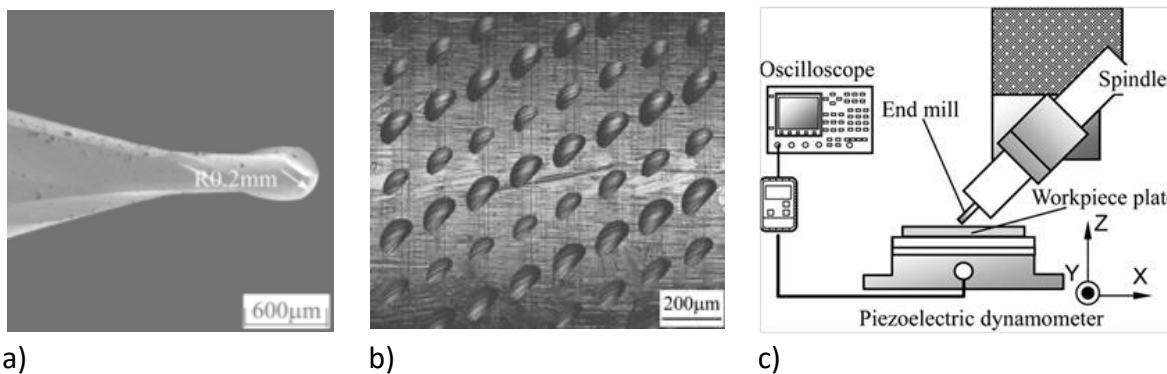
Další produktivní metodou pro texturování povrchů je vibroobrábění [50]. Vibrační pohyb nástroje je vyvozen piezoaktuátorem, kde délka vysunutí elementu je dána velikostí budícího napětí. U piezoaktuátoru je kontrolována pouze délka vysunutí což vyžaduje velmi přesný měřicí řetězec. Musí tak být zaručena absolutní přesnost uložení texturovaného vzorku. Vysunutí piezoaktuátoru je limitované hodnotami v řádech desítek mikrometrů. Aplikace tohoto zařízení je

tedy vhodná především při texturování povrchů pomocí soustružnických nožů. Vzorek je upevněn v čelistech soustruhu nebo podobného obráběcího stroje. Zařízení s nožem je umístěno na supportu. Pro tuto aplikaci bylo vyvinuto několik konstrukčních variant uchycení aktuátoru. Jednu z prvních konstrukcí (Obr. 9a) navrhnul M. S. Hong a K.F. Ehmann [51]. Tato konstrukce byla později ještě zdokonalena [52] (Obr. 9b) a posléze konstrukce našla uplatnění např. i při výrobě nesymetrických sférických zrcadel.



Obr. 9 Metoda vibroobrábění (a) konstrukce piezoaktuátoru [51], (b) inovovaný řídicí řetězec piezoaktuátoru [52]

Použití této metody se skládá ze dvou kroků. V prvním kroku se nastaví nulová pozice špičky nástroje. Následuje soustružení vzorku pro určení nulové pozice a nulového bodu povrchu. Takto připravený povrch je následně vibromechanicky obroběn. Tímto způsobem je vyřešena případná excentricita vzorku. Další zajímavou metodou pro vytváření mikrodůlků je mikrovrtání (Obr. 10a- c). Mikrovrták je vyroben ze slinutého karbidu a jeho otáčky při vytváření důlků dosahují až 20 000 ot/min [53]. Nevýhodou je však odebrání materiálu a tvorba třísek, které mohou při obrábění znehodnotit povrch vzorku.

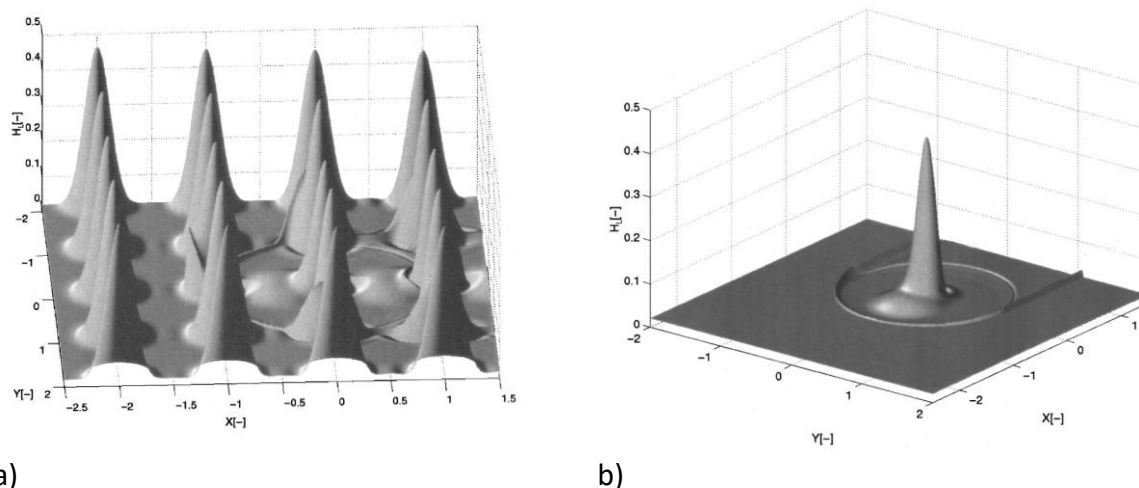


Obr. 10 Mikrovrtání: (a) mikrovrták, (b) textura vzniklá mikrovrtáním, (c) schéma zařízení [53]

Následující kapitola (1.5) se bude věnovat cílené modifikaci topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů a zejména jejím vlivem na utváření mazacích filmů ve fázích nedostatečného zásobování kontaktem mazivem. Tloušťka mazacího filmu v kontaktu u nekomfortních třecích povrchů je ovlivněna řadou provozních faktorů. Mezi čtyři základní faktory ovlivňující tloušťku mazacího filmu patří: množství oleje, rozměr kontaktu, viskozita maziva a rychlost třecích povrchů. Tyto všechny faktory ovlivňují, zda se kontakt nachází ve zcela zaplaveném režimu nebo je nedostatečně zásobován mazivem. Přehled současného stavu poznání dané problematiky tvoří také teoretický základ pro autorův vlastní vědecký přínos.

## 1.5 Experimentální a teoretické studium cílené modifikace třecích povrchů

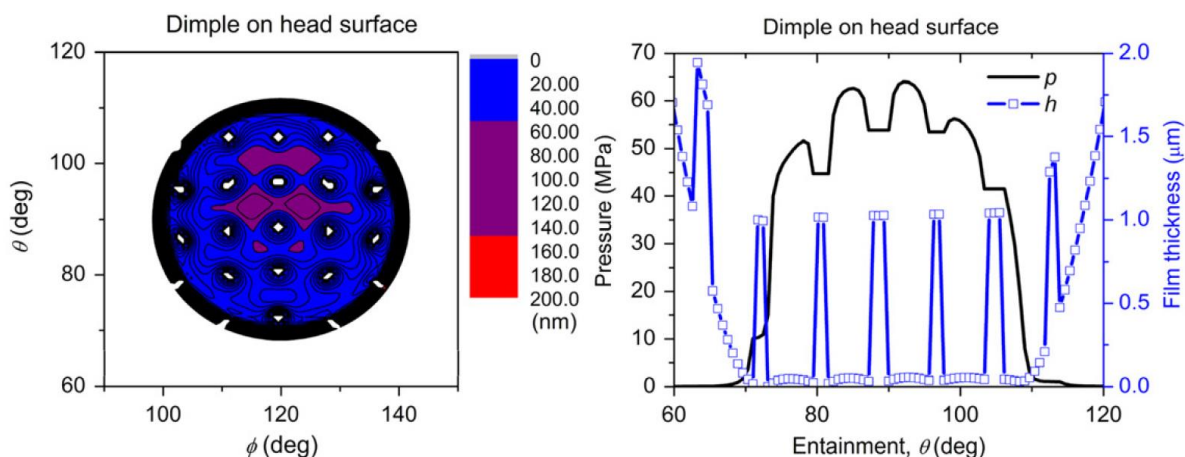
Jak již bylo zmíněno, mikrodůlky mají zásadní vliv zejména v režimu mezném, smíšeném, popřípadě při nedostatečném zásobování kontaktu mazivem. Chování jednotlivého mikrodůlku a celé textury při nedostatečném zásobování kontaktu mazivem modeloval numericky M. Dumont a kol. [54] za podmínek čistého valení. V rámci studia zjistili, že struktura povrchu v podmínkách nedostatečného zásobování mazivem významně ovlivňuje polohu vstupního menisku, přičemž pozice menisku a geometrie struktury povrchu jsou dva převládající faktory, které určují tloušťku mazacího filmu [54]. Numerická simulace s jedním mikrodůlkem (hloubka 1  $\mu\text{m}$ , šířka 80  $\mu\text{m}$ ) ukázala zajímavé výsledky v bezrozměrné tloušťce mazacího filmu ( $H$ ) na texturovaném povrchu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Po vstupu do kontaktu se vlivem vzrůstajícího tlaku mikrodůlek elasticky deformuje a na výstupní hraně z něj emituje mazivo, které pak deformuje třecí povrchy, a tím zvyšuje tloušťku mazacího filmu (Obr. 11b). Z modelu je zřejmé, že tloušťka mazacího filmu je na výstupní hraně trojnásobná oproti vstupní hraně. Posléze provedli simulaci pro matici mikrodůlků (Obr. 11a) s hloubkou 1  $\mu\text{m}$  a šířkou 40  $\mu\text{m}$ . Výsledky simulace pak prokázaly další posílení tohoto efektu ve zvýšení tloušťky mazacího filmu.



Obr. 11 Vrstva maziva procházející kontaktem za podmínek nedostatečného mazání: (a) matice mikrodůlků; (b) lokální zvýšení tloušťky filmu za mikrodůlkem [54]

Numericky simuloval chování povrchové textury také D. Zhu a kol. [55] pro vysoce zatížené kontakty za podmínek smíšeného mazání. Velikost oblasti a vlastní počet mikrodůlků byly označeny jako klíčový konstrukční parametr pro mazání [55]. Další studie byly zaměřeny na rozložení mikrodůlků v kontaktu a vlastní geometrii a tvar jejich dna [56]. Q. J. Wang a kol. publikovali studii [57] pro smíšené a EHD mazání vysoce zatížených eliptických kontaktů mezi honovaným povrchem a skupinou různě orientovaných inženýrských povrchů. Ukázalo se, že orientace textury má důležitou roli v utváření mazacího filmu. Vliv povrchových mikrodůlků byl studován také v oblasti biotribologie, konkrétně pro kloubní náhrady, kde dochází k reversibilnímu pohybu třecích povrchů. L. Gao a kol. [58] sestavili numerický model a simulovali EHL - smíšené mazání kovové hlavice s vytvořenou texturou. Výsledky ukázaly, že mikrodůlky mají pozitivní efekt na tvorbu mazacího filmu u kloubních náhrad, a to převážně v podmínkách smíšeného mazání (Obr. 12). Za podmínek úplného oddělení třecích povrchů mazivem však bylo v této studii pozorováno, že mikrodůlky můžou snížit tloušťku mazací vrstvy, což vede až ke styku nerovností třecích povrchů.



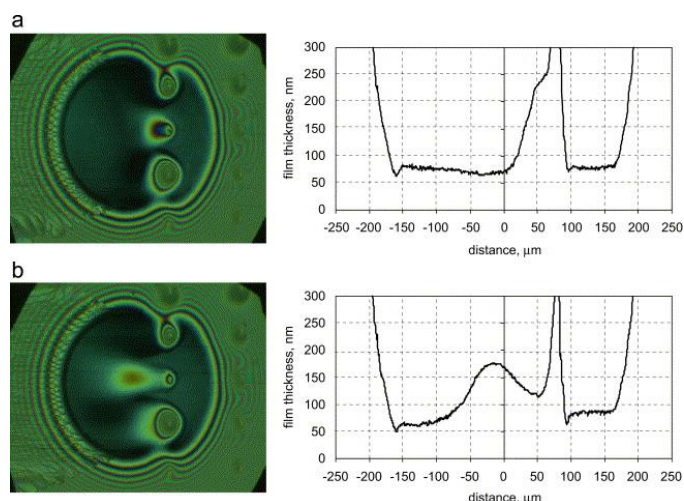


Obr. 12 Rozložení tlaku a tloušťky mazacího filmu napříč kontaktem pro texturovanou hlavici kyčelního kloubu [58]

Další výzkum vlivu topografie třecích povrchů v oblasti biotribologie publikoval H. Ito a kol. [59]. Na náhradě kyčelního kloubu pozoroval snížení opotřebení až pozoruhodných 69 %, a to za použití 0,1 mm hlubokých důlků rozmístěných okolo celé CoCr kovové hlavice. Několik dalších studií bylo provedeno za použití různých textur a materiálů [58], [60] s pozitivním účinkem mikrotextury na tloušťku filmu. H Sawano a kol. [61] testovali čtyři skupiny CoCr hlavice s různými hloubkami mikrodůlků a poprvé prokázali, že textura může zlepšit životnost umělých kyčelních náhrad. D. Choudhury a kol. [62] pozorovali snížení opotřebení hlavice na použití důlků vytvořených mikrovrtáním. V USA A. Chyr a kol. [63] použili laser pro vytvoření textury pro zvýšení únosnosti a snížení tření CoCr hlavice kyčelního kloubu. Zatímco v Číně B. Zhang [60] a H. Yu a kol. [64] použili tester reálných třecích dvojic kloubních náhrad (kov - polymer) pro srovnání texturovaného a netexturovaného povrchu za různých podmínek (zátížení, rychlost). Bylo zjištěno, že při optimálních parametrech lze snížit koeficient tření až o 66,7 – 85,7 % a průměrné snížení opotřebení může být až 35 %.

Nedávno publikovali L. Mourier a kol. [65] chování jednotlivých mikrodůlků vytvořených na třecích površích femtosekundovým pulzním laserem. Autoři došli k závěru, že vliv povrchových mikrodůlků na mazací film závisí v první řadě na jejich hloubce. Významný nárůst tloušťky filmu byl pozorován u mělkých mikrodůlků, zatímco hluboké způsobovaly lokální snížení tloušťky filmu.

Náhled do vlivu mikrodůlků ve vysoce zatížených kontaktech byl publikováno v celé řadě experimentálních studií také pomocí optické interferometrie a použití zařízení v konfiguraci kulička-disk. Experimentální pohled na mělké mikrodůlky za podmínek různých prokluzů v EHL kontaktu publikoval I. Křupka a kol. [66] Bylo zjištěno, že mělké mikrodůlky vytvořené na třecích površích fungují jako mikrozásobníky maziva a usnadňují vytvořit mazací film i za podmínek, kdy je v kontaktu utvořen tenký mazací film. Existuje zde také drobná redukce v tloušťce mazacího filmu oproti hladkému kontaktu, kterou můžeme vidět z profilu tloušťky mazacího filmu na Obr. 13.

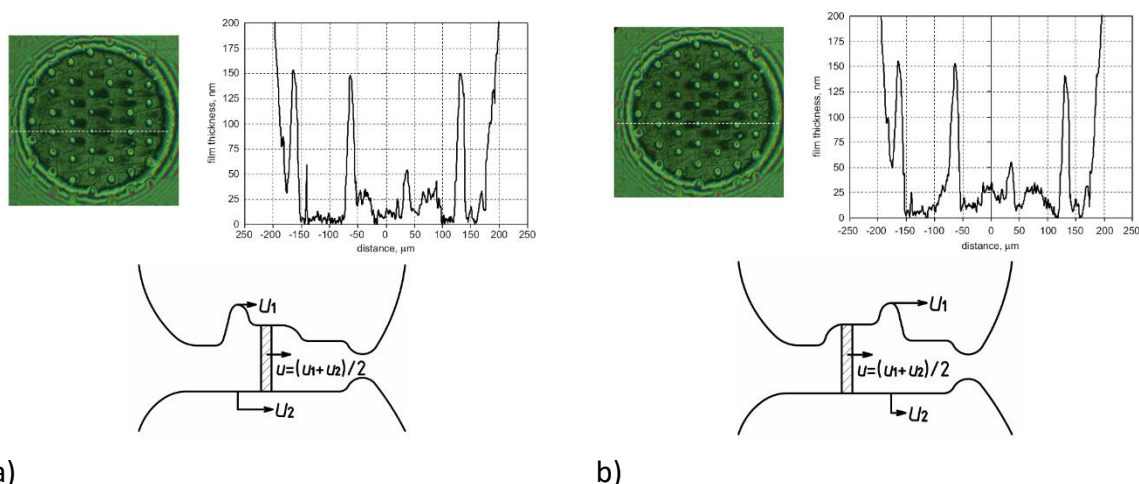


Obr. 13 Interferogramy a odpovídající profil tloušťky mazacího filmu v EHL kontaktu: (a)  $\Sigma = 0,5$ ; (b)  $\Sigma = 1$  [66]

Zlepšení tribologických vlastností bylo pozorováno zejména za provozních podmínek, kdy se povrch s mikrotexturou pohybuje rychleji než povrch bez textury a v kontaktu vzniká prokluz třecích povrchů. Tento prokluz definujeme jako  $\Sigma$  (2).

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

Při stejných rychlostech třecích povrchů nebo v případech, kdy se povrch bez mikrotextury pohybuje rychleji než povrch s texturou, dochází k místnímu poklesu „ $\Delta$ “ tloušťky mazacího filmu. Bylo pozorováno, že mikrodůlky umístěné uvnitř mazaného kontaktu emitují olej po proudu maziva, když jsou mikrodůlky na pomaleji se pohybujícím povrchu, a proti proudu, když jsou mikrodůlky na rychleji se pohybujícím povrchu. Stejný závěr pro matici mikrodůlků na třecím povrchu publikoval I. Křupka a kol. [67]. Na Obr. 14 je ukázán nárůst tloušťky mazacího filmu v okolí mikrodůlků při průchodu mazaným kontaktem. Efekt výtoku mazacího filmu z matice mikrodůlků můžeme pozorovat pro kladnou hodnotu prokluzu (Obr. 14a) i zápornou hodnotu (Obr. 14b).

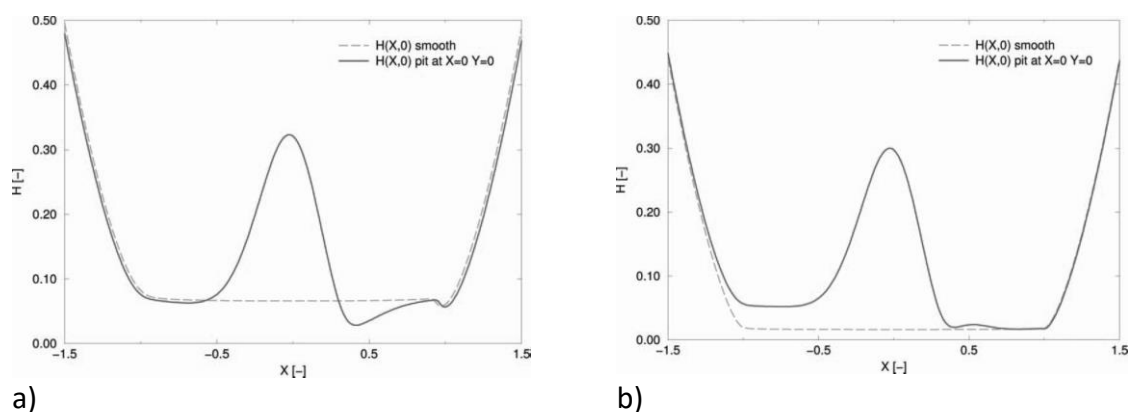


Obr. 14 Chromatické interferogramy a odpovídající profil tloušťky filmu pro mělké mikrodůlky při smíšeném mazání: (a)  $\Sigma = +0,5$ , (b)  $\Sigma = -0,5$  [67]

Podrobněji se problematikou rozložení, tvaru a vlivu mikrodůlků pracujících v různých režimech mazání zabývají studie [68], [67]. Bylo zjištěno, že kontakty s mikrodůlky mohou také napomoci

utváření mazacího filmu za nestacionárních podmínek, jako jsou rozběh a reverzace třecích povrchů [47], [69]. Pro podmínky s nedostatečným zásobením kontaktu mazivem se prokázalo, že mikrodůlky v mazaném kontaktu slouží také jako mikrozervoár maziva a při průchodu vysoce zatíženým kontaktem dodávají mazivo a zlepšují režim mazání. V odborné literatuře se také uvádí, že mikrodůlky, které mají velikost větší než je elastická kontaktní oblast, způsobují redukcii v tloušťce mazacího filmu. Kromě toho bylo zjištěno, že šípový tvar textury má nejlepší vliv na utváření mazacího filmu, naopak rýhy mají negativní efekt [47]. Dále se prokázalo, že mazivo emitované z mikrodůlků lépe odděluje třecí povrchy, když se tyto pohybují ve směru proti sobě [69].

P. M. Lugt a kol. [70] se zabývali matematickým popisem průchodu mikrodůlku kontaktem za hladovějícího a zcela zaplaveného režimu mazání. Ve studii uvádějí, že při čistém valení mikrodůlky negativně ovlivňují tloušťku filmu a také, že u mikrodůlků vytvořených vnikáním cizího tělesa vzniká oblast v okolí mikrodůlku s vysokou koncentrací napětí, která může mít za následek povrchové poškození. Dále zjistili, že při zcela zaplaveném režimu mazání je tloušťka filmu stejná jako u povrchů bez mikrodůlků, pokles nastává pouze před mikrodůlkem (Obr. 15a). Za mikrodůlkem je u hladovějícího režimu mazání tloušťka filmu až třikrát vyšší než před ním, kde se tloušťka filmu příliší neliší od povrchů bez mikrodůlků (Obr. 15b).

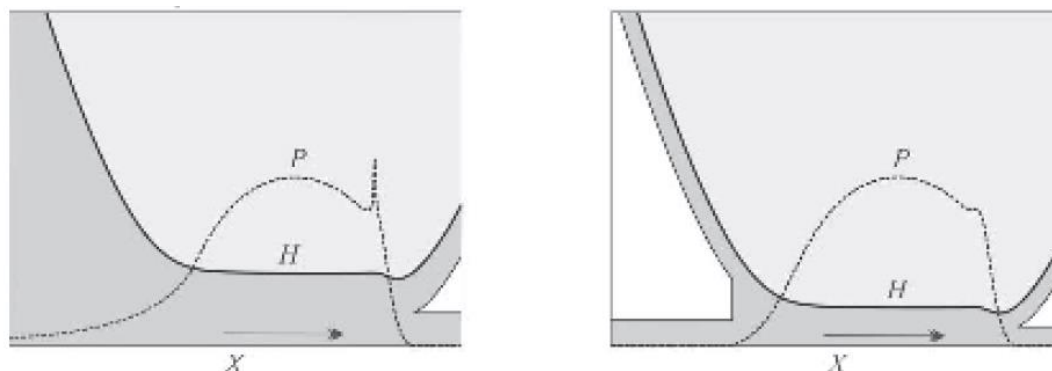


Obr. 15 Profil tloušťky filmu: (a) pro plně zaplavený kontakt, (b) pro hladovějící kontakt [70]

Cílená modifikace třecích povrchů byla studována v celé řadě různých aplikací včetně zlepšení tribologických vlastností [71]. Pozitivní efekt topografie byl prokázán zejména v oblasti suchého tření [67], mezného [72], hydrodynamického [47], EHD [69] a smíšeného mazání [73]. Kromě toho, další významný benefit texturování povrchu publikoval K. H. Zum Gahr a kol. [42], kteří popsali, že mikrotextura může pomoci zachytit částice opotřebení a tím předcházet opotřebení třecích povrchů. Největší a nejnáročnější výzvou pro studium topografie třecích povrchů je režim EHD mazání. Výzkum EHL kontaktů i navzdory těmto skutečnostem ukázal, že benefit textury je v případě, pokud jsou mikrodůlky menší než šířka kontaktu. Pozorování kontaktní oblasti s mikrotexturou pomocí optické interferometrie ukázalo, že mazivo emituje z mikrodůlků a může tak napomoci lépe oddělit třecí povrchy, a to zejména za nestacionárních podmínek, kdy se v kontaktu tvoří tenký mazací film [69].

Při použití experimentálního a numerického přístupu ke studiu samostatných mikrodůlků za podmínek prokluzu třecích povrchů pro EHL kontakt bylo zjištěno, že hluboké mikrodůlky mohou způsobit až selhání mazacího filmu, ale mělké mikrodůlky mají pozitivní vliv na nárůst mazacího filmu v jeho blízkém okolí, což publikoval např. L. Mourier a kol. [43]. Autoři předpokládají, že při pohybu mikrodůlku směrem ke středu kontaktu prudce narůstá tlak a viskozita maziva. Mazivo posléze emituje z mikrodůlku vlivem smykového napětí, což napomáhá k lokálnímu zvýšení tloušťky mazacího filmu. Vzhledem k tomu, že velikost EHL kontaktu je v porovnání s konformními

povrchy velmi malá, jsou velikosti mikrodůlků v EHL kontaktech většinou limitovány do velikosti cca 100  $\mu\text{m}$ . Autoři [43] navíc dodávají, že hloubka mikrodůlků by měla být také nižší než 1  $\mu\text{m}$ , aby se projevil benefit mikrodůlků v EHL kontaktu.

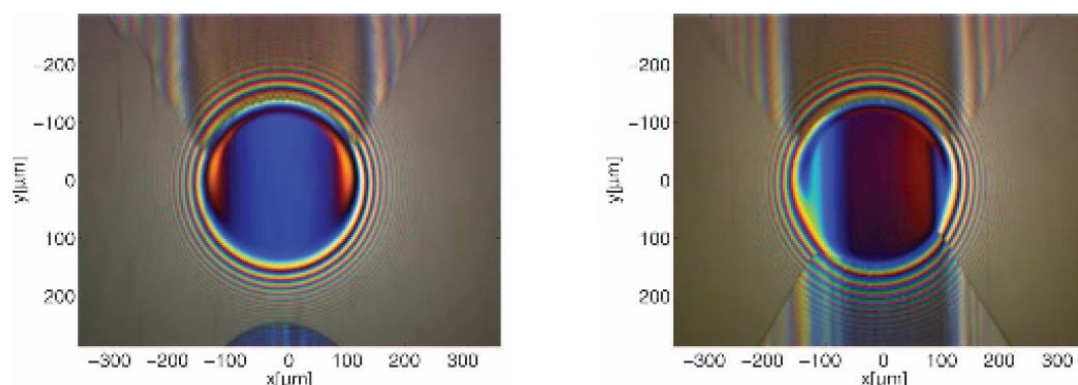


a)

b)

Obr. 16 Tloušťka mazacího filmu a tlak pro: (a) plně zaplavený EHL kontakt, (b) hladovějící EHL kontakt [70]

Výsledky popsané výše byly zaměřeny především na kontakty, které pracují pod podmínkami, kdy je kontakt zcela zaplaven mazivem (Obr. 16a; Obr. 17a). Jedná se o podmínky, kdy je v systému vždy dostatek maziva pro zaplnění vstupu kontaktu a oddělení třecích povrchů. V případě nedostatečného množství maziva dochází ke hladovění kontaktu (Obr. 16b; Obr. 17b). V tomto případě bude tloušťka mazacího filmu záviset také na množství maziva dostupného uvnitř kontaktu [70].



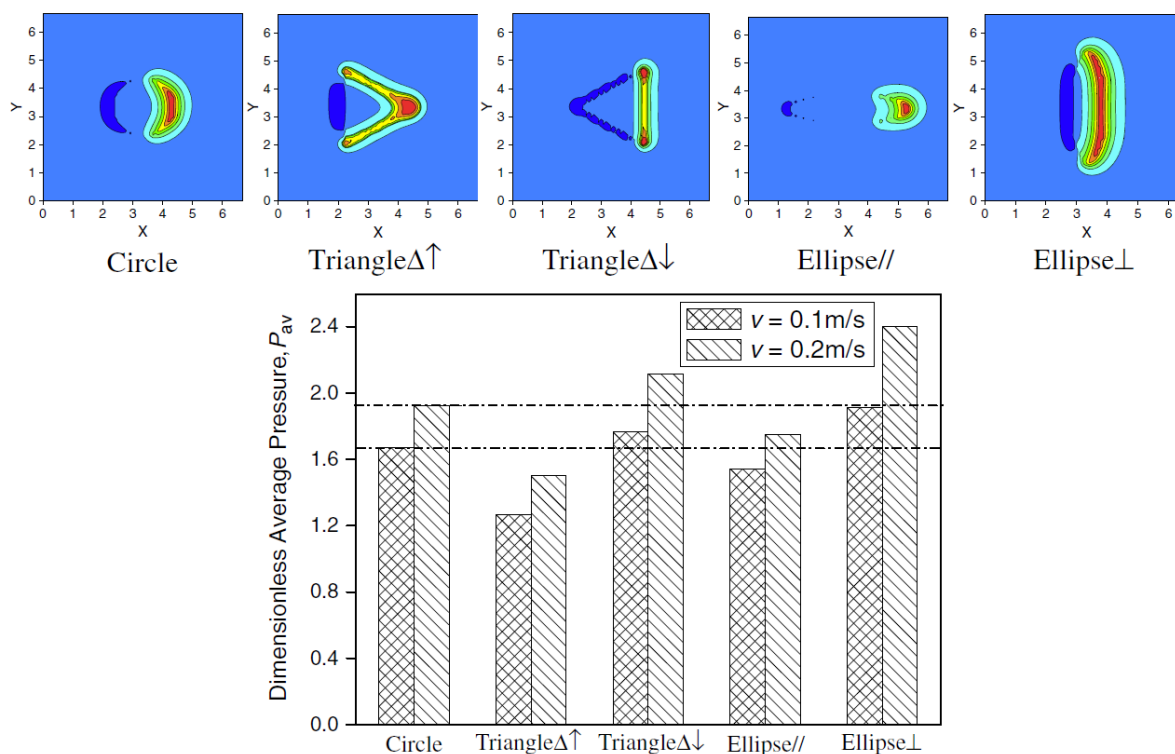
a)

b)

Obr. 17 Sekvence interferogramů: (a) plně zaplavený vstup kontaktu – přibližující se meniskus, (b) hladovějící kontakt [70]

I když boční výtok maziva snižuje tloušťku mazacího filmu v hladovějícím kontaktu v porovnání s plně zaplaveným kontaktem, může toto mazivo natéct zpět na vstupu do dalšího kontaktu. Tento proces je v literatuře známý jako doplňování maziva, neboli „replenishment“ [20]. V některých případech mikrodůlky vytvořené na třecích površích mohou fungovat jako mikrozásobníky maziva a napomoci zaplavit vstup kontaktu mazacím filmem. Nicméně se zdá, že v současné době neexistuje žádný teoretický model, který by popsal tento efekt. Vliv topografie třecích povrchů na tření v podmínkách hladovějícího kontaktu byl publikován pro polyoxymethylen [74]. V tomto případě bylo pozorováno, že pro velmi velký poměr mezi hloubkou a šířkou textury mazivo z kontaktu zcela zmizí a není tak pozorován žádný pozitivní vliv textury na snížení tření.

Vysoce zatížené kontakty často pracují v režimu EHD, smíšeného nebo mezného mazání [75], v těchto provozních podmínkách hrají mikrodůlky velmi zásadní roli, což publikoval například A. Erdemir [76] a H. Yu [77]. Tvar, velikost a orientace textury může významně ovlivnit účinnost mazání (Obr. 18). Této problematice se věnoval M. Kaneta a kol., který studoval průchod příčného výstupku v EHL kontaktu [78], numericky řešil průchod příčného výstupku přes EHL kruhový kontakt za prokluzu třecích povrchů C. H. Venner a kol. [79]. Vliv orientace povrchové struktury byl pak řešen ve studii Y. Hu [80], D. Zhu [81] a X. Ai [82]. V případě nestacionárních podmínek, které reprezentuje náhlý start a zastavení třecích povrchů byl prokázán příznivý vliv mikrodůlek, který vedl ke snížení tření a opotřebení povrchů. Mikrodůlky, které slouží jako mikrorezervoáry maziva dokážou emitovat mazivo v kritických fázích provozu strojních součástí, což publikoval J. Zhao a kol. [83].



Obr. 18 Průměrný tlak  $P_{av}$  pro různé tvary textury povrchu a orientace [77]

Cílená modifikace topografie třecích povrchů představuje jeden ze způsobů zlepšení tribologických vlastností mazaného kontaktu. V oblasti styku konformně zakřivených třecích povrchů bylo z uvedených studií prokázáno pozitivní ovlivnění kontaktu cílenou modifikací topografie. Studie zaměřené na tuto problematiku se věnovaly především vlivem cílené modifikace na tvar a tloušťku mazacího filmu. Bylo prokázáno, že v okolí mikrodůlky dochází k lokálnímu navýšení tloušťky mazacího filmu, a tedy k lepšímu oddělení třecích povrchů v kontaktu. Tento efekt má za následek také snížení tření a opotřebení třecích dvojic.

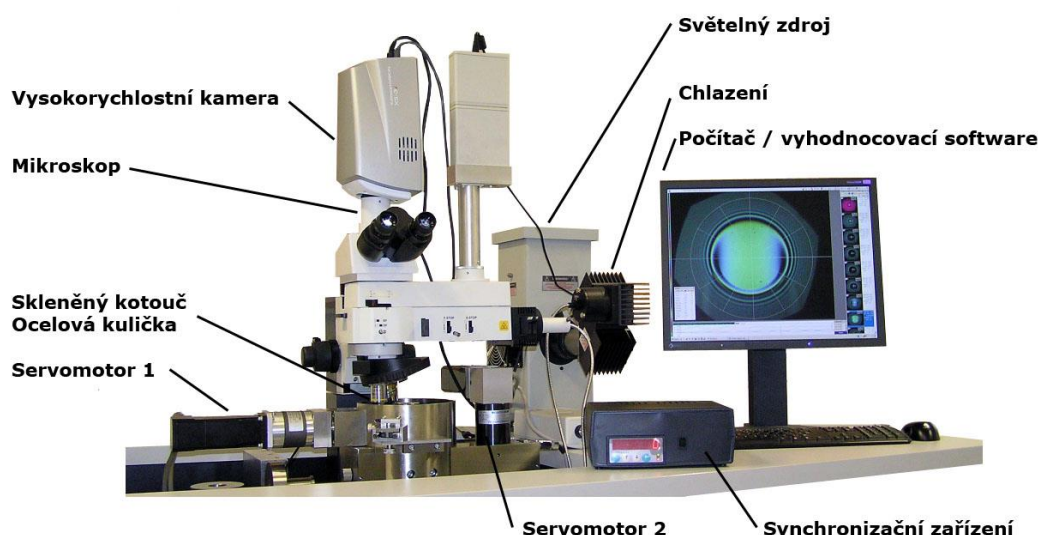
Studium problematiky cílené modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů přináší pozitivní výsledky pouze v případě dodržení určitých kritérií. V tomto případě hraje důležitou roli tvar a velikost mikrodůlek a jejich uspořádání do textury v kontaktní oblasti. Dále režim mazání a provozní podmínky, za kterých kontaktní povrchy pracují. Studium zaměřené na tuto problematiku ukázalo, že vhodně navržená textura tvořená mělkými mikrodůlkami může pozitivně ovlivnit utváření tloušťky mazacího filmu u nekonformních kontaktů za podmínek EHD, mezného a smíšeného mazání, popřípadě při nestacionárních provozních podmínkách. V tomto případě fungují jednotlivé mikrodůlky na třecím povrchu jako mikrozásobníky maziva. Tyto

mikrorezervoáry mohou dodávat do kontaktu dodatečné množství maziva a tím lépe oddělují třecí povrchy.

Následující kapitola se zabývá vlastním přínosem autora k problematice studia utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Cílem této kapitoly je experimentálním přístupem objasnit zejména vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem a vliv vstupní vrstvy maziva na tloušťku mazacího filmu.

## 2. STUDIUM UTVÁŘENÍ MAZACÍCH FILMŮ ZA PODMÍNEK NEDOSTATEČNÉHO ZÁSOBOVÁNÍ KONTAKTU MAZIVEM

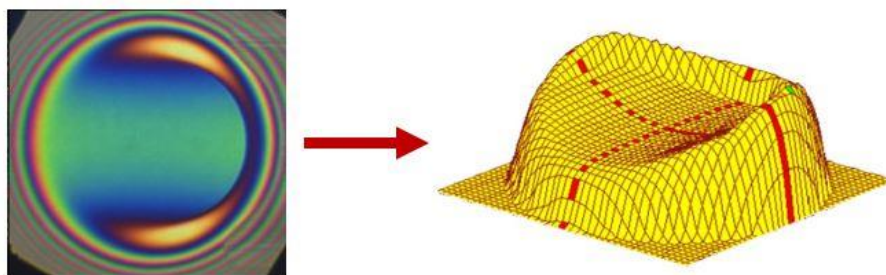
K experimentálnímu studiu utváření tenkých mazacích filmů byl použit tribometr typu „kulička-disk“ (Obr. 19). V tomto tribometru je mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným (safírovým) kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou. Horní strana kotouče je pokryta antireflexní vrstvou, spodní pak vrstvou chromu. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny servomotory, což umožňuje modelovat podmínky čistého valení, popřípadě s nadefinovaným prokluzem třecích povrchů (2).



Obr. 19 Experimentální zařízení pro studium tenkých mazacích filmů

Utváření mazacího filmu je pozorováno pomocí mikroskopového zobrazovacího systému a v závislosti na studovaných problémech je volena optimální kombinace světelného zdroje a kamery. Měřicí metodou ke stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu je kolorimetrická interferometrie [84].

K osvětlení kontaktu se v tomto případě používá zdroj bílého světla. Při osvětlení mazaného kontaktu se paprsek dělí při průchodu tenkou chromovou vrstvou disku na dvě části. První část se odrazí od vrstvy chromu zpět do objektivu mikroskopu. Druhá část se po průchodu vrstvou chromu a maziva odrazí od povrchu kuličky také zpět do objektivu. Tím, že svazek světla urazí rozdílnou vzdálenost, dojde k posuvu jeho fáze, což se projeví interferencí. Za použití vhodné kalibrace pak lze přiřadit jednotlivým barvám konkrétní hodnoty, které odpovídají tloušťce mazacího filmu (Obr. 20). Užití kolorimetrické interferometrické metody v kombinaci s vysokorychlostní kamerou umožňuje rekonstruovat vytváření mazacího filmu při nedostatečném zásobování kontaktu mazivem, popřípadě experimentálně studovat utváření mazacího filmu v okolí mikrodůlků.



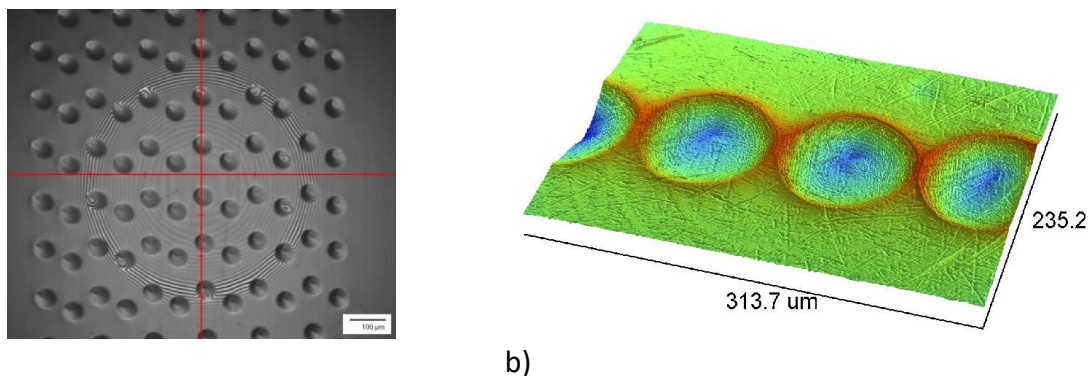
*Obr. 20 Stanovení tloušťky mazacího filmu z chromatického interferogramu*

Jako vzorek pro měření byla použita komerčně dodávaná kulička z ložiskové oceli (ČSN 14 109, ekvivalent 100Cr6, AISI 52100, DIN W.13505) o průměru 25,4 mm (60-66 HRC). K vytváření jednotlivých mikrodůlků na povrchu vzorků byl použit přípravek k mechanickému vyrážení pomocí diamantového hrotu o poloměru zaoblení 0,2 mm (typ Rockwell) s manuálním posuvem. Pro vytváření matic mikrodůlků bylo zkonstruováno zcela nové progresivní zařízení s možností automatizace celého texturovacího procesu (Obr. 21).



*Obr. 21 Plně automatické zařízení pro tvorbu mikrodůlků*

Princip zařízení pro tvorbu mikrodůlků vychází z průmyslově používaných mikroúderových značících systémů. K polohování kuličky slouží lineární posuv s přípravkem pro upnutí texturovaného vzorku. Základem texturovací jednotky je tlačný elektromagnetický aktuátor. Vertikální nastavení indentoru je pak zajištěno elektronicky řízeným vodícím šroubem. Texturovací jednotkou tvoří stejnosměrný elektromagnet s vratnou pružinou o jmenovitém tahu 27 N. Elektromagnet je ovládaný stejnosměrným napětím 24 V a jeho maximální zdvih je 12 mm. Samotný indentor je pevně spojen k pohyblivému jádru (kotvě). Na elektromagnet je přiveden přesně nastavený proud, kotva se vysune a indentor se dostane do kontaktu s povrchem vzorku. Při kontaktu je tak vytvořen mikrodůlek. Řídicí software pak celý proces automatizuje a vzniká požadovaná textura povrchu s předem nastaveným rozložením a velikostí mikrodůlků (Obr. 22).



a)

b)

Obr. 22 Textura s mikrodůlky vytvořenými na kuličce o průměru 25,4 mm: (a) fotografie malých mikrodůlků, (b) 3D profil velkých mikrodůlků

Vstupní experimenty prokázaly, že při prokluzu třecích povrchů dochází k ovlivnění toku maziva. Mazivo zachycené v mikrodůlku je vytlačováno do kontaktu ve směru, popřípadě proti směru pohybu třecí dvojice. V případě, kdy se ocelová kulička pohybuje rychleji než skleněný kotouč, můžeme pozorovat místní nárůst tloušťky mazacího filmu za mikrodůlkem. Pokud se skleněný kotouč pohybuje rychleji než ocelová kulička, můžeme pozorovat, že mazivo ovlivňuje oblast před mikrodůlkem. Tyto série vstupních experimentů potvrdily vhodnost použité experimentální metody ke studiu utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem.

Pro rozlišení citovaných obrázků ze souboru článků bude v následujícím textu používáno pro tyto zdroje stejné (originální) anglické označení, tak jak je tomu v těchto článcích uvedených v kapitole 2.3, tj. např. Fig. 1, respektive Table. 1 doplněné o odkaz na konkrétní článek.

## 2.1 Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem

Vlivu topografie třecích povrchů na utváření mazacích se věnují články [85], [86], [87], [88], kde je zpracováno utváření mazacího filmu za nestacionárních provozních podmínek, tj. podmínek, kdy je kontakt nedostatečně zásobován mazivem. Při těchto provozních podmínkách hraje topografie třecích povrchů velmi významnou roli v utváření mazacího filmu. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro tyto provozní podmínky se prokázalo, že mikrodůlky v mazaném kontaktu slouží také jako mikrozervoáry maziva a při průchodu vysoce zatíženým kontaktem emitují dodatečné mazivo a tím zlepšují režim mazání. Zároveň mohou sloužit jako kapsy pro zachycení částic opotřebení v mazivu a prodloužit tak trvanlivost třecích povrchů.

Ve článku [85] byly analyzovány dvě různé série experimentů zaměřených na vliv topografie třecích povrchů na utváření mazacího filmu za podmínek rozběhu třecích povrchů. Pro první sérii experimentů byla použita komerčně dodávaná ocelová kulička s drsností povrchu  $R_a = 0,018 \mu\text{m}$ , tj. s charakteristickým rozložením povrchových nerovností vzniklých finální dokončovací metodou. Tato série experimentů pro povrch bez mikrodůlků sloužila jako základ pro porovnání chování topografie s mikrodůlky. Druhá série experimentů byla posléze realizována na komerčně dodávané kuličce s indentovanou maticí mikrodůlků. Mikrodůlky byly vytvořeny za použití diamantového hrotu (typ Rockwell) a hloubka vytvořených mikrodůlků byla  $\sim 200 \text{ nm}$ , rozteč matice mikrodůlků byla  $50 \mu\text{m}$ . V této studii byly mikrodůlky vytvářeny manuálně, což bylo časově náročné a ve velikosti mikrodůlků byly patrné rozdíly. Z tohoto důvodu byly mikrodůlky vytvořeny pouze na malé části povrchu pro umožnění studia jejich chování. V tomto případě byla navržena a vyrobena nová koncepce synchronizace kamery s polohou kuličky, která umožnila zaznamenání průchodu oblasti



s mikrodůlky. Skleněný disk o průměru 150 mm měl opticky hladký povrch (bez povrchových nerovností). Pro pochopení fyzikální podstaty bylo v případě experimentálního měření vlivu textur vhodné použít základový olej bez aditiv, které by mohly chování mazacího filmu zásadně ovlivnit. V tomto případě byly všechny experimenty provedeny se základovým minerálním olejem LSBS ( $\eta = 0,69 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Zatížení kontaktu bylo 22 N, tomu odpovídá maximální Hertzův tlak 0,466 GPa a sledovaný průměr Hertzova kontaktu přibližně 300  $\mu\text{m}$ . Rychlost disku  $u_D$  a kuličky  $u_B$  byla volena s ohledem na dosažení konstantní hodnoty  $\Sigma$  (2). Pro záznam byla použita barevná vysokorychlostní kamera, která umožnila zaznamenat až 450 chromatických interferogramů za sekundu. Konečné rychlosti ocelové kuličky a skleněného disku při experimentálním měření dosáhly během 0,2 s hodnot  $0,00177 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respektive  $0,0205 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Hodnota prokluzu byla po dobu trvání experimentu neměnná s hodnotou 1,68. Tyto podmínky dovolily detailně sledovat postupné utváření mazacího filmu a změny v jeho tloušťce. Na Fig. 1 [85] je série čtyřech chromatických interferogramů a odpovídající profil tloušťky mazacího filmu ve směru pohybu kuličky. Interferogramy byly zachyceny v čase 38,8 ms (Fig. 1a), 42,2 ms (Fig. 1b), 46,7 ms (Fig. 1c) a 51,1 ms (Fig. 1d) [85] po rozběhu třecích povrchů. Se zvyšující se rychlostí třecích povrchů můžeme pozorovat utváření klínové vrstvy mazacího filmu, a také přítomnost schodu v tloušťce mazacího filmu. Tento schod se vytvoří právě v okamžiku rozběhu třecích povrchů. Stejně chování mazacího filmu pro vyšší hodnoty zrychlení při rozběhu třecích povrchů publikoval R. P. Glovnea a kol. [14]. Nicméně tento schod lze pozorovat přibližně do vzdálenosti poloviny průměru Hertzova kontaktu. Posléze tento schod zanikne, což může být způsobeno podmínkami prokluzu třecích ploch. Vytvoření druhého schodu nebylo při nastavených experimentálních podmínkách pozorováno. Z experimentu je zřejmé, že při rozběhu třecích povrchů s prokluzem není část kontaktu oddělena souvislou vrstvou mazacího filmu a dochází tak k vzájemnému styku třecích ploch. Přestože se tato oblast styku třecích ploch zmenšuje během rozběhu třecích povrchů, představuje možné riziko poškození. Stejná série chromatických interferogramů během rozběhu byla pořízena pro povrch s maticí mikrodůlků (Fig. 2 [85]). Je zřejmé, že mazivo je během rozběhu třecích povrchů vytlačováno z mikrodůlků ve směru pohybu třecí dvojice. Mazivo uniklé z mikrodůlku následně zvyšuje tloušťku mazacího filmu a redukuje vzájemný styk třecích povrchů. Zvětšení tloušťky mazacího filmu ve směru pohybu dosahuje přibližně 20 nm, což pomáhá efektivněji oddělit třecí povrchy. Chování mazacího filmu, které emituje z mikrodůlku při průchodu vysoce zatíženým kontaktem je však poněkud odlišné ve srovnání s předchozím experimentálním studiem [89], [67], kde výška a šířka oblasti se zvětšenou tloušťkou mazacího filmu zůstává téměř nezměněná při průchodu kontaktem. Fig. 3 [85] podrobně popisuje vliv mikrodůlku na tloušťku mazacího filmu při průchodu zaplaveným kontaktem. Tloušťka mazacího filmu v mikrodůlku se postupně snižuje (Fig. 3d [85]) při průchodu kontaktem a zároveň s vytlačováním maziva z mikrodůlku. Přesto se výška  $\Delta_1$  a šířka  $\Delta_2$  při průchodu napříč kontaktem významně nemění. Tento efekt je přisuzován tlaku uvnitř Hertzova kontaktu. Tento tlak je dostatečně vysoký, aby zvýšil viskozitu maziva do té míry, že se mazivo chová jako pevná látka. Tento efekt však nenastane v případě nedostatečného zásobování kontaktu mazivem, kdy se třecí povrchy dotýkají svými nerovnostmi povrchu. V tomto případě je zatížení přenášeno drsnostmi povrchu a částečně i mazivem. Díky místnímu snížení tlaku v nejbližším okolí těchto nerovností povrchu se již mazivo nechová jako pevná látka a může tedy emitovat z povrchových nerovností snadněji, což má pozitivní vliv na oddělení třecích povrchů. Tento jev popisuje Fig. 4 [85], kdy počáteční šířka lokálně zvětšené tloušťky mazacího filmu  $\Delta_3$  je přibližně stejná jako v případě plně zaplavených třecích povrchů. Avšak při průchodu napříč kontaktem se oblast vytlačeného maziva z mikrodůlku zvětšuje. Tento efekt na utváření mazacího filmu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem popisuje Fig. 4d - 4f [85] uvnitř vybrané kruhové oblasti. Bílé body reprezentují hodnoty tloušťky mazacího filmu nad 2 nm, tj. Fig. 4d – 56 %, Fig. 4e – 61 % a Fig. 4f – 68 % [85] oddělení třecích povrchů. Toto studium tak

představuje nový způsob jak snížit vzájemný styk třecích povrchů. Efekt utváření mazacího filmu pro reálný třecí povrch bez mikrodůlků popisuje Fig. 5 [85]. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, bylo prokázáno, že drobné povrchové nerovnosti mohou zvýšit tloušťku mazacího filmu [68]. Při rozběhu třecích povrchů je možné pozorovat v chromatických interferogramech oblasti se zvýšenou tloušťkou mazacího filmu. Tento dodatečný mazací film je vytlačován z mělkých povrchových nerovností během prokluzu třecích povrchů a pozorujeme tak stejné chování jako v předchozím případě. Na Fig. 5a - 5c [85] je přítomnost těchto oblastí naznačena pomocí šipek a na Fig. 5d - 5f [85] reprezentují opět bílé body hodnoty tloušťky mazacího filmu nad 2 nm. Detailněji lze tento efekt pozorovat na Fig. 6a- 6c [85], kdy se třecí povrchy rozbíhají s konstantním prokluzem 1,68. Tento nárůst tloušťky mazacího filmu pomáhá oddělit třecí povrchy. Pro objasnění schování výše uvedených rozdílů byla provedena dodatečná studie se zachyceným mazivem o tloušťce  $\sim 300$  nm. Na chromatických interferogramech (Fig. 7a - 7f [85]) lze pozorovat, že toto zachycené mazivo projde kontaktem téměř bez výrazných změn, zatímco mazivo zachycené v mikrodůlcích je vytlačováno do kontaktu. Tento experimentální přístup tak napomohl k pochopení výše uvedených rozdílů v chování maziva vytlačovaného z mikrodůlků při nedostatečném zásobování kontaktu mazivem.

Jak již bylo zmíněno ve studii [85], vytvoření textury manuálním způsobem je časově náročné a velikosti mikrodůlků jsou rozdílné. Z tohoto důvodu byl zautomatizován stávající způsob tvorby mikrodůlků tak, aby umožnil vytvoření struktury po celém obvodu povrchu třecího vzorku. Tento přístup umožnil studovat chování mikrodůlků v hladovějícím kontaktu.

Ve článku [86] tak byla studie vlivu chování mikrodůlků na tloušťku mazacího filmu prohloubena o chování hladovějícího kontaktu za podmínek čistého valení a prokluzu třecích povrchů. Na Fig. 3 [86] je možné kvalitativně i kvantitativně posoudit přínos textury mikrodůlků na rozložení tloušťky mazacího filmu při smíšeném mazání s použitím základového oleje SR600 a střední rychlost  $u = 0,0013 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Studie byla provedena pro mikrodůlky o hloubce  $\sim 250$  nm a rozteč matice mikrodůlků v horizontálním i vertikálním směru byla  $50 \mu\text{m}$ . V tomto případě se disk pohybuje pomaleji než kulička s mikrodůlkou ( $\Sigma = -0,5$ ), takže mazivo je emitováno za jednotlivými mikrodůlkou. Z chromatických interferogramů a rozložení tloušťky mazacího filmu lze pozorovat, že mazivo emitované z mikrodůlků efektivně odděluje třecí povrchy (Fig. 3c [86]) v porovnání s povrchem bez mikrodůlků.

Obdobná experimentální studie za podmínek smíšeného mazání byla publikována také ve článku [87]. V tomto případě byla střední rychlost třecích povrchů  $0,0013 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a prokluz  $\Sigma = 0,2$  (parametr mazání  $\Lambda = 0,6$ ). I v tomto případě bylo pozorováno navýšení tloušťky mazacího filmu (Fig. 5 [87]), které napomáhá lépe oddělit třecí povrchy za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem.

Na Fig. 4 [86] můžeme pozorovat chromatické interferogramy a jim odpovídající tloušťku mazacího filmu blízko centrální oblasti kontaktu pro povrch s mikrodůlkou a bez mikrodůlků. Tyto povrchy byly studovány při rozběhu trvajícím 0,2 s, kde prokluz třecích povrchů byl držen po celou dobu na konstantní hodnotě  $\Sigma = 1,53$ . Koncová rychlost kuličky resp. disku byla  $0,00177$  resp.  $0,0132 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Interferogramy jsou zachyceny v čase 46,7 ms od začátku rozběhu. Také tento experiment potvrzuje benefit mikrodůlků z hlediska formování mazacího filmu, tj. mikrodůlky navyšují tloušťku mazacího filmu v oblasti kontaktu, kde není vytvořen koherentní mazací film.

Dalším studovaným nestacionárním jevem probíhajícím při nedostatečného zásobování kontaktu mazivem je reverzace třecích povrchů. Stav minimálního množství maziva v kontaktu reprezentuje převážně moment, kdy dochází k vlastní reverzaci a třecí povrchy tak mají nulovou rychlost. V tomto okamžiku se vytvoří konstrikce mazacího filmu. Po změně smyslu pohybu tato konstrikce prochází skrz kontakt a velikost její míry závisí na rychlosti změny unášivé rychlosti. Zajímavým jevem z pohledu nedostatečného zásobování kontaktu mazivem je kavitační oblast na

výstupu z kontaktu, která je po změně smyslu pohybu vtažena do kontaktu. Tento jev může krátce po změně smyslu pohybu způsobit jeho následné hladovění. Z tohoto důvodu představuje tento nestacionární jev jistě nebezpečí z pohledu styku nerovností v místech rapidního poklesu tloušťky mazacího filmu. Fig. 5 [86] popisuje vliv mikrodůlků na tvorbu mazacího filmu při reverzaci třecích povrchů. V experimentu byla simulována změna smyslu pohybu třecích povrchů během 0,006 s z rychlosti +0,00177 na - 0,00177 m·s<sup>-1</sup> u kuličky a z +0,0053 na -0,0053 m·s<sup>-1</sup> u disku. Byl opět použit základový minerální olej typu LSBS. Tyto podmínky umožnily simulovat reverzaci třecích povrchů při hodnotě prokluzu  $\Sigma = 1$ . Tato hodnota byla dodržena v rámci celého studovaného děje. Na Fig. 5a-5c [86] jsou zobrazeny chromatické interferogramy zachycené v čase 0,061 (Fig. 5a); 0,097 (Fig. 5b) a 0,115 s (Fig. 5c) [86] po změně smyslu otáček třecích dvojic. Na Fig. 5a [86] můžeme pozorovat dvě kavitační oblasti. V tomto případě je napravo současný vstup maziva (předchozí oblast kavitace) po reverzaci a vlevo se začíná tvořit druhá kavitační oblast. Je zde také dobře pozorovatelná hranice mezi zachyceným mazivem a konstrikcí. Z profilu tloušťky mazacího filmu je pozorovatelné významné snížení tloušťky mazacího filmu po reverzaci otáček. Toto snížení tloušťky mazacího filmu je znázorněno na obrázku šipkami. Tato oblast se sníženou tloušťkou mazacího filmu prochází skrz netexturovaný kontakt. Ze srovnání texturovaného a netexturovaného povrchu je zřejmé, že mikrodůlky pomáhají dodat do kontaktu dodatečné množství maziva, což významně redukuje efekt snížení tloušťky mazacího filmu v oblasti konstrikce.

Hladovějící režim mazání reprezentuje další možnou aplikaci pro využití texturovaných povrchů. Nedostatečné množství maziva dodávaného do kontaktu může v tomto případě vést k prolomení mazacího filmu. Vhodně navržená textura by v tomto případě mohla napomoci dodatečnému zásobování hladovějícího kontaktu mazivem. Z tohoto pohledu je vhodné studovat vliv textury na hladovějící kontakt pro podmínky čistého valení, a také pro prokluz třecích povrchů. Na Fig. 6 [86] můžeme pozorovat vliv mikrodůlků na utváření mazacího filmu ve vysoce zatíženém částečně hladovějícím kontaktu při hodnotě prokluzu  $\Sigma = 1$  a pro základový minerální olej LSBS. Rychlost třecích povrchů byla pro experiment nastavena na 0,011 m·s<sup>-1</sup>. Olej nebyl v tomto případě rovnoměrně rozprostřen podél valivé dráhy, byly tak vytvořeny oblasti s nedostatečným, popřípadě nulovým množstvím maziva. Podařilo se tak experimentálně simulovat podmínky částečného hladovění kontaktu. Jakmile vstoupí do kontaktu oblast s nedostatečným množstvím maziva, tloušťka filmu se rapidně prolomí. Fig. 6a [86] popisuje situaci za podmínek plně zaplaveného kontaktu těsně před jeho prolomením, kde tloušťka mazacího filmu dosahuje přibližně 150 nm. Fig. 6b [86] pak popisuje rozložení tloušťky maziva přibližně po 16 ms. Mazací film zde rapidně propadnul na hodnotu pohybující se v řádu několika nanometrů. Můžeme tak mluvit o částečně hladovějícím kontaktu. Nicméně po dalších 11 ms později (Fig. 6c [86]) hladovějící oblastí prochází matice mikrodůlků. Tyto mikrodůlky dodávají do hladovějícího kontaktu dodatečné mazivo a oddělují tak lépe třecí povrchy. Na základě této studie lze konstatovat, že mikrodůlky fungují za podmínek hladovění jako mikrozásobníky maziva stejně jako v předchozích jmenovaných případech nedostatečného zásobování kontaktu mazivem.

Pro podmínky čistého valení publikoval Dumont a kol. [54] numerickou studii vlivu mikrodůlků na hladovějící kontakt. Závěry této numerické studie predikují, že pokud je mikrodůlek naplněn mazivem a vchází do vysoce zatíženého kontaktu, tak je část maziva uvolněna na vstupu do tohoto kontaktu. Určité množství maziva pak zůstává na vstupu do kontaktu a část je vtažena do kontaktu a pomáhá tak utvářet mazací film poblíž mikrodůlku. V tomto případě lze konstatovat, že benefit mikrodůlků lze pozorovat také za podmínek čistého valení na rozdíl od výše zmiňovaných aplikací, kde bylo potřeba určité míry prokluzu třecích povrchů. V předchozích experimentálních studiích nebyl tento efekt pozorován. Patrně z důvodu použití velmi mělkých mikrodůlků. Proto byla pro následující experiment vytvořena textura s přibližně 4000 mikrodůlky s hloubkou okolo 900 nm po celém obvodu kuličky, aby mohla být provedena experimentální studie chování mikrodůlků za

hladovějících podmínkách při čistém valení. Experiment byl proveden pro valivou rychlost  $0,13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a opět minerální základový olej LSBS. Distribuce maziva byla zvolena stejně jako v předchozím případě pro hladovějící podmínky za částečného prokluzu. Na Fig. 7a [86] je znázorněn chromatický interferogram při začátku hladovění, kdy do kontaktu vstupuje oblast bez maziva. Lze pozorovat, že meniskus se blíží ke vstupní oblasti kontaktu. Jakmile přibližující se meniskus prolomí tuto vstupní oblast, nastává v kontaktu hladovění (Fig. 7b [86]). Z Fig. 7b a 7c [86] je patrné, že v kontaktu není utvořen téměř žádný mazací film, který by oddělil třecí plochy s výjimkou oblastí nacházejících se za mikrodůlky (označeno šipkami). Je třeba zdůraznit, že experiment byl proveden za podmínek čistého valení a tedy navýšení tloušťky mazacího filmu nemůže vyplývat z rozdílných rychlostí třecích povrchů (prokluzu), jak tomu bylo v předchozích případech. Tímto experimentem tak byl validován předpoklad, který byl již dříve uvažován v numerické studii [54]. Avšak vliv mikrodůlků na utváření mazacího filmu za podmínek čistého valení není limitován pouze pro případ, kdy dochází k plnému prolomení mazacího filmu. Další experiment byl proveden pro velmi malé množství maziva (cca  $0,017 \text{ ml}$ ) rovnoměrně rozdělené po celé valivé dráze. Pro tento typ experimentu byla zvolena mnohem vyšší valivá rychlost, a to  $0,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při této rychlosti třecích povrchů již pracuje kontakt za hladovějících podmínek mazání. Díky tomuto typu experimentu bylo možno poprvé pozorovat, že kontakt je pokryt body, které navyšují tloušťku maziva (Fig. 8a [86]). Z chromatického interferogramu na Fig. 8a; 8b [86] můžeme pozorovat, že těchto bodů s lokálním nárůstem tloušťky mazacího filmu je více než by odpovídalo počtu mikrodůlků, ze kterých by toto mazivo mohlo emitovat. Tento efekt jde vysvětlit tak, že body s lokálním navýšením tloušťky mazacího filmu zůstávají na povrchu kuličky po průchodu kontaktem a znovu vstupují do kontaktu při další otáčce. Pozorované vzdálenosti mezi těmito body nebyly konstantní, pohybovaly se mezi  $50 - 100 \mu\text{m}$ , takže po několika otáčkách bylo pozorováno více těchto míst vstupujících do vysoce zatíženého kontaktu (Fig. 8c [86]).

Jak již bylo zmíněno výše, vytváření mikrodůlků po celém obvodu součásti pomocí indentoru s diamantovým hrotem je časově velmi náročné. Čas na vytvoření takové textury navzdory celkové automatizaci procesu trvá i několik hodin. Motivace k následující studii [88] tak byla vedena snahou experimentálně ověřit vliv textur vznikajících při progresivních dokončovacích metodách na tvar mazacího filmu ve vysoce zatížených kontaktech. Jako jedna z progresivních dokončovacích metod se jeví balotínování. Balotínování patří mezi beztržiskové úpravy ploch a je založeno na principu vrhání aktivních částic (skleněných nebo keramických kuliček) proti povrchu upravovaného vzorku, a to pomocí proudu stlačeného vzduchu. Jako aktivní částice se nejčastěji používají skleněné mikrokuličky o průměru  $0,03$  až  $0,8 \text{ mm}$ . Proud skleněných mikrokuliček, které jsou strhávány stlačeným vzduchem, pak naráží na povrch vzorku rychlostí až  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V důsledku své vysoké kinetické energie vytvářejí mikrokuličky na povrchu vzorku plastické deformace. Vznikne tak požadovaná textura tvořená mikrodůlkami. Na strukturu výsledného povrchu má pak zásadní vliv zejména rychlost částic a směr dopadu na upravovaný povrch. Oproti dříve použitému indentoru, který dokáže vytvořit mikrodůlky pouze po obvodu součásti přináší balotínování možnost vytvořit texturu na celém povrchu vzorku během několika sekund. Touto metodou tak lze upravovat progresivně jednoduché i tvarově složité povrchy strojních součástí (ozubené kola, klikové a vačkové hřídele, písty, ventily, hlavy válců, atd.). Textura tak může být vytvořena i pro povrch reálného ložiska, což by umožnilo jednoduše přenést poznatky získané v rámci základního výzkumu utváření mazacích filmů dále do reálných aplikací.

V této studii [88], která se věnuje progresivní metodě vytváření textury balotínováním, byly použity skleněné mikrokuličky typu B 159 o průměru  $0,07$  a  $0,11 \text{ mm}$ . Na Fig. 3a [88] je zobrazen povrch komerčně dodávané broušené kuličky (třecího vzorku) z ložiskové oceli AISI 52100, na Fig. 3b [88] pak tentýž povrch kuličky po aplikaci balotínování. Pro experiment byl použit základový minerální olej LSBS ( $\eta = 0,69 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  při  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , viskózně tlakový koeficient  $\alpha = 23 \text{ GPa}^{-1}$ ). Experimenty

byly provedeny při zatížení 28 N, čemuž odpovídá Hertzův tlak 0,505 GPa (průměr Hertzova kontaktu 0,324 mm). Rychlosti disku  $0.000931 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a kuličky  $0.000133 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  byly drženy pro celý experiment při stejné hodnotě. Tyto předpoklady umožnily experimentálně simulovat podmínky odpovídající prokluzu třecích povrchů  $\Sigma = 1,5$ . Jako první byl proveden experiment vlivu balotínováním vytvořené textury na tvar mazacího filmu. Z interferogramu na Fig. 15 [88] je však patrné, že kontakt je realizován pouze mezi výstupky drsností třecích povrchu kuličky a povrchem opticky hladkého disku. Mazací film v tomto případě nedokáže oddělit třecí povrchy z důvodu nízkého tlaku a při relativním pohybu třecích povrchů má toto za následek setření vrstvy chromu na disku (Fig. 15b [88]). Za těchto podmínek nebylo možné takto vytvořenou texturu experimentálně studovat a bylo nutné povrch přešetřit, aby se redukovaly výstupky nerovností. Na Fig. 15c [88] již můžeme vidět texturu vzniklou po balotínování a následném přešetření. Na Fig. 16 [88] jsou zobrazeny interferogramy a profil tloušťky mazacího filmu napříč kontaktem pro kontakt za podmínek smíšeného mazání, kde rychlost disku je  $0,000931 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a rychlost kuličky  $0,000133 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\Sigma = 1,5$ ). V tomto případě je tloušťka mazacího filmu velmi malá a některé povrchové nerovnosti mazací film prolamují (parametr mazání  $\Lambda = 0,5$ ). Avšak můžeme pozorovat, že dodatečné mazivo, které je emitováno z textury vzniklé balotínováním a přešetřením navyšuje tloušťku mazacího filmu na 25 nm a tímto redukuje styk nerovností třecích povrchů. Další experiment byl proveden pro tento typ textury pro podmínky rozběhu třecích povrchů. Jak již bylo zmíněno, rozběh třecích povrchů reprezentuje možnost poškození třecích povrchů z důvodu jejich nedostatečného oddělení v prvních okamžicích po rozběhu. Interferogramy (Fig. 17 [88]) byly zachyceny 65 ms po rozběhu třecích povrchů. Rychlosti třecích povrchů dosáhly  $0,00663 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pro disk a  $0,00058 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pro kuličku ( $\Sigma = 1,68$ ). Na těchto interferogramech (Fig. 17 [88]) můžeme pozorovat utváření mazacího filmu a v jednotlivých řezech napříč kontaktem odečíst tloušťku mazacího filmu. Navýšení tloušťky filmu díky textuře dosahuje 20 nm a pomáhá tak lépe oddělit třecí povrchy. V porovnání s netexturovaným povrchem dosahuje tloušťka mazacího filmu pouze 3 nm a dochází tak ke styku nerovností třecích povrchů. Tato studie tak prokazuje pozitivní vliv progresivně vytvořené textury (balotínování a následné přešetření) na utváření mazacího filmu za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Jako další krok pro pokračování této experimentální studie se nabízí vytvořit za pomoci balotínování texturu stejného typu pro reálné valivé ložisko a sledovat vliv takto vzniklé textury s ohledem na jeho trvanlivost v porovnání s netexturovaným ložiskem. Tímto přístupem by bylo možné posunout poznatky získané v rámci základního výzkumu dále do reálných tribologických aplikací.

Jak již bylo zmíněno [86], hladovějící režim mazání reprezentuje možnou aplikaci pro využití texturovaných povrchů. Nedostatečné množství maziva dodávané do kontaktu vede k prolomení mazacího filmu a mikrodůlky v tomto případě napomáhají dodatečnému zásobování hladovějícího kontaktu mazivem. V předchozích experimentech [86] se podařilo experimentálně simulovat podmínky hladovění kontaktu, které však nastávaly nahodile. Z těchto experimentů lze vyvodit závěry, že podmínky, kdy nastává hladovění, jsou obtížně definovatelné. Jakmile vstoupí do kontaktu oblast s nedostatečným množstvím maziva, tloušťka filmu se rapidně prolomí a po vstupu vrstvy s dostatečným množstvím maziva opět plně zaplaví. Z tohoto důvodu je nutné podmínky, kdy nastává hladovění kontaktu přesně definovat a nalézt metodu, při které budou tyto podmínky dodrženy po celou dobu experimentu. Na základě těchto upřesněných podmínek lze studovat detailněji vliv textury na utváření mazacího filmu. Jeden z možných přístupů je jednoznačně definovat množství maziva na vstupu do EHL kontaktu. Následující kapitola se proto věnuje vývoji experimentální metody, která by poskytla údaje o tloušťce mazacího filmu v hladovějícím EHL kontaktu v závislosti na tloušťce mazacího filmu v jeho vstupní oblasti.

## 2.2 Vliv vstupní vrstvy maziva na tloušťku mazacího filmu v režimu nedostatečného zásobování kontaktu mazivem

Hladovějící kontakt se vyznačuje klesající tloušťkou mazacího filmu při nárůstu rychlosti nad určitou mez. Tento pokles je způsoben nedostatečným množstvím maziva ve vstupní oblasti. Hladovění v EHL kontaktu je závislé na umístění vstupní hranice a centrální tloušťka filmu je v hladovějícím režimu funkcí polohy vstupního menisku.

Počáteční hladovění se projevuje snížením tlaku v Hertzově oblasti a tloušťka mazacího filmu se snižuje až na nulu, jak se vstupní meniskus přibližuje k Hertzově oblasti. Struktura povrchu v podmínkách nedostatečného zásobování mazivem významně ovlivňuje polohu vstupního menisku, přičemž pozice menisku a geometrie struktury povrchu jsou dva převládající faktory, které určují tloušťku mazacího filmu. Následující studie [90] proto byla vedena snahou vyvinout experimentální metodu, která by byla schopna poskytnout údaje o tloušťce mazacího filmu v hladovějícím EHL kontaktu v závislosti na tloušťce mazacího filmu v jeho vstupní oblasti. Tato metoda by tak umožnila přesně stanovit vstupní podmínky pro hladovějící EHL kontakt v rámci následujícího studia vlivu povrchové textury na utváření mazacího filmu. Dále je možné na základě této experimentální metody validovat numerické modely, které se zabývají predikcí tloušťky mazacího filmu v hladovějícím kontaktu a pro svůj výpočet potřebují znát tloušťku mazacího filmu na vstupu do kontaktu.

Studie [90] je založena oproti předchozím výše jmenovaným studiím v kapitole 2.1 na použití dvoukontaktního tribologického simulátoru. Jedná se o modifikovanou verzi předchozího typu umožňující pro studium mazacích filmů simulovat podmínky čistého valení (poháněn je pouze disk). Tenký mazací film je zde tvořen v důsledku relativního pohybu disku a dvou valivých elementů. Metoda je založena na předpokladu, že v podmínkách čistého valení je reziduální tloušťka mazacího filmu na disku za výstupem z prvního EHL kontaktu  $h_{oil1}$  rovna polovině tloušťky mazacího filmu v centrální oblasti prvního kontaktu  $h_{c1}/2$  (Fig. 2 [90]). Druhá polovina maziva je zachycena na povrchu valivého tělesa a je distribuována zpět do vstupní oblasti kontaktu. Stejná situace nastává ve druhém kontaktu tak, že množství maziva vstupující do druhého kontaktu  $h_{oil}$  je součtem  $h_{oil1}$  a  $h_{oil2}$ . Tloušťka mazacího filmu v centrální oblasti druhého kontaktu pak může být předepsána vztahem  $h_{oil} = h_{c1}/2 + h_{c2}/2$ . Jako první valivý element byl pro experiment použit soudeček, a to z důvodu lepšího rozložení mazacího filmu ve výstupní oblasti kontaktu. Druhý valivý element je kulička o průměru 25,4 mm.

Zařízení umožňuje nastavit vzdálenost mezi dvěma elementy a vycentrovat jejich vzájemné valivé dráhy pomocí mikrometru. Zatížení obou valivých kontaktů je realizováno pomocí pákového mechanismu a přesné nastavení lze realizovat prostřednictvím snímače síly pro každý z kontaktů. Pro záznam interferogramů je opět použita vysokorychlostní kamera. Ve studii byly použity dvě elipticity soudečku (prvního valivého elementu), a to 1 a 1,83 - konkrétní experimentální podmínky experimentů popisuje Table. 1 [90]. První iniciační experimenty byly provedeny pro kontakty tvořené dvěma kuličkami. Toto nastavení ukázalo, že boční doplňování maziva hraje podstatnou roli v utváření mazacího filmu. Nebylo zcela možné nastavit kontakty do stejné valivé dráhy, která se v závislosti na zatížení pohybuje do šířky cca 300  $\mu\text{m}$ . V závislosti na poloze vstupního menisku byly pak ve druhém kontaktu pozorovány fluktuace mazacího filmu. V kontaktní oblasti tak bylo možno pozorovat lokální hladovění a zároveň lokální plné zaplavení ve stejném čase (Fig. 4 [90]). Z těchto chromatických interferogramů je však obtížné zajistit opakovatelnost měření centrální a minimální tloušťky mazacího filmu. Z tohoto důvodu byl pro následující experimenty již používán pouze soudeček, který umožnil lepší distribuci maziva pro druhý kontakt. V konfiguraci soudeček-kulička a přesně stanoveným množstvím maziva 28  $\mu\text{l}$  aplikovaným mikropipetou byl proveden již první experiment, ve kterém mohlo být zanedbáno zpětné boční doplňování maziva. Toto

nastavení již umožnilo lépe kontrolovat průběh experimentu. Na Fig. 5 [90] je již možno pozorovat vytvoření homogenního mazacího filmu ve druhém kontaktu. Odpovídající tloušťky mazacího filmu v závislosti na rychlosti třecích povrchů jsou zobrazeny na Fig. 6 [90] a redukce tloušťky mazacího filmu včetně srovnání s teoretickým předpokladem na Fig. 7 [90]. V porovnání s numerickým modelem lze konstatovat dobrou shodu výsledků s provedeným experimentálním měřením pro větší hodnoty rychlostí ( $h_{oil}/h_{cff2}$  pod 0,6). Nicméně pokud se první kontakt nachází v hladovějících podmínkách, podstatně to ovlivní získané výsledky při nižších rychlostech. Toto můžeme pozorovat na Fig. 8 [90], kde je interferogram prvního kontaktu. Z tohoto interferogramu je patrné, že rozložení tloušťky mazacího filmu není homogenní z důvodu bočního doplňování maziva. Z tohoto důvodu není rozložení vrstvy na vstupu druhého kontaktu vždy dostatečně homogenní a není možné dosáhnout hodnoty  $h_{oil}/h_{cff2}$  nad 0,65 s dobrou opakovatelností. Bylo proto nutné modifikovat tribometr tak, aby dodával kontinuální množství maziva do kontaktu a zároveň stíral přebytečné mazivo za druhým kontaktem po celou dobu experimentu (Fig. 9 [90]). V následujícím experimentu bylo zásobování mazivem řízeno kontinuálně programovatelnou injekční pumpou, což umožnilo homogenní množství maziva. Fig. 10 [90] pak prezentuje chromatické interferogramy při stejné valivé rychlosti  $0,063 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . První kontakt (Fig. 10a [90]) pracuje za plně zaplavených podmínek a generuje mazací film pro druhý kontakt (Fig. 10b [90]), který pracuje za podmínek hladovění. Tento typ experimentu byl proveden pro řadu různých rychlostí třecích povrchů a také pro plně zaplavené podmínky pro druhý kontakt, závislost tloušťky mazacího filmu je pak vynesena v grafu (Fig. 11 [90]). Ukázalo se, že tato konfigurace umožňuje dosažení hodnot  $h_{oil}/h_{cff2}$  nad hodnotu 0,65 s dobrou opakovatelností měření. Avšak podmínky plného zaplavení prvního kontaktu limitují stupeň hladovění druhého kontaktu. Je to způsobeno tím, že pro druhý kontakt můžeme nezávisle měnit v průběhu experimentu pouze zatížení, a to má pouze malý vliv na tloušťka mazacího filmu, a tím také na hodnotu  $h_{oil1}$ . Navzdory tomuto omezení ukazují získané experimentální výsledky, že tato metoda může být použita k definování podmínek hladovějícího kontaktu založeném na vstupní tloušťce mazacího filmu. Ve studii byl také uvažován faktor, který může mít vliv na přesnost metody. Bylo předpokládáno, že kontakty pracují za podmínek čistého valení. Nicméně pomocí digitálního bezkontaktního tachometru byl zjištěn prokluz třecích povrchů dosahující hodnotu mezi 1 - 5 %. Navzdory tomu tato metoda ukazuje dobrou shodu s teoretickou predikcí a je proto použitelná pro další experimentální studium hladovění.

Tímto experimentálním přístupem byla popsána metoda, která umožňuje následně stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu ve vysoce zatížených EHL kontaktech mezi odvalujícími se třecími povrchy.

## 2.3 Soubor článků

Soubor článků je řazen podle data vydání od nejstaršího po nejnovější.



- [85] KRUPKA, I., P. SVOBODA a M. HARTL. Effect of surface topography on mixed lubrication film formation during start up under rolling/sliding conditions. *Tribology International*. 2010, 43(5-6): 1035-1042. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.017. ISSN 0301679x. Impact Factor: 1.936



- [86] KRUPKA, I, M HARTL a P SVOBODA. Effects of surface topography on lubrication film formation within elastohydrodynamic and mixed lubricated non-conformal contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010-1-1, 224(8): 713-722. DOI: 10.1243/13506501JET657. ISSN 1350-6501. Impact Factor: 0.916



- [87] VRBKA, M., I. KŘUPKA, O. ŠAMÁNEK, P. SVOBODA, M. VAVERKA a M. HARTL. Effect of surface texturing on lubrication film formation and rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal contacts. *Meccanica*. 2011, 46(3): 491-498. DOI: 10.1007/s11012-010-9288-x. ISSN 0025-6455. Impact Factor: 1.949



- [88] VRBKA, M., I. KŘUPKA, P. SVOBODA, P. ŠPERKA, T. NÁVRAT, M. HARTL a J. NOHAVA. Effect of shot peening on rolling contact fatigue and lubricant film thickness within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts. *Tribology International*. 2011, 44(12): 1726-1735. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.06.019. ISSN 0301679x. Impact Factor: 1.936



- [90] SVOBODA, Petr, David KOSTAL, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. *Tribology International*. 2013, 67(1): 140-145. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.07.019. ISSN 0301679x. Impact Factor: 1.936



## ZÁVĚR

Tato práce shrnuje výsledky dosažené při studiu vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem. Z popsaných studií a experimentů realizovaných při nestacionárních provozních podmínkách je patrné, že může docházet k redukci tloušťky mazacího filmu vlivem nedostatečného přísunu maziva až na hodnoty drsnosti kontaktních povrchů. V rámci experimentálního studia byly popsány zejména rozběh, reverzace a hladovění třecích povrchů, tj. podmínky nedostatečného zásobování kontaktu mazivem.

Z experimentální analýzy je patrné, že při rozběhu třecích povrchů představuje počáteční vzájemný styk těles značné riziko poškození třecích povrchů. Při rozběhu nejsou totiž třecí povrchy po určitou dobu odděleny mazacím filmem. Při reverzaci třecích povrchů se vytváří konstriktce, která dokáže snížit tloušťku mazacího filmu a lokálně dochází také ke styku třecích povrchů. Hladovění představuje také podmínky, při kterých může dojít k prolomení tloušťky mazacího filmu, což představuje negativní podmínky pro třecí dvojici.

V rámci studia bylo prokázáno, že cílená modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů představuje jeden ze způsobů zlepšení tribologických vlastností mazaného kontaktu v případě dodržení určitých kritérií. V tomto případě hraje důležitou roli tvar a velikost mikrodůlků a jejich uspořádání v kontaktní oblasti. Dále režim mazání a provozní podmínky, za kterých kontaktní povrchy pracují. Studium zaměřené na tuto problematiku ukázalo, že vhodně navržená textura tvořená mělkými mikrodůlky, může pozitivně ovlivnit utváření tloušťky mazacího filmu při nestacionárních provozních podmínkách. V tomto případě fungují jednotlivé mikrodůlky na třecím povrchu jako mikrozásobníky maziva. Tyto mikrozásobníky mohou dodávat do kontaktu dodatečné množství maziva a tím napomáhají posunout mazací režim směrem k optimálním provozním podmínkám, v případě kdy není dostatek maziva v kontaktu.

Experimentální studium zaměřené na tuto problematiku se věnovalo především vlivem cílené modifikace na tvar a tloušťku mazacího filmu. Bylo prokázáno, že v okolí mikrodůlku dochází k lokálnímu navýšení tloušťky mazacího filmu a tedy k lepšímu oddělení třecích povrchů v kontaktu za podmínek prokluzu třecích povrchů. Tento efekt má mimo jiné za následek také snížení tření a opotřebením třecích dvojic. Tloušťka mazacího filmu v mikrodůlku se postupně snižuje při průchodu kontaktem a zároveň s vytlačováním maziva z mikrodůlku. Tento efekt způsoben vysokým tlakem uvnitř Hertzova kontaktu. Tento tlak je dostatečně vysoký, aby zvýšil viskozitu maziva do té míry, že se mazivo chová jako pevná látka. Tento efekt však nenastává v případě nedostatečného zásobování kontaktu mazivem, kdy se třecí povrchy dotýkají svými nerovnostmi povrchu. V tomto případě je zatížení přenášeno drsnostmi povrchu a částečně i mazivem. Díky místnímu snížení tlaku v nejbližším okolí těchto nerovností povrchu se mazivo nechová jako pevná látka a může tedy emitovat z povrchových nerovností snadněji, což má pozitivní vliv na oddělení třecích povrchů. Hladovějící režim mazání tedy reprezentuje vhodnou aplikaci pro využití texturovaných povrchů. Vhodně navržená textura v tomto případě může napomoci dodatečnému zásobování hladovějícího kontaktu mazivem.

Experimentálně bylo za podmínek čistého valení potvrzeno, že pokud je mikrodůlek naplněn mazivem a vchází do vysoce zatíženého kontaktu, tak je část maziva uvolněna na vstupu do tohoto kontaktu. Určité množství maziva pak zůstává na vstupu do kontaktu a část je do něj vtažena a pomáhá tak utvářet mazací film v blízkém okolí mikrodůlku. V rámci experimentálního studia se tedy prokázalo, že benefit mikrodůlků lze pozorovat také za podmínek čistého valení.

## SUMMARY

The understanding of surface texture influence on lubricant film behaviour under insufficient lubricant supply is crucial for controlled and reliable operation of machine parts. Surface texture in such situations as highly loaded contacts ranging from technical applications like rolling bearings, gears, cam-follower mechanisms, to medical applications such as artificial hip joints may have a positive effect.

As a results of trends in engineering design the conditions under which the contacts have to operate reliably have become increasingly severe. Higher loads, speed variations and higher temperatures lead to significantly reduced film thickness levels. In such cases some numerical studies show that the presence of shallow surface features can help to separate lubricated surfaces more efficiently than it could be suggested from the results obtained with smooth surfaces. It appears that the surface topography plays an important role during non-stationary conditions as a start-up or reversal conditions and properly designed topography of the rubbing surfaces can help to reduce the asperities interactions even during these transient operational conditions including severe starvation. This can lead also to increase performance and service life of machine parts.

The present study should therefore contribute to clarification of the above-mentioned issues for severe conditions as insufficient lubricant supply in highly loaded contact. The aim of the presented habilitation thesis is to provide a systematic overview and analysis of the results of experimental and theoretical studies on the influence of surface topography on lubricant film formation under transient and severe operating conditions.

The author's own contribution is included through the five scientific articles published in journals. Full-text of these articles forms a significant content of this work. Presented habilitation thesis is divided into two main parts:

The first part summarizes the current state of knowledge on the influence of surface topography modification at the lubricant film thickness distribution, through both experimental and theoretical studies. This part provides an overview of the current state of knowledge in the field of transient operating conditions and extends the study to insufficient lubricant supply conditions. The second part contains a comment about own work published in international journals, including full-text. This part is devoted to the analysis of the impact of surface topography modification to the lubrication film thickness and study of starved EHL contact based on thickness of oil layer in the contact inlet.

The results of the habilitation thesis showed that lubricant emitted by micro-dents can effectively lift off the real roughness features and thereby reduce asperities interactions within transient conditions. The same behaviour was observed also for insufficient lubricant supply conditions. The additional lubricant emitted from micro-cavities to the contact locally enlarges the separation of rubbing surfaces within starved contact under rolling/sliding conditions. The positive effect of surface micro-cavities has been observed within starved non-conformal contact under pure rolling conditions also. An increase in film thickness within severe starved contact was localized upstream of the micro-dents, which was recently predicted numerically.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] PETROV, N.P. Friction in machines and Effect of Lubricating liquid upon it. *Saint-Petersburg: Engeneering Journal*. 1883, (1).
- [2] REYNOLDS, Osborn. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments: Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Proceedings of the Royal Society of London, Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1886, (177), 157234.
- [3] HAMROCK, Bernard J a D DOWSON. *Ball bearing lubrication: the elastohydrodynamics of elliptical contacts*. New York: Wiley, c1981, xxv, 386 p.
- [4] MARTIN, H. M. Lubrication of gear teeth. *Engineering: London*. 1916, (102), 119-121.
- [5] ARCHARD, J. F. a M. T. KIRK Lubrication at Point Contacts. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1961-05, 261(1307), 532-550. DOI: 10.1098/rspa.1961.0094.
- [6] LUBRECHT, A. A., W. E. TEN NAPEL a R. BOSMA Multigrid, an Alternative Method of Solution for Two-Dimensional Elastohydrodynamically Lubricated Point Contact Calculations. *Journal of Tribology*. 1987, 109(3), 437-. DOI: 10.1115/1.3261467.
- [7] SPIKES, H A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999, 213(5), 335-352. DOI: 10.1243/1350650991542712.
- [8] VICHARD, J P. Transient effects in the lubrication of hertzian contacts. *ARCHIVE: Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982 (vols 1-23)*. 1971, 13(3), 173-189. DOI: 10.1243/JMES\_JOUR\_1971\_013\_030\_02.
- [9] TAYLOR, C. M. Valve Train Lubrication Analysis. In: *Vehicle Tribology: Proc. 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Amsterdam: Elsevier, 1991, 119–131.
- [10] CHANG, L. A Simple and Accurate Method to Calculate Transient EHL Film Thickness in Machine Components Undergoing Operation Cycles. *Tribology Transactions*. 2000, 43(1), 116-122. DOI: 10.1080/10402000008982320.
- [11] JIN, Z M, P YANG, J CUI a D DOWSON. Transient elastohydrodynamic analysis of elliptical contacts. Part 1: isothermal and Newtonian lubricant solution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2004, 218(3), 211-224. DOI: 10.1243/1350650041323403.
- [12] KANETA, M. For the Establishment of a New EHL Theory. In: DOWSON, D. *Lubrication at the frontier: the role of the interface and surface layers in the thin film and boundary regime : proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology held in the Institut national des science appliquées des Lyon, Lyon, France, 8th-11th September, 1998*. 1st ed. New York: Elsevier for the Institute of Tribology, the University of Leeds and Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1999, s. 25. DOI: 10.1016/S0167-8922(99)80025-X.
- [13] SUGIMURA, J. a H.A. SPIKES Technique for measuring EHD film thickness in non-steady state contact conditions. In: DOWSON, D. *Elastohydrodynamics '96: fundamentals and applications in lubrication and traction*. New York: Elsevier for the Institute of Tribology, the University of Leeds and Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1997, s. 91. DOI: 10.1016/S0167-8922(08)70439-5.
- [14] GLOVNEA, R P a H A SPIKES. Elastohydrodynamic film formation at the start-up of the motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001, 215(2), 125-138. DOI: 10.1243/1350650011541774.

- [15] USOV, P. P. A numerical analysis of the elastohydrodynamic line contact film formation at motion start-up. *Journal of Friction and Wear*. 2008, 29(1), 54-65. DOI: 10.3103/S1068366608010108.
- [16] WANG, J., T. HASHIMOTO, H. NISHIKAWA a M. KANETA Pure rolling elastohydrodynamic lubrication of short stroke reciprocating motion. *Tribology International*. 2005, 38(11-12), 1013-1021. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.07.022.
- [17] WEDEVEN, L. D., D. EVANS a A. CAMERON Optical Analysis of Ball Bearing Starvation. *Journal of Lubrication Technology*. 1971, 93(3), 349-. DOI: 10.1115/1.3451591.
- [18] WOLVERIDGE, P E, K P BAGLIN a J F ARCHARD. The starved lubrication of cylinders in line contact. *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols 1-196)*. 1970, 185(1970), 1159-1170. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1970\_185\_126\_02.
- [19] LUBRECHT, Ton, Denis MAZUYER a Philippa CANN. Starved elastohydrodynamic lubrication theory: application to emulsions and greases. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics*. 2001, 2(5), 717-728. DOI: 10.1016/S1296-2147(01)01208-2.
- [20] CHIU, Y. P. An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems. *A S L E Transactions*. 2008-03, 17(1), 22-35. DOI: 10.1080/05698197408981435.
- [21] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part IV—Starvation Results. *Journal of Lubrication Technology*. 1977, 99(1), 15-. DOI: 10.1115/1.3452973.
- [22] RANGER, A. P., C. M. M. ETTLES a A. CAMERON The Solution of the Point Contact Elasto-Hydrodynamic Problem. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1975-10, 346(1645), 227-244. DOI: 10.1098/rspa.1975.0174.
- [23] KINGSBURY, E. Parched Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Tribology*. 1985, 107(2), 229-. DOI: 10.1115/1.3261026.
- [24] ELROD, H. G. A Cavitation Algorithm. *Journal of Lubrication Technology*. 1981, 103(3), 350-. DOI: 10.1115/1.3251669.
- [25] CHEVALIER, F., A. A. LUBRECHT, P. M. E. CANN, F. COLIN a G. DALMAZ Film Thickness in Starved EHL Point Contacts. *Journal of Tribology*. 1998, 120(1), 126-. DOI: 10.1115/1.2834175.
- [26] JACOD, B., F. PUBILIER, P.M. E. CANN a A.A. LUBRECHT An Analysis of Track Replenishment Mechanisms in the Starved Regime. In: DOWSON, D. *Lubrication at the frontier: the role of the interface and surface layers in the thin film and boundary regime : proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology held in the Institut national des science appliquées des Lyon, Lyon, France, 8th-11th September, 1998*. 1st ed. New York: Elsevier for the Institute of Tribology, the University of Leeds and Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1999, s. 483. DOI: 10.1016/S0167-8922(99)80069-8.
- [27] DAMIENS, B., C. H. VENNER, P. M. E. CANN a A. A. LUBRECHT Starved Lubrication of Elliptical EHD Contacts. *Journal of Tribology*. 2004, 126(1), 105-. DOI: 10.1115/1.1631020.
- [28] BHUSHAN, B. Biomimetics: lessons from nature-an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009-03, 367(1893), 1445-1486. DOI: 10.1098/rsta.2009.0011.
- [29] BHUSHAN, Bharat. Bioinspired Structured Surfaces. *Langmuir*. 2012-01, 28(3), 1698-1714. DOI: 10.1021/la2043729.
- [30] BHUSHAN, B., Y. C. JUNG a K. KOCH Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009-03, 367(1894), 1631-1672. DOI: 10.1098/rsta.2009.0014.

- [31] KOCH, K., B. BHUSHAN, H.-J. ENSIKAT a W. BARTHLOTT Self-healing of voids in the wax coating on plant surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009-03, 367(1894), 1673-1688. DOI: 10.1098/rsta.2009.0015.
- [32] GAO, Xuefeng a Lei JIANG. Biophysics: Water-repellent legs of water striders. *Nature*. 2004-11, 432(7013), 36-36. DOI: 10.1038/432036a.
- [33] GAO, Huajian, Xiang WANG, Haimin YAO, Stanislav GORB a Eduard ARZT. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials*. 2005, 37(2-3), 275-285. DOI: 10.1016/j.mechmat.2004.03.008.
- [34] REIF, Wolf-Ernst. *Squamation and ecology of sharks*. Frankfurt am Main: Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft, 1985.
- [35] BAR-COHEN, Yoseph. *Biomimetics: biologically inspired technologies*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006, xviii, 527 p., [32] p. of plates.
- [36] GENZER, Jan a Kirill EFIMENKO. Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review. *Biofouling*. 2006, 22(5), 339-360. DOI: 10.1080/08927010600980223.
- [37] ALAM, Firoz, Tom STEINER, Harun CHOWDHURY, Hazim MORIA, Iftexhar KHAN, Fayez ALDAWI a Aleksandar SUBIC. A study of golf ball aerodynamic drag. *Procedia Engineering*. 2011, 13(1), 226-231. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.05.077.
- [38] SASAKI, Shinya. Environmentally friendly tribology (Eco-tribology). *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, 24(1), 67-71. DOI: 10.1007/s12206-009-1154-1.
- [39] ETSION, Izhak. State of the Art in Laser Surface Texturing. *Journal of Tribology*. 2005, 127(1), 248-. DOI: 10.1115/1.1828070.
- [40] SHINKARENKO, A., Y. KLIGERMAN a I. ETSION The Effect of Elastomer Surface Texturing in Soft Elasto-Hydrodynamic Lubrication. *Tribology Letters*. 2009, 36(2), 95-103. DOI: 10.1007/s11249-009-9464-0.
- [41] DUMITRU, G., V. ROMANO, H.P. WEBER, H. HAEFKE, Y. GERBIG a E. PFLÜGER Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications. *Applied Physics A: Materials Science*. 2000, 70(4), 485-487. DOI: 10.1007/s003390051073.
- [42] ZUM GAHR, K.H., M. MATHIEU a B. BRYLKA Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. *Wear*. 2007, 263(7-12), 920-929. DOI: 10.1016/j.wear.2006.11.024.
- [43] MOURIER, L, D MAZUYER, F-P NINOVE a A A LUBRECHT. Lubrication mechanisms with laser-surface-textured surfaces in elastohydrodynamic regime. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, 224(8), 697-711. DOI: 10.1243/13506501JET771.
- [44] VINCENT, Christophe, Guy MONTEIL, Thierry BARRIERE a Jean Claude GELIN. Control of the quality of laser surface texturing. *Microsystem Technologies*. 2008, 14(9-11), 1553-1557. DOI: 10.1007/s00542-008-0573-8.
- [45] SUDEEP, U., N. TANDON a R. K. PANDEY Performance of Lubricated Rolling/Sliding Concentrated Contacts With Surface Textures: A Review. *Journal of Tribology*. 2015-07, 137(3), 031501-. DOI: 10.1115/1.4029770.
- [46] NELSON, Jeffrey B a Daniel T SCHWARTZ. Electrochemical printing: in situ characterization using an electrochemical quartz crystal microbalance. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2005-12, 15(12), 2479-2484. DOI: 10.1088/0960-1317/15/12/033.
- [47] COSTA, H.L. a I.M. HUTCHINGS Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*. 2007, 40(8), 1227-1238. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.01.014.

- [48] PETERSSON, U. a S. JACOBSON Friction and Wear Properties of Micro Textured DLC Coated Surfaces in Boundary Lubricated Sliding. *Tribology Letters*. 2004, 17(3), 553-559. DOI: 10.1023/B:TRIL.0000044504.76164.4e.
- [49] STEINHOFF, K., A. KAPOOR a N. GUILLON Controlled wear as mechanism for the design of geometrically defined nanometric surface structures on forming tools. In: GEIGER, ed. by M. *Advanced technology of plasticity 1999*. Berlin: Springer, 1999, s. 265-270.
- [50] GRECO, Aaron, Steven RAPHAELSON, Kornel EHMANN, Q. Jane WANG a Chih LIN. Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibromechanical Texturing Method. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2009, 131(6), 061005-. DOI: 10.1115/1.4000418.
- [51] HONG, Min S. a Kornel F. EHMANN Generation of engineered surfaces by the surface-shaping system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1995, 35(9), 1269-1290. DOI: 10.1016/0890-6955(94)00114-Y.
- [52] ZHU, Wen-Hong, Martin B. JUN a Yusuf ALTINTAS. A fast tool servo design for precision turning of shafts on conventional CNC lathes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001, 41(7), 953-965. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00118-8.
- [53] MATSUMURA, Takashi a Satoru TAKAHASHI. Micro dimple milling on cylinder surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2012, 14(2), 135-140. DOI: 10.1016/j.jmapro.2011.12.002.
- [54] DUMONT, M.-L., P. M. LUGT a J. H. TRIPP Surface Feature Effects in Starved Circular EHL Contacts. *Journal of Tribology*. 2002, 124(2), 358-. DOI: 10.1115/1.1403457.
- [55] WANG, Q. Jane a Dong ZHU. Virtual Texturing: Modeling the Performance of Lubricated Contacts of Engineered Surfaces. *Journal of Tribology*. 2005, 127(4), 722-. DOI: 10.1115/1.2000273.
- [56] ZHU, D, T NANBU, N REN, Y YASUDA a Q J WANG. Model-based virtual surface texturing for concentrated conformal-contact lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, 224(8), 685-696. DOI: 10.1243/13506501JET739.
- [57] WANG, Q. Jane, Dong ZHU, Raosheng ZHOU a Fukuo HASHIMOTO. Investigating the Effect of Surface Finish on Mixed EHL in Rolling and Rolling-Sliding Contacts. *Tribology Transactions*. 2008-09, 51(6), 748-761. DOI: 10.1080/10402000801888937.
- [58] GAO, Leiming, Peiran YANG, Ian DYMOND, John FISHER a Zhongmin JIN. Effect of surface texturing on the elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip implants. *Tribology International*. 2010, 43(10), 1851-1860. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.02.006.
- [59] ITO, Hiroshi, Kiyoshi KANEDA, Toshio YUHTA, Ikuya NISHIMURA, Kazunori YASUDA a Takeo MATSUNO. Reduction of polyethylene wear by concave dimples on the frictional surface in artificial hip joints. *The Journal of Arthroplasty*. 2000, 15(3), 332-338. DOI: 10.1016/S0883-5403(00)90670-3.
- [60] ZHANG, Bo, Wei HUANG, Jingqiu WANG a Xiaolei WANG. Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE. *Tribology International*. 2013, 65(1), 138-145. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.01.004.
- [61] SAWANO, Hiroshi, Shin'ichi WARISAWA a Sunao ISHIHARA. Study on long life of artificial joints by investigating optimal sliding surface geometry for improvement in wear resistance. *Precision Engineering*. 2009, 33(4), 492-498. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2009.01.005.
- [62] CHOUDHURY, Dipankar, Filip URBAN, Martin VRBKA, Martin HARTL a Ivan KRUPKA. A novel tribological study on DLC-coated micro-dimpled orthopedics implant interface. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015, 45(1), 121-131. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2014.11.028.

- [63] CHYR, Anthony, Mingfeng QIU, Jared W. SPELTZ, Ronald L. JACOBSEN, Anthony P. SANDERS a Bart RAEYMAEKERS. A patterned microtexture to reduce friction and increase longevity of prosthetic hip joints. *Wear*. 2014, 315(1-2), 51-57. DOI: 10.1016/j.wear.2014.04.001.
- [64] YU, Haiwu, Xiaolei WANG a Fei ZHOU. Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure Between Conformal Contacting Surfaces. *Tribology Letters*. 2010, 37(2), 123-130. DOI: 10.1007/s11249-009-9497-4.
- [65] MOURIER, L., D. MAZUYER, A.A. LUBRECHT a C. DONNET Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International*. 2006, 39(12), 1745-1756. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.02.037.
- [66] KŘUPKA, I. a M. HARTL The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films. *Tribology International*. 2007, 40(7), 1100-1110. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.10.007.
- [67] KŘUPKA, I., M. VRBKA a M. HARTL Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts. *Tribology International*. 2008, 41(11), 1063-1073. DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.016.
- [68] KŘUPKA, I., D. KOUTNÝ a M. HARTL Behavior of real roughness features within mixed lubricated non-conformal contacts. *Tribology International*. 2008, 41(12), 1153-1160. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.02.005.
- [69] KRUPKA, Ivan, Martin HARTL, Martin ZIMMERMAN, Pavel HOUSKA a Siyoul JANG. Effect of surface texturing on elastohydrodynamically lubricated contact under transient speed conditions. *Tribology International*. 2011, 44(10), 1144-1150. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.05.005.
- [70] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. *Tribology Transactions*. 2011-03, 54(3), 470-496. DOI: 10.1080/10402004.2010.551804.
- [71] BRUZZONE, A.A.G., H.L. COSTA, P.M. LONARDO a D.A. LUCCA Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2008, 57(2), 750-769. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.003.
- [72] RAPOPORT, L., A. MOSHKOVICH, V. PERFILYEV, I. LAPSKER, G. HALPERIN, Y. ITOVICH a I. ETSION Friction and wear of MoS<sub>2</sub> films on laser textured steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 2008, 202(14), 3332-3340. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.009.
- [73] COSTA, H.L. a I.M. HUTCHINGS Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, 209(3), 1175-1180. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.026.
- [74] CHO, M.H. a Sangil PARK. Micro CNC surface texturing on polyoxymethylene (POM) and its tribological performance in lubricated sliding. *Tribology International*. 2011, 44(7-8), 859-867. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.03.001.
- [75] JACOBSON, Bo. Thin film lubrication of real surfaces. *Tribology International*. 2000, 33(3-4), 205-210. DOI: 10.1016/S0301-679X(00)00032-3.
- [76] ERDEMIR, A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. *Tribology International*. 2005, 38(3), 249-256. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.08.008.
- [77] YU, Haiwu, Wei HUANG a Xiaolei WANG. Dimple patterns design for different circumstances. *Lubrication Science*. 2013, 25(2), 67-78. DOI: 10.1002/lis.168.
- [78] KANETA, M., T. SAKAI a H. NISHIKAWA Optical Interferometric Observations of the Effects of a Bump on Point Contact EHL. *Journal of Tribology*. 1992, 114(4), 779-. DOI: 10.1115/1.2920948.
- [79] VENNER, C. H. a A. A. LUBRECHT Numerical Simulation of a Transverse Ridge in a Circular EHL Contact Under Rolling/Sliding. *Journal of Tribology*. 1994, 116(4), 751. DOI: 10.1115/1.2927329.
- [80] HU, Yuan-Zhong a Dong ZHU. A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts. *Journal of Tribology*. 2000, 122(1), 1-8. DOI: 10.1115/1.555322.

- [81] ZHU, Dong a Yuan-Zhong HU. Effects of Rough Surface Topography and Orientation on the Characteristics of EHD and Mixed Lubrication in Both Circular and Elliptical Contacts. *Tribology Transactions*. 2001, 44(3), 391-398. DOI: 10.1080/10402000108982472.
- [82] AI, Xiaolan a Herbert S. CHENG The Effects of Surface Texture on EHL Point Contacts. *Journal of Tribology*. 1996, 118(1), 59-67. DOI: 10.1115/1.2837093.
- [83] ZHAO, Jiabin a Farshid SADEGHI. The Effects of a Stationary Surface Pocket on EHL Line Contact Start-Up. *Journal of Tribology*. 2004, 126(4), 672-680. DOI: 10.1115/1.1759342.
- [84] HARTL, Martin, Ivan KŘUPKA, Radek POLIŠČUK a Miroslav LIŠKA. An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*. 1999, 42(2), 303-309. DOI: 10.1080/10402009908982221.
- [85] KRUPKA, I., P. SVOBODA a M. HARTL Effect of surface topography on mixed lubrication film formation during start up under rolling/sliding conditions. *Tribology International*. 2010, 43(5-6), 1035-1042. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.017.
- [86] KRUPKA, I, M HARTL a P SVOBODA. Effects of surface topography on lubrication film formation within elastohydrodynamic and mixed lubricated non-conformal contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, 224(8), 713-722. DOI: 10.1243/13506501JET657.
- [87] VRBKA, M., I. KŘUPKA, O. ŠAMÁNEK, P. SVOBODA, M. VAVERKA a M. HARTL Effect of surface texturing on lubrication film formation and rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal contacts. *Meccanica*. 2011, 46(3), 491-498. DOI: 10.1007/s11012-010-9288-x.
- [88] VRBKA, M., I. KŘUPKA, P. SVOBODA, P. ŠPERKA, T. NÁVRAT, M. HARTL a J. NOHAVA Effect of shot peening on rolling contact fatigue and lubricant film thickness within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts. *Tribology International*. 2011, 44(12), 1726-1735. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.06.019.
- [89] KŘUPKA, Ivan a Martin HARTL. Effect of Surface Texturing on Very Thin Film EHD Lubricated Contacts. *Tribology Transactions*. 2008-12, 52(1), 21-28. DOI: 10.1080/10402000801911838.
- [90] SVOBODA, Petr, David KOSTAL, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. *Tribology International*. 2013, 67(1), 140-145. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.07.019.