VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Ing. Martin Hartl, Ph.D.

MĚŘENÍ A STUDIUM VELMI TENKÝCH MAZACÍCH FILMŮ

THE MEASUREMENT AND STUDY OF VERY THIN LUBRICANT FILMS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE

BRNO 2002

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

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

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE
Areálová knihovna FSI VUT v Brně

© Martin Hartl
ISBN 80-214-2224-6
ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA 4

1 ÚVOD 5

2 MAZÁNÍ A ŘEŽIMY MAZÁNÍ 6

3 TENKÉ MAZACÍ FILMY A JEJICH MĚŘENÍ 8

3.1 Mazací filmy ve strojních soustavách 8
3.2 Interferometrie velmi tenkých filmů 9
3.3 Metoda povrchových sil 14

4 STUDIUM TENKÝCH FILMŮ KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ 18

4.1 Měřicí aparatura 18
4.2 Experimentální materiál 19
4.3 Experimentální podmínky 19
4.4 Kolorimetrická interferometrie 20
4.5 Proužky stejného chromatického řádu 20
4.6 Srovnání měřicích metod 21
4.7 Výsledky 21

5 ZÁVĚR 23

LITERATURA 25

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Martin Hartl se narodil 4. srpna 1967 v Brně. V letech 1985–1990 studoval obor Stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Zde roku 1990 zakončil studium s vyznamenáním obhajobou diplomové práce zaměřené na problematiku mezních provozních podmínek rychloběžných valivých uložení a složením státní závěrečné zkoušky. Téhož roku zahájil doktorské postgraduální studium na stejné fakultě v oboru Konstrukční a procesní inženýrství. V roce 1997 obhájil doktorskou disertační práci nazvanou

„Mapování tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu počítačovou diferenciální kolorimetrií“ a obdržel titul 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“.

Od roku 1993 je zaměstnán jako odborný asistent na Ústavu konstruování na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Zde se věnuje zejména experimentálnímu výzkumu chování tenkých mazacích filmů při elastohydrodynamickém a mezném mazání. Uvedená problematika byla rozvíjena v rámci dvou projektů Grantové agentury České republiky, jejichž byl řešitelem. Výsledky vědecké práce byly publikovány v 9 článcích v mezinárodních vědeckých časopisech, v 5 příspěvcích do mezinárodních vědeckých knižních publikací a 24 příspěvcích na mezinárodních a českých vědeckých konferencích. Po celou dobu svého působení na Fakultě strojního inženýrství úzce spolupracuje s Ústavem fyzikálního inženýrství této fakulty, kde se spolupodílel na založení „Skupiny pro výzkum elastohydrodynamického mazání“ a vytvoření experimentální laboratoře. Své znalosti a zkušenosti v oboru výzkumu elastohydrodynamického mazání uplatnil a dále prohloubil při studijních pobytech na zahraničních univerzitách, zejména na Tsinghua univerzitě v Pekingu (2001) a Kjúšúském technologickém institutu v Kitakjúšú (2000, 1998). V roce 1999 působil také jako hostující profesor na Lyonské vědecké a technické univerzitě (INSA).

V pedagogické činnosti zajišťuje výuku cvičení kurzů Části a mechanismy strojů KI a KII v prvním stupni magisterského studia, školí diplomanty (3) a doktorandy (1).

1 ÚVOD

Tribologie, zabývající se studiem a popisem tření, mazání a opotřebení, hraje důležitou roli při návrhu, realizaci a provozu téměř všech strojních soustav. Přestože bylo získáno obrovské množství empirických údajů a formulováno mnoho teorií, rozvoj techniky přináší stále nové problémy, které nelze řešit pouze využitím stávajících znalostí. Mezi tyto problémy patří i chování mazacích filmů o tloušťkách několika jednotek či desítek nanometrů, jejichž výzkum si vyžádala zejména postupující miniaturizace strojních součástí. Pokrok ve vývoji mikroobrábění nejen dovolil realizovat v mikroskopickém měřítku strojní soustavy známé až dosud pouze z makrosvěta, ale také umožnil vznik nových mikroelektromechanických zařízení (MEMS). Ve všech těchto případech jsou mazací filmy natolik tenké, že je nelze považovat za homogenní kontinuum a nemůže být zanedbán vliv povrchů na jejich chování.

Cílem habilitační práce je podat systematický výklad výsledků experimentálního výzkumu velmi tenkých mazacích filmů, vztahujícího se k mazání strojních soustav, doplněný o vlastní publikace autora v této oblasti. Práce se neomezuje pouze na výsledky inženýrských experimentů, ale snaží se o syntézu základních poznatků získaných jak v oblasti technických věd, tak i ve fyzice povrchů a koloidní a fyzikální chemii. Práce je obsahově členěna do tří částí:

První část podává na základě klasické Stribeckovy křivky úvod do jednotlivých režimů mazání běžně se vyskytujících ve strojních soustavách. Jsou zde popsány základní principy mezného, elastohydrodynamického a smíšeného mazání. Tato část poskytuje východisko pro pochopení experimentů popsaných v druhé části.

Druhá část se věnuje experimentálnímu výzkumu tenkých mazacích filmů, a to jak na základní, tak i aplikované úrovni. Zde je možné nalézt objasnění principu využití interfernce světla k měření tlouštěk tenkých kapalinných filmů i metody povrchových sil, společně s přehledem výsledků získaných oběma metodami.

Třetí část obsahuje pět již publikovaných prací zaměřených zejména na vývoj měřicích metod, umožňujících studium velmi tenkých mazacích filmů za vysokých tlaků, které se běžně vyskytují u strojních součástí. Anglicky psané články jsou doplněny českým komentářem umožňujícím snazší orientaci v dosažených výsledcích.

2 MAZÁNÍ A REŽIMY MAZÁNÍ

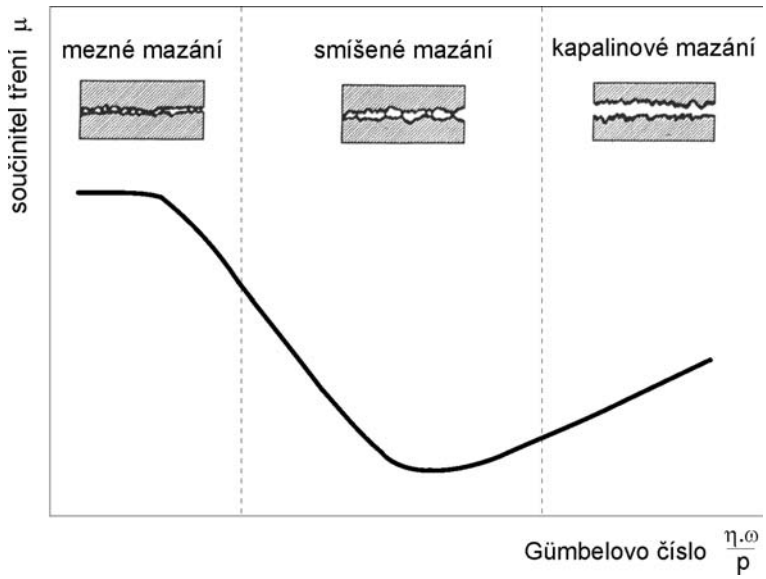
Mazání je tribologický proces, při kterém se prostřednictvím maziva významně snižuje tření a opotřebení třecích povrchů nacházejících se v relativním pohybu. Jako maziva může být užito libovolné látky v plynném, kapalném nebo pevném skupenství, jejíž primární úlohou je separace a ochrana třecích povrchů. Mezi sekundární úlohy maziva pak může patřit např. zajištění odvodu tepla, odstraňování částeček vznikajících opotřebením nebo dosažení některých požadovaných vlastností (např. korozivzdornosti).

Rozlišují se režimy mazání, při kterých dochází k oddělení třecích povrchů koherentním mazacím filmem (*mazání hydrostatické*, *hydrodynamické*, *elastohydrodynamické* a *mazání vytlačovaným filmem*) a režimy, při kterých dochází k bezprostřední interakci mezi třecími povrchy (*mazání mezné* a *mazání tuhými mazivy*).

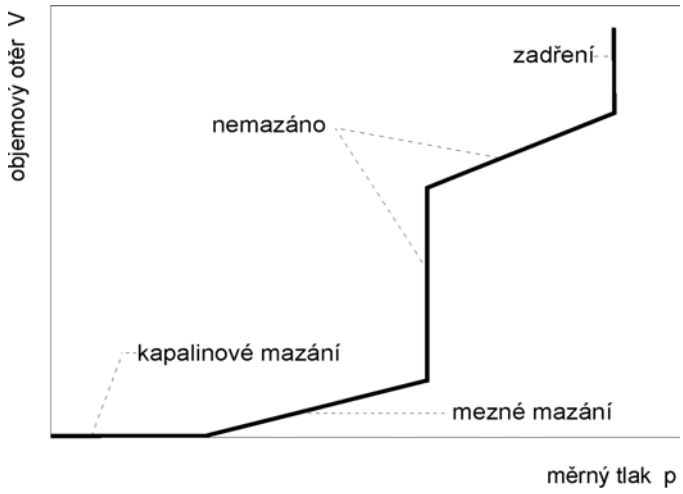
Aby mazací film byl schopen přenášet zatížení působící na třecí povrchy, musí v něm být vyvolán odpovídající protitlak. Toho lze dosáhnout buď hydrostatickým, nebo hydrodynamickým působením. Při hydrostatickém mazání se potřebný tlak v mazacím filmu vytváří externě a mazivo je mezi třecí povrchy zaváděno z vnějšího tlakového zdroje. Hydrodynamické působení, kdy tlak v mazacím filmu je důsledkem relativního pohybu třecích povrchů, je typické pro mazání hydrodynamické, elastohydrodynamické a mazání vytlačovaným filmem.

Jednotlivé režimy mazání (s výjimkou hydrostatického) mohou být přehledně znázorněny pomocí *Stribeckovy křivky* (obr. 1), která udává závislost součinitele tření μ v kluzném radiálním ložisku na parametru $\eta\omega/p$, kde η je dynamická viskozita maziva, ω úhlová rychlost čepu a p tlak [1]. Součin $\eta\omega/p$ je bezrozměrná veličina zvaná Gümbelovo číslo. V závislosti na hodnotě tohoto čísla je možné vymezit na Stribeckově křivce tři oblasti odpovídající třem základním režimům mazání – meznému, smíšenému a kapalinovému.

Při vysokých zatíženích a nízkých rychlostech třecích povrchů může docházet k *meznému mazání*, kdy třecí povrchy jsou od sebe odděleny velmi tenkým filmem vytvořeným buď z adsorbovaných molekul maziva, nebo chemickou reakcí třecích povrchů. Při tomto režimu mazání je zatížení přenášeno výhradně kontaktem mezi povrchovými nerovnostmi a velikost tření závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech třecích povrchů a na chemických vlastnostech maziva.



Obr. 1 Stribeckova křivka



Obr. 2 Závislost objemového otěru *V* na měrném tlaku *p* [2]

Se vzrůstající rychlostí třecích povrchů a klesajícím zatížením dochází k poklesu součinitele tření a nastává přechod od mezného ke kapalinovému mazání, označovaný jako *smíšené mazání*. Při smíšeném mazání je zatížení přenášeno jak kontaktem mezi povrchovými nerovnostmi, tak i hydrodynamickým působením mazacího filmu a velikost tření je tedy dána součtem příspěvků od tření v oblasti reálného styku povrchů a od vnitřního tření v mazacím filmu.

Se zvyšujícím se Gümbelovým číslem dochází sice k nárůstu součinitele tření, avšak mezi třecími povrchy se vytváří koherentní mazací film, který zabraňuje jejich vzájemné interakci. Nastává *kapalinové mazání*, při kterém je velikost tření závislá pouze na reologických vlastnostech maziva, zejména na jeho viskozitě. Podle toho, zda třecí povrchy jsou nekonformně či konformně zakřiveny, lze kapalinové mazání dále rozdělit na *mazání elastohydrodynamické* a *hydrodynamické*.

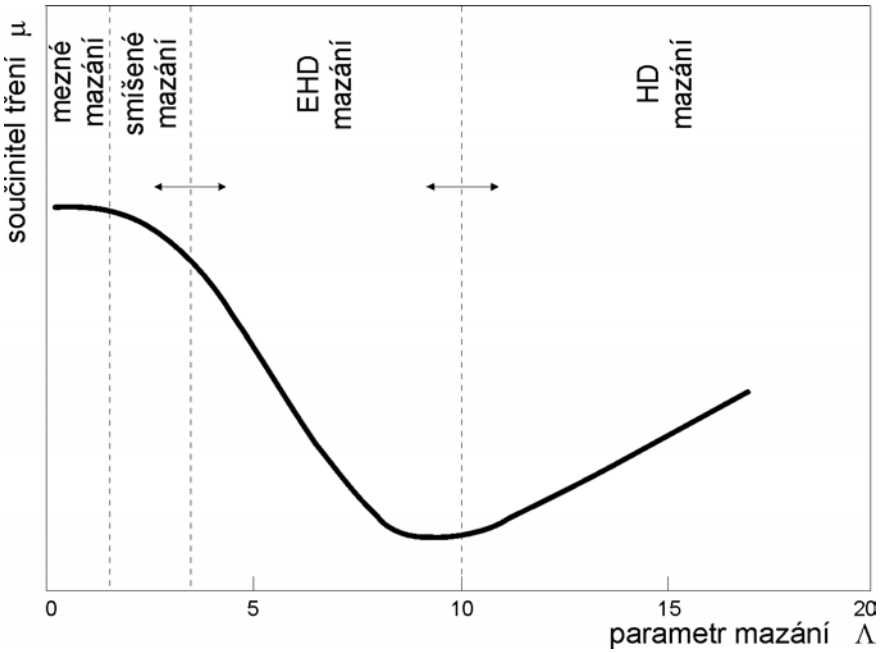
Obrázek 2 ukazuje závislost objemového otěru *V* na měrném tlaku *p* pro jednotlivé režimy mazání. Při kapalinovém mazání nedochází téměř k žádnému opotřebení třecích povrchů. S přechodem od kapalinového k meznému mazání nastává pozvolný nárůst opotřebení, který je vystřídán prudkým zlomem při dosažení podmínek suchého tření. S dalším nárůstem zatížení pak dochází k postupnému odírání třecích povrchů, vedoucímu až k zadření.

Zkoušky valivých ložisek [3] a ozubení [4] prokázaly, že životnost třecích povrchů nezávisí na samotné tloušťce mazacího filmu, ale na jejím poměru k redukované drsnosti třecích povrchů. Tuto skutečnost vyjadřuje *parametr mazání* Λ definovaný jako

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{R_{red}} = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \tag{1}$$

kde h_{min} je minimální tloušťka mazacího filmu, R_{red} je redukovaná drsnost třecích povrchů a R_{a1} a R_{a2} jsou střední aritmetické úchylky profilů třecích povrchů.

Při hodnotách $\Lambda > 5$ nastává hydrodynamické mazání, při kterém nedochází k interakci povrchových nerovností a drsnost třecích povrchů nemá žádný vliv na tloušťku mazacího filmu ani na součinitel tření. S klesající hodnotou Λ začíná drsnost povrchů ovlivňovat tloušťku mazacího filmu a při $\Lambda = 3$ dochází k prvnímu styku třecích povrchů, jejichž drsnost má výrazný vliv na tloušťku mazacího filmu. Tato hodnota parametru mazání je obvykle spojována s přechodem mezi elastohydrodynamickým a smíšeným mazáním. Zatím však není všeobecná shoda o tom, pro jaký rozsah hodnot Λ nastává smíšené mazání. Doposud se obvykle uváděl rozsah $3 > \Lambda > 0{,}5$, avšak některé nedávno publikované [5] naznačují, že smíšené mazání může nastávat pro Λ v intervalu $3 > \Lambda > 0{,}05$. V této oblasti mikrogeometrie třecích povrchů silně ovlivňuje tloušťku mazacího filmu, a to jednak prostřednictvím svého vlivu na tok maziva a jednak tím, že povrchové nerov-



Obr. 3 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ [6]

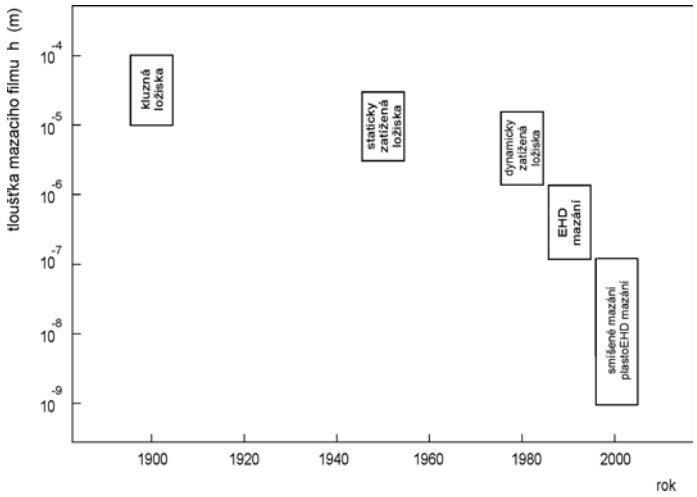
nosti přenášejí část zatížení. Pro velmi malé hodnoty Λ pak nastává mezné mazání. Je však sporné, zda malé hodnoty Λ mají nějaký fyzikální smysl, protože parametr mazání vychází z drsnosti nedeformovaných povrchů a předpokládá, že drsnost nemá vliv na tloušťku mazacího filmu. Závislost součinitele tření μ na parametru mazání Λ je znázorněna na obr. 3.

3 TENKÉ MAZACÍ FILMY A JEJICH MĚŘENÍ

3.1 MAZACÍ FILMY VE STROJNÍCH SOUSTAVÁCH

S rozvojem techniky a technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmů ve strojních tribologických soustavách [7]. 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. Dalším důvodem je také zlepšování kvality povrchů třecích prvků, které je výsledkem používání nových dokončovacích postupů.

Když O. Reynolds na konci devatenáctého století publikoval svoji teorii hydrodynamického mazání [8], minimální tloušťka mazacího filmu v tehdy používaných kluzných ložiskách se pohybovala kolem 10^{-4} až 10^{-5} m. Rozvoj spalovacích motorů v první polovině dvacátého století vedl ke zlepšení konstrukce klikových kluzných ložisek, což znamenalo snížení tloušťky hydrodynamického mazacího filmu až na 10^{-6} m. Objev elastohydrodynamického 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 10^{-6} až 10^{-7} m. Při smíšeném mazání spojeném s plastickou deformací povrchových nerovností nebo u hydrodynamicky mazaných magnetických paměťových médií může mít mazací film tloušťku až 10^{-8} nebo dokonce 10^{-9} m. Tloušťka těchto *velmi tenkých mazacích filmů* je stejného řádu jako je velikost molekul maziva. Proces postupného snižování tlouštěk mazacího filmu je ilustrován na obr. 4.

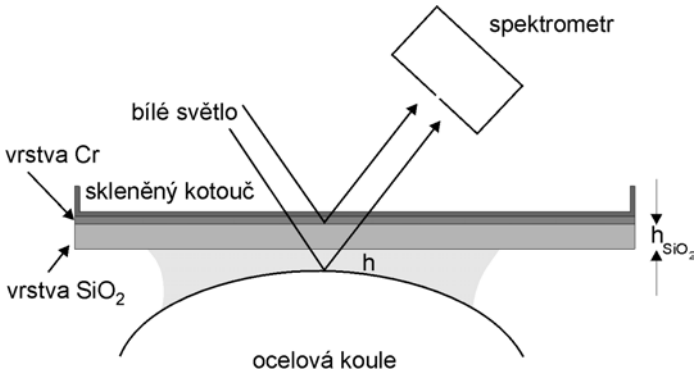


Obr. 4 Vývoj tlouštěk mazacího filmu ve strojních tribologických soustavách [7]

3.2 INTERFEROMETRIE VELMI TENKÝCH FILMŮ

Optická interferenční metoda je v současnosti nejrozšířenější metodou používanou k měření tloušťky velmi tenkých mazacích filmů. Její podstata spočívá v amplitudovém dělení světelné vlny při jejím dopadu na tenký mazací film nacházející se mezi dvěma povrchy. Koherentní superpozicí takto vzniklých vln dochází k interferenci, jejímž důsledkem je vznik interferenčního obrazce, který poskytuje informaci o tloušťce a tvaru mazacího filmu. Aby bylo dosaženo dostatečně kontrastního interferogramu, musí mít polopropustná rozhranní obklopující mazací film odpovídající reflektanci. Té se dosahuje buď užitím dvou postříbřených slídových destiček [9] nebo použitím skleněné desky pokryté vrstvou chrómu, na kterou je přitlačována ocelová kulička [10]. Je-li takovýto interferometr osvětlen bílým světlem, jehož paprsky dopadají pod konstantním úhlem, pak lze v prošlém, respektive odraženém světle pozorovat spojitě se měnící barvy, které jsou výsledkem superpozice monochromatických interferenčních struktur. Jedná se o Fizeauovy proužky neboli proužky stejné tloušťky. Pro účely studia velmi tenkých mazacích filmů se používají dva základní způsoby jejich vyhodnocování. První je založen na spektrálním rozkladu interferenčních barev [9], [10], při kterém vznikají *proužky stejného chromatického řádu*, pro které je poměr tloušťky mazacího filmu ku vlnové délce konstantní. Druhý spočívá v kvantitativním *porovnávání barev* mezi vyhodnocovaným interferogramem a interferogramem získaným pomocí interferenční soustavy o známé geometrii [11].

Optickou interferenční metodu, umožňující měření tloušťky a indexu lomu velmi tenkých kapalinových filmů, popsal již roku 1973 J. N. Israelachvili [9]. Užití této metody je však díky použitému materiálu třecích povrchů omezeno jen na malé hodnoty kontaktních tlaků a smykových spádů. G. J. Johnston a kol. [10] proto nahradil postříbřené plátky slídy interferenční soustavou tvořenou rotujícím skleněným kotoučem opatřeným vrstvou chrómu, po které se odvaluje ocelová kulička. Toto uspořádání navržené R. Goharem [12] bylo od poloviny šedesátých let používáno ke studiu elastohydrodynamických mazacích filmů pomocí konvenční optické interferenční metody [13], [14]. Protože však v tomto případě nelze kontrolovaně měnit vzdálenost mezi třecími povrchy a tudíž ani přesně zjistit posuv vlnových délek, použil G. J. Johnston spektrálního rozkladu interferenčních barev k stanovení vlnové délky, při které nastává interferenční maximum. Pro filmy tenčí než 100 nm však toto maximum leží v ultrafialové části spektra. Proto byla vrstva chrómu překryta ještě vrstvou oxidu křemičitého o známé tloušťce, který má přibližně stejný index lomu jako většina zkoumaných maziv. Tato úprava poprvé použitá F. J. Westlakem a A. Cameronem [15] vede k zdánlivému zvětšení tloušťky mazacího filmu a tím i k přesunu interferenčních maxim do viditelné části spektra. Princip metody je znázorněn na obr. 5.

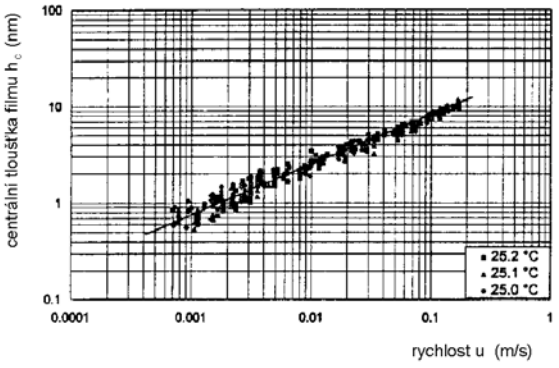


Obr. 5 Princip měření tloušťky velmi tenkých mazacích filmů [16]

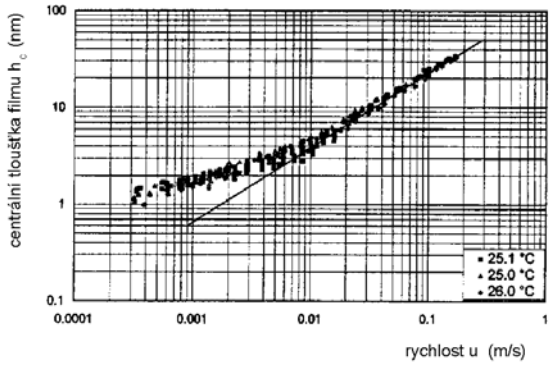
Jednou z prvních aplikací této měřicí metody bylo stanovení tlouštěk mazacího filmu, při kterých vrstva maziva již netvoří spojité prostředí neboli kontinuum. Protože všechna numerická řešení problému elastohydrodynamického mazání vycházejí z předpokladu, že mazací film tvoří kontinuum, je zřejmé, že tyto tloušťky představují také limit platnosti elastohydrodynamické teorie. Závislost centrální tloušťky mazacího filmu u kruhového kontaktu na průměrné rychlosti třecích povrchů lze vyjádřit ve tvaru

$$h_c(u) = K\alpha^{0,53}\eta_0^{0,67}u^{0,67} \tag{2}$$

kde *K* je konstanta, jejíž hodnota závisí na geometrii a mechanických vlastnostech třecích povrchů a na jejich zatížení. Je-li rovnice (2) znázorněna v logaritmických souřadnicích, jedná se o lineární funkci, jejíž grafem je přímka se směrnicí 0,67. Provedená měření prokázala, že lineární alkany, jako např. hexadekan $C_{16}H_{34}$ (obr. 6), vykazují tuto lineární závislost až do tlouštěk filmu kolem 1 nm [17]. Podobné chování bylo pozorováno i u vysoce rafinovaných základových ropných olejů [18] a u polyalfaolefínových syntetických olejů [19]. Z rovnice (2) plyne, že tloušťka mazacího 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 [20]. 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 visko-



Obr. 6 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro hexadekan [21]



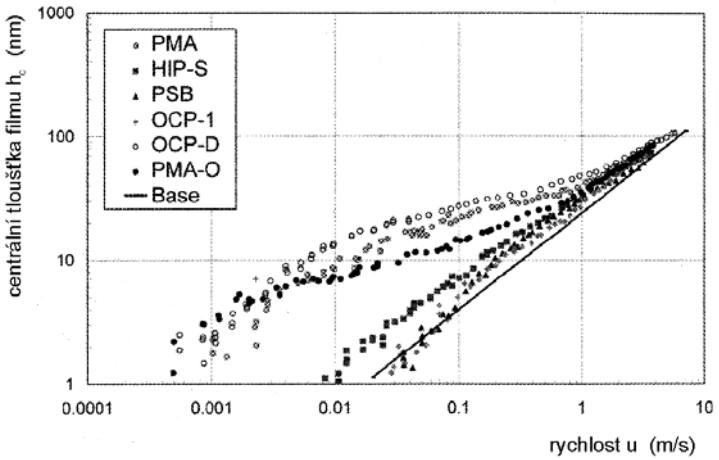
Obr. 7 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro di-2-ethylhexylsebakát [21]

zita maziva η_0, a že tudíž až do tloušťky 1 nm nedochází k utváření mezného filmu v kontaktu.

Některé kapaliny, jako např. estery [17], však vykazují při určité tloušťce mazacího filmu odklon od lineární závislosti, přičemž centrální tloušťka mazacího filmu je větší než vyplývá z rovnice (2). To je zřejmé z obr. 7, na kterém jsou znázorněny výsledky měření pro di(2-ethylhexyl)sebakát $C_{26}H_{50}O_4$. Příčina takovéhoto chování spočívá v utváření *mezného filmu* tvořeného několika monomolekulárními vrstvami vysoce viskosní tekutiny na třecích površích. Tento film bývá označován také jako *imobilní*, protože se pohybuje jen velmi pomalu ve srovnání s rychlostí kapalinového mazacího filmu. Celková centrální tloušťka mazacího filmu je v tomto případě dána součtem centrální tloušťky elastohydrodynamického filmu a celkové tloušťky mezné vrstvy. Není však zřejmé, zda v tomto případě má mezný film svůj původ v nárůstu viskozity maziva ve vstupní oblasti kontaktu, či je výsledkem adsorpce polárních nečistot nacházejících se v esteru.

Mezný film vznikající v důsledku několikanásobného zvýšení viskozity maziva ve vstupní oblasti kontaktu byl pozorován u kapalin majících téměř kulové molekuly, jako jsou oktamethylcyklotetrasiloxan (OMCTS) $[(CH_3)_2SiO]_4$ a cyklohexan C_6H_{12} [22]. Bylo prokázáno, že obě kapaliny vytvářejí mezný film o celkové tloušťce až deseti monomolekulárních vrstev, který se projevuje stupňovitou závislostí centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti třecích povrchů.

Mazací film o větší tloušťce než by odpovídala elastohydrodynamickému mazání vykazují při nízkých rychlostech třecích povrchů i ropné oleje zahuštěné polymerovými zušlechťujícími přísadami, mezi které patří zejména modifikátory viskozity, depresanty a disperzanty. Tyto přísady ovlivňující viskozitu oleje jsou součástí většiny motorových a převodových olejů. Ze závislosti na obr. 8 je zřejmé, že některé modifikátory viskozity rozpuštěné v základovém ropném oleji vytvářejí relativně tlustý mezný film o tloušťkách od 15 do 25 nm [23]. Příčinou vzniku tohoto filmu je patrně adsorpce polymerů na třecích površích, kde se utvářejí vrstvy s vysokou koncentrací molekul polymerů, jejichž viskozita je až 40× větší než viskozita základového oleje η_0 [18], [23]. Provedené analýzy ukázaly, že maximální celková tloušťka mezného filmu je rovna dvojnásobku průměru statistického klubka, což odpovídá přibližně tvorbě adsorbované vrstvy o tloušťce Floryho poloměru na každém z třecích povrchů. Takto se však chovají pouze polární polymery. Přidání některých jiných polymerů do základového oleje vede naopak při nízkých rychlostech třecích povrchů k tvorbě tenčího filmu, než by plynulo z teorie elastohydrodynamického mazání. Příkla-

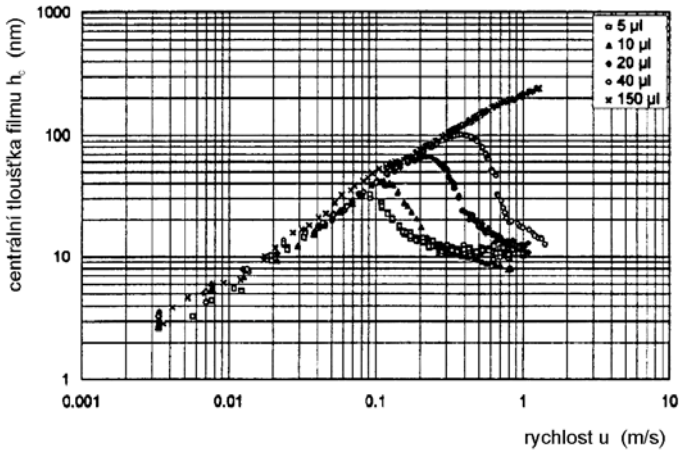


Obr. 8 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro základový ropný olej zahuštěný různými modifikátory viskozity [23]

dem může být roztok polystyrenu v di(2-ethylhexyl)-ftalátu [24]. Tento jev lze vysvětlit tvorbou mezného filmu s nízkou koncentrací polystyrenu v blízkosti třecích povrchů.

Ve všech výše uvedených případech má mezný film charakter několik nanometrů tlusté vrstvy tekutiny ulpívající na třecích površích, která po zastavení jejich pohybu mizí. Optická interferenční metoda umožnila také studium jiných typů mezných filmů. Bylo prokázáno, že dialkylditiofosforečnan zinečnatý (ZnDDF), který je běžně přidáván jako protioděrová přísada do motorových olejů, vytváří na třecích površích pevný mezný film o tloušťkách 5 až 25 nm [25]. Tento film vzniká za vyšších teplot (nad 130° C) v důsledku chemické reakce přísady s třecím povrchem. Odklon od lineární závislosti $\log h_c = \log f(u)$ byl pozorován i v případě základových olejů s přísadami tvořenými dlouhými řetězci polárních molekul. Tyto organické mazivostní přísady používané jako modifikátory tření vytvářejí na třecích površích mezné filmy, které se chovají částečně jako viskozní tekutinový film a částečně jako pevná vrstva [26]. Při stejných experimentálních podmínkách však byly zjištěny odlišné tloušťky mezných filmů, což bylo přisouzeno nedostatečnému očištění třecích povrchů.

Optická interferenční metoda umožnila také studium vlivu van der Waalsových přitažlivých mezimolekulárních sil na chování maziva. Konvenční elastohydrodynamická teorie vyjádřená rovnicí (2) předpokládá, že ve vstupní oblasti kontaktu je dostatečné množství maziva a že kontakt je tedy „plně zaplaven“. V některých tribologických soustavách, jakými jsou např. vysokorychlostní valivá ložiska, však tomu tak není a kontakt „hladoví“. Na obr. 9 je závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro případ, kdy bylo na povrch kuličky dodáno jen velmi malé množství polyalfaolefínového oleje [27]. Z diagramu je zřejmé, že při nižších rychlostech valení se tloušťka mazacího filmu mění v souladu s rovnicí (2) a vstupní oblast kontaktu je zaplavena mazivem. Při určité rychlosti, která závisí na objemu maziva užitého v testu, však nastává náhlý pokles tloušťky filmu. Ten je způsoben nedostatečným zpětným tokem maziva z výstupní do vstupní oblasti kontaktu, který se uskutečňuje vně po obou stranách kontaktní oblasti. Jeho velikost, a tedy také to, zda kontakt hladoví či je plně zaplaven, závisí především na velikosti mezipovrchového napětí na rozhraní mazivo-vzduch [28]. To však nevysvětluje, proč tloušťka mazacího filmu neklesá až k nule, nýbrž na hodnotu kolem 10 až 20 nm. G. Guangteng a H. A. Spikes [27] na základě svých experimentů došli k závěru, že příčinou tohoto jevu je sekundární zpětný tok způsobený van der Waalsovými silami. Tyto síly přitahující molekuly maziva k třecímu povrchu se významně projevují při tloušťkách mazacího filmu pod 20 nm, kdy způsobují rychlé šíření vrstev maziva, které zajišťuje jeho dodávku do vstupní oblasti kontaktu.

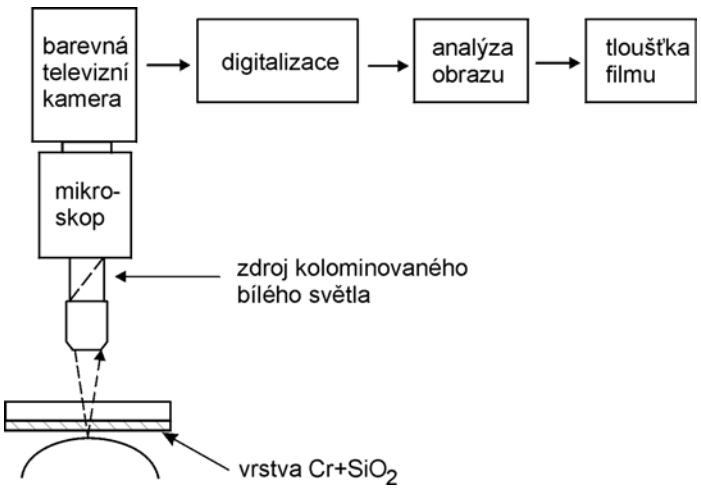


Obr. 9 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro hladovějící kontakt mazaný polyalfaolefínovým olejem [21]

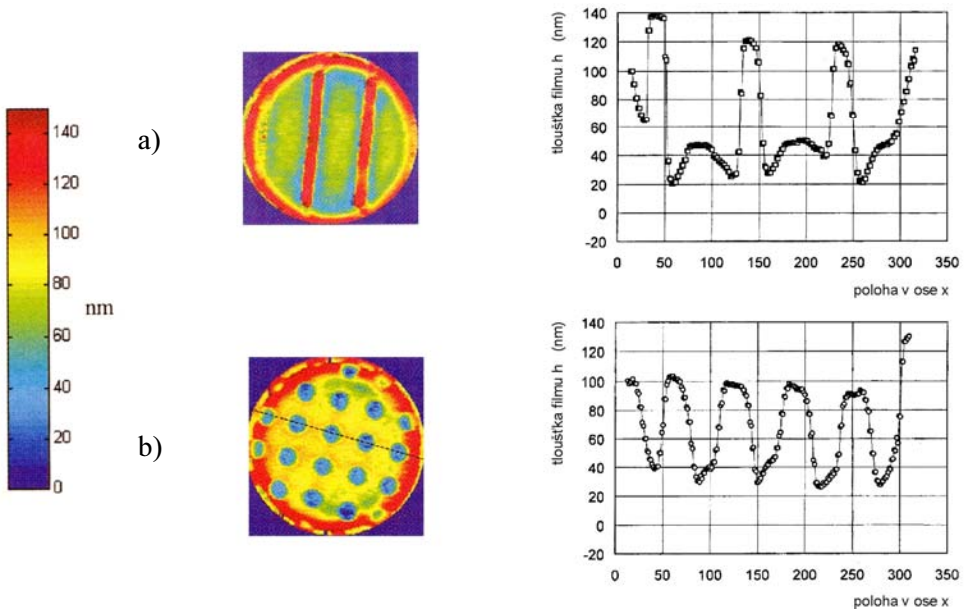
Studium tenkých mazacích filmů mezi drsnými třecími povrchy je mnohem složitější než v případě hladkých povrchů, protože tloušťka mazacího filmu a tedy i režim mazání se mění nejen

v závislosti na rychlosti třecích povrchů, ale i uvnitř samotné kontaktní oblasti. První krok v této oblasti podnikli G. Guangteng a H. A. Spikes [29], kteří pomocí optické interferenční metody zkoumali vliv izotropních povrchových nerovností na střední hodnotu centrální tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu. Přitom zjistili, že pro hodnotu parametru mazání v intervalu $2 > \Lambda > 0{,}1$ nastává smíšené mazání, při kterém je tloušťka mazacího filmu menší než tloušťka filmu získaná pro hladké třecí povrchy.

Měřicí metoda využívající spektrálního rozkladu interferenčních barev sice umožňuje relativně přesné stanovení tloušťky mazacího filmu, avšak pouze v jediném bodě, popř. v řezu podél či napříč kontaktní oblastí [30]. Není tedy možné získat informaci o jejím rozložení v celém kontaktu, která je nezbytná pro studium smíšeného mazání. Proto výzkumníci z Tribologického odboru Imperial College of Science, Technology and Medicine v Londýně doplnili v polovině devadesátých let mikroskop svého experimentálního zařízení o barevnou televizní kameru určenou pro záznam chromatických interferogramů. Propojení kamery s počítačem pak umožnilo jejich digitalizaci a následné vyhodnocení (obr. 10) [11]. Přitom vycházeli z práce L. Gustafssona a kol. [31], který navrhl postup, jak získat tvar elastohydrodynamického mazacího filmu na základě porovnání barevných tónů nacházejících se ve vyhodnocovaném interferogramu s tóny získanými pomocí kalibrace. Ta spočívá v sejmutí chromatického interferogramu zaplaveného statického kontaktu o známé geometrii, jeho převedení do barevného systému HSI (barevný tón, sytost, jas) a přiřazení informace o tloušťce mazacího filmu k jednotlivým barvám. V případě měření velmi tenkých mazacích filmů byl však postup kalibrace poněkud modifikován. Závislost 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 se 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 ± 5 %. Velikost zpracovaného obrazu je 256 × 256 pixelů, jeho prostorová rozlišitelnost 1,3 μm.



Obr. 10 Schéma aparatury pro mapování tloušťky mazacích filmů [11]

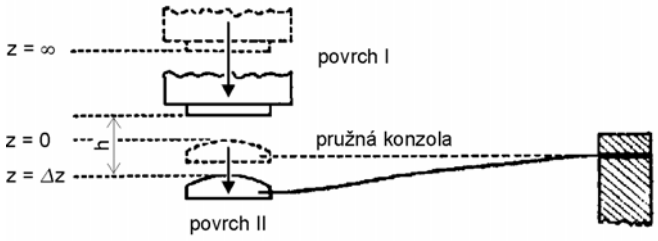


Obr. 11 Rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro [34]:
a) vícenásobný podélný práh
b) pole identických výstupků

Měřicí metoda, umožňující stanovit rozložení tloušťky velmi tenkého mazacího filmu v kontaktu, byla použita k přímému experimentálnímu studiu smíšeného mazání [32]–[34]. Za tímto účelem byl na povrchu hladké ocelové kuličky vytvořen metodou rozprašování chrómu reliéf mající podobu příčného prahu, vícenásobného příčného prahu, vícenásobného podélného prahu a dvojrozměrného pole sestávajícího z identických výstupků. Výška povrchových nerovností se pohybovala kolem 150 nm, což odpovídá hodnotě R_a mezi 0,05 až 0,07 μm. U všech typů povrchových nerovností byl pozorován vznik mikroelastohydrodynamického mazání, přičemž rozložení tloušťky mazacího filmu záviselo na jejich tvaru. V případě vícenásobného příčného prahu byla minimální tloušťka mazacího filmu nalezena na hraně prahu nacházejícího se nejblíže ke vstupní oblasti kontaktu (obr. 11a). U dvojrozměrného pole identických výstupků byla u každého z výstupků zjištěna podkovovitá konstrikce v tloušťce mazacího filmu s minimy, nacházejícími se na bocích a na odtokové hraně výstupku (obr. 11b). Změřená hodnota střední tloušťky mazacího filmu byla u všech typů povrchových nerovností větší než centrální tloušťka mazacího filmu pro hladké povrchy až do okamžiku, kdy tloušťka filmu dosáhne výšky nedeformovaných nerovností.

3.3 METODA POVRCHOVÝCH SIL

Metoda založená na měření povrchových sil je patrně nejrozšířenější metodou používanou ke studiu vlastností tenkých kapalinových filmů nacházejících se mezi dvěma povrchy. Její princip spočívá v přiblížení dvou nekonformně zakřivených, velmi hladkých povrchů do těsné blízkosti, takže se mezi nimi vytvoří spára o známé velikosti, vyplněná kapalinou (obr. 12). Povrchy bývají obvykle vyrobeny z plátků slídy [35], avšak mohou být také zhotoveny z oxidu hlinitého [36], oceli [37] nebo borokřemičitého skla povlečeného kovovou vrstvou tvořenou např. kobaltem, platinou či zlatem [37]. Kontaktní geometrie má podobu styku dvou válců se zkříženými osami [35], nebo styku koule s deskou [36]. Velikost spáry lze přesně měnit pomocí piezoelektrického krystalu, který je pevně spojen s jedním z povrchů. Druhý povrch je připevněn na konec pružné konzoly o tuhosti K. Na počátku měření jsou oba povrchy od sebe natolik vzdáleny, že mezi nimi nepůsobí žádná síla. Je-li na krystal přivedeno elektrické napětí, dochází k jeho prodloužení, popř.



Obr 12 Princip měření povrchových sil

zkrácení, takže s ním spojený povrch mění svoji polohu. V důsledku působení sil krátkého dosahu se pružná konzola deformuje o hodnotu Δz, takže velikost normálové síly může být vyjádřena z podmínky rovnováhy sil.
Jestliže piezoelektrický krystal dále změní svoji délku o hodnotu Δl, pak se vzdálenost obou povrchů změní o Δh a rovnováha sil bude mí tvar

$$F(h) = K\Delta z \tag{3}$$

Aby bylo možné stanovit velikost síly působící mezi povrchy je zapotřebí znát tuhost konzoly K,

$$F(h-\Delta h) = K(\Delta l - \Delta h) + F(h) \tag{4}$$

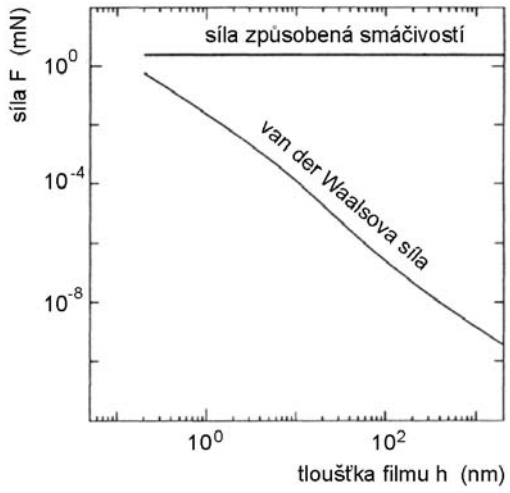
změnu délky piezoelektrického krystalu Δl a změnu vzdálenosti obou povrchů Δh. K a Δl se stanoví na základě kalibrace provedené před každým měřením. Změna vzdálenosti obou povrchů Δh se určí buď pomocí optické interferenční metody [9], nebo kapacitního snímače [36]. Výsledkem měření je obvykle závislost síly působící mezi povrchy na jejich vzdálenosti. Povrchy se přitom nemusí pouze pozvolna přibližovat ve směru normály, ale mohou také kmitat s vysokou frekvencí [38], nebo se příčně pohybovat [39].

Pokusy experimentálně stanovit velikost povrchových sil probíhaly od počátku třicátých let [40], [41]. Teprve však až roku 1969 popsali D. Tabor a R. H. S. Winterton [35] první experimentální zařízení, u kterého byly použity povrchy vyrobené z plátků slídy, jejichž vzdálenost bylo možno nastavit pomocí piezoelektrického krystalu. Jeho konstrukci dále zlepšil J. N. Israelachvili [42].

Celková síla působící mezi dvěma povrchy vzájemně oddělenými tenkou vrstvou kapaliny je

$$F = F_{HD} + F_S + F_P \tag{5}$$

dána součtem tří sil odlišného původu – vztlakové hydrodynamické síly F_{HD}, síly způsobené smáčivostí kapaliny F_S a povrchové síly F_P.
Vztlaková hydrodynamická síla vzniká za předpokladu pohybu jednoho z povrchů v normálovém či tečném směru, kdy je kapalina unášena do prostoru majícího tvar přibližně klínové mezery. *Síla způsobená smáčivostí kapaliny* má svůj původ v nerovnováze kohezních sil působících na rozhranní fází. Tato síla se skládá ze tří příspěvků, z nichž první je důsledkem Laplaceova tlaku, druhý je vyvolán adhezí mezi vrcholky nerovností obou povrchů a třetí je způsoben povrchovým napětím na rozhranní vzduch-kapalina [43]. *Povrchové síly*, vznikající v důsledku vzájemné interakce mezi tělesy, mohou být buď přitažlivé či odpudivé, v závislosti na druhu kapaliny nacházející se mezi tělesy a na tloušťce její vrstvy. Obecně se jedná o slabé síly s velmi krátkým dosahem (« 1 μm), které jsou obtížně měřitelné. J. N. Israelachvili [44] rozděluje tyto síly ve vztahu ke koloidním roztokům na síly van der Waalsovy, síly elektrostatické, síly v elektrické dvojvrstvě, síly

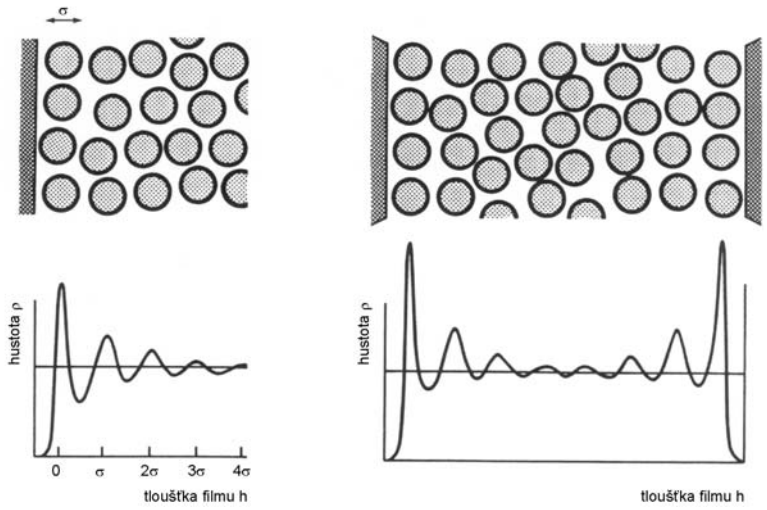


Obr. 13 Závislost síly způsobené smáčivostí kapaliny a van der Waalsovy síly na tloušťce vrstvy kapaliny pro soustavu tvořenou koulí a deskou vzájemně oddělenými vrstvou OMCTS [45]

v roztocích polymerů, síly strukturální a síly adhezní. U velmi tenkých mazacích filmů hrají významnou roli zejména van der Waalsovy síly a strukturální síly.

Podstatou *van der Waalsových sil* působících mezi atomy a molekulami je vzájemná interakce elektrostatických dipólů. Na obr. 13 jsou znázorněny závislosti síly způsobené smáčivostí kapaliny a van der Waalsovy síly na tloušťce vrstvy kapaliny pro soustavu tvořenou koulí a rovinnou deskou vzájemně oddělenými vrstvou oktamethylcyklotetrasiloxanu [45]. Z obrázku je zřejmé, že síla způsobená smáčivostí kapaliny se prakticky nemění s tloušťkou její vrstvy, zatímco van der Waalsova síla prudce klesá se vzrůstající vzdáleností obou povrchů.

Vlastnosti kapaliny nacházející se v bezprostřední blízkosti fázového rozhraní kapalina-pevná fáze jsou ovlivněny potenciálem pevné fáze a jsou odlišné od vlastností objemové fáze. Hustota kapaliny a tedy i interakční potenciál nejsou v těchto místech konstantní, nýbrž jsou tlumenou periodickou funkcí vzdálenosti, jejíž perioda je přibližně rovna velikosti molekuly kapaliny (obr. 14a). Příčinou tohoto jevu jsou síly krátkého dosahu působící mezi molekulami pevné fáze a molekulami kapaliny obecně označované jako *strukturální (solvatační)*, které způsobují, že molekuly kapaliny blízko povrchů zaujímají uspořádanou konfiguraci mající podobu kvazidiskrétních vrstev. Velikost těchto sil závisí nejenom na tvaru molekul kapaliny a na jejich místním uspořádání, ale také na fyzikálních a chemických vlastnostech povrchu pevné fáze. Obdobný, avšak mnohem obecnější jev, je možné pozorovat také v případě několik nanometrů tlustého kapalinného filmu

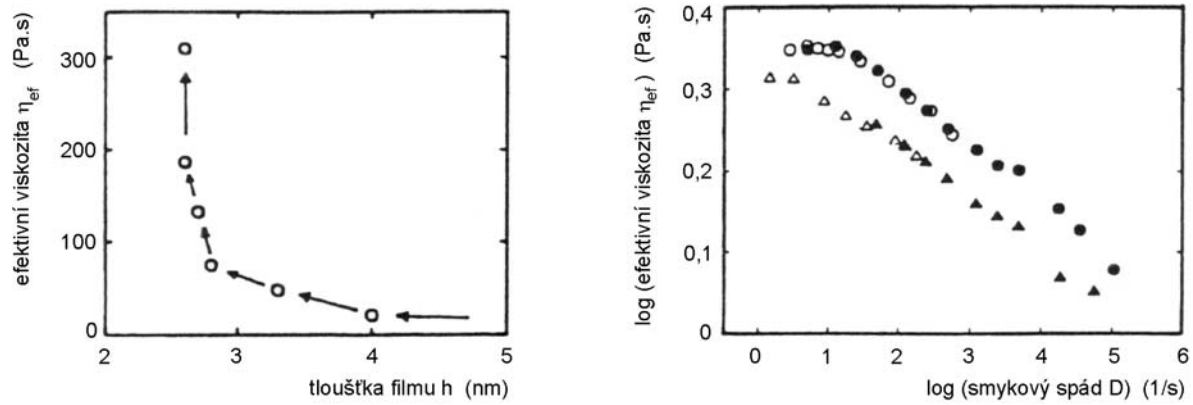


Obr. 14 Změna hustoty kapaliny v blízkosti fázového rozhraní kapalina-pevná látka v případě [52]:
a) izolovaného rozhraní
b) dvou tuhých povrchů

nacházejícího se mezi dvěma povrchy (obr. 14b). Existence strukturálních sil byla poprvé experimentálně prokázána R. G. Hornem a J. N. Israelachvilim [46], kteří roku 1981 změřili velikost sil působících mezi dvěma slídovými povrchy oddělenými vrstvou oktamethylcyklotetrasiloxanu.

Je-li tloušťka vrstvy kapaliny nacházející se mezi dvěma povrchy (5 až 10) středních průměrů molekuly σ, není možné považovat kapalinu dále za homogenní kontinuum, jehož statické a dynamické vlastnosti jsou ve všech místech stejné. Tak jako se mění hustota kapaliny napříč filmem, dochází i ke změně její dynamické viskozity [47]. Protože je však zatím nemožné experimentálně stanovit viskozitní profil tenkého filmu, je výhodné zavést *efektivní viskozitu* η_{ef} jakožto průměrnou hodnotu napříč filmem. S. Granick a kol. [48]–[50] studoval závislost efektivní viskozity na smykovém spádu u tenkých filmů tvořených dodekanem, oktamethylcyklotetra-siloxanem a hexadekanem. K tomu použil experimentální zařízení pro měření povrchových sil umožňující oscilační příčný pohyb povrchů [51]. Bylo prokázáno, že při nízkých hodnotách smykového spádu dochází s poklesem tloušťky filmu k významnému nárůstu efektivní viskozity, jejíž hodnota mnohonásobně (až o sedm řádů) převyšuje hodnotu objemové viskozity kapaliny η_0 (obr. 15a). Avšak se zvyšujícím se smykovým spádem nastává pokles efektivní viskozity, který je popsán mocninovou závislostí (obr. 15b). Podobné experimenty jako Granick provedl také J. N. Israelachvili a kol. [39], který pozoroval při smyku dvou povrchů oddělených tenkou vrstvou cyklohexanu, resp. oktamethylcyklotetrasiloxanu „kvantování“ tloušťky filmu projevující se skokem v časové závislosti třecí síly (efektivní viskozity) spojeným s náhlou změnou počtu molekulárních vrstev kapaliny. Bylo rovněž zjištěno, že při tloušťkách filmu menších než 5 σ a při nízkých hodnotách smykového spádu se obě látky chovají spíše jako pevná fáze než jako kapalina. Toto chování souvisí s pravidelným uspořádáním molekul, které je však se vzrůstajícím smykovým spádem narušeno, a ve filmu se v průběhu krátkého časového okamžiku mnohokráte opakuje proces tuhnutí a tání. Makroskopicky se to projevuje trhavým smykovým pohybem označovaným jako stick-slip.

H. Matsuoka a T. Kato [53], [54] studovali chování oktamethylcyklotetrasiloxanu, cyklohexanu a *n*-hexadekanu mezi dvěma tečně se pohybujícími povrchy při mnohem realističtějších experimentálních podmínkách než Granick a Israelachvili. Jejich výsledky ukazují, že filmy tlustší jako 10 σ se chovají v souladu s konvenční teorií elastohydrodynamického mazání. Při nižších tloušťkách filmu však byly u oktamethylcyklotetrasiloxanu a cyklohexanu pozorovány odchylky od teo-



a) b)

Obr. 15 Výsledky Granickových experimentů pro OMCTS a dodekan [49].
a) Závislost efektivní viskozity na tloušťce mazacího filmu pro dodekan při nízkém smykovém spádu.
b) Závislost efektivní viskozity na smykovém spádu pro OMCTS (trojúhelníky) a dodekan (kroužky) při tloušťce filmu 2,7 nm

retických hodnot mající podobu kvantování tloušťky filmu s hodnotou kvanta rovnou střednímu průměru molekuly σ. Tento jev je přisuzován vlivu strukturální síly, která je superponovaná na hydrodynamickou vztlakovou sílu, a jejíž velikost nezávisí na rychlosti pohybu povrchů.

U *n*-hexadekanu kvantování tloušťky filmu nebylo pozorováno a výsledky se shodovaly s teoretickými hodnotami až do tloušťky 1 nm, což lze vysvětlit tím, že tato kapalina vykazuje nízkou hodnotu strukturální síly. To je dáno molekulárním složením *n*-hexadekanu, který se skládá z flexibilních dlouhých řetězců molekul, jen obtížně zaujímajících uspořádanou konfiguraci v blízkosti povrchu.

J. M. Georges a kol. [37] studoval reologické vlastnosti vytlačovaných filmů tvořených jednoduchými kapalinami a roztoky polymerů, sevřených mezi koulí a deskou. Přitom zjistil, že při tloušťkách filmu větších než jistá kritická tloušťka h_{krit} se kapalina chová v souladu s hydrodynamickou teorií a její viskozita je rovna objemové viskozitě kapaliny η_0. Na obou površích je přítomna imobilní vrstva mající anomální viskometrické vlastnosti, která však neovlivňuje tok kapaliny. Tloušťka této vrstvy je v případě jednoduchých kapalin rovna σ, u roztoků polymerů pak jedno až dvojnásobku gyračního poloměru. S poklesem tloušťky filmu dochází k nárůstu efektivní viskozity a při tloušťce $h = h_{krit}$ přestává platit klasická hydrodynamická teorie. Když tloušťka filmu dále klesne až na hodnotu rovnající se součtu tlouštěk imobilních vrstev na obou površích, začne film vykazovat vlastnosti pevné fáze. Georges však v tomto případě nepozoroval pravidelné uspořádání molekul, což může naznačovat, že k němu dochází jen u atomicky hladkých povrchů.

4 STUDIUM TENKÝCH FILMŮ KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ

4.1 MĚŘICÍ APARATURA

Měřicí aparatura se skládá ze tří základních částí: simulátoru, mikroskopového zobrazovacího systému a řídící a vyhodnocovací jednotky (obr. 16).

Princip simulátoru vychází z koncepce navržené R. Goharem [12]. Tenký mazací film je vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou

Obr. 16 Měřicí aparatura vyvinutá na Vysokém učení technickém v Brně

vrstvou, spodní pak dvojnásobnou vrstvou chrómu a oxidu křemičitého. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvratné páce. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny, avšak v provedených experimentech byla poháněna

pouze kulička, zatímco kotouč byl unášen. Teplotní stabilita tribologické soustavy byla zajištěna tepelnou izolací komory zařízení a užitím uzavřeného vyhřívacího okruhu.

Mikroskopový zobrazovací systém vychází ze standardního průmyslového mikroskopu Nikon Optiphot 150 doplněného sekundárním děličem svazku a v některých případech i zdrojem bílého světla o vysoké intenzitě. Sekundární dělič svazku umožňuje současné snímání chromatických interferogramů jak pomocí barevné televizní kamery, tak i vláknovým spektrometrem. Oba přístroje jsou synchronizovány s pohybem kotouče, takže všechna měření jsou prováděna na stejném místě.

Řídící a vyhodnocovací jednotka sestává z osobního počítače a řady vstupně/výstupních karet umožňujících obousměrnou komunikaci mezi počítačem a simulátorem, televizní kamerou a vláknovým spektrometrem.

Původní varianta měřicí aparatury, její princip a funkce jsou popsány v článku [55]. Úprava aparatury pro studium tenkých filmů spočívající v redukci otáček ocelové kuličky a použití xenonového vláknového zdroje světla je prezentovaná v publikaci [58]. Doplnění mikroskopového zobrazovacího systému o sekundární dělič svazku a vláknový spektrometr je předmětem článku [59].

4.2 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL

Ve všech experimentech byla použita kulička, vyrobená z chromové oceli AISI 52100, o průměru 25,4 mm odvalující se po skleněném kotouči zhotoveném z korunového skla BK7. Vrstva chrómu na spodní straně kotouče byla překryta vrstvou oxidu křemičitého, která v případě měření kolorimetrickou interferometrií měla tloušťku kolem 200 nm, zatímco při měření pomocí proužků stejného chromatického řádu byla její tloušťku přibližně 500 nm. V obou případech pokrýval oxid křemičitý celou spodní stranu kotouče s výjimkou radiálního pásu o šířce 10 mm, který byl použit k vytvoření kalibrační tabulky (viz dále).

V experimentech popsaných v článcích [56] až [59] byly použity následující kapaliny, které reprezentují zástupce jednotlivých skupin maziv:

a) Di(2-ethylhexyl)ftalát (DOP) $C_{24}H_{38}O_4$ [56], [57] je ester kyseliny ftalové patřící do skupiny diesterových olejů.
b) Hexadekan $C_{16}H_{34}$ [56]–[59] je lineární alkan.
c) Izoparafinický základový ropný olej [57] patří mezi rozvětvené alkany.
d) Izoparafinický základový ropný olej stejný jako v bodě c) navíc však obsahující tyto zušlechťující přísady: triolein (10 %), kyselinu stearovou (1 %), trikresylfosforečnan (1 %) a další sirnatou složku (1 %) [57].
e) Naftenický základový ropný olej [59] je alkylcykloalkán.
f) N-tetradekan $C_{14}H_{30}$ [58] je lineární alkan.
g) Oktamethylcyklotetrasiloxan (OMCTS) $[(CH_3)_2SiO]_4$ [58], [59] představuje jednoduchý silikonový olej (polysiloxan). Jedná se o inertní a téměř nepolární kapalinu.
h) Skvalan $C_{30}H_{62}$ [56], [57] je rozvětvený alkan.

4.3 EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY

Všechny experimenty popsané v článcích [56] až [59] byly provedeny při kontaktním tlaku kolem 0,5 GPa. Rychlosti třecích povrchů byly stanoveny podle rovnice (2) v závislosti na geometrii a mechanických vlastnostech třecích povrchů a na reologických vlastnostech zkoumaných kapalin. Většina měření se uskutečnila při teplotě 25° C, s výjimkou experimentů s di(2-ethylhexyl)ftalátem a naftenickým základovým ropným olejem, kdy byl za účelem dosažení nižší viskozity vzorek zahřát na 40, resp. 30° C.

4.4 KOLORIMETRICKÁ INTERFEROMETRIE

Kolorimetrická interferometrie [60] byla vyvinuta nezávisle na L. Gustafssonovi a kol. [31], jako měřicí metoda určená k stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém elastohydrodynamickém kontaktu s podstatně vyšší přesností a prostorovou rozlišitelností, než je tomu u konvenční interferometrie. Princip metody byl implementován do rozsáhlého programu [61], který umožnil opakovaně rekonstruovat tvar mazacího filmu z velkého množství chromatických interferogramů získaných pro různé experimentální podmínky. Vůbec poprvé tak bylo možno provést srovnání tvaru elastohydrodynamického mazacího filmu získaného z numerického řešení s experimentálně stanoveným tvarem [62].

Protože měřicí rozsah původní metody se pohyboval od 60 do 600 nm, bylo zapotřebí kolorimetrickou interferometrii modifikovat tak, aby bylo možné měřit podstatně tenčí filmy. Jako nejjednodušší způsob řešení se ukázalo použití skleněného kotouče, u kterého byla vrstva chrómu překryta ještě vrstvou oxidu křemičitého o vhodné tloušťce. Postup měření tenkého filmu je následující:

a) Na místě, kde je kotouč pokryt pouze vrstvou chrómu, je sejmut monochromatický a chromatický interferogram statického kontaktu. Z monochromatického interferogramu je stanovena geometrie interferenční soustavy, zatímco na základě chromatického interferogramu jsou přiřazeny interferenční barvy k tloušťkám filmu. Výsledkem je kalibrační tabulka udávající závislost barevných souřadnic CIELAB na tloušťce filmu s diferencí 1 nm.

b) Kontakt je přemístěn do pozice, kde budou prováděna měření tloušťky kapalinového filmu a kde je kotouč pokryt dvojnásobnou vrstvou chrómu a oxidu křemičitého. V tomto místě je sejmut chromatický interferogram statického kontaktu při plném zatížení, ze kterého je stanovena tloušťka vrstvy oxidu křemičitého. Princip stanovení tloušťky je stejný jako u původní měřicí metody, tj. barevné souřadnice v chromatickém interferogramu jsou srovnávány s hodnotami v kalibrační tabulce.

c) Kontakt je zaplaven zkoumanou tekutinou a při různých rychlostech třecích povrchů jsou zaznamenány chromatické interferogramy. Ty jsou posléze převedeny do třírozměrných map tloušťky filmu, přičemž od každé tloušťky filmu je odečtena tloušťka vrstvy oxidu křemičitého.

Celý výše uvedený postup je vykonáván prostřednictvím programu, do kterého bylo integrováno i ovládání simulátoru a televizní kamery. Podrobný popis programu je uveden v článku [55]. Princip měřicí metody je vyložen v článcích [55], [56] a [57], kde jsou i příslušné ilustrace. Při měření filmů tenčích jako 20 nm je postup měření dále modifikován, jak je popsáno v článku [59]. Rozlišitelnost takto upravené měřicí metody je 1 nm, prostorová rozlišitelnost je 1,2 μm.

Metoda byla ověřena měřeními provedenými na statickém kontaktu zaplaveném hexadekanem a na dynamickém kontaktu zaplaveném di(2-ethylhexyl)ftalátem, a to jak srovnáním s hodnotami teoretickými, tak i s hodnotami získanými pomocí metody vyvinuté na Lyonské vědeckotechnické univerzitě [63]. Postup ověření je podrobně popsán v článcích [56] a [57]. Opakovatelnost měření je demonstrována v článku [59].

4.5 PROUŽKY STEJNÉHO CHROMATICKÉHO ŘÁDU

Použití proužků stejného chromatického řádu pro měření tlouštěk velmi tenkých kapalinových filmů bylo popsáno v kap. 3.2. Princip užité metody vychází z práce G. J. Johnstona a kol. [10], přičemž konvenční spektrometr byl nahrazen spektrometrem vláknovým. Toto řešení podstatně zjednodušilo přenos interferogramu na difrakční mřížku spektrometru a nevyžadovalo prakticky žádnou modifikaci mikroskopového zobrazovacího systému. Postup měření tenkého filmu je následující:

a) Kalibrace spektrometru pomocí Hg-Ar zdroje.

b) Stanovení temného elektrického proudu.

c) Sejmutí referenčního spektra ze vzorku se známou odrazivostí, v tomto případě z vysoce homogenní křemíkové destičky.

d) Sejmutí spektra ze středu statického, plně zatíženého kontaktu a stanovení vlnové délky λ_0, při které nastává interferenční maximum.

e) Zaplavení kontaktu zkoumanou tekutinou a zaznamenání spekter při různých rychlostech třecích povrchů. Všechna měření jsou prováděna na stejném místě kotouče, které je totožné s pozicí statického kontaktu. U každého spektra je stanovena vlnová délka λ, při které nastává interferenční maximum.

f) Výpočet centrálních tlouštěk filmu h_c pro jednotlivé rychlosti třecích povrchů z vlnových délek λ_0 a λ.

Podrobný popis měřicí metody včetně obrázků sejmutých spekter se nachází v článku [59]. Tamtéž je popsáno ověření správnosti a opakovatelnosti provedených měření. Rozlišitelnost metody je lepší jako 1 nm, prostorová rozlišitelnost je 2,5 μm.

4.6 SROVNÁNÍ MĚŘICÍCH METOD

Pomocí obou výše popsaných měřicích metod byla za stejných experimentálních podmínek stanovena závislost centrální tloušťky filmu na rychlosti třecích povrchů pro naftenický základový ropný olej, hexadekan a oktamethylcyklotetrasiloxan. I když z výsledků měření publikovaných v článku [59] je zřejmý velmi dobrý soulad mezi oběma metodami, provedené experimenty ukázaly jejich výhody i nevýhody. Především, kolorimetrická interferometrie je komparativní měřicí metoda, jejíž hlavní přednost spočívá v možnosti stanovit tloušťku filmu v relativně velkém počtu bodů, který je limitován pouze počtem pixelů čipu kamery. Její přesnost však vždy bude nižší než přesnost metody založené na proužcích stejného chromatického řádu, což je dáno tím, že kolorimetrická interferometrie používá empiricky stanovenou kalibrační tabulku. Ta také určuje přesnost stanovení tloušťky vrstvy oxidu křemičitého, která se promítá do všech provedených měření. Použití proužků stejného chromatického řádu pro měření tloušťky kapalinového filmu umožňuje dosáhnout až desetinásobně vyšší přesnosti než kolorimetrická interferometrie, avšak tloušťka může být stanovena pouze v omezeném počtu bodů. To vylučuje použití této metody v případech, kdy je nutné studovat tvar mazacího filmu. Na druhé straně je však možné ze spektrálního rozkladu interferenčních barev stanovit i jiné parametry, než je tloušťka filmu (např. index lomu).

4.7 VÝSLEDKY

Výsledky experimentů publikované v článcích [56] až [59] jsou prezentovány ve formě závislosti centrální, resp. minimální tloušťky mazacího filmu na průměrné rychlosti třecích povrchů. Jeli tato závislost znázorněna v logaritmických souřadnicích, lze podle jejího tvaru rozdělit výsledky do dvou skupin:

a) Závislost je v celém rozsahu měření lineární. Takovéto chování bylo pozorováno u hexadekanu [57] a izoparafinického [57] a naftenického [59] základového ropného oleje.

b) Při určité kritické tloušťce mazacího filmu h_{krit} nastává odklon od lineární závislosti, přičemž tloušťka filmu je větší, než vyplývá z rovnice (2). Tento typ chování lze dále klasifikovat do dvou skupin:

   ba) S klesající rychlostí třecích povrchů se tloušťka filmu asymptoticky blíží k tloušťce mezné (imobilní) vrstvy. Ta může být tvořena buď vrstvami uspořádaných molekul o vysoké viskozitě ulpívajících na třecích površích, jako je tomu v případě skvalanu [57], nebo vrstvami zušlechťujících přísad adsorbovaných na třecích površích, jako je

tomu u aditivovaného izoparafinického základového ropného oleje [57]. Hodnota h_{krit} pro skvalan je 12 nm, pro aditivovaný izoparafinický základový ropný olej je 14 nm.

bb) Při nízkých rychlostech třecích povrchů dochází k stupňovité změně tloušťky mazacího filmu s rychlostí, což bylo pozorováno u oktamethylcyklotetrasiloxanu [58], [59] a n-tetradekanu [58]. Hodnota h_{krit} pro oktamethylcyklotetrasiloxan je 8 nm, pro n-tetradekan pak 11 nm.

Poněvadž při $h_c > h_{krit}$ vykazují všechny zkoumané kapaliny lineární závislost $\log h_c = \log f(u)$ se směrnicí rovnou přibližně 0,67, je možné z rovnice (2) odhadnout pomocí metody nejmenších čtverců hodnotu viskozitně-tlakového koeficientu α. Vypočtené hodnoty viskozitně-tlakového součinitele pro di(2-ethylhexyl)ftalát, hexadekan a skvalan jsou uvedeny v článku [57] společně s hodnotami nalezenými v literatuře.

Předpoklady zavedené v kap. 3.2 týkající se vstupní oblasti kontaktu umožňují použít rovnici (2) také k výpočtu efektivní viskozity η_{ef}, která byla definována v kap. 3.3. V případě hexadekanu a obou základových ropných olejů je evidentně $\eta_{ef} = \eta_0$, z čehož plyne, že nedochází k utváření mezného filmu v kontaktu. To sice dobře koresponduje s výsledky experimentů získanými na obdobné měřicí aparatuře a za podobných experimentálních podmínek [17], [18], avšak již nikoli s výsledky měření pomocí metody povrchových sil [50]. Příčinou může byť buď vysoká hodnota smykového spádu (kolem 10^6 s^{-1}), nebo skutečnost, že použitá kulička nemá atomicky hladký povrch. U skvalanu a u aditivovaného izoparafinického základového ropného oleje byl pozorován několikanásobný nárůst efektivní viskozity s klesající tloušťkou filmu [56], [57]. Stupňovitá změna tloušťky mazacího filmu s rychlostí zjištěná při nízkých rychlostech třecích povrchů u oktamethylcyklotetrasiloxanu a n-tetradekanu se v závislosti $\eta_{ef} = f(h_c)$ projevuje skokovou změnou efektivní viskozity. To svědčí o kvantování vrstev kapaliny ulpívajících ve vstupní oblasti kontaktu na třecích površích, jejichž tloušťka se v případě oktamethylcyklotetrasiloxanu mění s hodnotou kvanta rovnou 2 σ.

U kapalin vykazujících při nízkých rychlostech třecích povrchů nelineární chování byla pomocí metody nejmenších čtverců stanovena celková tloušťka mezné vrstvy h', přičemž za centrální tloušťku elastohydrodynamického filmu h_c^{EHD} bylo dosazeno z rovnice (2). Postup a výsledky výpočtu jsou popsány v článku [57]. Bylo zjištěno, že skvalan, oktamethylcyklotetrasiloxan a n-tetradekan vytvářejí na každém z třecích povrchů mezný film mající podobu monomolekulární vrstvy vysoce viskózní kapaliny. Přítomnost tohoto filmu v kontaktu byla pozorována pouze při pohybu třecích povrchů, nikoli však za statických podmínek. U aditivovaného izoparafinického základového ropného oleje je mezný film o celkové tloušťce 3 nm tvořen adsorbovanými vrstvami trioleinu a kyseliny stearové, které jsou relativně trvanlivé a zůstávají přítomny na třecích površích i po skončení experimentu.

Rekonstrukce tvaru mazacího filmu z chromatických interferogramů pomocí kolorimetrické interferometrie je ilustrována v článku [56].

5 ZÁVĚR

Habilitační práce je přehledem rychlého vývoje, kterým prošel experimentální výzkum velmi tenkých mazacích filmů v uplynulém desetiletí. Mnoho problémů v tomto oboru bylo již vyřešeno, ale další týkající se zejména mazání strojních soustav čekají na své vyřešení. Mezi ně patří zejména:

a) reologické vlastnosti velmi tenkých filmů tvořených průmyslovými mazivy;
b) velikost prokluzu v blízkosti rozhranní kapalina-pevná fáze za vysokých tlaků;
c) fyzikální vlastnosti a kinetika utváření mezných filmů na třecích površích u protioděrových a vysokotlakých zušlechťujících přísad;
d) chování základových maziv a reaktivních filmů ve styku povrchových nerovností;
e) podstata a velikost sil, které určují chemické procesy probíhající v kontaktech mazaných tenkými filmy (např. mžiková teplota či emise elektronů).

V práci jsou popsány dva nejrozšířenější experimentální přístupy používané ke studiu velmi tenkých kapalinových filmů:

a) Interferometrické měření tloušťky filmu za vysokých kontaktních tlaků, jehož výsledkem je obvykle závislost tloušťky na průměrné rychlosti třecích povrchů.
b) Metoda povrchových sil, která umožňuje získat závislost síly působící mezi dvěma povrchy na tloušťce filmu.

Vlastní autorovy práce se zaměřily zejména na vývoj měřicí metody umožňující stanovit rozložení tloušťky tenkého mazacího filmu v bodovém elastohydrodynamickém kontaktu. Pomocí této metody bylo zkoumáno chování tenkých mazacích filmů tvořených jak kapalinami se známou molekulární strukturou, tak i průmyslovými mazivy. Na základě provedených experimentů lze formulovat následující závěry:

a) Kolorimetrická interferometrie byla modifikována pro měření tenkých mazacích filmů až do tlouštěk několika nanometrů [56], [57]. Metoda byla ověřena měřeními provedenými na statickém i dynamickém kontaktu, a to jak srovnáním s hodnotami teoretickými, tak i s hodnotami získanými pomocí jiných měřicích metod. Rozlišitelnost modifikované kolorimetrické interferometrie je 1 nm, prostorová rozlišitelnost je 1,2 μm, maximální počet vyhodnocovaných bodů je 250 000.
b) Pro měření centrální tloušťky mazacího filmu bylo v některých případech užito proužků stejného chromatického řádu [59]. Tato metoda sice umožňuje stanovit tloušťku filmu pouze v jediném bodě, avšak potenciálně až s desetinásobně vyšší přesností než kolorimetrická interferometrie.
c) Provedená měření potvrdila, že hexadekan a vysoce rafinované základové ropné oleje vykazují při velkých kontaktních tlacích lineární závislost $\log h = \log f(u)$ [57], [59]. Naproti tomu u skvalanu, oktamethylcyklotetrasiloxanu, n-tetradekanu a aditivovaných základových ropných olejů byl při stejných experimentálních podmínkách pozorován odklon od lineární závislosti způsobený přítomností mezného filmu na třecích površích [56]–[59].
d) Bylo zjištěno, že v případě skvalanu, oktamethylcyklotetrasiloxanu a n-tetradekanu má mezný film podobu monomolekulární vrstvy vysoce viskosní kapaliny ulpívající na každém z třecích povrchů. U aditivovaného základového ropného oleje je však mezný film tvořen relativně trvanlivými adsorbovanými vrstvami zušlechťujících přísad.
e) Zavedení efektivní viskozity umožnilo zkoumat změnu dynamické viskozity maziva ve vstupní oblasti kontaktu v závislosti na centrální tloušťce mazacího filmu. U všech kapalin, s výjimkou hexadekanu a vysoce rafinovaných základových ropných olejů, byl pozorován několikanásobný nárůst efektivní viskozity s klesající tloušťkou filmu.

f) Ze změřených závislostí centrální tloušťky mazacího filmu na průměrné rychlosti třecích povrchů byla vypočtena hodnota viskozitně-tlakového koeficientu pro di(2-ethylhexyl)ftalát, hexadekan a skvalan. Stanovené hodnoty se velmi dobře shodují s hodnotami zjištěnými pomocí vysokotlaké reometrie.

Význam publikovaných výsledků lze spatřovat nejen v jejich přínosu k výzkumu tenkých mazacích filmů, ale zejména ve vytvoření měřicí aparatury, měřicí metody a metodiky měření, které umožňují testovat průmyslově užívaná maziva. To je velmi užitečné pro řadu strojírenských oborů, z nichž jako příklad může být uveden automobilový průmysl, kde reologické vlastnosti maziva ve vstupní oblasti elastohydrodynamického kontaktu úzce souvisejí se třením, a tím i se spotřebou paliva. Budoucí práce budou zaměřeny zejména na výzkum vlivu povrchových nerovností na chování tenkých mazacích filmů.

LITERATURA

[1] GÜMBEL, L.: Das Problem der Lagerreibung. Monatsblatter d. Berliner Bezirksvereines Deutscher Ingenieure (VDI), 1914, s. 87–104 a s. 109–120.

[2] BEERBOWER, A.: Boundary Lubrication. In: GRU.IGBEN.72 – Report on Scientific and Technical Forecast, 1972.

[3] TALLIAN, T. E. – SIBLEY, L. B. – VALORI, R.: Elastohydrodynamic Film Effects on the Load-Life Behaviour of Rolling Contacts. ASME (the American Society of Mechanical Engineering) Paper 65-LUB-11, 1965.

[4] WELLAUER, E. J. – HOLLOWAY, G. A.: Application of EHD Oil Film Theory to Industrial Gear Drives. ASME (the American Society of Mechanical Engineering) Paper 75-PTG-1, 1976.

[5] SPIKES, H. A.: Boundary Lubricating Films. In: Proceedings of the International Tribology Conference Yokohama 1995. Tokyo, JSL 1995, s. 49–54.

[6] HAMROCK, B. J.: Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, s. 42.

[7] DOWSON, D.: Developments in Lubrication – the Thinning Film. Journal of Applied Physics D, 25, 1992, s. A334–A339.

[8] 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, 177, 1886, s. 157–234.

[9] ISRAELACHVILI, J. N.: Thin Film Studies Using Multiple-Beam Interferometry. Journal of Colloid and Interface Science, 44, 1973, s. 259–271.

[10] 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.

[11] 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.

[12] GOHAR, R.: A Ball-Plate Machine for Measuring Elastohydrodynamic Oil Films. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G, 182, 1967–1968, s. 43–45.

[13] FOORD, C. A. – HAMMANN, W. C. – CAMERON, A.: Evaluation of Lubricants Using Optical Elastohydrodynamics. ASLE (the American Society of Lubrication Engineers) Transactions, 11, 1968, s. 31–43.

[14] FOORD, C. A. – WEDEVEN, L. D. – WESTLAKE, F. J. – CAMERON, A.: Optical Elastohydrodynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 1, 184, 1969–1970, s. 487–505.

[15] WESTLAKE, F. J. – CAMERON, A.: A Study of Ultra-Thin Lubricant Films Using an Optical Technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G, 182, 1967–1968, s. 75–78.

[16] SPIKES, H.: Advances in the Study of Thin Lubricant Films. In: New Directions in Tribology (Plenary and Invited Papers from the First World Tribology Congress). Bury St Edmunds, the Institution of Mechanical Engineers 1997, s. 355–369.

[17] GUANGTENG, G. – SPIKES, H. A.: Boundary Film Formation by Lubricant Base Fluids. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 448–454.

[18] 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.

[19] GUANGTENG, G. – SPIKES, H. A.: Fractionation of Liquid Lubricants at Solids Surfaces. Wear, 200, 1996, s. 336–345.

[20] WEDEVEN, L. D. – EVANS, D. – CAMERON, A.: Optical Analysis of Ball Bearing Starvation. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 93, 1971, s. 349–363.
[21] SPIKES, H. A.: Direct Observation of Boundary Layers. Langmuir, 12, 1996, s. 4567–4573.
[22] 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.
[23] SMEETH, M. – SPIKES, H. – GUNSEL, S.: Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 726–734.
[24] MITSUI, H. – SPIKES, H. A. – SUITA, Y.: Boundary Film Formation by Low Molecular Weight Polymers. In: Elastohydrodynamics – ’96 (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1997, s. 487–500.
[25] GUNSEL, S. – SPIKES, H. A. – ADERIN, M.: In-Situ Measurement of ZDDP Films in Concentrated Contacts. Tribology Transactions, 36, 1993, s. 276–282.
[26] ANGHEL, V. – CANN, P. M. – SPIKES, H. A.: Direct Measurement of Boundary Lubricating Films. In: Elastohydrodynamics – ’96 (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1997, s. 459–466.
[27] GUANGTENG, G. – SPIKES, H. A.: The Role of Surface Tension and Disjoining Pressure in Starved and Parched Lubrication. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 210, 1996, s. 113–124.
[28] CHIU, Y. P.: An Analysis and Prediction of Lubricant Film starvation in Rolling Contact System. ASLE (the American Society of Lubrication Engineers) Transactions, 17, 1974, s. 22–35.
[29] GUANGTENG, G. – SPIKES, H. A.: An Experimental Study of Film Thickness in the Mixed Lubrication Regime. In: Elastohydrodynamics – ’96 (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1997, s. 159–166.
[30] SMEETH, M. – SPIKES, H. A.: Central and Minimum Elastohydrodynamic Film Thickness at High Contact Pressure. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 119, 1997, s. 291–296.
[31] 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.
[32] GUANGTENG, G. – CANN, P. M. – OLVER, A. V. – SPIKES, H. A.: Mapping Surface Features in the Thin Film Lubrication Regime. In: Lubrication at the Frontier (Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1999.
[33] OLVER, A. V. – GUANGTENG, G. – SPIKES, H. A.: Film Thickness and Pressure in Micro-EHD Contacts. In: Thinning Films and Tribological Interfaces (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1999, s. 503–510.
[34] 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.
[35] TABOR, D. – WINTERTON, R. H. S.: The Direct Measurement of Normal and Retarded van der Waals Forces. Proceedings of the Royal Society of London, A312, 1969, s. 435–450.
[36] TONCK, A. – GEORGES, J. M. – LOUBET, J. L.: Measurement of Intermolecular Forces and the Rheology of Dodecane between Alumina Surfaces. Journal of Colloid and Interface Science, 126, 1988, s. 150–163.

[37] GEORGES, J. M. – MILLOT, S. – LOUBET, J. L. – TONCK, A.: Drainage of Thin Liquid Films between Relatively Smooth Surfaces. Journal of Chemical Physics, 98, 1993, s. 7345–7360.
[38] ISRAELACHVILI, J. N.: Measurement of the Viscosity of Liquids in Very Thin Films. Journal of Colloid and Interface Science, 110, 1986, s. 263–271.
[39] ISRAELACHVILI, J. N. – MCGUIGGAN, P. M. – HOMOLA, A. M.: Dynamic Properties of Molecularly Thin Liquid Films. Science, 240, 1988, s. 189–191.
[40] TOMLINSON, G. A.: Molecular Cohesion. Philosophical Magazine, 6, 1928, s. 695–712.
[41] BRADLEY, R. A.: The Cohesive Force between Solid Surfaces and the Surface Energy of Solid. Philosophical Magazine, 13, 1932, s. 853–862.
[42] ISRAELACHVILI, J. N. – ADAMS, G. E.: Measurement of Forces between Two Mica Surfaces in Aqueous Electrolyte Solutions in the Range 0-100 nm. Journal of the Chemical Society Faraday Transactions II, 74, 1978, s. 975–1001.
[43] FISHER, L. R. – ISRAELACHVILI, J. N.: Experimental Studies on the Applicability of the Kelvin Equation to Highly Curved Concave Menisci. Journal of Colloid and Interface Science, 80, 1981, s. 528–541.
[44] ISRAELACHVILI, J. N.: The Forces between Surfaces. Philosophical Magazine A, 43, 1981, s. 753–770.
[45] KATO, T. – MATSUOKA, H.: Surface Elastic Deformation by Solvent Structural Force in Very Thin Film Lubrication. In: Elastohydrodynamics – '96: Fundamentals and Applications in Lubrication and Traction (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B.V. 1997, s. 167–174.
[46] HORN, R. G. – ISRAELACHVILI, J. N.: Direct Measurement of Structural Forces between Two Surfaces in a Nonpolar Liquid. The Journal of Chemical Physics, 75, 1981, s. 1400–1411.
[47] BITSANIS, I. – VANDERLICK, T. K. – TIRRELL, M. – DAVIS, H. T.: A Tractable Molecular Theory of Flow in Strongly Inhomogeneous Fluids. Journal of Chemical Physics, 89, 1988, s. 3152–3162.
[48] VAN ALSTEN, J. – GRANICK, S.: Molecular Tribometry of Ultrathin Liquid Films. Physical Review Letters, 61, 1988, s. 2570–2573.
[49] GRANICK, S.: Motions and Relaxations of Confined Liquids. Science, 253, 1991, s. 1374–1379.
[50] CARSON, G. – HU, H. – GRANICK, S.: Molecular Tribology of Fluid Lubrication: Shear Thinning. Tribology Transactions, 35, 1992, s. 405–410.
[51] PEACHEY, J. – VAN ALSTEN, J. – GRANICK, S.: Design of an Apparatus to Measure the Shear Response of Ultrathin Liquid Films. Review of Scientific Instrument, 62, 1991, s. 463–473.
[52] ISRAELACHVILI, J. N.: Intermolecular and Surface Forces. London, Academic Press Limited 1997, s. 262.
[53] MATSUOKA, H. – KATO, T.: Discrete Nature of Ultrathin Lubrication Film Between Mica Surfaces. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 118, 1996, s. 832–838.
[54] 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, 211, 1997, s. 139–150.
[55] 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.
[56] HARTL, M. – MOLIMARD, J. – KŘUPKA, I. – VERGNE, P. – QUERRY, M. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M.: Thin Film Lubrication Study by Colorimetric Interferometry.

In: Thinning Films and Tribological Interface Conservation (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2000, s. 695–704.
[57] 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.
[58] 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, 44, 2001, s. 412–417.
[59] HARTL, M. – KŘUPKA, 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). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2002.
[60] HARTL, M. – KŘUPKA, I. – LIŠKA, M.: Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of Chromatic Interference Patterns. Optical Engineering, 36, 1997, s. 2384–2391.
[61] HARTL, M. – KŘUPKA, I. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M.: Computer-Aided Chromatic Interferometry. Computer & Graphics, 22, 1998, s. 203–208.
[62] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – ČERMÁK, J. – LIŠKA, M.: Elastohydrodynamic Lubricant Film Shape – Comparison between Experimental and Theoretical Results. In: Tribology for Energy Conservation (Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1998, s. 221–232.
[63] 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.

ABSTRACT

This work is a monograph dealing with thin film lubrication of machine elements. It examines current understanding of the nature and properties of ultrathin lubricating films with thickness of several nanometers, i.e., when the size of fluid molecules in comparison with the thickness of fluid films can not be neglected.

The organisation of the text is such that it is divided into three interconnected parts. The first part is essentially an introduction into lubrication regimes. It embodies the definition of tribology and tribological system, classification of different lubrication regimes and description of boundary, elastohydrodynamic and mixed lubrication. The second part of the work then covers experimental study of ultrathin liquid films. It begins with the explanation of thinning film in lubricated machine elements throughout 20th century. Two main experimental techniques for studying ultrathin lubricating films – ultrathin film interferometry and surface forces balances are described. In the third part author's works on the field of thin film lubrication are reviewed. Main attention is given to the development of a new experimental technique that enables the measurement of lubricant film thickness in concentrated contacts down to several nanometers. The application of this technique to the study of film-forming properties of several liquids is described.