VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ
Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 257
ISSN 1213-418X

Ivan Křupka

POKROČILÉ PROBLÉMY ELASTOHYDRODYNAMIKY

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

POKROČILÉ PROBLÉMY ELASTOHYDRODYNAMIKY

ADVANCED PROBLEMS IN ELASTOHYDRODYNAMICS

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU „KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ“

VUTIUM

Brno 2008

KLÍČOVÁ SLOVA
elastohydrodynamické mazání, optická interferometrie, smíšené mazání, tloušťka mazacího filmu

KEY WORDS
elastohydrodynamic lubrication, optical interferometry, mixed lubrication, lubricant film thickness

© Ivan Křupka, 2008
ISBN 978-80-214-3606-0
ISSN 1213-418X

OBSAH

1 Úvod 5

2 Numerické řešení 6

3 Experimentální řešení 8

4 Nanometrické mazací filmy 11

5 Nehladké třecí povrchy 13

6 Reálné třecí povrchy 16

7 Závěr 18

8 Literatura 19

9 Abstract 23

Ivan Křupka je docentem na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se roku 1967 v Liptovském Mikuláši. V roce 1990 absolvoval studium na Strojní fakultě VUT v Brně, obor Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu. Po dvouměsíční praxi v První brněnské strojírně a absolvování vojenské prezenční služby byl v roce 1991 přijat do interního doktorandského postgraduálního studia na Strojní fakultě VUT v Brně. V roce 1995 nastoupil jako odborný asistent na Ústav konstruování FSI VUT v Brně, kde pracuje do současné doby. V roce 1997 obhájil disertační práci nazvanou *Experimentální stanovení tloušťky a teploty elastohydrodynamického mazacího filmu* a obdržel titul Dr. (Ph.D.). Za mimořádné výsledky v oblasti výzkumu dosažené v průběhu postgraduálního studia mu byla roku 1993 udělena Cena ministra školství, mládeže a tělovýchovy České republiky „Talent 92“. V roce 2002 se habilitoval na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně prací *Studium elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav* a byl jmenován docentem pro obor Konstrukční a procesní inženýrství.

Absolvoval několik studijních pobytů na zahraničních univerzitách, zejména ve Francii, Číně a Japonsku.

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena na tribologii, především na studium elastohydrodynamického a smíšeného mazání. Pro modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách (ve styku zubů ozubeného převodu, vačky a zdvihátka, ve valivém ložisku a u lineárního valivého vedení), navrhl a odladil několik variant simulátorů. S jejich pomocí lze v širokém rozmezí provozních podmínek (zatížení, rychlosti třecích povrchů, teplota maziva) studovat chování tenkých mazacích filmů v bodových kontaktech. Ke stanovení rozložení tloušťky mazacích filmů je využívána kolorimetrická interferometrie, metoda využívající postupů počítačového zpracování obrazů pro vyhodnocování chromatických interferogramů, na jejímž vývoji se rovněž částečně podílel. Dosažené výsledky byly publikovány v 22 původních vědeckých článcích otištěných v impaktovaných časopisech a ve 28 příspěvcích ve sbornících světových nebo evropských kongresů, sympózií a konferencí. O jejich mezinárodním ohlasu svědčí 45 citací podle Science Citation Index. Systematicky spolupracuje s univerzitními pracovišti v USA, Číně, Francii a Japonsku a s průmyslovými společnostmi v Německu a USA.

Pedagogicky působí od roku 1991, kdy v průběhu interního postgraduálního doktorandského studia vedl v prvním stupni magisterského studia výuku cvičení kurzů „Části a mechanismy strojů“. Od roku 1995 vedl výuku cvičení kurzů „Základy konstruování I a II“ a „Konstruování a CAD“ a od roku 1998 i kurzů „CAD“. Od roku 2002 je pověřen přednáškami v základním kurzu „Základy konstruování“. Zavedl a vyučuje předměty „Mikro a nanotechnika“ a „Vybrané kapitoly za základů konstruování“.

Od roku 2006 je členem vědecké rady Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a oborové rady doktorského studijního programu Konstrukční a procesní inženýrství.

1 ÚVOD

The recognition and understanding of elastohydrodynamic lubrication represents one of the major developments in the field of tribology in the twentieth century.
Bernard J. Hamrock (1994)

Tato slova jsou dokladem významu, který je přikládán úloze výzkumu elastohydrodynamického mazání při poznání procesů, probíhajících v mazaných kontaktech velmi zatěžovaných prvků tribologických soustav. Pro tento režim kapalinového mazání je charakteristické vytvoření tenkého mazacích filmu, oddělujícího třecí povrchy ve styku zubů ozubeného převodu, vačky a zdvihátka, ve valivém ložisku, u lineárního valivého vedení apod. Mazací film nejen zcela přenáší zatížení kontaktní dvojice, ale zároveň zabraňuje styku třecích povrchů, což vede k podstatnému snížení tření a opotřebení.

Koncem 40. let 20. století prokázal A. M. Ertel [1], že jak elastické deformace třecích těles, tak i změna viskozity maziva s tlakem nezpůsobují dostatečné zvýšení tloušťky mazacího filmu, jsou-li uvažovány odděleně. Zahrnutím obou těchto faktorů do řešení problému mazání velmi zatěžovaných nekonformně zakřivených povrchů položil základy elastohydrodynamického mazání. Rozvoj numerických i experimentálních metod umožnil v druhé polovině 20. století studium komplexních problémů spojených s problematikou elastohydrodynamického mazání. Jednalo se především o změny v rozložení tloušťky a tlaku v mazacím filmu způsobené nerovnostmi třecích povrchů, rozdílnou teplotou mazacího filmu podél a napříč kontaktní oblastí při kluzně-valivém vzájemném pohybu třecích povrchů, nenewtonovským chováním maziva či náhlými změnami v zatížení a rychlostech třecích povrchů. Stále významnější úlohu v mnoha oblastech techniky, zejména v záznamu dat, konstrukci mikromechanických zařízení a v automobilovém a leteckém průmyslu však hrají velmi tenké mazací filmy. To je způsobeno zejména zvyšováním teplot a tlaků v mazaných kontaktech v důsledku zlepšování vlastností materiálů a používání maziv s nižší viskozitou snižujících tření a tím i spotřebu energie. K tomu přistupuje zmenšování vzdáleností mezi pohybujícími se povrchy součástí, které je výsledkem pokroku ve vývoji miniaturních komponentů a zlepšování kvality povrchů.

V následujících kapitolách je nastíněn aktuální stav řešení vybraných problémů elastohydrodynamického mazání v oblasti velmi tenkých mazacích filmů a popsán příspěvek autora k jejich poznání.

2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ

Teoretické řešení elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů tuhých třecích těles vychází z předpokladu, že mazací film je v kontaktu třecích těles generován společným působením hydrodynamického tlaku v mazacím filmu a elastických deformací třecích povrchů. Na tvaru mazacího filmu a průběhu tlaku v kontaktu třecích těles se dále výrazně podílí změna dynamické viskozity a hustoty maziva s tlakem v kontaktní oblasti.

Rozložení hydrodynamického tlaku v elastohydrodynamickém mazacím filmu je popsáno Reynoldsovou rovnicí, kterou je možno získat odvozením z Navierových-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity, nebo přímo ze zákona o zachování hmotnosti za předpokladu ustáleného laminárního proudění newtonovské kapaliny. Oběma těmito postupy obdržíme Reynoldsovu rovnici v obecném tvaru, jejíž jednotlivé členy popisují hmotnostní průtoky způsobené gradienty tlaku v mazané oblasti, rychlostmi povrchů, pohybem povrchů v normálovém směru a místní roztažností maziva. Za předpokladu proudění pouze v tečném směru a při zanedbání místní roztažnosti maziva dostaneme redukovaný tvar Reynoldsovy rovnice, používaný při kapalinovém mazání nekonformně zakřivených těles [2]. Vyjádříme-li dále tloušťku mazacího filmu v bodovém kontaktu jako součet nedeformovaného tvaru kontaktní oblasti a elastických deformací třecích povrchů, dostaneme základní vztahy popisující elastohydrodynamický problém.

První plně numerické řešení problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů publikovali v roce 1975 A. P. Ranger, C. M. M. Ettles a A. Cameron [3]. Jejich teoretické řešení poprvé potvrdilo experimentálně získané poznatky o charakteristických rysech mazacího filmu v bodovém kontaktu. Obdobný přístup použili B. J. Hamrock a D. Dowson u elastohydrodynamicky mazaných eliptických kontaktů [4]-[7]. Ve své studii podrobně popsali vliv bezrozměrného parametru rychlosti U, zatížení W a materiálů G a parametru elipticity k[1] na rozložení tloušťky a průběh tlaku v mazacím filmu. Hodnoty těchto bezrozměrných parametrů byly zvoleny tak, aby v použitém rozsahu parametru elipticity bylo dosaženo podmínek elastohydrodynamického mazání. Na základě třiceti čtyř kombinací provozních podmínek Hamrock a Dowson získali vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu

$$H_{\min} = 3{,}63U^{0{,}68}W^{-0{,}073}G^{0{,}49}\left(1-e^{-0{,}68k}\right) \tag{1}$$

a centrální tloušťku mazacího filmu

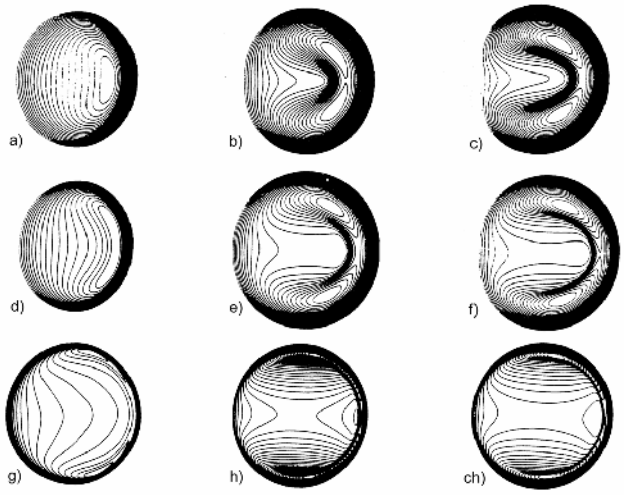
$$H_c = 2{,}69U^{0{,}67}W^{-0{,}067}G^{0{,}53}\left(1-0{,}61e^{-0{,}73k}\right). \tag{2}$$

Nehledě na omezený rozsah podmínek, pro které byly tyto rovnice odvozeny, jsou dodnes používány při odhadu tloušťky mazacího filmu v elastohydrodynamicky mazaných kontaktech tribologických soustav a slouží rovněž jako referenční hodnoty při prezentaci výsledků teoretických i experimentálních studií.

Při numerickém řešení problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů se pomocí diskretizace spojitá informace, obsažená v exaktním řešení nelineární diferenciální Reynoldsovy rovnice, nahradí diskrétní informací v konečném počtu míst řešené oblasti (uzlových bodech sítě). Ve výše uvedených numerických řešeních, byla pro řešení získané soustavy nelineárních rovnic použita Gaussova-Seidelova iterační metoda s dolní relaxací. Tato metoda sice

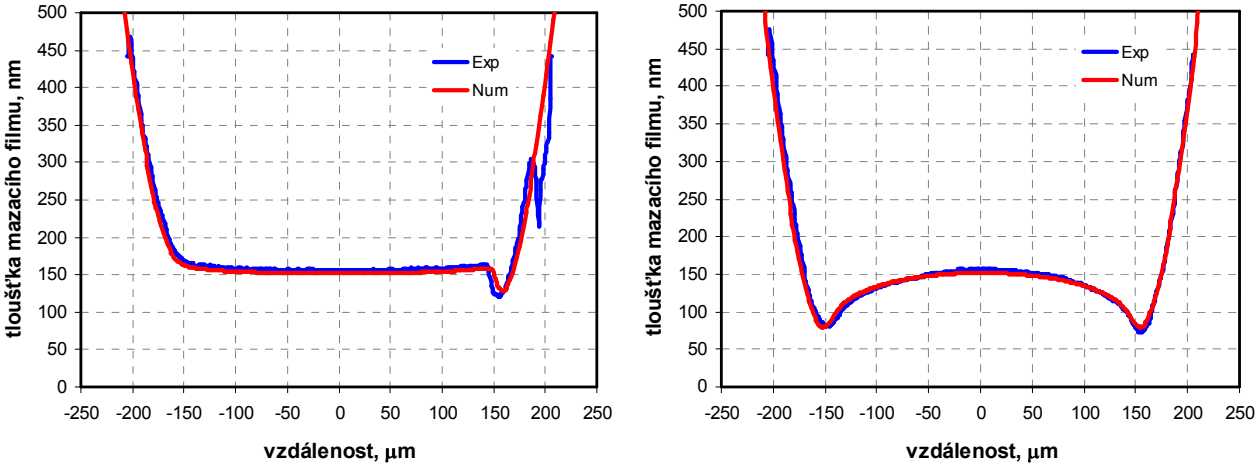
[1] $H=h/R$, $U=\eta u/E'R$, $G=\alpha E'$, $W=F/E'R^2$ a $k=a/b$, kde h je tloušťka mazacího filmu, R je redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru pohybu, η_0 je dynamická viskozita maziva při okolním tlaku, u je průměrná rychlost třecích povrchů ve směru pohybu, E' je redukovaný modul pružnosti třecích povrchů, α je viskozitně-tlakový součinitel maziva, F je normálová síla způsobená zatížením, a je délka hlavní poloosy kontaktní elipsy, b je délka vedlejší poloosy kontaktní elipsy.

neklade velké nároky na paměť počítače, ale vyžaduje značný počet iterací k dosažení konečného výsledku. Situace se výrazně změnila po zavedení multigridních (vícesíťových) numerických metod. V roce 1987 A. A. Lubrecht, W. E. ten Napel a R. Bosma [8] publikovali výsledky získané použitím multigridní metody pro řešení úlohy elastohydrodynamického mazání kruhových kontaktů (obr. 1). Prokázali, že použití multigridní metody při řešení Reynoldsovy rovnice může přinést výrazné zrychlení výpočtu. V současné době je tak možné získat rozložení tlaku a tloušťky v mazacím filmu i pro neustálené provozní podmínky a reálné třecí povrchy [10].



Obr. 1 Tvar elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhovém kontaktu [9].

Obdobný přístup k řešení elastohydrodynamického problému byl zvolen i výzkumným týmem tvořeným pracovníky Ústavu konstruování FSI VUT v Brně a společnosti Timken Česká republika. Pro řešení Reynoldsovy rovnice mazání byla implementována multigridní technika řešení v literatuře nazývaná jako Coarse Grid Correction Cycle (CGCC), která je modifikací Full Multi Grid (FMG) metody a která zajišťuje výraznou akceleraci konvergence problému. Vedle Reynoldsovy rovnice mazání vystupuje v soustavě rovnic daného problému také integro-diferenciální rovnice tloušťky mazacího filmu, na jejíž řešení byla aplikována multigridní metoda a to Multi Level Multi Integrace (MLMI). Úspěšné zvládnutí aplikace pokročilých numerických metod [11] umožnilo nejen realizovat detailní porovnání naměřených a vypočítaných rozložení tloušťky mazacích filmů v bodových kontaktech (obr. 2), ale i cíleně plánovat experimenty.

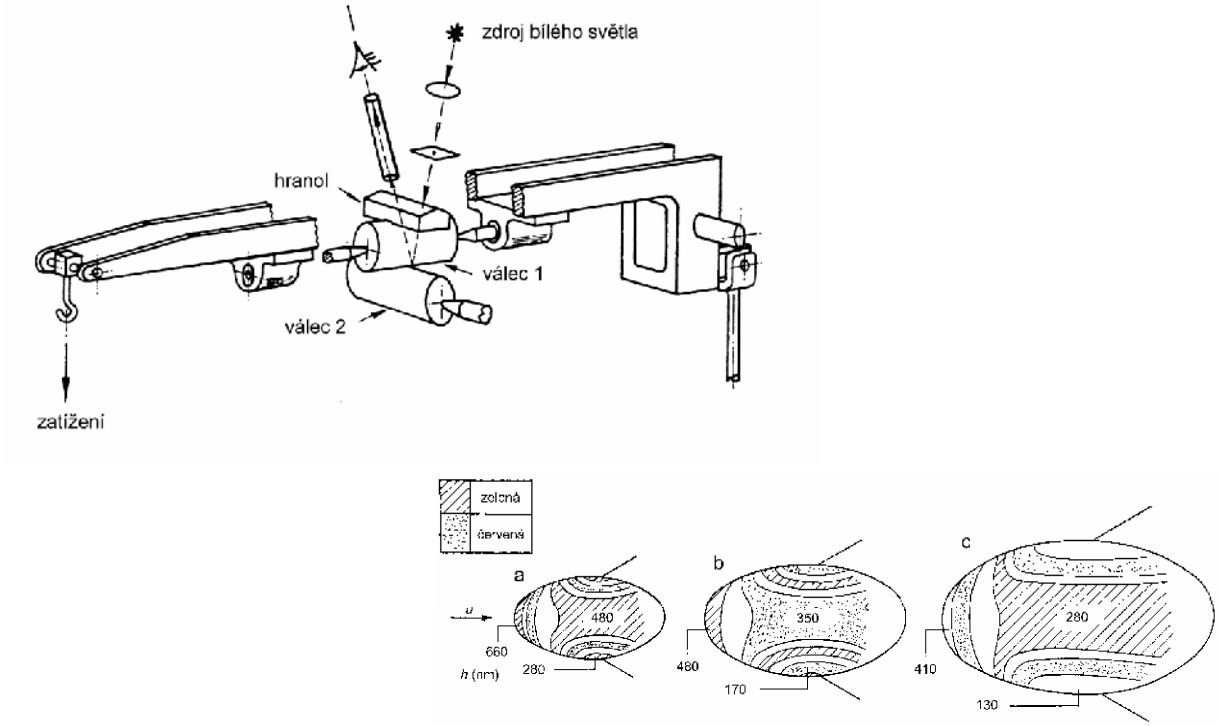


(a) (b)

Obr. 2 Srovnání naměřeného a vypočítaného průběhu tloušťky mazacího filmu podél (a) a napříč (b) kruhovým kontaktem pro rychlost valení 0,0342 m/s [11].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ

V roce 1961 publikovali J. F. Archard a M. T. Kirk [12] první kvantitativní experimentální studii zabývající se elastohydrodynamickým mazáním bodových kontaktů. Podmínky vyskytující se u bodových kontaktů v reálných tribologických soustavách modelovali v kontaktu dvou válců s mimoběžnými osami. V průběhu měření použili zdroj bílého světla k osvětlení kontaktní oblasti, pro stanovení změny její velikosti se zatížením. Přitom v kontaktní oblasti pozorovali interferenční proužky stejné tloušťky, jejichž barvy se měnily se změnou zatížení a rychlosti třecích povrchů. V následujících studiích [13], [14] ukázali, že tímto způsobem lze získat rozložení tloušťky mazacího filmu v mazaném eliptickém kontaktu mezi dvěma válci vyrobenými z polymethylmethakrylátu (obr. 3).

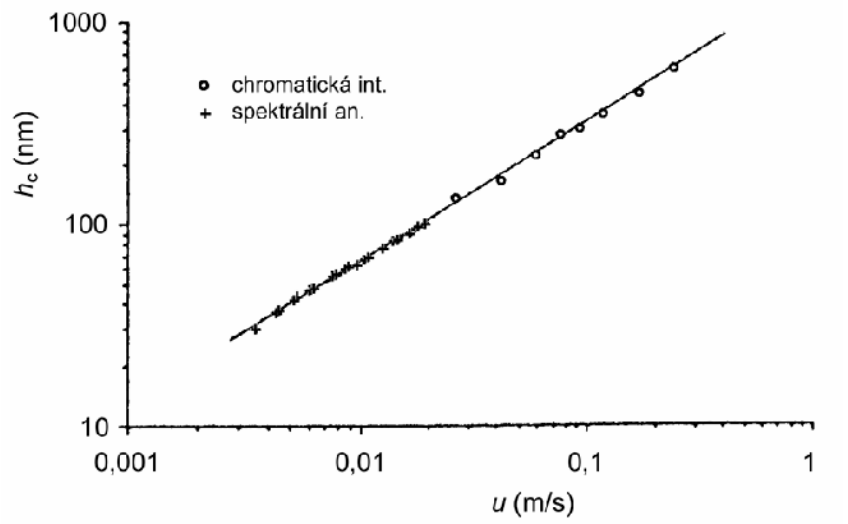


Obr. 3 Zařízení se dvěma zkříženými válci pro studium mazacích filmů a proužky stejné tloušťky pozorované Archardem a Kirkem v eliptickém kontaktu [13].

Práce Archarda a Kirka znamenaly zásadní průlom v oblasti experimentálního studia elastohydrodynamického mazání. V průběhu 70. a 80. let 20. století se optická interferenční metoda stala nejpoužívanější měřicí metodou ke studiu chování elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů [15]. Umožnila nejen získat detailní informace o tvaru mazacího filmu, ale naměřené hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu byly použity i k ověření teoretických modelů, které byly využívány při návrhu velmi zatížených prvků tribologických soustav.

Při zvyšování únosnosti a účinnosti těchto soustav však současně docházelo ke snižování tloušťky mazacího filmu oddělujícího třecí povrchy. Postupně se tak omezená rozlišitelnost konvenční optické interferenční metody, daná šířkou interferenčního proužku, stala limitujícím faktorem dalšího studia problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů. Tenké mazací filmy o tloušťkách až do 10 nm měřili sice už F. J. Westlake a A. A. Cameron [16], při užití klínovité vrstvy oxidu křemičitého, nepřekonali však omezenou rozlišovací schopnost chromatické interferometrie. H. A. Spikes a G. Guangteng [17] proto zvolili stejnou soustavu vrstev a zaznamenávali chromatické interferogramy, jejichž barvy se měnili s rotací kotouče, tj.

s tloušťkou vrstvy oxidu křemičitého. Při známé tloušťce této vrstvy (od 50 do 200 nm) po obvodu kotouče mohli stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu. Protože však tvar mazacího filmu nemohl být získán z jednoho interferogramu, byla tato metoda velmi nepraktická a možnost jejího použití pro studium elastohydrodynamicky mazaných kontaktů omezená. Tento nedostatek překonali G. J. Johnston, R. Wayte a H. A. Spikes [18] spektrální analýzou interferenčních barev ke stanovení vlnové délky, při které nastává interferenční maximum. Způsob vyhodnocování chromatických interferogramů, společně s užitím soustavy vrstev tvořené vrstvou oxidu křemičitého o tloušťce okolo 500 nm a vrstvou chrómu o tloušťce 20 nm, umožnil měřit tloušťku velmi tenkých mazacích filmů v centrální oblasti kruhového kontaktu (obr. 4).



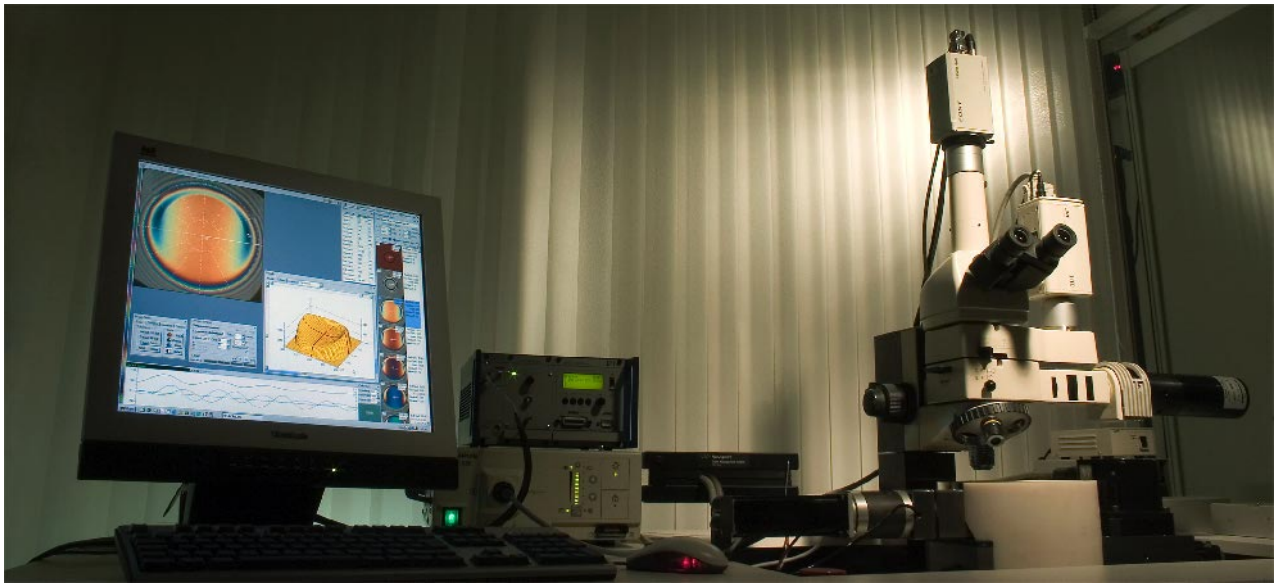
Obr. 4 Srovnání hodnot centrální tloušťky mazacího filmu změřených chromatickou interferometrií a spektrální analýzou chromatických interferogramů pro naftenický základový ropný olej [18].

Výše uvedený způsob vyhodnocování chromatických interferogramů, založený na spektrální analýze interferenčních barev, je v dnešní době používán pro stanovení hodnoty tloušťky mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu při studiu chování velmi tenkých mazacích filmů s tloušťkami pod 10 nm, tj. na rozhraní mezi elastohydrodynamickým a mezným mazáním [19]. I když tato metoda umožňuje stanovit tloušťku mazacího filmu i v řezu podél nebo napříč kontaktní oblastí, není obecně vhodná pro studium minimální tloušťky mazacího filmu, jejíž poloha v kontaktu se mění v závislosti na provozních podmínkách. L. Gustafsson, E. Höglund a O. Marklund [20] proto chromatické interferogramy zaznamenali na fotografický film a po digitalizaci zpracovali v počítači. Pro porovnávání interferenčních barev použili barevný prostor HSI, pro jehož každou složku (*H* - barevný tón, *S* - sytost, *I* - jas) nalezli jedinou tloušťku mazacího filmu v kalibrační tabulce. Tímto postupem byli schopni získat rozložení mazacího filmu v bodovém kontaktu v rozsahu od 95 do 700 nm.

Studium tvaru tenkých mazacích filmů však umožnila až modifikace této metody, kterou zavedli P. M. Cann, H. A. Spikes a J. Hutchinson [21], kteří na spodním povrchu skleněného kotouče použili soustavu vrstev tvořenou vrstvou oxidu křemičitého o tloušťce okolo 500 nm a vrstvou chrómu o tloušťce 20 nm. V zatíženém kontaktu nejprve metodou, založenou na spektrální analýze interferenčních barev, stanovili tloušťku této vrstvy a následně k ní přiřadili hodnotu barevného tónu *H*. Totéž opakovali na různých místech kotouče, až se jim podařilo získat hodnoty barevného tónu *H* v celém rozsahu tloušťky vrstvy oxidu křemičitého. G. Guangteng a kol. [22], [23] metodu dále zpřesnili použitím složek barevného prostoru RGB. Další dílčí úpravy této

metody publikovali J. Lord a kol. [24] a J. Molimard a kol. [25]. V následujících letech bylo při experimentálním výzkumu problému elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů prokázáno, že užitím těchto metod je možné stanovit tvar mazacího filmu v rozsahu od 3 do 800 nm s velkou přesností a rozlišitelností [15].

V 90. letech 20. století bylo v Tribologické laboratoři na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně navrženo a realizováno experimentální zařízení (obr. 5), ve kterém jsou podmínky vyskytující se v reálných strojních uzlech modelovány ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou [26]. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak vrstvou chrómu. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvratné páce. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny servomotory, které jsou řízeny programovatelnými měniči frekvence. Teplotní stabilita tribologické soustavy je zajištěna tepelnou izolací komory zařízení a užitím uzavřeného vyhřívacího okruhu. Mazané kontakty jsou pozorovány pomocí mikroskopového zobrazovacího systému založeného na průmyslovém mikroskopu. V závislosti na studovaných problémech je volena optimální kombinace světelného zdroje a barevné kamery ke snímání chromatických interferenčních obrazců. Při studiu mazacích filmů za ustálených podmínek je používán kontinuální halogenový ev. xenonový zdroj bílého světla a barevná televizní tříčipová CCD kamera. Pro výzkum smíšeného mazání a procesů probíhajících za neustálených provozních podmínek je využit zábleskový xenonový zdroj bílého světla v kombinaci s barevnou digitální tříčipovou CCD kamerou nebo barevnou vysokorychlostní CMOS kamerou.



Obr. 5 Experimentální zařízení pro studium mazacích filmů.

Jak již bylo uvedeno výše experimentální výzkum mazacích filmů je spojen s použitím pokročilých měřicích metod. Kolorimetrická interferometrie [27], metoda vyvinutá na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, umožňuje výzkum chování mazacích filmů o tloušťce řádu jednotek nanometrů jak u modelových nerovností, tak i u reálných třecích povrchů. Výsledky získané při studiu chování mazacích filmů v bodových kontaktech pracujících za podmínek mezného, smíšeného i elastohydrodynamického mazání prokázaly, že tato metoda umožňuje získat detailní informace o tloušťce mazacího filmu pro tloušťky až do 1 nm. Získaná rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu třecích těles tak umožňuje posoudit schopnosti maziva utvářet mazací film oddělující třecí povrchy s ohledem na topografii třecích povrchů i použitý typ maziva a mazivostních přísad.

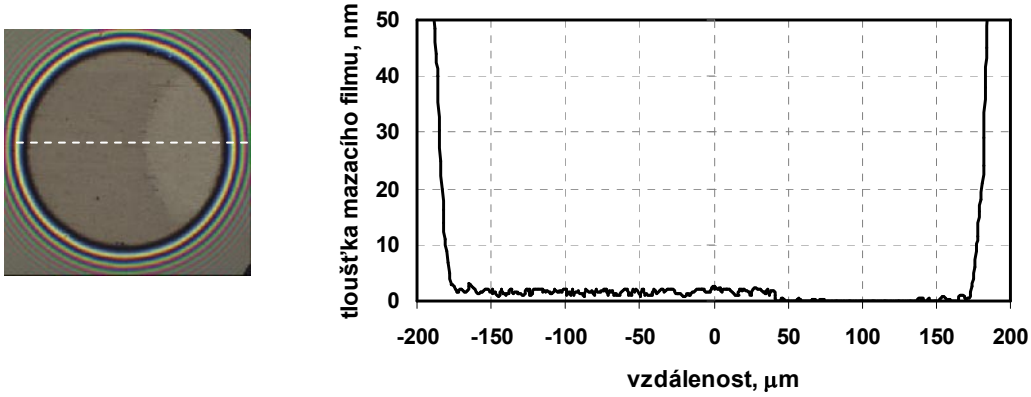
4 NANOMETRICKÉ MAZACÍ FILMY

V uplynulém desetiletí bylo dosaženo významného pokroku ve studiu nanometrických kapalinových mazacích filmů. Stále rostoucí výkonnost počítačů společně s pokrokem ve vývoji algoritmů umožnila provést rozsáhlé numerické simulace jejich chování. V oblasti experimentálního výzkumu byla vyvinuta celá řada měřicích metod, které umožňují studovat vlastnosti tenkých kapalinových filmů nacházejících se mezi dvěma povrchy. Ty zahrnují jak univerzální metody vyvinuté fyziky pro studium vlastností povrchů jako např. aparaturu pro měření povrchových sil (SFA) nebo mikroskopii využívající interakci meziatomových sil (AFM), tak i metody speciálně určené pro výzkum mazaných kontaktů, jako jsou interferometrie ultratenkých filmů a kolorimetrická interferometrie.

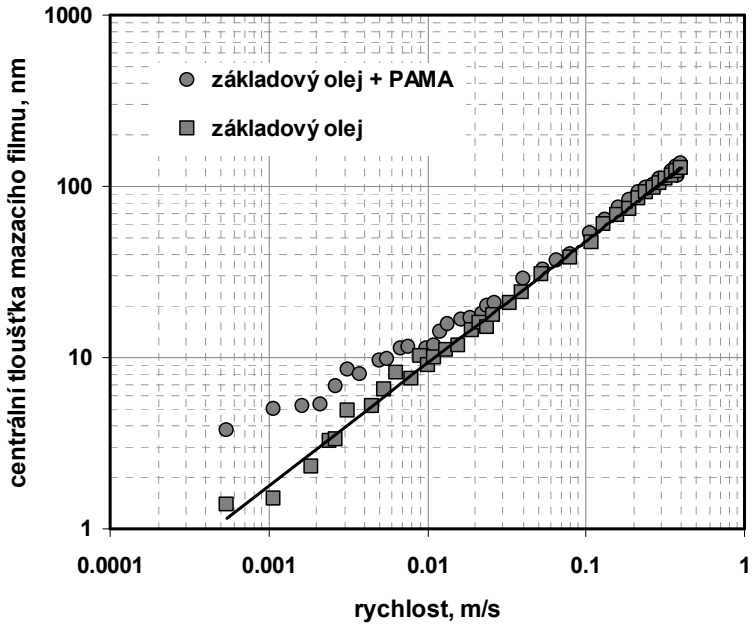
Hlavní úlohou maziva je oddělení povrchů prostřednictvím filmu o nízké smykové pevnosti, což vede k významnému snížení tření a opotřebení. U kapalných maziv se toho dosahuje prostřednictvím hydrodynamické vztlakové síly, přičemž tloušťka filmu silně závisí na viskozitě maziva. Nedávno publikované experimentální práce ukazují, že se snižováním tloušťky mazacího filmu se mění jeho fyzikální vlastnosti, a to nejprve kvalitativně a posléze kvantitativně. Experimentálně získané výsledky byly srovnány s klasickou teorií hydrodynamického a elastohydrodynamického mazání. Bylo zjištěno, že v případě průmyslových maziv, jejichž základ tvoří vysoce rafinované ropné oleje nebo polyalfaolefinové syntetické oleje, je klasická teorie platná až do tlouštěk filmu 10-15 nm [18],[28]. Při nižších tloušťkách však byly pozorovány odchylky od teoretických hodnot mající podobu kvantování jejich tloušťky s hodnotou kvanta rovnou střednímu průměru molekuly [29].

Chování mezných mazacích filmů bylo studováno i pomocí kolorimetrické interferometrie, která na rozdíl od jiných měřicích metod používaných ke studiu mazacích filmů umožňuje stanovit rozložení tloušťky velmi tenkých mazacích filmů v celém kontaktu [30]. Na obr. 6 je dokumentováno utváření mezného mazacího filmu o tloušťce několika nanometrů při rozběhu třecích povrchů mazaných ropným olejem obohaceným polyalkylmetakrylátem, polymerovou mazivostní přísadou sloužící jako modifikátor viskozity. Dřívější výzkumy ukázaly, že příčinou vzniku tohoto filmu je patrně adsorpce polymerů na třecích površích, kde se utvářejí vrstvy s vysokou koncentrací molekul polymerů [31], [32].

Přínos k utváření velmi tenkého mazacího filmu je zřejmý i z obr. 7, který srovnává naměřené hodnoty centrální tloušťky mazacího filmu pro základový a formulovaný olej. Zatímco hodnoty centrální tloušťky pro základový olej odpovídají teoretickému řešení podle rovnice (2), u formulovaného oleje je zřejmý nárůst tloušťky mazacího filmu v důsledku utváření mezných filmů na třecích površích. V dnešní době jsou již k dispozici speciálně navrhované přísady na bázi polymetakrylátu, které umožňují tvorbu mezných filmů o tloušťkách 10-20 nm [33],[34]. Bylo prokázáno, že použití těchto přísad negativně neovlivňuje funkci dalších mazivostních přísad standardně přidávaných do maziv [35].

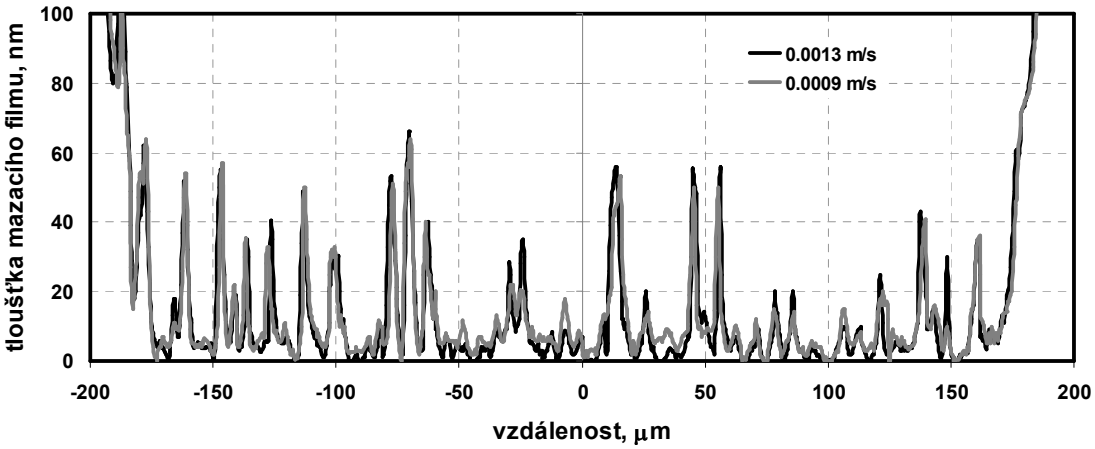


Obr. 6 Utváření mezného mazacího filmu při rozběhu třecích povrchů [30].



Obr. 7 Vliv mezných filmů na centrální tloušťku mazacího filmu [30].

Význam mezných mazacích filmů však nespočívá jen v jejich schopnosti oddělovat velmi hladké třecí povrchy. U většiny strojírenských aplikací má topografie třecího povrchů významný vliv na funkci mazaného kontaktu. I v takovýchto případech však mezné mazací filmy napomáhají oddělit třecí povrchy a tím snížit velikost tření a opotřebení. Na obr. 8 jsou srovnány průběhy tloušťky v kontaktu mazaném olejem formulovaným PAMA pro dvě rychlosti třecích povrchů. Je zřejmé, že při dosažení určité hodnoty rychlostí třecích povrchů mezné mazací filmy zamezují dalšímu snižování tloušťky mazacího filmu a tím přispívají ke snížení opotřebení třecích povrchů.



Obr. 8 Vliv mezných filmů za podmínek smíšeného mazání [30].

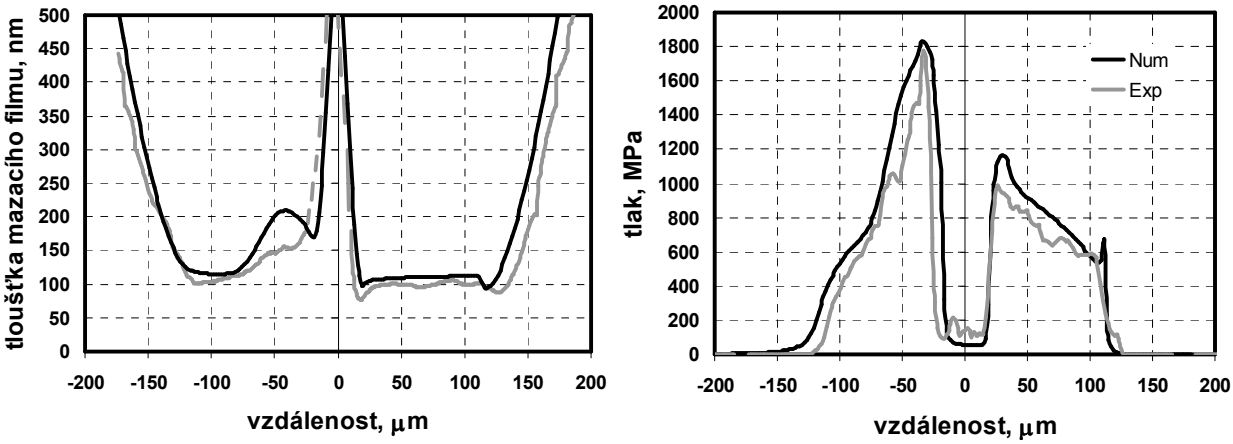
5 NEHLADKÉ TŘECÍ POVRCHY

V uplynulých desetiletích došlo v důsledku zlepšení kvality materiálů a pokroku ve výrobních technologiích k podstatnému zvýšení délky únavového života strojních tribologických soustav jakými jsou např. valivá ložiska či ozubená kola. Jedním z nejdůležitějších mezních stavů těchto soustav se stalo povrchově iniciované únavové poškození, ke kterému dochází mnohem častěji, než k únavovému poškození iniciovanému inkluzemi. Nejčastější příčinou tohoto mezního stavu je kontaminace maziva pevnými částicemi, které jsou v něm obsaženy již z výroby, a v důsledku záběhu a opotřebení se jejich koncentrace dále zvyšuje. Další příčinou znečištění maziva mohou být také nečistoty z vnějších zdrojů znečištění, jakými jsou např. prach či písek. Velikost znečišťujících částic (až 50 μm) je obvykle mnohem větší než tloušťka mazacího filmu (méně než 1 μm), takže při jejich průchodu kontaktní oblastí dochází k jejich zamáčknutí do třecích povrchů. Vzniklé vtisky působí jako koncentrátory napětí a v důsledku opakovaného cyklického namáhání dochází ke vzniku povrchových trhlin, které se dále větví až nastává vydrolování nebo odlupování materiálu z třecích povrchů.

Již koncem sedmdesátých let 20. století provedli L. D. Wedeven a C. Cusano [35] sérii experimentů, při kterých zkoumali pomocí optické interferenční metody vliv uměle vytvořených vtisků na tloušťku elastohydrodynamického mazacího filmu. Přitom zjistili, že při kluzu třecích povrchů nastává lokální tlakové maximum v blízkosti hrany vtisku nacházející se blíže k výstupní oblasti kontaktu. Tuto domněnku později potvrdily výsledky numerických výpočtů, které provedli X. Ai a H. S. Cheng [37]. M. Kaneta a kol. [38] použitím podobné měřicí metody jako Wedeven a Cusano zkoumal vliv provozních podmínek a tvaru vtisku na tloušťku mazacího filmu.

Proces vzniku vtisků na třecích površích byl numericky a experimentálně zkoumán J. C. Hamerem a kol. [39], [40]. Velikost napětí a plastických deformací vznikajících při vtlačování tuhé částice do třecího povrchu byla zkoumána několika autory, mezi nimi např. i E. R. Kralem a kol. [41]. Nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím únavové poškození třecích povrchů je však velikost následného tahového pnutí v povrchové vrstvě materiálu v blízkosti hran vtisku. Velikost tohoto pnutí v případě liniového elastohydrodynamicky mazaného kontaktu numericky stanovili P. R. Goglia a kol. [42] a C. H. Venner a kol. [43]. V polovině 90. let minulého století publikovali X. Ai a S. C. Lee [44] numerickou analýzu vlivu vtisku na bodový elastohydrodynamicky mazaný kontakt. Z analýzy vyplývá, že při prokluzu třecích povrchů dochází k nárůstu kontaktního tlaku na hranách vtisku, který vede ke zvýšení následného pnutí. To je příčinou vzniku trhlin, které postupně rostou a spojují se.

Na problematiku utváření tloušťky a tlaku v okolí vtisků je zaměřen i společný výzkum se společností Timken Česká republika. Naměřené hodnoty tloušťky mazacího filmu byly srovnány s výsledky získanými výpočtovou simulací parametrů nestacionárního elastohydrodynamického kontaktního problému nehladkých povrchů v kruhové kontaktní oblasti (obr. 9a) [45]. Tloušťka mazacího filmu však není rozhodujícím parametrem pro posuzování rizika únavového poškozování třecích povrchů. Tím je zejména tlak v mazacím filmu, který výrazným způsobem ovlivňuje velikost podpovrchového napětí. Z tohoto důvodu byl odladěn inverzní algoritmus stanovování tlaku v mazacím filmu z naměřených hodnot rozložení tloušťky mazacího filmu [46]. Z tloušťky mazacího filmu je při znalosti geometrie třecích těles stanovena jejich elastická deformace a z ní jsou stanoveny hodnoty tlaku. Tento přístup umožnil podstatným způsobem rozšířit možnosti experimentálního zařízení. Na obr. 9b je ukázáno srovnání vypočítaného průběhu tlaku s rozložením tlaku spočítaným z naměřené tloušťky mazacího filmu. Z obou průběhů je zřejmý významný nárůst tlaku v okolí vtisku při prokluzu třecích povrchů. Získané výsledky rovněž prokázaly, že s rostoucí hloubkou vtisku dochází k nárůstu tlaku a tím k zvyšování rizika únavového poškozování třecích povrchů.



(a) (b)

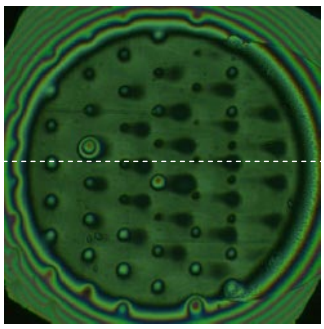
Obr. 9 Rozložení tloušťky (a) a tlaku (b) v mazaném kontaktu v okolí vtisku při prokluzu třecích těles

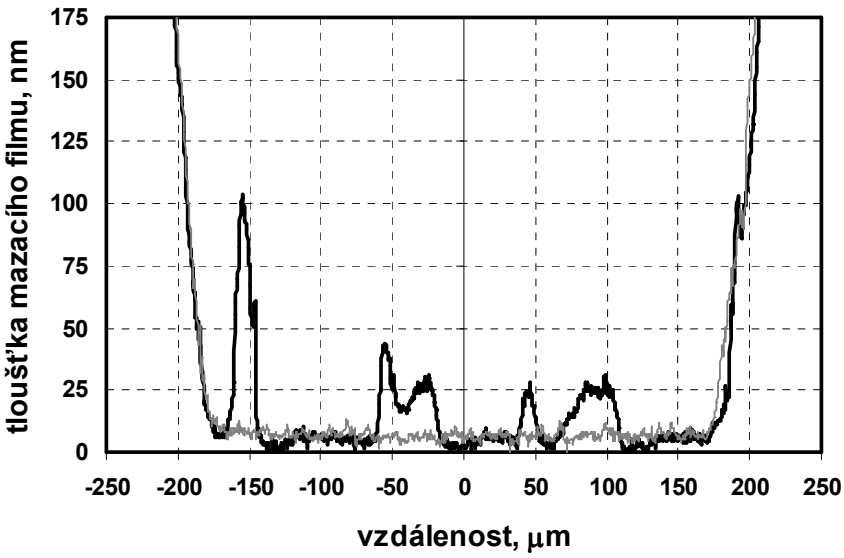
Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že povrchové nerovnosti mohou významným způsobem negativně ovlivnit funkci strojních součástí. V poslední době však bylo prokázáno, že vhodná volba tvaru textury třecího povrchu může naopak zlepšit třecí vlastnosti mechanických součástí. Třecí povrchy některých strojních částí (pístů spalovacích motorů, kluzných vedení, mechanických těsnění a pod.) jsou opatřovány soustavou mikrodutin s cílem vytvořit podmínky, při kterých je vytvářen účinnější mazací film oddělující třecí povrchy [47]. Princip cílené modifikace topografie je relativně jednoduchý. Třecí povrch se opatří soustavou mikro-dutin, které slouží jako mikro-zásobníky maziva. Mazivo je dodáváno do kontaktu při průchodu mikro-dutin mazaným kontaktem v důsledku rozdílných rychlostí třecích povrchů a průchodu maziva kontaktem.

M. Dumont a kol. [48] popsali chování povrchů s modifikovanou topografií za podmínek nedostatečného mazání a ukázali, že zvolený postup má pozitivní vliv na životnost třecích povrchů. L. X. Zhao a F. Sadeghi [49] studovali vliv mikrostruktur na mazaný kontakt při rozběhu třecích povrchů, tj. za podmínek, kdy ještě není v kontaktu vytvořen souvislý mazací film. Zjistili, že mikrostruktury vytvářejí mikrozásobníky maziva, které je do kontaktu dodáváno v kritických fázích provozu strojních částí. L. Mourier a kol. [50] ukázali, že rozhodující vliv má hloubka mikrodutin. Mikrodutiny o větší hloubce způsobovaly pokles tloušťky mazacího filmu, naopak mělčí mikrodutiny (pod 500 nm) měly pozitivní vliv na účinnost mazacího filmu.

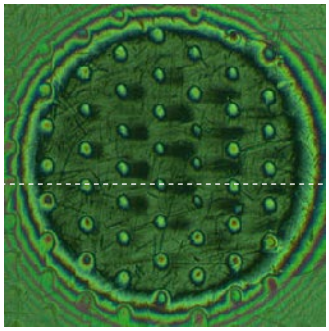
Zásadním problémem je navržení vhodné geometrie mikro-dutin a jejich uspořádání v mazaném kontaktu. Experimenty realizovanými na Ústavu konstruování FSI VUT v Brně se podařilo prokázat, že pro zvolené aplikace je zapotřebí použít mělké mikro-dutiny o relativně malém průměru ve srovnání s průměrem mazaného kontaktu [51],[52],[53]. Konkrétně pro podmínky v experimentálním zařízení, kde je průměr mazaného kontaktu okolo 320 μm, je to průměr mikro-dutiny do 30-40 μm při hloubce do 400 nm. Takováto hloubka mikro-dutiny se sice může jevit malá ve srovnání s výškou povrchových nerovností po dokončovací operaci, ale realizované experimenty prokázaly podstatný přínos těchto mělkých mikro-dutin i u reálných třecích povrchů. Na obr. 10a je ukázán příklad soustavy mikro-dutin v mazaném kontaktu a její vliv na tloušťku mazacího filmu ve srovnání s hladkým kontaktem. V tomto případě se povrch kuličky s mikro-dutinami pohybuje pomaleji než hladký povrch skleněného kotouče. V důsledku rozdílných rychlostí třecích povrchů mazivo je vytlačováno s mikro-dutin ve směru pohybu třecích povrchů. Tak dochází k místnímu navýšení tloušťky mazacího filmu, které je zřejmé z průběhu tloušťky mazacího filmu podél kontaktu. I když dochází pouze k místnímu nárůstu tloušťky mazacího filmu v okolí mikro-dutin, vhodně zvolená soustava mikro-dutin může významným

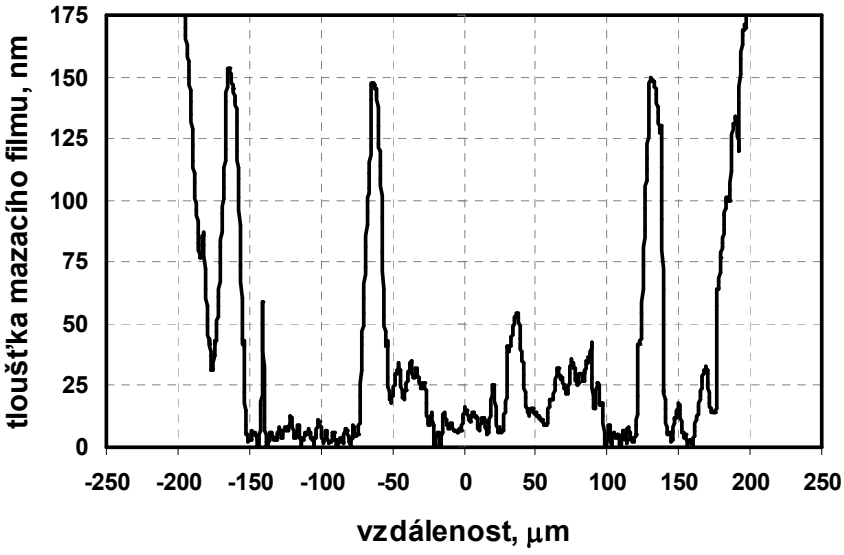
způsobem přispět k tvorbě účinnějšího mazacího filmu. Obdobný přínos byl prokázán i za podmínek smíšeného mazání (obr. 10b) [54]. Přínos cílené modifikace topografie k zvýšení tloušťky mazacího filmu je však je jedním kritériem. Při návrhu součástí s třecími povrchy s cíleně modifikovanou topografií je však zapotřebí vzít do úvahy i riziko únavového poškozování třecích povrchů.





(a)





(b)

Obr. 10 Vliv cílené modifikace topografie třecího povrchu na tloušťku mazacího filmu za podmínek elastohydrodynamického (a) a smíšeného (b) mazání.

6 REÁLNÉ TŘECÍ POVRCHY

Většina valivých ložisek, ozubených soukolí, vaček nebo trakčních mechanizmů pracuje za podmínek, kdy průměrná tloušťka mazacího filmu je menší než výška povrchových nerovností. V těchto případech má tloušťka mazacího filmu přímou souvislost s takovými procesy probíhajícími v mazaném kontaktu jako je tření, opotřebení, kontaktní únava a zadírání. Současná teoretická řešení (např. [55]) mohou poskytnout rozložení tloušťky a tlaku v mazaném kontaktu reálných třecích povrchů, která jsou využívána při návrhu exponovaných prvků strojních soustav. Vstupy těchto modelů tvoří topografie třecích povrchů změřená optickými 3D profilometry. Takto je možné již při návrhu součástí posoudit vliv orientace povrchových nerovností způsobených dokončovacími metodami obrábění. Limitujícím faktorem je však značná časová náročnost numerického řešení pro podmínky smíšeného mazání. To je způsobeno zejména obtížnou konvergencí numerického řešení v případě velmi tenkého mazacího filmu. Z tohoto důvodu má velký význam experimentální výzkum dané problematiky.

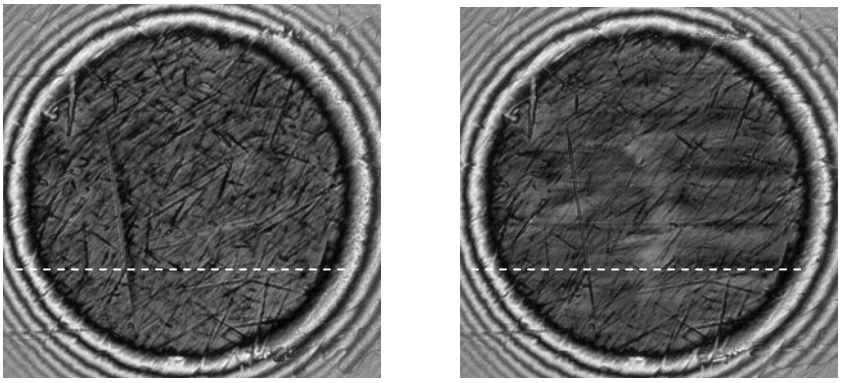
Převážná část experimentálního studia vlivu povrchových nerovností na mazací film byla v uplynulém období soustředěna na studium modelových nerovností [56]-[64]. Tyto nerovnosti mají zpravidla charakter napařených výstupků nebo jsou třecí povrchy opatřeny rýhami ev. vtisky vhodných rozměrů. To bylo zejména ovlivněno dostupnými měřicími metodami a jejich nízkou přesností a rozlišitelností při stanovení tloušťky mazacího filmu. I přes tato omezení studium mazaných kontaktů s třecími povrchy opatřenými modelovými nerovnostmi přispělo výrazným způsobem k objasnění celé řady procesů probíhajících za podmínek smíšeného mazání.

V současné době je však pozornost věnována studiu chování reálných třecích povrchů s cílem objasnit procesy probíhající v mazaných kontaktech, které není možné modelovat v makroskopickém měřítku. Jedná se zejména o skutečnost, že u reálného třecího povrchu jsou jednotlivé nerovnosti ovlivňovány nerovnostmi okolními a dochází tak k řetězení vlivů pozorovaných u modelových nerovností. Vyvinutí pokročilých měřicích metod využívajících počítačového zpracování obrazu umožnilo realizovat úvodní experimenty s třecími povrchy s náhodně orientovanými reálnými nerovnostmi. G. Guangteng a kol. [65] získali první kvalitativní výsledky, když se jim podařilo stanovit závislost průměrné tloušťky mazacího filmu v kontaktu na rychlostech třecích povrchů. J. B. Luo a kol. [66] popsali postupné zvyšování stykové plochy mazaného kontaktu se snižující se rychlostí třecích povrchů.

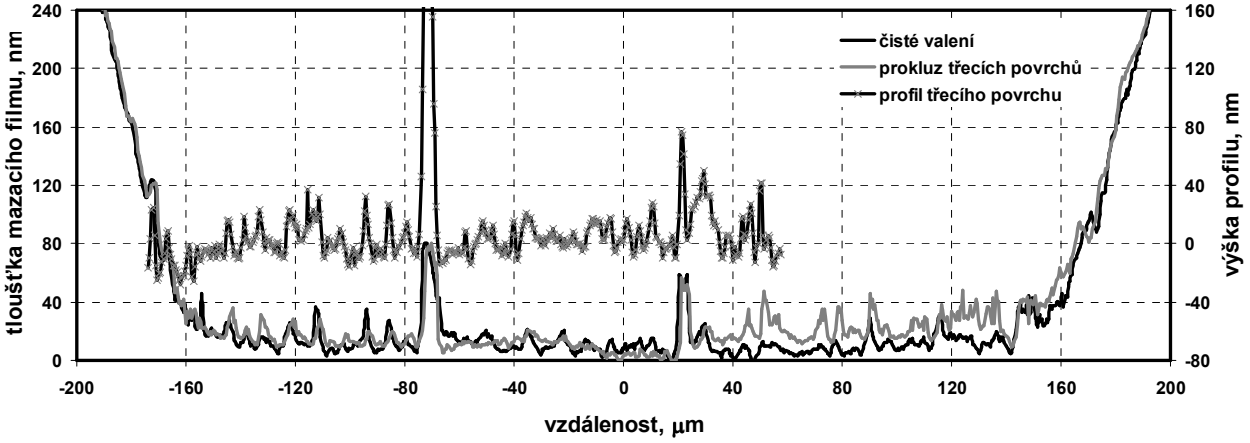
Podrobné, kvantitativní studium spočívající ve srovnání naměřených hodnot rozložení tloušťky mazacího filmu ze skutečnou topografií třecích povrchů umožnila až kombinace dvou měřicích metod, kolorimetrické interferometrie a interferometrie s řízenou změnou fáze. Kolorimetrická interferometrie je použita ke stanovení rozložení tloušťky mazacího filmu, které je srovnáno s původní, nedeformovanou topografií třecího povrchu získanou pomocí interferometrie s řízenou změnou fáze. Avšak stanovit topografii třecího povrchu mimo experimentální zařízení a následně provést experimenty se stejnou polohou a orientací nerovností v mazaném kontaktu se ukázalo jako prakticky nemožné. Z tohoto důvodu bylo experimentální zařízení vybaveno o optický 3D profilometr, který umožňuje stanovit topografii třecího povrchu bez nutnosti jeho přemístění. Tak bylo možné ukázat vliv jednotlivých povrchových nerovností i u reálných třecích povrchů [67] a tím úspěšně završit úvodní etapu experimentálního studia, které je nezbytné k ověření stávajících teoretických modelů s cílem optimalizace návrhového procesu strojních součástí. Měření uskutečněná se základovými oleji prokázala vliv příčně orientovaných nerovností ve tvaru rýh na místní snížení tloušťky mazacího filmu, které u velmi tenkých mazacích filmů vede k prolomení mazacího filmu a následnému styku třecích povrchů. Pro posouzení přínosu mazivostních přísad k ochraně třecích povrchů a utváření účinného mazacího filmu byl použit plně formulovaný olej a mazivo obohacené přísadou na bázi polymerů. Výsledky získané s těmito mazivy ukázaly přínos i velmi tenkých mezných filmů pro ochranu třecích povrchů a snížení jejich opotřebování. Tloušťka studovaných mezných filmů se pohybovala jen okolo 3 nanometrů, nicméně u hladkých povrchů

tyto mezné filmy zcela oddělovaly třecí povrchy a u reálných povrchů účinně oddělovaly třecí povrchy v podstatné části kontaktní oblasti [30].

Na obr. 11 je uveden příklad získaných výsledků dokládající, jak různé povrchové nerovnosti mohou výrazně ovlivnit tloušťku mazacího film. Rýha o hloubce několika mikrometrů orientovaná kolmo na směr pohybu způsobuje redukci mazacího filmu. Naopak mělké prohlubně vytváří mikro-zásobníky maziva a při prokluzu třecích povrchů mají obdobný přínos na mazací film jako cílená modifikace topografie třecích povrchů popsaná výše.



(a) (b)



(c)

Obr. 11 Vliv topografie třecího povrchu na tloušťku mazacího filmu.

7 ZÁVĚR

Tekuté mazací filmy budou s největší pravděpodobností i v blízké budoucnosti významným prostředkem ve snaze o další úspory energie prostřednictvím snižování tření a následného opotřebení třecích povrchů. Zvyšování účinnosti mazacích filmů je spojeno nejen s využitím nových druhů maziv, ale i s poznáním jejich chování za vysokých tlaků v mazaných kontaktech.

Neustálý vývoj výpočetní techniky umožňuje stále detailnější simulace procesů probíhajících v mazaných kontaktech velmi zatěžovaných strojních částí. Je možné nejen zohlednit reálnou topografii třecích povrchů, ale mimo jiné i simulovat utváření mazacích filmů na úrovni jednotlivých molekul. Hlavní omezení v dalším poznání procesů mazání tak lze spatřovat v přesnosti měřicích metod používaných ke studiu mazacích filmů. Prakticky všechny dnes používané měřicí metody vycházejí z optické interferenční metody a vyhodnocování tloušťky mazacích filmů často ovlivňují subjektivní faktory. Využití přesnějších měřicích metod často omezuje konfigurace experimentálního zařízení, kde se studovaný mazací film nachází mezi třecími povrchy. Jako velmi perspektivní se ukazuje využití spektroskopické reflektometrie, které nachází inspiraci v oblasti fyziky tenkých vrstev. Tak by bylo možné nejen stanovit tloušťku mazacího filmu, ale i změnu fyzikálních vlastností maziva v kontaktu třecích těles.

Problematiku elastohydrodynamického mazání zejména v oblasti velmi tenkých mazacích filmů tak nelze považovat za uzavřenou. Vědecko-výzkumné aktivity Tribologické laboratoře při Ústavu konstruování FSI VUT v Brně jsou převážně orientovány na oblast velmi tenkých mazacích filmů při zohlednění vlivu topografie třecích povrchů. Perspektivu dalšího úspěšného řešení této problematiky vytváří mezinárodní spolupráce s univerzitními vědeckými týmy (Northwestern University, Tsinghua University, Shanghai University) i partnery z průmyslových podniků (Timken, INA Schaeffler, Eaton). Nezbytným předpokladem je však zejména vlastní vědecký tým do jehož aktivit jsou zapojováni studenti doktorského i navazujícího magisterského studia. Prostřednictvím předmětů *Mikro- a nanotechnika* a *Tribologie* v oboru navazujícího magisterského studijního programu *Konstrukční inženýrství* jsou studenti seznamováni s aktuálními problémy v oblasti mazání velmi tenkými mazacími filmy. V rámci diplomových prací mají možnost se zúčastnit jejich řešení a následně doplnit vědecký tým prostřednictvím doktorského studia. Tím bylo dosaženo vhodného skloubení vědecko-výzkumné a pedagogické činnosti.

8 LITERATURA

[1] ERTEL, A. M. Hydrodynamic Lubrication Based on New Principles. Akademia nauk SSSR, Prikladnaja Metematika i Mechanika, 3, 2, 1936, s. 41-52.

[2] HAMROCK, B. J. Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, s. 147-151.

[3] RANGER, A. P. - ETTLES, C. M. M. - CAMERON, A. The Solution of the Point Contact Elastohydrodynamic Problem. Proceedings of the Royal Society of London, A346, 1975, s. 227-244.

[4] HAMROCK, B. J. - DOWSON, D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part I -Theoretical Formulation. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, 1976, s. 223-229.

[5] HAMROCK, B. J. - DOWSON, D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II -Ellipticity Parameter Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, 1976, s.375-383.

[6] HAMROCK, B. J. - DOWSON, D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part III -Fully Flooded Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 99, 1977, s. 264-276.

[7] HAMROCK, B. J. - DOWSON, D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV -Starvation Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 99, 1977, s. 15-23.

[8] LUBRECHT, A. A. - TEN NAPEL, W. E. - BOSMA, R. Multigrid, an Alternative Method of Solution for Two-Dimensional Elastohydrodynamically Lubricated Point Contact Calculations. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 109, 1987, s. 437-442.

[9] VENNER, C. H. - TEN NAPEL, W. E. Multilevel Solution of the Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contact Problem. Part II: Smooth Surface Results. Wear, 152, 1992, s. 369-381.

[10] DOWSON, D. - EHRET, P. Past, present and future studies in elastohydrodynamics. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part J, Journal of Engineering Tribology, 1999, 213, 317-333.

[11] URBANEC, L. Numerická simulace elastohydrodynamicky mazaného kruhového kontaktu nehladkých povrchů, Disertační práce, Brno 2008, 86 s.

[12] ARCHARD, J. F. - KIRK, M. T. Lubrication at Point Contacts. Proceedings of the Royal Society of London, A261, 1961, s. 535-550.

[13] ARCHARD, J. F. - KIRK, M. T. Influence of Elastic Modulus on the Lubrication of Point Contacts. In: Lubrication and Wear Convention. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1963, s. 181-189.

[14] KIRK, M. T. Hydrodynamic Lubrication of 'Perspex'. Nature, 194, 1962, s. 965-966.

[15] SPIKES, H.A. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: the contribution of experiment. Proc. IMECHE, Part J: Journal of Engineering Tribology, 213, 1999, s. 335-352.

[16] WESTLAKE, F. J. - CAMERON, A. A. Study of Ultra-Thin Lubricant Films Using an Optical Technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 182, 1967-1968, s. 75-78.

[17] SPIKES, H. A. - GUANGTENG, G. Properties of Ultra-thin Lubricating Films Using Wedged Spacer Layer Optical Interferometry. In: Interface Dynamics (Proceedings of the

14th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). London, Mechanical Engineering Publications Limited. 1988, s. 275-279.
[18] JOHNSTON, G. J. - WAYTE, R. - SPIKES, H. A. The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts. Tribology Transactions, 34, 1991, s. 187-194.
[19] SPIKES, H. A. - RATOI, M. Molecular Scale Liquid Lubricating Films. In: Thinning Films and Tribological Interfaces (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2000, s. 359-370.
[20] GUSTAFSSON, L. - HÖGLUND, E. - MARKLUND, O. Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 208, 1994, s. 199-205.
[21] CANN, P. M. - SPIKES, H. A. - HUTCHINSON, J. The Development of a Spacer Layer Imaging Method (SLIM) for Mapping Elastohydrodynamic Contacts. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 915-921.
[22] GUANGTENG, G. - CANN, P. M. - OLVER, A. V. - SPIKES, H. A. Lubricant Film Thickness in Rough Surface, Mixed Elastohydrodynamic Contact. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 122, 2000, s. 65-76.
[23] GUANGTENG, G. - CANN, P. M. - OLVER, A. V. - SPIKES, H. A. An Experimental Study of Film Thickness Between Rough Surfaces in EHD Contacts. Tribology International, 33, 2000, s. 183-189.
[24] LORD, J. - MARKLUND, O. - LARSSON, R. Multi channel interferometry for measurement of the thickness of very thin EHL lubricant films, In: Thinning films and tribological interfaces (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology), Elsevier, 2000, s. 711-718.
[25] MOLIMARD, J. - QUERRY, M. - VERGNE, P. New Tools for the Experimental Study of EHD and Limit Lubrications. In: Lubrication at the Frontier (Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V., 1999, s. 717-726.
[26] HARTL, M. - KŘUPKA, I. - POLIŠČUK, R. - LIŠKA M. An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. Tribology Transactions, 42, 1999, s. 303-309.
[27] HARTL, M. - KŘUPKA, I. - POLIŠČUK, R. - LIŠKA, M. - MOLIMARD, J. - QUERRY, M. - VERGNE, P. Thin Film Colorimetric Interferometry. Tribology Transactions, 44, 2001; s. 270-276.
[28] COOPER, D. - MOORE, A. J. Application of the Ultra-thin Elastohydrodynamic Oil Film Thickness Technique to the Study of Automotive Engine Oils, Wear, 175, 1994, 93-105.
[29] MATSUOKA, H. - KATO, T. Discrete Nature of Ultrathin Lubrication Film Between Mica Surfaces. Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 118, 1996, 832-838.
[30] KŘUPKA, I. - HARTL, M. The influence of Thin Boundary Films on Real Surface Roughness in Thin Film, Mixed EHD Contact. Tribology International. 2007. 40(11). s. 1553 - 1560.
[31] SMEETH, M. - SPIKES, H. A. - GUNSEL, S. The Formation of Viscous Surface Films by Polymer Solutions: Boundary or Elastohydrodynamic Lubrication. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 720-725.
[32] SMEETH, M. - SPIKES, H. - GUNSEL, S. Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 726-734.
[33] DARDIN, A. - MÜLLER, M. - TOPOLOVEC-MIKLOZIC, K. - SPIKES, H. A. Influence of Polyalkylmethacrylate Viscosity Index Improvers on the Efficiency of Lubricants.

Presented at 2003 JSAE/SAE International Spring Fuels & Lubricants Meeting, Yokohama, Japan. JSAE 20030220. SAE 2003-01-1967.
[34] MÜLLER, M. - TOPOLOVEC-MIKLOZIC, K. - DARDIN, A. - SPIKES, H. A. The Design of Boundary Film-Forming PMA Viscosity Modifiers. Tribol Trans, 2006; 49 (2), s. 225-232.
[35] FAN, J.-MÜLLER, M.- STOEHR, T. - SPIKES, H. A. Reduction of friction by functionalised viscosity index improvers. Tribology Letters, 28, 2007, s. 287-298.
[36] WEDEVEN, L. D. - CUSANO, C. Elastohydrodynamic Film Thickness Measurements of Artificially Produced Surface Dents and Grooves. ASLE Transactions, 22, 1979, 4, pp. 369-381.
[37] AI, X. - CHENG, H. S. The Influence of Moving Dent on Point EHL Contacts. Tribology Transactions, 37, 1994, 2, pp. 323-335.
[38] KANETA, M. - KANADA, T. - NISHIKAWA, H. Optical Interferometric Observations of the Effects of a Moving Dent on Point Contact EHL. In: DOWSON, D.: Elastohydrodynamics – '96 Fundamentals and Applications in Lubrication and Traction. Tribology Series 32. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1997, pp. 69-79.
[39] HAMER, J. C. - SAYLES, R. S. - IOANNIDES, E. Deformation Mechanisms and Stresses Created by Third Body Debris Contacts and Their Effects on Rolling Bearing Fatigue. In: DOWSON, D.: Interface Dynamics. Tribology Series 12. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1987, s. 201-208.
[40] HAMER, J. C. - SAYLES, R. S. - IOANNIDES, E. Particle Deformation and Counter-face Damage When Relatively Soft Particles are Squashed Between Hard Anvils. Tribology Transactions, 32, 1989, 3, s. 281-288.
[41] KRAL, E. R. - KOMVOPOULOS, K. - BOGY, D. B. Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Repeated Indentation of a Half-Space by a Rigid Sphere. Journal of Applied Mechanics- Transactions of the ASME, 1988, 60, s. 829-841.
[42] GOGLIA, P. R. - CUSANO, C. - CONRY, T. F. The Effects of Surface Irregularities on the Elastohydrodynamic Lubrication of Sliding Line Contacts, Part I –Single Irregularities. Journal of Tribology - Transactions of the ASME, 106, 1984, s. 113-119.
[43] VENNER, C. H. - LUBRECHT, A. A. - TEN NAPEL, W. E. Numerical Simulation of the Over-Rolling of a Surface Feature in an EHL Line Contact. Journal of Tribology - Transactions of the ASME, 113, 1991, s. 777-783.
[44] AI, X. - LEE, S. C. Effect of Slide-to-roll Ratio on Interior Stresses Around a Dent in EHL Contacts. Tribology Transactions, 39, 1996, 4, s. 881-889.
[45] KŘUPKA, I. - HARTL, M. - URBANEC, L. - ČERMÁK, J. Single dent within EHD contact – comparison between experimental and numerical results. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology, 2007, 221 s. 635-644
[46] VAVERKA, M. - VRBKA, M. - POLIŠČUK, R. - KŘUPKA, I. - HARTL, M. Numerical evaluation of pressure from experimentally measured film thickness in EHL point contact. Lubrication Science. 2008. 20(1). p. 47 - 59. ISSN 0954-0075.
[47] ETSION, I. State of the art in laser surface texturing. Journal of Tribology, Trans. of the ASME, 127, 2005, s. 248-253.
[48] DUMONT, M. - LUGT, P. M. - TRIPP, J. H. Surface feature effects in starved circular EHL contacts,. Journal of Tribology, Trans. of the ASME, 2002, 124, s. 358-366.
[49] ZHAO, J. X. - SADEGHI, F. The effects of a stationary surface pocket on EHL line contact start-up. Journal of Tribology, Trans. of the ASME, 2004, 126, s. 672-680.
[50] MOURIER, L. - MAZUYER, D. - LUBRECHT, A.A. - DONNET, C. Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. Tribol Int, 2006, 39, s. 1745-1756.

[51] KŘUPKA, I. - HARTL, M. The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films. Tribology International. 2007, 40(7). s. 1100 - 1110.
[52] KŘUPKA, I. - HARTL, M. Experimental Study of Microtextured Surfaces Operating Under Thin-Film EHD Lubrication Conditions. ASME Transaction, Journal of Tribology. 2007, 129(3). s. 502 - 508.
[53] KŘUPKA, I. - HARTL, M. Thin-Film Lubrication of Dented Surfaces. Tribology Transactions. 2007, 50(4). s. 488 - 496.
[54] KŘUPKA, I. - VRBKA, M. - HARTL, M. Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts. Tribology International, 2008, v tisku.
[55] HU, Y.Z. - ZHU, D. A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts. ASME J. Tribol., 2000, 122, 1, s 1-9.
[56] WEDEVEN, L.D. - CUSANO, C. Elastohydrodynamic Film Thickness Measurements of Artificially Produced Surface Dents and Grooves. ASLE Trans., 1979, 22, 4, s. 369-381.
[57] KANETA, M. - CAMERON, A. Effects of Asperities in Elastohydrodynamic Lubrication. ASME J. Lubr. Tech., 19801, 102, 3, s. 374-379.
[58] KANETA, M. Effects of Surface Roughness in Elastohydrodynamic Lubrication. JSME Int. J. III-VIB, 1992, 35, 4, pp 535-546.
[59] KANETA, M. - SAKAI, T. - NISHIKAWA, H. Effects of Surface Roughness on Point Contact EHL. Trib. Trans., 1993, 36, s. 605-612.
[60] KANETA, M. - NISHIKAWA, H. Local Reduction in Thickness of Point Contact EHL Films Caused by Transversaly Oriented Moving Groove and Its Recovery. ASME J. Tribol., 1994, 116, s. 635-639.
[61] KANETA, M. - NISHIKAWA, H. Experimental Study on Microelastohydrodynamic Lubrication," Proc. Instn. Mech. Engrs. Part J: J. Eng. Tribol., 1999, 213, J5, s. 371-381.
[62] GUANGTENG, G. - CANN, P.M. - OLVER, A.V. - SPIKES, H.A. Lubricant Film Thickness in Rough Surface, Mixed Elastohydrodynamic Contact. ASME J. Tribol., 2000, 122, s. 65-76.
[63] FÉLIX-QUIÑONEZ, A. - EHRET, P. - SUMMERS, J. L. New Experimental Results of a Single Ridge Passing Through an EHL Conjunction," ASME J. Tribol., 2003, 125, s. 252-259.
[64] GLOVNEA, R. P. - CHOO, J.W. - OLVER, A. V. - SPIKES, H. A. Compression of a Single Transverse Ridge in a Circular Elastohydrodynamic Contact. ASME J. Tribol., 2003, 125, s. 275-282.
[65] GUANGTENG, G. - CANN, P. M. - OLVER, A. V. - SPIKES, H. A. Lubricant Film Thickness in Rough Surface, Mixed Elastohydrodynamic Contact," ASME J. Tribol., 2000, 122, s. 65-76.
[66] LUO, J. - LIU, S. - WE, S. Contact Ratio and Deformation of Asperity in Nano-partial Lubrication. Sci. China Ser. A, 2001, 44, Suppl., s. 78-85.
[67] KŘUPKA, I. - KOUTNÝ, D. - HARTL, M. Behaviour of real roughness features within mixed lubricated nonconformal contacts. Tribology International, 2008, v tisku.

9 ABSTRACT

Lubricant films play an important role in protecting surfaces of friction bodies in highly loaded machine parts as rolling bearings, gears and cams and followers. Once the lubricant film is not longer able to separate friction surfaces sufficiently it usually results in their damage caused by the fatigue life, wear and related phenomena. Viscous boundary films and surface texturing are among those approaches that can help to minimize the risk of lubricated contact failures.

In the last decade it has been shown that the presence of thin viscous boundary films formed on rubbing surfaces lubricated with some polymer-containing viscosity index improver solutions can help to reduce the friction and wear. Such boundary films increase the overall lubrication film thickness and moves the transition between elastohydrodynamic or mixed lubrication and boundary lubrication towards more severe operating conditions.

Surface texturing approach is based on the introduction of properly designed micro-features on rubbing surfaces. Small in diameter and shallow micro-dents were found to provide best results as to the increase of film thickness within concentrated contacts operated under rolling/sliding conditions. They can act as lubricant micro-reservoirs that supply additional lubricant between rubbing surfaces.

Obtained results suggest that joint action of both boundary film formation and surface texturing combines both contributions that can help to increase tribological performances in different stages of machine parts operation by increasing lubrication film thickness.

This lecture summarizes results obtained in the study of these approaches in Tribology Laboratory at Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology. In the first part, numerical (Chapter 2) and experimental (Chapter 3) approaches are introduced. The second part of the work gives an overview of results achieved in the study of the formation of very thin viscous boundary films (Chapter 4), the behaviour of non-smooth surfaces having artificially produced asperities (Chapter 5) and lubrication mechanisms of real rough surfaces (Chapter 6).