

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 187

ISSN 1213-418X

Martin Hartl

**VELMI TENKÉ
ELASTOHYDRODYNAMICKÉ
MAZACÍ FILMY**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

VELMI TENKÉ ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZACÍ FILMY

VERY THIN ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATING FILMS

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



BRNO 2005

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEY WORDS

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

OBSAH

1 Historický vývoj problémů tření a mazání u strojů.....	5
2 Elastohydrodynamické mazání.....	7
3 Interferometrie mazacích filmů.....	11
4 Velmi tenké mazací filmy.....	15
5 Závěr: Elastohydrodynamické mazání a jeho význam pro další rozvoj techniky.....	20
6 Literatura.....	22
7 Abstract.....	27

Martin Hartl je docentem na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se roku 1967 v Brně. Po maturitě na Střední průmyslové škole strojní v Brně, Kotlářská 9 studoval v letech 1985–1990 na Fakultě strojní VUT v Brně obor Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu. Studium ukončil s vyznamenáním obhajobou diplomové práce *Problematika mezních provozních podmínek rychloběžného valivého uložení*. Roku 1990 byl přijat do postgraduálního studia na téže fakultě v oboru Konstrukční a procesní inženýrství. 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“. Po ukončení studia roku 1997 obhájil disertační práci *Mapování tloušťky elasto-hydrodynamického filmu počítačovou diferenciální kolorimetrií* a byl mu přiznán akademický titul doktor. V roce 2002 se habilitoval na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně prací *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů* a byl jmenován docentem pro obor Konstrukční a procesní inženýrství.

Roku 1993 nastoupil na Ústav konstruování Fakulty strojní VUT v Brně, kde pracoval nejprve jako odborný asistent a od roku 2002 jako docent. O rok později byl jmenován do funkce ředitele ústavu, kterou vykonává dodnes. V této funkci se podílel na organizační transformaci ústavu a modernizaci koncepce výuky.

V roce 1999 působil jako hostující profesor na Lyonské vědecké a technické univerzitě. Absolvoval několik studijních pobytů na zahraničních univerzitách, zejména v Číně a Japonsku.

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena na tribologii, především na studium elasto-hydrodynamického a smíšeného mazání. Je spoluautorem měřicí metody určené ke studiu velmi tenkých mazacích filmů (kolorimetrická interferometrie), kterou využívá řada světových pracovišť. Dosažené výsledky byly publikovány ve 12 původních vědeckých člancích otištěných v impaktovaných časopisech a ve 22 příspěvcích ve sbornících světových nebo evropských kongresů, sympózií a konferencí. O jejich mezinárodním ohlasu svědčí 30 citací podle Science Citation Index. Systematicky spolupracuje s univerzitními pracovišti v Číně, Francii a Japonsku a s průmyslovými společnostmi v Německu a USA.

Pedagogické činnosti se věnuje od ukončení vysokoškolského studia. Přednáší Části a mechanismy strojů v bakalářském a magisterském studijním programu Strojní inženýrství. Významně se podílel také na zavedení oboru Konstrukční inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, ve kterém přednáší Tribologii. Vede diplomové práce a je školitelem doktorandů, z nichž jeden již své studium absolvoval. Trvale uskutečňuje modernizaci výuky a zavádí její nové formy.

Od roku 2003 je členem oborové rady doktorského studijního programu Konstrukční a procesní inženýrství a Rady fondu vědy Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

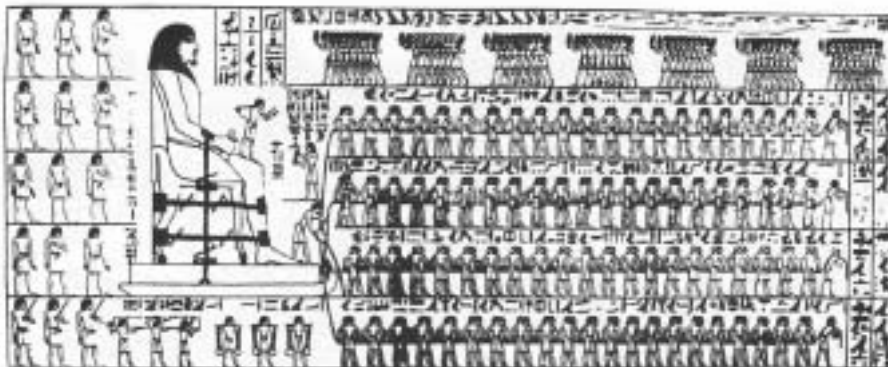
1 HISTORICKÝ VÝVOJ PROBLÉMU TŘENÍ A MAZÁNÍ U STROJŮ

Since there is no model in nature for guiding wheels on axles or axle journals, man faced a great task in designing bearings - a task which has not lost its importance and attraction to this day.

Rolling bearings and their contribution to the progress of technology (1986)

Ačkoliv tribologie je relativně mladou vědní disciplínou, cílevědomé využití poznatků týkajících se tření, mazání a opotřebení při řešení technologických problémů je starší než literárně zaznamenaná historie lidstva. Paleolitický člověk používal k rozdělávání ohně či zhotovování otvorů nástrojů, jejichž součástí byla primitivní kluzná ložiska vyrobená z parohů či kostí. Znamky využití ložisek nesou také archeologické nálezy hrnčířských kruhů a kamenných nástrojů na mletí obilí pocházející z neolitického období [1].

První záznamy o užití kola jako podstatné části vozidla, které jsou důkazem úsilí ranných civilizací o nahrazení kluzného tření třením valivým při dopravě nákladů, pocházejí z období 5500 let př. n. l. Také transport obrovských kamenných bloků a soch užitých při stavbě pyramid a paláců v Mezopotámii a Egyptě vyžadoval jisté tribologické znalosti. Nástěnná malba znázorňující přepravu sochy dvorního hodnostáře a velkostatkáře Cuje (Ti) nalezená v jeho hrobě v egyptské Sakkáře a pocházející z období kolem roku 2400 př. n. l. je prvním známým zobrazením dokumentujícím užití maziva. Podobné nástěnné obrazy a reliéfy, avšak mladšího data, byly odkryty také v el-Berša v Egyptě a Ninive v Iráku. Jejich objevitel britský archeolog Layard [2] došel k závěru, že jako maziva bylo užito pravděpodobně živočišného tuku. Pro tuto domněnku však neexistují žádné pádné důkazy a jiní autoři proto uvádějí jako možná maziva vodu, bahno z řeky Nilu, popř. bahno smíšené s olivovým olejem. Dowson [3] provedl odhad součinitele tření pro případ transportu sochy zobrazené na nástěnném obrazu z hrobu Džehutihotepe v el-Berša (obr. 1) datovaného kolem roku 1880 př. n. l. Na této malbě je 60t kolos naložený na dřevěných saních tažen 172 muži. Jestliže každý z mužů vyvinul sílu přibližně 800 N, pak celková třecí síla musela být alespoň 172×800 N, což dává součinitel tření 0,23. Tato hodnota odpovídá součiniteli tření pro kombinaci dřevo na dřevo za vlhka, z čehož je možné usoudit, že dřevěné sáně se pohybovaly po vodou mazané dřevěné podložce.



Obr. 1 Nástěnný obrazu z hrobu Džehutihotepe v el-Berša zobrazující transport sochy.

Vynález kola je sice všeobecně považován za největší technický výtvar v lidské historii, avšak realizace uložení osy pomocí ložisek měla daleko větší praktický význam. Římský architekt Vitruvius Pollio ve svém spise *Deset knih o architektuře* [4] líčí, jak řecký stavitel Chersifrón a jeho syn Metagenés dopravovali kamenné kvádry na stavbu chrámu Artemidy Efeské v Efesosu pomocí dřevěných kol připevněných na jejich podstavy. Kola byla nasazena na ocelovou osu, jejíž oba konce byly otočně uloženy v kovových pánvích umístěných v dřevěném rámu. Na jiném místě knihy je možné nalézt také první zmínku o valivém ložisku. Vitruvius zde popisuje konstrukci beranidla uloženého pomocí jednoduchého lineárního válečkového ložiska, kterou kolem roku

330 př. n. l. navrhl řecký inženýr Diadés. Nejstarší dochovaná ložiska pocházející z období 54 až 44 př. n. l. byla nalezena ve vodách jezera Nemi ležícího nedaleko Říma [5]. Roku 1895 zde italský archeolog Boghi objevil dvě potopené římské lodě, které byly koncem dvacátých let minulého století vyzvednuty a restaurovány. Obě lodě byly vybaveny kruhovou otočnou dřevěnou plošinou sloužící patrně jako piedestal, která byla uložena v axiálním kuličkovém ložisku. Fragmenty další menší plošiny obsahující části dřevěného kuželového ložiska byly nalezeny na jejich přídi. Římané si byli také dobře vědomi příznivých účinků oleje na snížení tření. Římský spisovatel Plinius Secundus ve své encyklopedii *Naturalis historia* [6] uvádí výčet tehdy známých rostlinných a živočišných olejů, které mohou být užity jako maziva.

Středověk znamenal stagnaci ve vývoji techniky a tedy i v aplikaci tribologických poznatků. Teprve až renesance, jejíž vůdčí osobností byl italský malíř a sochař Leonardo da Vinci, přinesla zásadní objevy na poli nauky o tření. Skicy z *Codexu Atlanticus* a *Codexu Arundel* [7] dokumentují, že Leonardo provedl řadu experimentů s cílem stanovit velikost třecí síly mezi dvěma povrchy nacházejícími se v relativním pohybu. Na jejich základě rozpoznal rozdíl mezi smykovým a valivým třením, stejně tak jako příznivý vliv maziva na snížení tření. Jeho pozorování jsou v naprostém souladu s prvními dvěma zákony tření: 1. třecí síla je přímo úměrná zatížení; 2. třecí síla je nezávislá na zdánlivé stykové ploše. Leonardo také jako první přišel s myšlenkou součinitele tření definovaného jako poměr třecí a normálové síly. Zjistil rovněž, že jeho velikost závisí na kvalitě povrchů, přičemž tělesa s hladším povrchem vykazují menší odpor vůči pohybu. Tyto znalosti poskytly Leonardovy solidní vědecký základ pro konstrukci nejrůznějších druhů ložisek. *Codex Madrid I* [7] objevený teprve roku 1967 obsahuje řadu náčrtů, mezi nimiž lze nalézt např. návrh valivých a patních ložisek či rannou formu ložiskové klece.

Nehledě na genialitu Leonardových myšlenek, jeho práce neměla v podstatě žádný historický vliv, protože jeho poznámky a nákresy zůstaly po staletí nepublikovány. Roku 1699 francouzský fyzik Amontons [8] znovuobjevil první dva zákony tření, když pomocí jednoduchého tribometru změřil velikost součinitele tření mezi různými kombinacemi povrchů. Jeho závěry byly téměř o století později potvrzeny dalším francouzským fyzikem Coulombem [9], který k prvním dvěma zákonům tření přidal třetí, podle kterého je třecí síla nezávislá na rychlosti pohybu.

Éra průmyslové revoluce přinesla podstatné zlepšení teoretických znalostí týkajících se stavby strojů, které vedly nejen ke zdokonalení jejich konstrukce, ale také k mnoha vynálezům. Roku 1787 obdržel britský obchodník Garnett [10] patent na válečkové ložisko, které mělo všechny hlavní znaky moderních valivých ložisek. Ložisko bylo součástí zařízení vyrobeného ve Wattově továrně a používaného tímto britským vynálezcem k experimentálním účelům. První patent na kuličkové ložisko získal roku 1794 britský kovolitec Vaughan [11]. Ložisko bylo určeno k uložení nápravy, nemělo vnitřní kroužek ani klec, bylo však opatřeno plnicím otvorem, který umožňoval dosáhnout maximálního počtu valivých elementů a tedy i vyšší únosnosti. Počátkem 19. století bylo dřevo jako ložiskový materiál zcela nahrazeno kovem. Velký význam pro vývoj kluzných ložisek měl vynález ložiskového kovu tvořeného slitinou cínu, antimonu a mědi, na který byl roku 1839 udělen patent americkému inženýrovi Babbittovi. V přibližně stejné době bylo patentováno také složení několika látek [12], [13], které rozšiřovaly relativně omezený seznam tehdy běžně užívaných maziv tvořených zejména oleji rostlinného a živočišného původu.

Před rokem 1850 byla složení maziv a mechanismu mazání věnována jen malá pozornost. Obrat přineslo teprve rozšíření parního stroje, rozvoj železnic a zejména pak zavedení výroby minerálního oleje destilací. Vynálezcem tohoto postupu byl britský chemik Young [14], který roku 1851 založil rafinérii, jež se za nedlouho poté stala největším světovým výrobcem minerálního oleje. Zahájení těžby ropy v Titusville v Pensylvánii roku 1859 pak znamenalo počátek moderní průmyslové výroby maziv.

2 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

... the elucidation of the mechanism of elastohydrodynamic lubrication may be regarded as the major event in the development of lubrication science since Reynolds' own paper.

Frederick Thomas Barwell (1970)

Třebaže vztah popisující smykové napětí mezi vrstvami pohybující se tekutiny byl postulován Newtonem [15] již roku 1688, mechanismus kapalinového mazání byl objasněn až koncem 19. století. Experimenty nezávisle na sobě provedené Towerem [16] ve Velké Británii a Petrovem [17] v Rusku ukázaly, že při dostatečné dodávce maziva jsou třecí povrchy radiálních kluzných ložisek vzájemně od sebe odděleny koherentním mazacím filmem. Únosnost a součinitel tření těchto ložisek musí tedy záviset na hydrodynamickém působení maziva a nikoliv na vlastnostech třecích povrchů. Když se o výsledku Towerových experimentů dozvěděl Reynolds, došel k závěru, že pohyb maziva ve spáře ložiska je možné považovat za laminární tok viskózní kapaliny. Roku 1886 publikoval studii [18], ve které na základě Navierových-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity odvodil rovnici popisující rozložení tlaku v klínové mezeře tvořené třecími povrchy kluzného ložiska. Tato rovnice označovaná jako Reynoldsova je považována za základ teorie kapalinového mazání.

Zatímco Reynoldsova rovnice byla úspěšně užita při analýze kluzných ložisek, její aplikace u ozubených převodů nedávala realistické výsledky. Martin [19] publikoval roku 1916 řešení Reynoldsovy rovnice pro případ, kdy se mazací film tvořený izoviskózní nestlačitelnou kapalinou nachází mezi dvěma dokonale tuhými válci s rovnoběžnými osami. Získal vztah pro minimální tloušťku mazacího filmu, který, zapsán pomocí bezrozměrných parametrů¹, má tvar

$$H_{\min} = 4,9 \frac{U}{W_L}, \quad (1)$$

kde H_{\min} je bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu, U je bezrozměrný parametr rychlosti a W_L je bezrozměrný parametr zatížení pro liniový kontakt. Poněvadž rovnice (1) dávala pro případ čelního ozubeného soukolí hodnoty tloušťky mazacího filmu podstatně menší než je hodnota střední aritmetické úchylnosti profilů boků zubů, bylo zřejmé, že předpoklady o dokonale tuhých površích a izoviskózním chování maziva nejsou správné. Na základě těchto závěrů byla v následujících letech věnována pozornost těm faktorům, které sice byly u hydrodynamicky mazaných kluzných ložisek zanedbávány, ale které mohly hrát významnou roli při mazání nekonformně zakřivených třecích povrchů. Peppler [20] a Meldahl [21] proto řešili problém izoviskózního mazání elastických třecích povrchů a Gatcombe [22] vzal do úvahy při řešení Reynoldsovy rovnice změnu viskozity maziva s tlakem. Výsledky těchto studií ukázaly, že jsou-li vlivy elastické deformace třecích povrchů a změny viskozity maziva s tlakem uvažovány odděleně, nezpůsobují potřebný nárůst tloušťky mazacího filmu.

Teprve až Grubin [23] publikoval roku 1949 první analytické řešení tloušťky mazacího filmu, které bralo do úvahy jak elastické deformace třecích povrchů, tak i závislost viskozity maziva na tlaku. Vycházel přitom z předpokladu, že třecí povrchy mají stejný tvar jako u suchého (Hertzova) kontaktu a že tlak na vstupu do kontaktní oblasti je nekonečně veliký. Největším přínosem Gru-

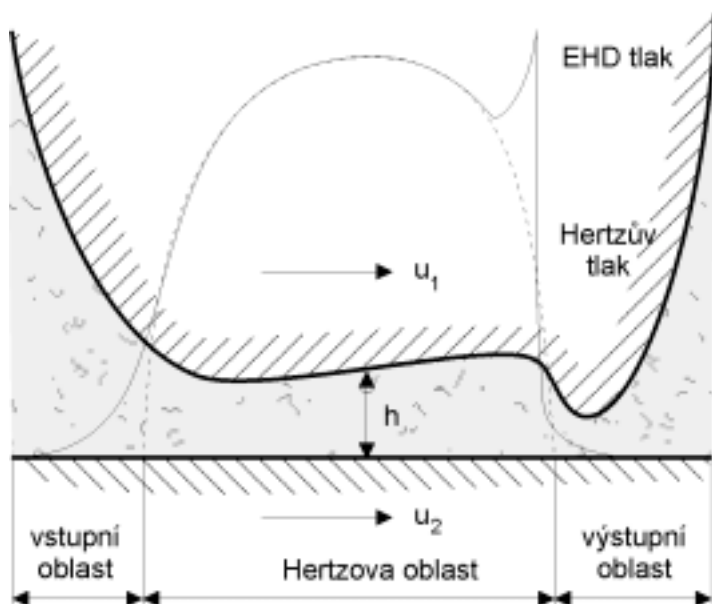
¹ Již na počátku řešení problému elastohydrodynamického mazání liniových kontaktů se ukázalo jako velmi praktické prezentovat výsledky pomocí bezrozměrných parametrů ve formě $H = f(U, G, W_L)$, kde $H = h/R$, $U = \eta_0 u / E'R$, $G = \alpha E'$, $W_L = w / E'R$, přičemž h je tloušťka mazacího filmu, 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, w je normálová liniová síla způsobená zatížením.

binovy práce je odvození rovnice, která umožňuje stanovit centrální tloušťku mazacího filmu v liniiovém kontaktu

$$H_c = 1,95 \frac{U^{8/11} G^{8/11}}{W_L^{1/11}}, \quad (2)$$

kde H_c je bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu, G je bezrozměrný parametr materiálů zohledňující elastické vlastnosti obou třecích povrchů a viskozitně-tlakovou charakteristiku maziva. Rovnice (2) dává o jeden až dva řády vyšší hodnotu tloušťky mazacího filmu než rovnice (1) odvozená Martinem.

Roku 1951 uveřejnil Petrusевич [24] tři numerická řešení pro tři různé rychlosti třecích povrchů získaná přímou iterační metodou, která potvrdila charakteristické znaky elasto-hydrodynamického (EHD) kontaktu anticipované Grubinem (obr. 2). V centrální (Hertzově) oblasti kontaktu je tenký, přibližně paralelní mazací film, což je způsobeno velmi vysokou viskozitou maziva a zanedbatelným Poiseuilleovým prouděním v porovnání s prouděním Couetteovým. Poněvadž velikost lokálních elastických deformací třecích povrchů je mnohem větší než tloušťka mazacího filmu, rozložení tlaku ve většině kontaktu odpovídá přibližně Hertzovu rozložení. Na výstupu z kontaktní oblasti, kde dochází k poklesu tlaku, narůstá význam Poiseuilleova proudění, což vede k náhlému snížení tloušťky mazacího filmu. Jeho hodnota zde činí asi 80 % hodnoty centrální tloušťky. Tato změna je příčinou lokálního druhého tlakového maxima označovaného jako Petrusевичovo, které je příznačné pro EHD kontakty.



Obr. 2 Schematické znázornění tvaru mazacího filmu a rozložení tlaku v liniiovém elasto-hydrodynamickém kontaktu.

Přímá iterační metoda založená na postupném řešení rovnice elasticity a Reynoldsovy rovnice byla velmi pomalá a jen obtížně konvergovala². Proto Dowson a Higginson [25] přišli roku 1959 s inverzní metodou řešení, která spočívá v použití Reynoldsovy rovnice nikoliv pro výpočet rozložení tlaku v kontaktu, nýbrž pro stanovení tloušťky mazacího filmu odpovídající danému rozložení tlaku. Na základě porovnání takto získaného výsledku s tvarem těles spočteným z rovnice elasticity se zpětně modifikuje výchozí tlakové rozložení a celý proces se opakuje tak dlouho, dokud není dosaženo požadovaného souladu mezi oběma výsledky. Podstatné zrychlení konvergence a použití výkonných počítačů umožnilo získat řešení pro různá maziva a materiály třecích povrchů

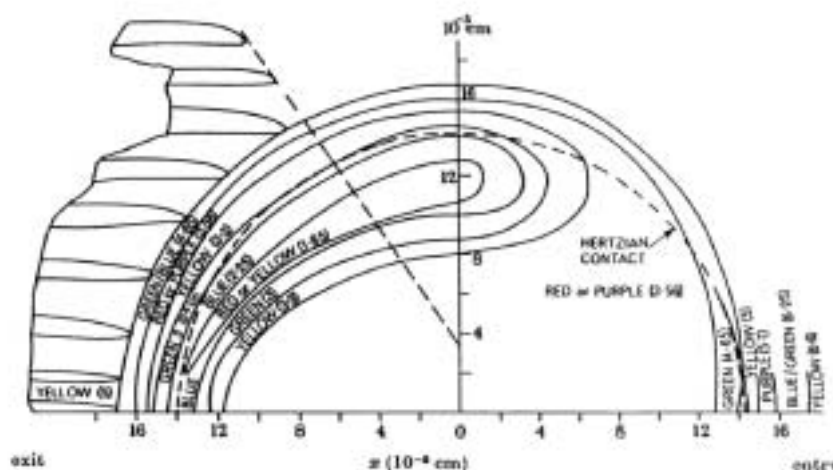
² První numerické řešení problému EHD mazání liniiového kontaktu uskutečněné Dowsonem a Higginsonem koncem padesátých let trvalo devět měsíců.

a pro různé hodnoty rychlostí a zatížení [26]. Na základě regresní analýzy těchto řešení byla odvozena řada rovnic umožňujících odhad tloušťky mazacího filmu v liniovém kontaktu, např. [27]

$$H_{\min} = 2,65 \frac{G^{0,54} U^{0,70}}{W_L^{0,13}} \quad (3)$$

Z rovnice (3) je zřejmé, že tloušťka mazacího filmu závisí především na vlastnostech maziva ve vstupní oblasti kontaktu, zvláště na jeho viskozitě a na rychlosti třecích povrchů, zatímco vliv zatížení a elastických vlastností třecích povrchů je velmi malý.

Obr. 3 Vrstevnicový diagram rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém elastohydrodynamickém kontaktu [45].



Experimentálně se poprvé podařilo prokázat tvar mazacího filmu v EHD liniovém kontaktu Crookovi [28] roku 1961, který při svých experimentech použil čtyřdiskové experimentální zařízení s kapacitním snímačem. O čtyři roky později pak Kannel [29] za pomoci manganinových tlakových snímačů potvrdil existenci druhého tlakového maxima v EHD kontaktu. Stejnou metodu použili také Hamilton a Moore [30], kteří však zjistili, že hodnota experimentálně zjištěného maxima je podstatně menší než hodnota získaná z numerického řešení.

Jestliže při studiu EHD mazání liniových kontaktů teoretické práce předstihly experimentální, u bodových tomu bylo naopak. Až do počátku šedesátých let se totiž mělo za to, že v těchto kontaktech může docházet pouze k meznému mazání³. Teprve až experimenty provedené Archardem a Kirkem [31] na experimentálním zařízení se dvěma zkříženými válci prokázaly existenci kapalinového mazacího filmu v bodových kontaktech. Užítí optické interferenční metody Kirkem [32] a téměř vzápětí i Goharem a Cameronem [33] pak přineslo první informace o tvaru mazacího filmu. Byla prokázána existence podkovovité konstrikce v jeho tloušťce s minimy nacházejícími se na bocích kontaktní oblasti (obr. 3).

Problém EHD mazání bodových kontaktů nelze analyticky jednoduše řešit bez zanedbání bočního výtoku maziva z kontaktu. Dokonce i nejjednodušší semianalytické řešení vycházející z Grubinových předpokladů vyžaduje stanovení rozložení tlaku v celém kontaktu. Omezená výpočetní kapacita počítačů byla důvodem, že první takovéto řešení pro kruhový kontakt bylo publikováno až v roce 1965 Archardem a Cowkingem [34] a o pět let později dále rozšířeno Chengem [35] pro eliptický kontakt. První úplné numerické řešení kruhového kontaktu založené na použití přímé iterační metody popsali Ranger et al. [36] roku 1975. Obdobný přístup užíli také Hamrock a Dowson [37], kteří získali hodnoty bezrozměrné centrální H_c a minimální H_{\min} tloušťky ma-

³ Při mezném mazání zatížení není přenášeno hydrodynamickým působením mazacího filmu, ale prostřednictvím velmi tenkého mezného filmu, jehož struktura a vlastnosti jsou odlišné od struktury a vlastností maziva a třecích povrchů. Tento film vzniká fyzikální adsorpcí, chemisorpcí nebo chemickými reakcemi maziva s třecími povrchy.

zaciho filmu pro 34 různých kombinací bezrozměrných parametrů rychlosti U , materiálů G , zatížení W a elipticity k^4 . Pomocí regresní analýzy získaných výsledků pak odvodili následující rovnice

$$H_c = 2,69U^{0,67}G^{0,53}W^{-0,067} \left(1 - 0,61e^{-0,73k}\right), \quad (4)$$

$$H_{\min} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073} \left(1 - e^{-0,68k}\right). \quad (5)$$

Rovnice (4) a (5) jsou platné pouze pro případ, kdy vektor rychlosti leží ve směru vedlejší poloosy kontaktní elipsy. Obecnější vztah umožňující výpočet tloušťky mazacího filmu pro libovolný směr vektoru rychlosti odvodil Chittenden et al. [38]. Velkého pokroku bylo dosaženo roku 1981, když Evans a Snidle [39] poprvé úspěšně použili inverzní metodu řešení u bodového EHD kontaktu. Pomocí tohoto přístupu se jim podařilo získat výsledky pro maximální Hertzův tlak až 1,5 GPa, což pomocí přímé iterační metody nebylo z důvodu numerické nestability možné.

Snaha o nalezení stabilní a rychle konvergující numerické metody, která by umožňovala řešit problém EHD mazání v širokém rozsahu rychlostí a zatížení, vedla koncem osmdesátých let k zavedení multigradních metod. Lubrecht et al. byl první, kdo použil tyto metody pro řešení jak liniového [40], tak i bodového [41] kontaktu. Základy pro vytvoření rychlého řešiče EHD problémů položil Venner [42], který spojil výhody multigradní a multilevel multiintegrační metody, čímž otevřel cestu k analýze EHD mazání u mnoha strojních součástí.

⁴ V případě bodového EHD kontaktu je nutné použít k popisu problému pěti bezrozměrných parametrů $H = f(U, G, W, k)$. Zatímco parametry H , U a G jsou stejné jako v případě liniového kontaktu, $W = F/E'R^2$ a $k = a/b$, kde F je normálová síla způsobená zatížením, a je délka hlavní poloosy kontaktní elipsy, b je délka vedlejší poloosy kontaktní elipsy.

3 INTERFEROMETRIE MAZACÍCH FILMŮ

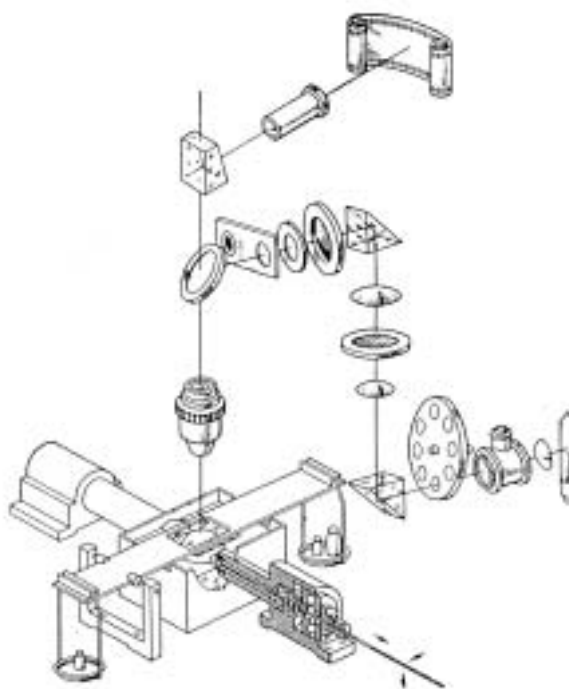
By looking for the Newtonian colours one can form some conception of the depth of an inactive fluid which must be maintained between the plates to permit freedom of motion.

William Bate Hardy (1919)

První, kdo užili optickou interferenční metodu k měření tloušťky mazacího filmu, byli pravděpodobně Hardy a Hardy [43], kteří její pomocí roku 1919 zkoumali vlastnosti kapalinových filmů nacházejících se mezi konvexními povrchy hodinových skel. Chromatických interferenčních proužků použili roku 1935 ke stanovení tloušťky monomolekulárního filmu složeného z amfilních lineárních molekul také Langmuir a Blodgett [44].

Počátkem šedesátých let Archard a Kirk [31] zjistili, že tloušťka a tvar mazacího filmu v EHD kontaktu mohou být stanoveny na základě proužků stejné tloušťky. Roku 1962 získal Kirk [32] tímto způsobem rozložení tloušťky olejového filmu v eliptickém kontaktu mezi dvěma polymethylmethakrylátovými válci s mimoběžnými osami. Vzhledem k nízké hodnotě Youngova modulu pružnosti však bylo dosaženo malého kontaktního tlaku, který měl jen nevelký vliv na viskozitu maziva. Krátce poté popsali Gohar a Cameron [33] první aplikaci optické interferenční metody na opravdový EHD kontakt tvořený ocelovou kuličkou odvalující se po desce vyrobené ze skla o vysokém indexu lomu (obr. 4). Ze získaných chromatických interferogramů se jim podařilo získat detailní mapy tloušťky mazacího filmu, jež porovnali s výsledky numerického řešení [45]. Koncem šedesátých let bylo publikováno několik prací, které zásadním způsobem přispěly ke zdokonalení měření EHD filmů pomocí optické interferometrie. Jednalo se zejména o užití polodrazné vrstvy chrómu za účelem zvýšení kontrastu interferogramů, konstrukci experimentálního zařízení umožňujícího dosažení podmínek čistého valení [46] a zavedení monochromatického, resp. dichromatického zdroje světla [47].

Obr. 4 Experimentální zařízení pro měření tloušťky mazacího filmu v kruhovém EHD kontaktu pomocí optické interferometrie [45].



Počáteční studie se zaměřovaly na dva aspekty EHD mazání. Prvním byla verifikace výsledků teoretických řešení, a to zejména tvaru mazacího filmu a rovnic pro jeho tloušťku [45], [48]. Druhým bylo porovnávání schopnosti různých maziv vytvářet účinný EHD film a stanovení velikosti jejich viskozitně-tlakového součinitele [47], [49]. Většina prací publikovaných během šedesátých let pocházela od týmu profesora Camerona z Imperial College of Science, Technology and

Medicine v Londýně. Postupně však došlo k rozšíření optické interferenční metody studia EHD filmů také na další pracoviště a v průběhu sedmdesátých let se tato metoda stala široce užívaným experimentálním nástrojem. Pozornost byla věnována především aplikovaným problémům, jako např. mazání komplexními mazivy [50]–[52], mazání při nedostatečném přísunu maziva [53] a vliv tvaru a orientace povrchových nerovností na tloušťku mazacího filmu [54]–[56].

Při vizuálním vyhodnocování interferogramů nemůže být optická interferenční metoda použita k měření mazacích filmů, jejichž tloušťka je menší než tloušťka odpovídající prvnímu interferenčnímu minimu. Pro případ interferenční soustavy tvořené skleněnou deskou pokrytou vrstvou chrómu a ocelovou kuličkou, které jsou vzájemně odděleny mazacím filmem a osvětlené kolmo dopadajícím bílým světlem, se hodnota minimální měřitelné tloušťky filmu pohybuje kolem 80 nm. Toto omezení překonali Westlake a Cameron [57], kteří vrstvu chrómu překryli ještě vrstvou oxidu křemičitého o známé tloušťce. Poněvadž oxid křemičitý má přibližně stejný index lomu jako většina maziv, vede přítomnost vrstvy z tohoto materiálu k zdánlivému zvětšení tloušťky mazacího filmu a tím i k přesunu prvního interferenčního minima k vyšším tloušťkám.

Práce Westlaka a Camerona zůstala více jak dvacet let nepovšimnuta. Teprve až roku 1991 publikoval Johnston et al. [58] článek, ve kterém popsal metodu umožňující měření tloušťky mazacích filmů v rozsahu od 1 do 500 nm s přesností $\pm 5\%$. Tato metoda je založena na přístupu Westlaka a Camerona, přičemž lidské oko je při vyhodnocování interferogramů nahrazeno spektrometrem. Při spektrálním rozkladu interferenčních barev vznikají proužky stejného chromatického řádu, pro které je poměr tloušťky mazacího filmu k vlnové délce konstantní. Užití těchto proužků k měření tloušťky a indexu lomu tenkých kapalinových filmů je sice známo již od počátku sedmdesátých let [59], avšak Johnston et al. byl první, kdo jej aplikoval na případ EHD kontaktu. Pomocí této metody byla během devadesátých let zkoumána celá řada základních i aplikovaných problémů spojených zejména s chováním mazacích filmů na rozhraní mezi EHD a mezním mazáním [60]–[63]. Jejím významným omezením však byla skutečnost, že umožňovala stanovení tloušťky mazacího filmu pouze v jediném bodě, zpravidla ležícím v centrální oblasti kontaktu. Smeeth a Spikes [64] proto použili k analýze interferenčních barev spektrometru s maticovým detektorem, což umožnilo stanovit tloušťku mazacího filmu v libovolném řezu podél či napříč kontaktní oblastí. Další vylepšení metody přineslo snížení dolní hranice jejího měřicího rozsahu na pouhých 0,3 nm, jenž umožnilo pozorovat utváření mezních filmů o tloušťkách menších než 1 nm [65].

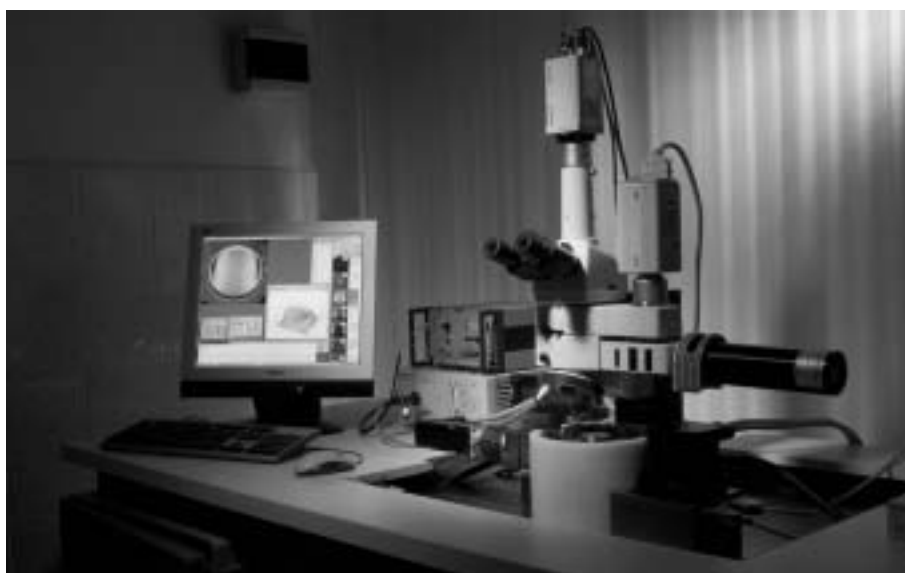
Jinou možností jak měřit velmi tenké mazací filmy je stanovení tloušťky filmu z rozdělení intenzity v monochromatickém interferogramu EHD kontaktu. Tento přístup poprvé použil u dvousvazkové interferometrie Luo et al. [66], který s jeho pomocí studoval mechanismus mazání v oblasti velmi tenkých filmů [67]. Jeho předností je především relativní jednoduchost a možnost získat rozložení tloušťky mazacího filmu v celém kontaktu. Hodnota minimální měřitelné tloušťky je přibližně 1 nm, rozlišitelnost metody je 0,5 nm. Metodu dále rozvinuli Guo a Wong [68], kteří popsali její aplikaci na případ vícesvazkové interferometrie.

Měřicí metoda využívající spektrálního rozkladu interferenčních barev sice umožňuje velmi přesné měření tloušťky mazacího filmu, avšak neposkytuje informaci o jeho rozložení v celém kontaktu. Proto Cann et al. [69] doplnil experimentální zařízení, které vyvinul Johnston et al. [58], o barevnou televizní kameru propojenou s počítačem a určenou pro záznam chromatických interferogramů. Při jejich vyhodnocování vycházel z práce Gustafssona et al. [70], který navrhl postup, jak získat tvar EHD mazacího filmu na základě porovnání barevných tónů nacházejících se ve vyhodnocovaném interferogramu s tóny získanými pomocí kalibrace. Ta spočívá v sejmutí interferogramu zaplaveného statického kontaktu o známé geometrii, jeho převedení do barevného prostoru HSI⁵ a přiřazení informace o tloušťce mazacího filmu k jednotlivým barvám. V případě měření velmi tenkých mazacích filmů byl však postup kalibrace poněkud modifikován. Závislost

⁵ Barevný prostor HSI popisuje barvu pomocí jejího barevného tónu, sytosti a jasu.

barevného tónu na tloušťce filmu byla získána ze série suchých statických kontaktů mezi skleněným kotoučem a hladkou ocelovou kuličkou. Povrch kotouče byl pokryt dvojnásobnou vrstvou sestávající z tenké vrstvy chrómu a vrstvy oxidu křemičitého o proměnné tloušťce, takže v každém ze statických kontaktů měla vrstva oxidu křemičitého jinou tloušťku. Ta byla stanovena ze spektrálního rozkladu interferenčních barev, zatímco informace o barevném tónu byla získána zpracováním videosignálu z televizní kamery. Všechna měření se realizují na jediném místě kotouče, kde byla na počátku změřena i tloušťka vrstvy oxidu křemičitého. Rozsah měřitelných tlouštěk mazacího filmu se pohybuje od 4 do 100 nm. Odhadovaná přesnost metody je $\pm 5\%$. Velikost zpracovaného obrazu je 256×256 pixelů, jeho prostorová rozlišitelnost $1,3 \mu\text{m}$. I když ani tato metoda neumožňuje zkoumání smíšeného mazání reálných povrchů, byla s úspěchem použita ke studiu vlivu uměle vytvořených povrchových nerovností na tloušťku a tvar mazacího filmu [71], [72].

Roku 1997 publikoval Hartl et al. [73] článek, ve kterém popsal užití kolorimetrické interferometrie k stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu. Protože rozsah měřitelných tlouštěk mazacích filmů se pohyboval od 60 do 600 nm, byla metoda později modifikována tak, aby bylo možné měřit filmy až do tloušťky 1 nm [74].



Obr. 5 Experimentální zařízení pro studium velmi tenkých mazacích filmů pomocí kolorimetrické interferometrie.

Užitá měřicí aparatura (obr. 5) sestává ze tří základních částí: simulátoru, mikroskopového zobrazovacího systému a řídicí a vyhodnocovací jednotky. Princip simulátoru vychází z koncepce navržené Goharem [46]. Tenký mazací film je vytvářen ve styku mezi rotujícím transparentním kotoučem a otáčející se kuličkou o průměru 25,4 mm, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. V závislosti na požadovaném maximálním Hertzově tlaku je kotouč vyroben buď z korunového skla nebo opticky izotropního safíru a kulička z chromové oceli nebo karbidu wolframu. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak tenkou vrstvou chrómu. Kontakt je zatěžován přes kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvrtné páce. Oba třecí povrchy jsou nezávisle poháněny pomocí střídavých servomotorů, s výjimkou těch případů, kdy je zapotřebí dosáhnout podmínek čistého valení. Pak je poháněna pouze kulička, zatímco kotouč je unášen. Teplotní stabilita měření je zajištěna tepelnou izolací komory zařízení a užitím uzavřeného vyhřívacího, resp. chladícího okruhu. Mikroskopový zobra-

zovací systém tvořený standardním průmyslovým mikroskopem s episkopickým osvětlovačem je použit jak pro osvětlení kontaktní oblasti, tak i pro zobrazení interferogramu na čip barevné televizní či digitální kamery. Zdrojem světla je halogenová lampa, v případě snímání přechodových jevů pak xenonová výbojka, která je synchronizována s pohybem kuličky, takže všechna měření jsou prováděna na stejném místě jejího povrchu. Řídící a vyhodnocovací jednotka sestává z osobního počítače a řady vstupně/výstupních karet umožňujících obousměrnou komunikaci mezi počítačem a simulátorem, kamerou, popř. dalšími zařízeními.

Světlo ze světelného zdroje dopadá kolmo na kontaktní oblast, kde se odráží na rozhraní mezi sklem a vrstvou chrómu a na rozhraní mezi mazacím filmem a deformovaným povrchem kuličky. Odražené paprsky interferují, přičemž interferenční barvy jsou zachyceny kamerou, jejíž obraz je převeden do barevného prostoru CIELAB⁶. V tomto systému jsou pomocí diferenční rovnice kvantitativně porovnávány barvy mezi vyhodnocovaným interferogramem a etalonem, který má formu matematicky popsané závislosti souřadnic barevného systému CIELAB na tloušťce mazacího filmu. Etalon je získán z monochromatického a chromatického interferogramu zaplaveného statického kontaktu, přičemž z monochromatického interferogramu je stanovena geometrie interferenční soustavy, zatímco na základě chromatického interferogramu jsou přiřazeny interferenční barvy k tloušťkám filmu. Výše uvedený postup byl implementován do rozsáhlého programu [75], který umožňuje opakovaně rekonstruovat tvar mazacího filmu z velkého množství chromatických interferogramů získaných pro různé experimentální podmínky. Součástí programu je také ovládání simulátoru a televizní kamery. Rozlišitelnost kolorimetrické interferometrie je 1 nm. Velikost vyhodnocovaného interferogramu je limitovaná pouze počtem pixelů kamery, prostorová rozlišitelnost je 1,2 μm . Metoda byla užita nejen ke studiu různých aspektů velmi tenkých mazacích filmů [74], [76], [77], ale také při verifikaci výsledků numerických řešení [78], [79].

Studium tenkých mazacích filmů mezi drsnými třecími povrchy je mnohem složitější než v případě hladkých povrchů, protože tloušťka mazacího filmu a tedy i režim mazání se mění nejen v závislosti na rychlosti třecích povrchů, ale i uvnitř samotné kontaktní oblasti. Navíc je třeba stanovit nedeformovanou topografii třecích povrchů ve stejném místě, v jakém je měřena tloušťka mazacího filmu, což je v případě reálných povrchových nerovností značně komplikované. Tento problém vyřešil Hartl et al. [80], který užil kombinaci kolorimetrické interferometrie a interferometrie s řízenou změnou fáze k in-situ měření změn topografie reálných třecích povrchů v EHD kontaktu. Interferometrie s řízenou změnou fáze umožňuje stanovit nedeformovanou topografii povrchu ze sady interferogramů získaných pro různý fázový posuv [81]. Za tímto účelem byl mikroskopový zobrazovací systém doplněn o Miraův interferenční objektiv sestávající z děliče svazku a desky se zrcadlící plochou, která plní funkci referenčního objektu. Změny fáze je dosaženo změnou vzdálenosti mezi referenční plochou objektivu a pozorovaným povrchem, což je realizováno pomocí piezoelektrického posuvu. Přesnost stanovení výšky povrchových nerovností pomocí této metody se pohybuje kolem 1 nm.

⁶ Barevný prostor CIELAB popisuje barvu pomocí jejího jasu, odstínu mezi červenou a zelenou a odstínu mezi modrou a žlutou.

4 VELMI TENKÉ MAZACÍ FILMY

In what is often called complete lubrication, the kind of lubrication investigated by Towers and Osborne Reynolds, the solid surfaces are completely floated apart by the lubricant. There is, however, another kind of lubrication in which the solid faces are near enough to influence directly the physical properties of the lubricant.

William Bate Hardy (1922)

S rozvojem techniky a technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmů u strojních součástí [82]. Tento proces má několik příčin. Mezi nejvýznamnější patří zvyšování teplot a tlaků v kontaktech, které je důsledkem zlepšování vlastností materiálů, a používání maziv s nižší viskozitou, které si vynutil požadavek snižování tření a tím i spotřeby energie. Dalšími důvody jsou také zlepšování kvality třecích povrchů a postupující miniaturizace, které jsou výsledkem používání nových metod obrábění.

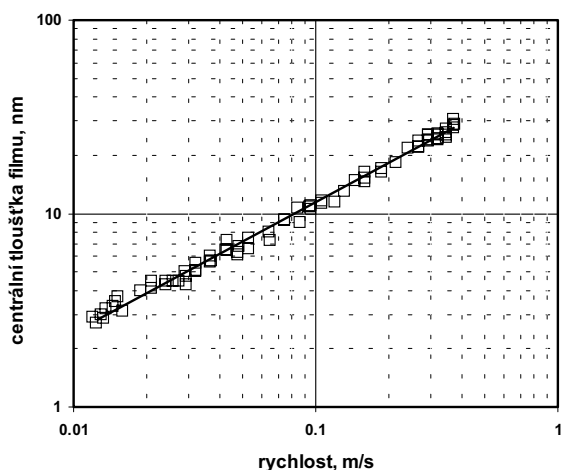
Když Reynolds [18] publikoval roku 1886 svoji teorii hydrodynamického mazání, minimální tloušťka mazacího filmu v tehdy používaných kluzných ložiskách se pohybovala od 10 do 100 μm . Rozvoj spalovacích motorů v první polovině dvacátého století vedl k zlepšení konstrukce klikových kluzných ložisek, což znamenalo snížení tloušťky hydrodynamického mazacího filmu až na 1 μm . Objev EHD mazání počátkem druhé poloviny dvacátého století pak přinesl poznání, že u vysoce zatížených strojních součástí, jakými jsou např. valivá ložiska či ozubené převody, dosahuje minimální tloušťka mazacího filmu hodnot 0,1 až 1 μm . Ve styku povrchových nerovností při smíšeném mazání, u hydrodynamicky mazaných magnetických paměťových médií a u mikroelektromechanických systémů však může mít mazací film tloušťku až 0,01 nebo dokonce 0,001 μm . V těchto případech jsou mazací filmy již natolik tenké, že se mohou chovat odlišně, než jak předpokládá klasická EHD teorie odvozená za předpokladu, že mazací film tvoří homogenní kontinuum.

Existují dva základní přístupy k experimentálnímu studiu velmi tenkých mazacích filmů. První – užívaný zejména ve fyzice povrchů a koloidní a fyzikální chemii – je založen na měření povrchových sil mezi dvěma nekonformně zakřivenými velmi hladkými povrchy vzájemně separovanými tenkou vrstvou kapaliny [83]. Tento přístup dává velmi přesné výsledky, které však mají značně omezené uplatnění při návrhu strojních součástí. To je způsobeno skutečností, že měření jsou prováděna na idealizovaném kontaktu při velmi malých hodnotách kontaktních tlaků a smykových spádů. Druhý – charakteristický především pro studium EHD mazání u strojních součástí – spočívá v interferometrickém měření tloušťky mazacího filmu v kontaktu mezi transparentním kotoučem a ocelovou kuličkou (viz kap. 3). Tento přístup umožňuje dosáhnout podmínek blízkých těm, jaké lze nalézt v reálných EHD kontaktech: kluzně valivé tření, doba průchodu maziva kontaktem 10^{-4} s, maximální Hertzův tlak 0,5 až 4 GPa a smykový spád 10^6 až 10^8 s^{-1} . Do druhé skupiny metod patří také kolorimetrická interferometrie, která byla vyvinuta na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Následující odstavce podávají stručný přehled o jejím užití při řešení různých problémů spojených s mazáním velmi tenkými EHD filmy.

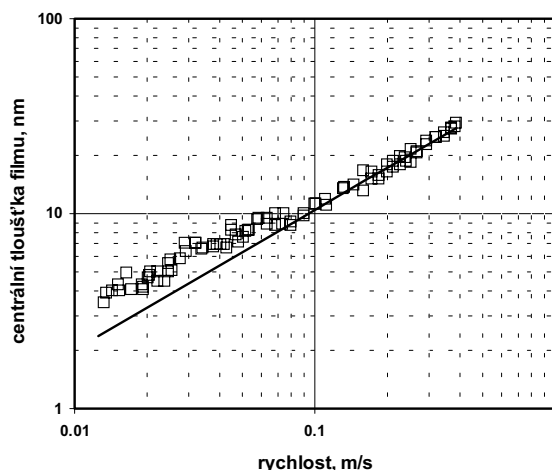
Jednou z prvních aplikací kolorimetrické interferometrie bylo stanovení tlouštěk mazacího filmu, při kterých vrstva maziva již netvoří spojitě prostředí neboli kontinuum. Protože všechna numerická řešení problému EHD mazání vycházejí z předpokladu, že mazací film tvoří kontinuum, je zřejmé, že tyto tloušťky představují také limit platnosti EHD teorie. Z rovnice (4) plyne, že závislost centrální tloušťky mazacího filmu u kruhového kontaktu na průměrné rychlosti třecích povrchů lze vyjádřit ve tvaru

$$h_c = K \alpha^{0,53} \eta_0^{0,67} u^{0,67}, \quad (6)$$

kde K je konstanta, jejíž hodnota závisí na geometrii a mechanických vlastnostech třecích povrchů a na jejich zatížení, α je viskozitně-tlakový součinitel, η_0 je dynamická viskozita při okolním tlaku a u je průměrná rychlost třecích povrchů. Je-li rovnice (6) znázorněna v logaritmických souřadnicích, jedná se o lineární funkci, jejíž grafem je přímka se směrnici 0,67. Měření provedená s hexadekanem (obr. 6), což je lineární alkan, vykazují takovou závislost až do tloušťek filmu kolem 1 nm [74]. Jak bylo vysvětleno v kap. 2, tloušťka EHD filmu závisí na reologických vlastnostech maziva ve vstupní oblasti kontaktu, která sahá od hranice Hertzovy kontaktní oblasti až do vzdálenosti, kde tloušťka mazacího filmu dosahuje jeden až dvojnásobek centrální tloušťky [53]. Při velmi malých rychlostech třecích povrchů se velikost vstupní oblasti zmenšuje, takže hodnota centrální tloušťky mazacího filmu je určována viskozitou vrstev maziva ulpívajících na obou třecích površích. Z lineární závislosti centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti třecích povrchů lze usoudit, že viskozita těchto vrstev je stejná jako viskozita maziva a že tudíž až do tloušťky 1 nm nedochází k utváření mezního filmu v kontaktu. To sice dobře koresponduje s výsledky experimentů získanými na obdobné měřicí aparatuře a za podobných experimentálních podmínek [61], avšak již nikoli s výsledky měření pomocí metody povrchových sil [84]. Příčinou může být buď vysoká hodnota smykového spádu nebo skutečnost, že použitá kulička nemá atomicky hladký povrch. Lineární závislost také naznačuje, že povrchové nerovnosti mají na tloušťku mazacího filmu zanedbatelný vliv, což je pravděpodobně způsobeno jejich elastickou deformací. Podobné chování jako u hexadekanu bylo pozorováno také u izoparafinických [74] a naftenických [85] základových ropných olejů.



Obr. 6 Závislost centrální tloušťky filmu na rychlosti valení pro hexadekan.



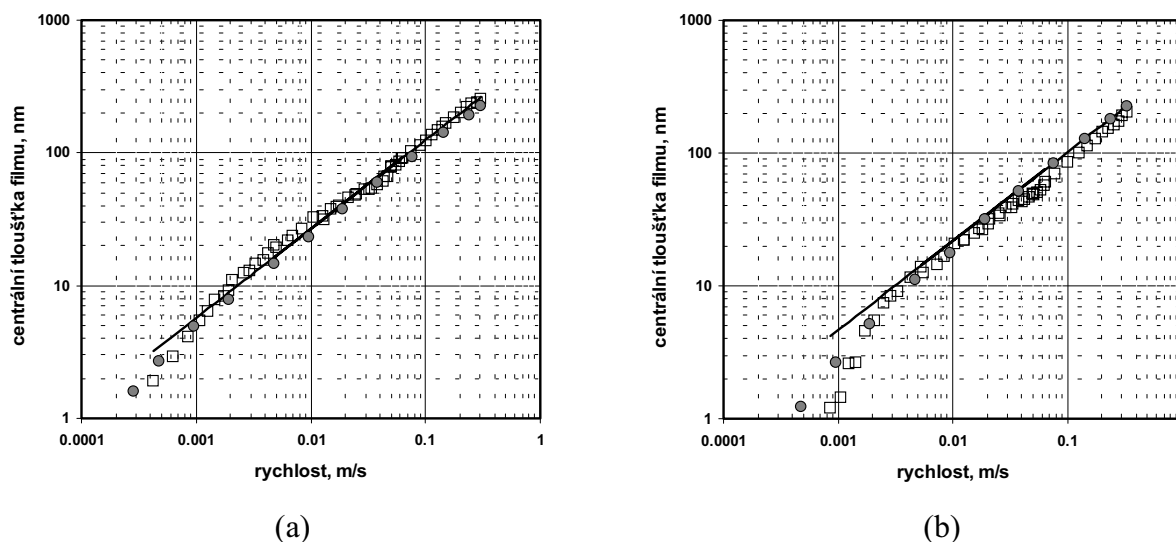
Obr. 7 Závislost centrální tloušťky filmu na rychlosti valení pro oktamethylcyklotetrasiloxan.

Některé kapaliny, jako např. oktamethylcyklotetrasiloxan (obr. 7), vykazují při určité tloušťce mazacího filmu odklon od lineární závislosti, přičemž centrální tloušťka mazacího filmu je větší než vyplývá z rovnice (6) [85]. Oktamethylcyklotetrasiloxan je jednoduchým silikonovým olejem, který je pro svou inertnost a nepatrnou polaritu často používán při studiu velmi tenkých filmů metodou povrchových sil [86]. Příčinou nelineárního chování je utváření mezního filmu na třecích površích sestávajícího z přibližně deseti monomolekulárními vrstev vysoce viskozní tekutiny. Pozorovaná stupňovitá změna tloušťky mazacího filmu s rychlostí je pravděpodobně důsledkem kvantování vrstev kapaliny ve vstupní oblasti kontaktu.

Mazací film o větší tloušťce než by odpovídala EHD mazání vykazují při nízkých rychlostech třecích povrchů také některá průmyslově používaná maziva, jako např. olej Mobil Jet Oil II určený

pro letecké turbíny. Poněvadž se jedná o směs esterů obsahující řadu různých zušlechťujících přísad, mezní film se chová částečně jako viskozni tekutinový film a částečně jako pevná vrstva.

Všechny výše uvedené experimenty byly uskutečněny při maximálním Hertzově tlaku kolem 0,5 GPa. Kontaktní tlaky vyskytující se v reálných EHD kontaktech u strojních součástí, jakými jsou např. valivá ložiska, ozubené převody či variátory, však dosahují několikanásobně vyšších hodnot. Roku 2002 publikoval Zhu [87] výsledky numerického řešení eliptického EHD kontaktu získané pro široký rozsah provozních podmínek, které ukazují na anomální chování mazacího filmu při nízkých rychlostech třecích povrchů a vysokých kontaktních tlacích. To spočívá v odklonu od lineární závislosti reprezentované rovnicí (6), přičemž tloušťka mazacího filmu je menší než vyplývá z této rovnice a s klesající rychlostí se asymptoticky blíží k nule. Rozdíl mezi tloušťkou maziva stanovenou z rovnice (6) a z numerického řešení je tím větší, čím je vyšší hodnota maximálního Hertzova tlaku. K ověření tohoto chování byla provedena série experimentů s kotoučem vyrobeným z opticky izotropního syntetického safiru a kuličkou z oceli, resp. karbidu wolframu. Díky vysokým hodnotám Youngova modulu pružnosti třecích povrchů bylo možné dosáhnout maximálního Hertzova tlaku až 3 GPa. Jako maziva bylo užito izoparafinického základového ropného oleje, který při kontaktním tlaku 0,5 GPa vykazuje lineární závislost až do tlouštěk filmu kolem 1 nm. Experimentální pozorování (obr. 8) potvrdila tendence předpovězená numerickým řešením. Příčina tohoto chování není zcela zřejmá, lze však soudit, že souvisí s nedostatečným hydrodynamickým působením mazacího filmu.

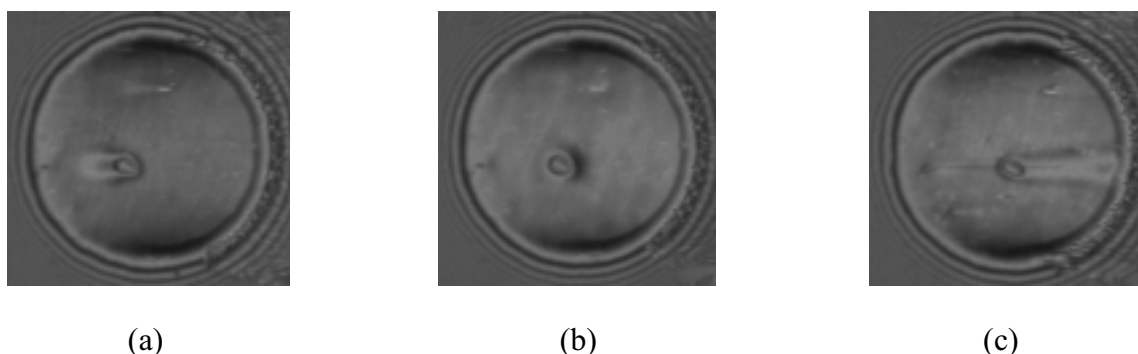


Obr. 8 Porovnání vypočtené (●) a změřené (□) závislosti centrální tloušťky filmu na rychlosti valení pro izoparafinický základový ropný olej pro maximální Hertzův tlak 1 GPa (a) a 3 GPa (b).

Z dosud uvedeného je zřejmé, že chování velmi tenkých mazacích filmů je relativně složité, a to dokonce i pro případ hladkých třecích povrchů. U drsných povrchů je situace ještě komplikovanější, protože hydrodynamický mazací film plně neodděluje třecí povrchy, takže dochází k vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi. Ty se deformují, přičemž v jejich styku nastává mezní mazání, zatímco v jiných oblastech kontaktu je mazání kapalínové.

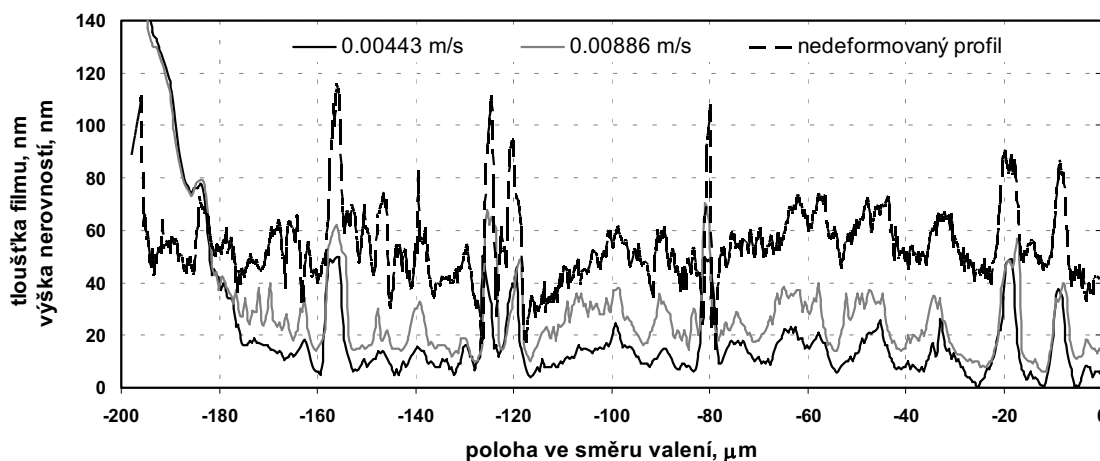
Nejjednodušší situace, která může být experimentálně studována, je EHD mazání nehladkých povrchů, mezi kterými nedochází k vzájemné interakci. Příkladem je změna tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu dvou hladkých třecích povrchů, z nichž jeden je narušen uměle vytvořeným vtiskem. Ten zpravidla vzniká při průchodu znečišťujících částic kontaktní oblastí, kdy dochází k jejich zamáčknutí do třecích povrchů. Vtisky působí jako koncentrátoři napětí a v důsledku

opakovaného cyklického namáhání dochází v jejich místě ke vzniku povrchových trhlin, které se dále větví, až nastává vydrolování nebo odlupování materiálu z třecích povrchů [88]. Aby bylo možné zkoumat tento případ prostřednictvím optické interferenční metody, byl do povrchu kuličky pomocí nástroje ze slinutého karbidu vytvořen kuželový vtisk o průměru 73 μm a hloubce 0,7 μm .



Obr. 9 Interferogramy průchodu vtisku kontaktní oblasti pro případ, kdy rychlost kotouče je menší (a), stejná (b) a větší (c) jako rychlost kuličky.

Jedním z nejzajímavějších jevů, které mohou být pozorovány při EHD mazání drsných povrchů, je „nezávislé“ chování tloušťky mazacího filmu a povrchové nerovnosti v Hertzově oblasti kontaktu (obr. 9) [89]. Jakmile vtisk vstupuje do této oblasti, je mazivo v něm zachycené vystaveno náhlé změně tlaku z hodnoty odpovídající atmosférickému tlaku až na hodnotu maximálního Hertzova tlaku. To vede ke zvýšení jeho viskozity o několik řádů, které má za následek dočasnou změnu stavu maziva, jenž se chová spíše jako pevná látka než jako kapalina. Couetteovo proudění v centrální oblasti kontaktu, kde tloušťka mazacího filmu je téměř konstantní, unáší vzniklý sloupec maziva průměrnou rychlostí třecích povrchů. Vtisk však prochází kontaktem rychlostí povrchu, na kterém se nachází. Za podmínek čistého valení, kdy mají kulička i kotouč stejné rychlosti,



Obr. 10 Rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro případ smíšeného mazání reálných povrchů.

se sloupec maziva pohybuje společně s vtiskem. Je-li rychlost kuličky menší (větší) než rychlost kotouče, pak se sloupec pohybuje rychleji (pomaleji) než vtisk a elastická deformace je lokalizována v okolí přední (zadní) hrany vtisku. Tento jev poprvé pozorovali u tlustých filmů Wedeven a Cusano [56] a teoreticky jej potvrdili Venner a Lubrecht [90]. Kolorimetrická interferometrie také umožnila studovat, za jakých podmínek může dojít k prolomení mazacího filmu v okolí

přední hrany vtisku [89]. Bylo zjištěno, že případ, kdy se povrch opatřený vtiskem pohybuje pomaleji než hladký povrch, je z tohoto hlediska mnohem nebezpečnější, než když je tomu naopak.

Experimentálně nejnáročnější je výzkum smíšeného mazání reálných povrchů, kdy tlak v mazacím filmu má za následek změnu topografie třecích povrchů, která zpětně zase ovlivňuje tlak. To znamená, že hydrodynamický tlak vznikající v okolí jednotlivých povrchových nerovností způsobuje jejich elastickou deformaci, která vede k jejich částečnému, popř. úplnému zahlazení. Tento jev projevující se perturbacemi Hertzova rozložení tlaku bývá označován jako mikroelastohydrodynamické mazání. Nadto mezi vrcholy stýkajících se nerovností je velmi tenký mazací film, který má jiné reologické vlastnosti než film ve zbylé části kontaktu. Experimenty provedené s kuličkou mající reálné izotropní nerovnosti a střední aritmetickou úchylku povrchu kolem $0,019 \mu\text{m}$ potvrdily některé atributy chování mazacího filmu, které byly již dříve teoreticky předpovězeny a nedávno také pozorovány u uměle vytvořených povrchových nerovností [80]. Především nerovnosti procházející EHD kontaktem jsou elasticky deformovány, přičemž velikost deformace závisí na původní výšce nerovností, elastických vlastnostech třecích povrchů a jejich rychlostech (obr. 10). Rychlosti třecích povrchů, zejména velikost prokluzu, hrají nejdůležitější roli při procesu mazání reálných povrchů.

5 ZÁVĚR: ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ A JEHO VÝZNAM PRO DALŠÍ ROZVOJ TECHNIKY

What is inaccessible today may become accessible tomorrow as has happened by the invention of the microscope... Coherent assumptions on what is still invisible may increase our understanding of the visible...

Jean Baptiste Perrin (1926)

Objasnění podstaty EHD mazání je považováno za jeden z největších úspěchů tribologie v druhé polovině dvacátého století [91]. To není nikterak překvapující, pokud si uvědomíme, že při tomto režimu mazání vzniká mezi nekonformně zakřivenými třecími povrchy strojních součástí koherentní kapalinový mazací film, který zabraňuje vzájemné interakci povrchových nerovností. Díky tomu nedochází k téměř žádnému opotřebení třecích povrchů.

Teorie EHD mazání byla sice formulována na základě zkoumání fyzikálního mechanismu mazání boků zubů ozubených kol, avšak záhy našla uplatnění také u valivých ložisek, vačkových mechanismů, variátorů, kloubů a těsnění. Koncem dvacátého století byl problém predikce tvaru a tloušťky mazacího filmu jak v liniovém, tak i bodovém kontaktu z velké části vyřešen (alespoň pro hladké povrchy) a výpočet EHD mazání se stal součástí standardních návrhových procedur [92].

S pokrokem ve výrobních technologiích maziv a povrchů však dochází k neustálému snižování tloušťky mazacího filmu, což přináší nové dosud nezodpovězené otázky. Zde je třeba připomenout, že výsledky prvních teoretických řešení problému EHD mazání byly porovnávány s výsledky experimentálních měření uskutečněných na diskových zařízeních počátkem šedesátých let. Tehdy se tloušťka mazacího filmu pohybovala kolem jednoho mikrometru, zatímco v dnešních strojích a zařízeních mají EHD filmy tloušťku několika desítek či dokonce jednotek nanometrů [82]. To nutně vyvolává požadavek na přezkoumání původních předpokladů učiněných při výpočtu relativně tlustých mazacích filmů. Mezi fundamentální otázky patří zejména ty, které se týkají validity Reynoldsovy rovnice, meze platnosti mechaniky kontinua a způsobu, jak predikovat chování nanometrických mazacích filmů. Úsilí vyřešit tyto problémy přineslo poznání, že mezi EHD a mezním režimem mazání existuje pravděpodobně ještě režim další, u kterého je sice stále ještě možné pozorovat hydrodynamické působení maziva, avšak mazací film se chová odlišně, než jak předpovídá EHD teorie [93]. Tento režim mazání označovaný některými autory jako mazání tenkým filmem [67] přitahuje v současné době pozornost řady vědců, kteří se dříve věnovali řešení konvenčních tribologických problémů. Experimentální úkoly, které by na tomto poli měly být řešeny v blízké budoucnosti, zahrnují studium: reologických vlastností velmi tenkých filmů tvořených průmyslovými mazivy; velikosti prokluzu v blízkosti rozhraní kapalina-pevná fáze za vysokých tlaků; fyzikálních vlastností a kinetiky utváření mezních filmů na třecích površích u protioděrových a vysokotlakých zušlechťujících přísad; chování základových maziv a reaktivních filmů ve styku povrchových nerovností; podstaty a velikosti sil, které určují chemické procesy probíhající v kontaktech mazaných tenkými filmy (např. mžiková teplota či emise elektronů).

Jak bude vypadat tribologie v příštích 25 letech, je těžké předpovídat. Nicméně tři hlavní tendence vývoje mohou být načrtnuty již dnes [94]. První vychází z nárůstu výpočetního výkonu počítačů, který by kolem roku 2030 měl být milionkrát větší, než jaký je dnes. Možnosti, které to přinese z hlediska výpočtové simulace, jsou stěží představitelné. Druhá tendence předpokládá vývoj laciných supravodičů pracujících při pokojových teplotách, které umožní masové rozšíření ložisek využívajících sil elektrodynamického pole. Třetí směr vývoje bude patrně spojen s využitím bioaktivních materiálů, a to nejenom u kloubních implantátů, ale také u ložisek.

Problematika velmi tenkých mazacích filmů, jíž se autor této přednášky zabývá, je součástí výzkumného záměru *Nanomateriály a nanostruktury* a rovněž navazujícího magisterského studijního oboru *Konstrukční inženýrství*. V tomto interdisciplinárním studijním oboru, který spojuje inženýrské a aplikované vědy, má tribologie své pevné místo. Díky jejímu zařazení do studijního plánu

mají studenti možnost nejenom se seznámit s podstatou procesů tření, mazání a opotřebení, ale také získat celistvější pohled na děje probíhající ve strojích. Tribologie není zahrnuta jen ve specializovaných přednáškách, ale stala se také součástí základního kurzu Částí a mechanismů strojů. To má velký praktický význam, neboť ztráty způsobené třením a opotřebením dosahují v průmyslově vyspělých zemích přibližně 1 % hrubého národního produktu [95].

6 LITERATURA

- [1] DAVISON, C. St. C. Bearings since the Stone Age; A short history of their development. *Engineering*, January 1957, vol. 183, pp. 2–5.
- [2] LAYARD, A. H. *Discoveries in the ruins of Nineveh and Babylon*. New Jersey: Gorgias Press LLC., 2002. 740 p. ISBN 1-931956-50-2.
- [3] DOWSON, D. *History of tribology*. 2nd ed. London and Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing Limited, 1998. 768 p. ISBN 1-86058-070-X.
- [4] VITRUVIUS POLLIO, M. *Deset knih o architektuře*. 3. vyd. Praha: Baset, 2001. 438 s. ISBN 80-86223-49-3.
- [5] UCELLI, G. *Le Navi Di Nemi*. Roma: La Liberia dello Stato, 1950. 474 p.
- [6] PLINIUS SECUNDUS, G. *Kapitoly o přírodě*. Praha: Svoboda, 1974. 352 s.
- [7] PEČÍRKA, J. *Leonardo da Vinci*. 3. vyd. Praha: Odeon, 1988. 77 s.
- [8] AMONTONS, G. De la resistance caus'ee dans les machines. *Mémoires de l'Académie Royale*, 1699, pp. 257–282.
- [9] COULOMB, Ch. A. de. Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et aur cordages. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, 1785, vol. X, pp. 161–342.
- [10] Pat. GB 1580. GARNETT, J. Method of reducing friction in axles, etc. 1787.
- [11] Pat. GB 2006. VAUGHAN, P. Axle trees, arms, and boxes. 1794.
- [12] Pat. GB 11674. DENNE, T. Compositions for atmospheric pipes, and for lubricating machinery. 1847.
- [13] Pat. GB 12109. DONLAN, J. J. Compounds for lubricating machinery. 1848.
- [14] Pat. GB 13292. YOUNG, J. Treating bituminous coals to obtain paraffine and oil containing paraffine therefrom. 1850.
- [15] NEWTON, I. *Isaac Newton's Philosophiæ Naturales Principia Mathematica*. 3rd ed. London: Cambridge University Press, 1972. 916 p.
- [16] TOWER, B. First report on friction experiments (friction of lubricated bearings). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, November 1883, pp. 632–659.
- [17] PETROV, N. P. Trenie v mašinach i vlijanie na něgo smazyvajuščej židkosti. *Inženěrnij žurnal St. Petěrsburg*, 1883, vol. 27, pp. 71–140, 227–279, 337–436, 535–564.
- [18] REYNOLDS, O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1886, vol. 177, pp. 157–234.
- [19] MARTIN, H. M. Lubrication of gear teeth. *Engineering*, August 1916, vol. 102, pp. 119–121.
- [20] PEPLER, W. Untersuchungen über die Druckübertragung bei belastetem und geschmierten unclaufenden achsparallelen Zylindern. In: *Maschinenelemente-Tatung Aachen*. Berlin: VDI Verlag, 1935, pp. 42–43.
- [21] MELDAHL, A. contribution to the theory of the lubrication of gears and of the stressing of the lubricated flanks of gear teeth. *The Brown Boveri Review*, November 1941, vol. 28, pp. 374–382.
- [22] GATCOMBE, E. K. Lubrication characteristics of involute spur-gears – a theoretical investigation. *Transactions of the A.S.M.E.*, April 1945, vol. 67, pp. 177–188.
- [23] GRUBIN, A. N. Fundamentals of the hydrodynamic theory of lubrication of heavily loaded cylindrical surfaces. In: *Investigation of the Contact of Machine Components*. Ed. Kh. P. Ketova. Moscow: Gosud. Nauch-Tekh. Izdat. Mash. Lit., 1949, pp. 118–196.
- [24] PETRUSEVIČ, A. I. Osnovnye vyvody iz kontaktno-gidrodinamičeskoj teorii smazki. *Izvestija Akademii Nauk SSSR – Otdělenije tehničeskich nauk*, 1951, pp. 209–223.

- [25] DOWSON, D.; HIGGINSON, G. R. A numerical solution to the elastohydrodynamic problem. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1959, vol. 1, pp. 6–15.
- [26] DOWSON, D.; HIGGINSON, G. R.; WHITAKER, A. V. Elasto-hydrodynamic lubrication: A survey of isothermal solutions. *Journal Mechanical Engineering Science*, 1962, vol. 4, pp. 121–162.
- [27] DOWSON, D. Elasto-hydrodynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3A*, 1968, vol. 182, pp. 151–167.
- [28] CROOK, A. W. Elasto-hydrodynamic lubrication of rollers. *Nature*, 1961, vol. 190, pp. 1182.
- [29] KANNEL, J. W. Measurements of pressures in rolling contact. *Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part 3B*, 1965, vol. 180, pp. 135.
- [30] HAMILTON, G. M.; MOORE, S. L. Deformation and pressure in an elastohydrodynamic contact. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1971, vol. A322, pp. 313–330.
- [31] ARCHARD, J. F.; KIRK, M. T. Lubrication at point contacts. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1961, vol. A261, pp. 535–550.
- [32] KIRK, M. T. Hydrodynamic lubrication of ‘Perspex’. *Nature*, 1962, vol. 194, pp 965–966.
- [33] GOHAR, R.; CAMERON, A. Optical measurement of oil film thickness under elastohydrodynamic lubrication. *Nature*, 1963, vol. 200, pp. 458–459.
- [34] ARCHARD J. F.; COWKING F. W. Elasto-hydrodynamic lubrication at point contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3B*, 1965–1966, vol. 180, pp. 47–56.
- [35] CHENG, H. S. A Numerical solution of the elastohydrodynamic film thickness in an elliptical contact. *Transactions of the ASME – Journal of Lubrication Technology*, January 1970, vol. 92, pp. 155–162.
- [36] RANGER A. P.; ETTLES C. M. M.; CAMERON A. The solution of the point contact elastohydrodynamic problem. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1975, A346, pp. 227–244.
- [37] HAMROCK B. J.; DOWSON D. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts, Part III – Fully flooded results. *Transactions of the ASME – Journal of Lubrication Technology*, April 1977, vol. 99, pp. 264–276.
- [38] CHITTENDEN, R. J.; DOWSON, D.; DUNN, J. F.; TAYLOR, C. M. A theoretical analysis of the isothermal elastohydrodynamic lubrication of concentrated contacts II. General case, with lubricant entrainment along either principal axis of the Hertzian contact ellipse or at some intermediate angle. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1985, A397, pp. 271–294.
- [39] EVANS, H. P.; SNIDLE, R. W. Inverse solution of Reynolds’ equation of lubrication under point-contact elastohydrodynamic conditions. *Transactions of the ASME – Journal of Lubrication Technology*, October 1981, vol. 103, pp. 539–546.
- [40] LUBRECHT, A.; TEN NAPEL, W. E., BOSMA, R. Multgrid, an alternative method for calculating film thickness and pressure profiles in elastohydrodynamically lubricated line contacts. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, October 1986, vol. 108, pp. 551–556.
- [41] LUBRECHT, A.; TEN NAPEL, W. E., BOSMA, R. Multgrid, an alternative method of solution for two-dimensional elastohydrodynamically lubricated point contact calculations. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, July 1987, vol. 109, pp. 437–443.
- [42] VENNER, CH. Higher-order multilevel solvers for the EHL line and point-contact problem. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, October 1994, vol. 116, pp. 741–750.
- [43] HARDY, W. B.; HARDY, J. K. Note on static friction and on the lubricating properties of certain chemical substances. *Philosophical Magazine*, July 1919, vol. 38, pp. 32–48.
- [44] LANGMUIR, I; BLODGETT, K. B. Über einige neue Methoden zur Untersuchung von monomolekularen Filmen. *Kolloid-Zeitschrift*, Dezember 1935, band 73, s. 257–263.

- [45] CAMERON, A.; GOHAR, R. Theoretical and experimental studies of the oil film in lubricated point contact. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, vol. A291, pp. 520–536.
- [46] GOHAR, R. A ball-plate machine for measuring elastohydrodynamic oil films. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G*, 1967–1968, vol. 182, pp. 43–45.
- [47] FOORD, C. A.; WEDEVEN, L. D.; WESTLAKE, F. J.; CAMERON, A. Optical elastohydrodynamic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 1*, 1969–1970, vol. 184, pp. 487–505.
- [48] GOHAR, R.; CAMERON, A. The mapping of elastohydrodynamic contacts. *ASLE Transactions*, 1967, vol. 10, pp. 215–225.
- [49] WESTLAKE, F. J.; CAMERON, A. Optical elastohydrodynamic fluid testing. *ASLE Transactions*, 1972, vol. 15, pp. 81–95.
- [50] HAMAGUCHI, H.; SPIKES, H. A.; CAMERON, A. Elastohydrodynamic properties of water in oil emulsions. *Wear*, 1977, vol. 43, pp. 17–24.
- [51] CUSANO, C.; SLINEY, H. E. Dynamics of solid dispersions in oil during the lubrication of point contacts, Part I – Graphite. *ASLE Transactions*, 1982, vol. 25, pp. 183–189.
- [52] CUSANO, C.; SLINEY, H. E. Dynamics of solid dispersions in oil during the lubrication of point contacts, Part II – Molybdenum disulfide. *ASLE Transactions*, 1982, vol. 25, pp. 190–197.
- [53] WEDEVEN, L. D.; EVANS, D.; CAMERON, A. Optical analysis of ball bearing starvation. *Transactions of the ASME – Journal of Lubrication Technology*, July 1971, vol. 93, pp. 349–363.
- [54] JACKSON, A.; CAMERON, A. An interferometric study of EHL of rough surfaces. *ASLE Transactions*, 1976, vol. 19, pp. 50–60.
- [55] WEDEVEN, L. D. Influence of debris dent on EHD lubrication. *ASLE Transactions*, 1977, vol. 21, pp. 41–52.
- [56] WEDEVEN, L. D.; CUSANO, C. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced dents and grooves. *ASLE Transactions*, 1979, vol. 22, pp. 369–381.
- [57] WESTLAKE, F. J.; CAMERON, A. Fluid film interferometry in lubrication studies. *Nature*, 1967, vol. 214, pp. 633–634.
- [58] JOHNSTON, G. J.; WAYTE, R.; SPIKES, H. A. The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts. *Tribology Transactions*, 1991, vol. 34, pp. 187–194.
- [59] ISRAELACHVILI, J. Interferometric method for determining refractive index and thickness of thin films. *Nature Physical Science*, January 1971, vol. 229, pp. 85–86.
- [60] GUNSEL, S.; SPIKES, H. A.; ADERIN, M. In-situ measurement of ZDDP films in concentrated contacts. *Tribology Transactions*, 1993, vol. 36, pp. 276–282.
- [61] GUANGTENG, G.; SPIKES, H. A. Boundary film formation by lubricant base fluids. *Tribology Transactions*, 1996, vol. 39, pp. 448–454.
- [62] SMEETH, M.; SPIKES, H. A.; GUNSEL, S. The formation of viscous surface films by polymer solutions: Boundary or elastohydrodynamic lubrication. *Tribology Transactions*, 1996, vol. 39, pp. 720–725.
- [63] GUANGTENG, G.; SPIKES, H. A. Fractionation of liquid lubricants at solids surfaces. *Wear*, 1996, vol. 200, pp. 336–345.
- [64] SMEETH, M.; SPIKES, H. A. Central and minimum elastohydrodynamic film thickness at high contact pressure. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, April 1997, vol. 119, pp. 291–296.
- [65] GLOVNEA, R. P.; FORREST, A. K.; OLVER, A. V.; SPIKES, H. A. Measurement of sub-nanometer lubricant films using ultra-thin film interferometry. *Tribology Letters*, October 2003, vol. 15, pp. 217–230.

- [66] LUO, J.; WEN, S.; HUANG, P. Thin film lubrication Part I: Study on the transition between EHL and thin film lubrication using a relative optical interference technique. 1996, *Wear*, vol. 194, pp. 107–115.
- [67] LUO, J.; WEN, S.; WEN, L.; WEN, S.; LI, L. K. Y. The failure of fluid film at nano-scale. *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42, pp. 912–916.
- [68] GUO, F.; WONG, P. L. A multi-beam intensity-based approach for lubricant film measurements in non-conformal contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Engineering Tribology*, 2002, vol. 216, pp. 281–291.
- [69] CANN, P. M.; SPIKES, H. A.; HUTCHINSON, J. The development of a Spacer Layer Imaging Method (SLIM) for mapping elastohydrodynamic contacts. *Tribology Transactions*, 1996, vol. 39, pp. 915–921.
- [70] GUSTAFSSON, L.; HÖGLUND, E.; MARKLUND, O. Measuring lubricant film thickness with image analysis. *Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1994, vol. 208, pp. 199–205.
- [71] GUANGTENG, G.; CANN, P. M.; OLVER, A. V.; SPIKES, H. A. Lubricant film thickness in rough surface, mixed elastohydrodynamic contact. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, January 2000, vol. 122, pp. 65–76.
- [72] GLOVNEA, R. P.; CHOO, J. W.; OLVER, A. V.; SPIKES, H. A. Compression of a single transverse ridge in a circular elastohydrodynamic contact. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, April 2003, vol. 125, pp. 275–282.
- [73] HARTL, M.; KŘUPKA, I.; LIŠKA, M. Differential colorimetry: Tool for evaluation of chromatic interference patterns. *Optical Engineering*, September 1997, vol. 36, pp. 2384–2391.
- [74] HARTL, M.; KŘUPKA, I.; POLIŠČUK R.; LIŠKA, M.; MOLIMARD J.; QUERRY M.; VERGNE P. Thin film colorimetric interferometry. *Tribology Transactions*, 2001, vol. 44, pp. 270–276.
- [75] 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*, 1999, vol. 42, pp. 303–309.
- [76] HARTL, M.; KŘUPKA, I.; LIŠKA, M. Experimental study of boundary layers formation by thin film colorimetric interferometry. *Science in China, Series A – Mathematics Physics Astronomy*, 2001, vol. 44, pp. 412–417.
- [77] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; LIŠKA, M. Influence of contact pressure on central and minimum film thickness within ultra-thin lubricated contacts. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, October 2005, vol. 127, pp. 890–892.
- [78] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; POLIŠČUK, R.; ČERMÁK, J.; LIŠKA, M. Experimental evaluation of EHD film shape and its comparison with numerical solution. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, October 2000, vol. 122, pp. 689–696.
- [79] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; POLIŠČUK, R.; LIŠKA, M. Experimental study of central and minimum elastohydrodynamic film thickness by colorimetric interferometry technique. *Tribology Transactions*, 2000, vol. 43, pp. 611–618.
- [80] HARTL, M.; KŘUPKA, I.; FUIS, V.; LIŠKA, M. Experimental study of lubricant film thickness behavior in the vicinity of real asperities passing through lubricated contact. *Tribology Transactions*, 2004, vol. 47, pp. 376–385.
- [81] HARIHARAN, P.; OREB, B. F.; EIJU, T. Digital phase-shifting interferometry: A simple error-compensating phase calculation algorithm. *Applied Optics*, 1987, vol. 26, pp. 2504–2506.
- [82] DOWSON, D. Developments in lubrication – the thinning film. *Journal of Applied Physics D*, 1992, vol. 25, pp. A334–A339.

- [83] TABOR, D.; WINTERTON, R. H. S. The direct measurement of normal and retarded van der Waals forces. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1969, A312, pp. 435–450.
- [84] CARSON, G.; HU, H.; GRANICK, S. Molecular tribology of fluid lubrication: Shear thinning. *Tribology Transactions*, 1992, vol. 35, pp. 405–410.
- [85] HARTL, M.; KRŮPKA, I.; LIŠKA, M. Experimental study of boundary layers formation in concentrated contacts. In: *Boundary and Mixed Lubrication: Science and Application: Proceedings of the 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Ed. D. Dowson et al. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2002, pp. 413–421. ISBN 0-444-50969-0.
- [86] MATSUOKA, H.; KATO, T. Experimental study of ultrathin liquid lubrication film thickness at the molecular scale. *Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1997, vol. 211, pp. 139–150.
- [87] ZHU, D. Elastohydrodynamic lubrication in extended parameter ranges – Part 1: Speed effect. *Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, 540–548.
- [88] NÉLIAS, D.; VILLE, F. Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, January 2000, vol. 122, pp. 55–64.
- [89] KRŮPKA I.; HARTL M.; LIŠKA M. The influence of slide-to-roll ratio on lubricant film thickness distribution in the vicinity of real roughness features passing through EHD point contact. In: *Life Cycle Tribology: Proceedings of the 31th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Ed. D. Dowson et al. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2005, ISBN: 0-444-51687-5.
- [90] VENNER, C. H.; LUBRECHT, A. A. Transient analysis of surface features in an EHL line contact in the case of sliding. *Transactions of the ASME – Journal of Tribology*, 1994, vol. 116, pp. 186–193.
- [91] BARWELL, F. T. The founder of modern tribology. In: *Osborne Reynolds and Engineering Science Today*. Ed. D. M. McDowell; J. D. Jackson. Manchester: Manchester University Press, 1970, pp. 240–263.
- [92] HAMROCK, B. J.; JACOBSON, BO.; SCHMID, S. R. *Fundamentals of Machine Elements*. 1st ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1999. 926 p. ISBN 0-256-19069-0.
- [93] HU, Y. Z.; GRANICK, S. Microscopic study of thin film lubrication and its contributions to macroscopic tribology. *Tribology Letters*, 1998, vol. 5, pp. 81–88.
- [94] SPIKES, H. Tribology research in the twenty-first century. *Tribology International*, 2001, vol. 34, pp. 789–799.
- [95] *Tribologie, Reibungs-Verschleiß-Schmierung*. BMFT-Forschungsbericht T76-38. Bonn: Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1984.

7 ABSTRACT

The trend of decreasing lubricant film thickness in tribological systems termed as “the thinning film” is one of the important features of current tribology stirred up by the quest for energy saving. This trend results in very thin lubricant films whose thickness is almost of the same order as the size of a lubricant molecule and comparable to the composite surface roughness of the rubbing surfaces. Such a lubrication regime is associated with a transition from elastohydrodynamic to boundary lubrication and occurs especially at low lubricant viscosity, low speed and high operating temperature. It has been called thin film lubrication.

This lecture has examined our current understanding of thin film elastohydrodynamic lubrication of machine elements. The organisation of the text is such that it is divided into five parts. The first part is essentially an introduction into history of tribology. The second part of the work reviews the development of understanding of the phenomenon of elastohydrodynamic lubrication throughout the twentieth century. The third part charts the development of optical interferometry as an experimental tool for the study of both elastohydrodynamic and very thin film lubrication. In the fourth part author’s works on the field of thin film lubrication are reviewed. The fifth part attempts to predict and discuss some of the many challenges facing research in very thin film lubrication in the near future.