

# **STUDIUM A MĚŘENÍ VELMI TENKÝCH MAZACÍCH FILMŮ**

Martině

# **STUDIUM A MĚŘENÍ VELMI TENKÝCH MAZACÍCH FILMŮ**

Habilitační práce

Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

odborný asistent Vysokého učení technického v Brně

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Brno 2002

# OBSAH

<b>PŘEDMLUVA</b>	<b>6</b>
<b>PŘEHLED OZNAČENÍ</b>	<b>7</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>10</b>
1.1 Tribologie	10
1.2 Mazání a režimy mazání	11
1.3 Mezné mazání	14
1.4 Elastohydrodynamické mazání	17
1.5 Smíšené mazání	24
<b>2 TENKÉ MAZACÍ FILMY A JEJICH MĚŘENÍ</b>	<b>28</b>
2.1 Mazací filmy v strojních soustavách	28
2.2 Interferometrie velmi tenkých filmů	29
2.3 Metoda povrchových sil	38
<b>3 STUDIUM TENKÝCH FILMŮ KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ</b>	<b>48</b>
3.1 Měřicí aparatura	48
3.2 Experimentální materiál	49
3.3 Experimentální podmínky	50
3.4 Kolorimetrická interferometrie	50
3.5 Proužky stejného chromatického řádu	51
3.6 Srovnání měřicích metod	52
3.7 Výsledky	52
<i>Článek 1 – An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry</i>	54
<i>Článek 2 – Thin Film Lubrication Study by Colorimetric Interferometry</i>	61
<i>Článek 3 – Thin Film Colorimetric Interferometry</i>	71
<i>Článek 4 – Experimental Study of Boundary Layers Formation by Thin Film Colorimetric Interferometry</i>	78
<i>Článek 5 – Experimental Study of Boundary Layers Formation in Concentrated Contacts</i>	84
<b>4 ZÁVĚR</b>	<b>93</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>95</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b>	<b>96</b>

# PŘEDMLUVA

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 této 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 interference světla k měření tloušťek 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.

Je pro mne milou povinností poděkovat svým kolegům: Dr. Ivanovi Křupkovi za spolupráci při všech experimentech popsaných v příložených publikacích, prof. Miroslavu Liškovi za všestrannou podporu, bez níž by se výzkum nemohl uskutečnit a prof. Františkovi Boháčkovi za kritické pročtení prvních dvou částí rukopisu.

*M. H.*

# PŘEHLED OZNAČENÍ

$A$	J	Hamakerova konstanta
$D$	$s^{-1}$	smykový spád
$E_1, E_2$	Pa	Youngův modul pružnosti třecího povrchu 1, resp. 2
$E'$	Pa	redukovaný modul pružnosti
$F$	N	síla
$F_{HD}$	N	vztlaková hydrodynamická síla
$F_n$	N	normálová síla
$F_p$	N	povrchová síla
$F_s$	N	síla způsobená smáčivostí povrchů
$F_T$	N	třecí síla
$F_{Tk}$	N	kinetická třecí síla
$F_{Tst}$	N	statická třecí síla
$F_{vdW}$	N	van der Waalsova síla
$G$	1	bezrozměrný parametr materiálů
$H$	1	bezrozměrná tloušťka mazacího filmu
$H'$	1	bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu pro liniový kontakt
$\bar{H}$	1	bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu pro bodový kontakt
$H_c$	1	bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu
$H_{min}$	1	bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu
$K$	s	konstanta
$K$	$N.m^{-1}$	tuhost
$L$	m	délka kontaktu
$N$	1	řád interference
$R_a$	m	střední aritmetická úchylka profilu třecích povrchů
$R_{red}$	m	redukovaná drsnost třecích povrchů
$R_x$	m	redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy $x$
$R_y$	m	redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy $y$
$T$	K	absolutní teplota
$T_t$	K	teplota tání
$T_r$	K	reakční teplota
$U$	1	bezrozměrný parametr rychlosti
$V$	$m^{-3}$	objemový otěr
$W$	1	bezrozměrný parametr zatížení pro bodový kontakt
$W'$	1	bezrozměrný parametr zatížení pro liniový kontakt
$X$	1	bezrozměrná souřadnice ve směru pohyb

PŘEHLED OZNAČENÍ

$a$	$m^{-1}$	konstanta
$g_E$	1	bezrozměrný parametr elasticity pro bodový kontakt
$g_V$	1	bezrozměrný parametr viskozity pro bodový kontakt
$g_l$	1	bezrozměrný parametr viskozity pro liniový kontakt
$g_3$	1	bezrozměrný parametr elasticity pro liniový kontakt
$h$	m	tloušťka mazacího filmu
$h'$	m	celková tloušťka mezní vrstvy
$h'_1, h'_2$	m	tloušťka mezní vrstvy na třecím povrchu 1, resp. 2
$h_c$	m	centrální tloušťka mazacího filmu
$h_c^{EHD}$	m	centrální tloušťka elastohydrodynamického mazacího filmu
$h_c^*$	m	střední hodnota centrální tloušťky mazacího filmu pro drsné povrchy
$h_{krit}$	m	kritická tloušťka mazacího filmu
$h_{min}$	m	minimální tloušťka mazacího filmu
$h_{SiO_2}$	m	tloušťka vrstvy oxidu křemičitého
$k$	1	parametr elipticity
$l$	1	délka
$n$	1	exponent
$n$	1	index lomu maziva
$n_{SiO_2}$	1	index lomu vrstvy oxidu křemičitého
$p$	Pa	tlak, měrný tlak
$p_H$	Pa	maximální Hertzův tlak
$p_s$	Pa	střední kontaktní tlak
$r$	m	poloměr
$r_{1x}, r_{2x}$	m	poloměr třecího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy $x$
$r_{1y}, r_{2y}$	m	poloměr třecího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy $y$
$t$	$^{\circ}C$	teplota
$u$	$J.m^{-2}$	energie interakce
$u$	$m.s^{-1}$	průměrná rychlost ve směru osy $x$
$u_1, u_2$	$m.s^{-1}$	rychlost třecího povrchu 1, resp. 2
$w$	$N.m^{-1}$	normálová liniová síla
$x$	m	souřadnice ve směru pohybu
$y$	m	souřadnice ve směru bočního výtoku maziva z kontaktu
$z$	m	souřadnice ve směru tloušťky mazacího filmu
$A$	1	parametr mazání
$\phi$	1	celková změna fáze způsobená průchodem a odrazem světla na jednotlivých rozhraních soustavy tenkých vrstev
$\alpha$	$Pa^{-1}$	viskozitně-tlakový koeficient
$\gamma$	1	korelační parametr
$\gamma$	$N.m^{-1}$	povrchové napětí
$\gamma_{0,5x}$	m	50% korelační délka ve směru osy $x$
$\gamma_{0,5y}$	m	50% korelační délka ve směru osy $y$
$\eta$	Pa.s	dynamická viskozita
$\eta_{ef}$	Pa.s	efektivní dynamická viskozita
$\eta_0$	Pa.s	dynamická viskozita při nulovém tlaku
$\theta$	rad	krajový úhel
$\lambda$	m	vlnová délka světla



## PŘEHLED OZNAČENÍ

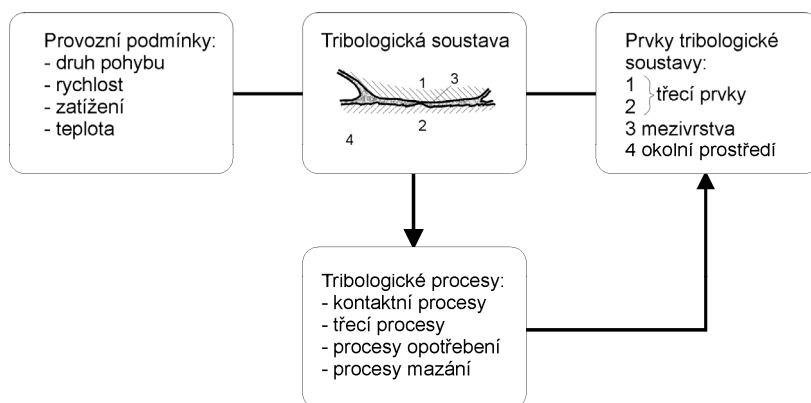
$\mu$	1	součinitel tření
$\nu_1, \nu_2$	1	Poissonova konstanta třecího povrchu 1, resp. 2
$\rho$	kg. m <sup>-3</sup>	hustota
$\sigma$	m	střední průměr molekuly
$\tau$	Pa	smykové napětí
$\omega$	s <sup>-1</sup>	úhlová rychlost

# 1 ÚVOD

## 1.1 TRIBOLOGIE

Pojem tribologie se poprvé objevil v roce 1965 ve zprávě pracovní skupiny ustanovené britským Ministerstvem školství a vědy [1], kde byla tribologie definována jako „*věda a technologie zabývající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu a s tím spojená praxe*“. Pojmenování má svůj původ v řeckých slovech „tribos“ a „logos“ a lze jej přeložit jako „věda o tření“. Vzájemná interakce povrchů je totiž doprovázena vznikem pasivních odporů proti pohybu, které se označují jako *tření*. Důsledkem tření je *opotřebení*, což je degradační proces vedoucí k úbytku materiálu z interagujících povrchů. Tření je spojeno se ztrátou mechanické energie, opotřebení pak se ztrátou materiálu. Tření a opotřebení je možné zmenšit *mazáním*, jehož úlohou je prostřednictvím maziva zabránit bezprostřednímu styku povrchů. Hlavní náplní tribologie je tedy studium a popis tření, mazání a opotřebení s cílem využívat získané poznatky při řešení technologických problémů.

Interagující (třecí) povrchy společně s vrstvou maziva a okolním prostředím vytvářejí *tribologickou soustavu* (obr. 1), která může být přirozeného nebo umělého původu. Procesy probíhající v této soustavě mohou být rozděleny na *procesy kontaktní, procesy tření, procesy opotřebení a procesy mazání* [2]. Všechny tyto procesy jsou determinovány provozními podmínkami jako jsou např. druh pohybu, rychlost, zatížení a teplota a vedou ke změnám struktury a funkce tribologické soustavy. Ty mohou za určitých podmínek způsobit vznik některého z mezních stavů, mezi které patří nadměrné tření, nestabilita (např. stick-slip), nadměrná plastická deformace, únavový lom, povrchové poškození (např. pitting), zadření (např. scoring) a nadměrné opotřebení (např. fretting) [3].



Obr. 1 Tribologická soustava

## 1.2 MAZÁNÍ A REŽIMY MAZÁNÍ

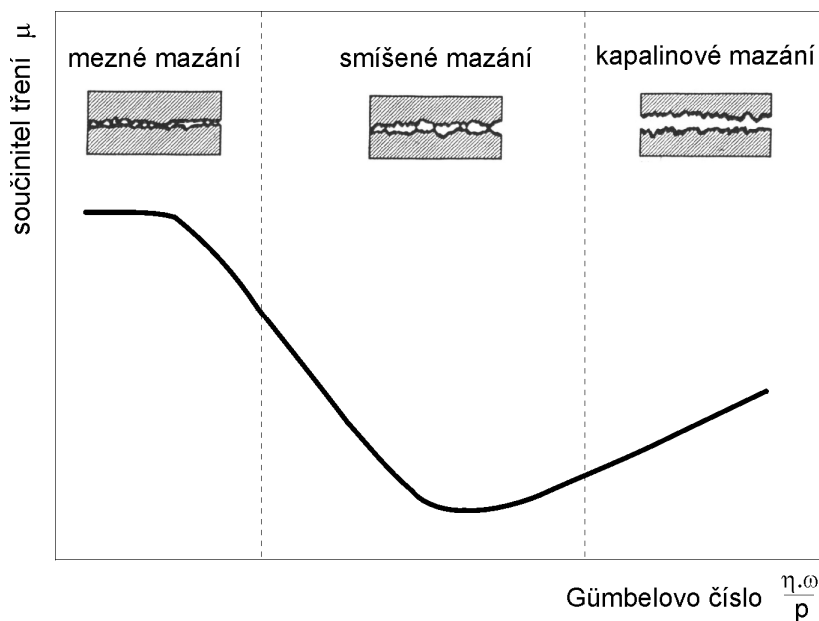
Mazání je tribologický proces při kterém se prostřednictvím maziva významně snižuje tření a opotřebením třecích povrchů nacházejících se v relativním pohybu. Jako maziva může být užito libovolné látky v plynném, kapalném nebo pevném skupenství, jejíž primární úlohou je separace a ochrana třecích povrchů. Mezi sekundární úlohy maziva pak může patřit např. zajištění odvodu tepla, odstraňování částeczek 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 mezní a mazání tuhými mazivy*).

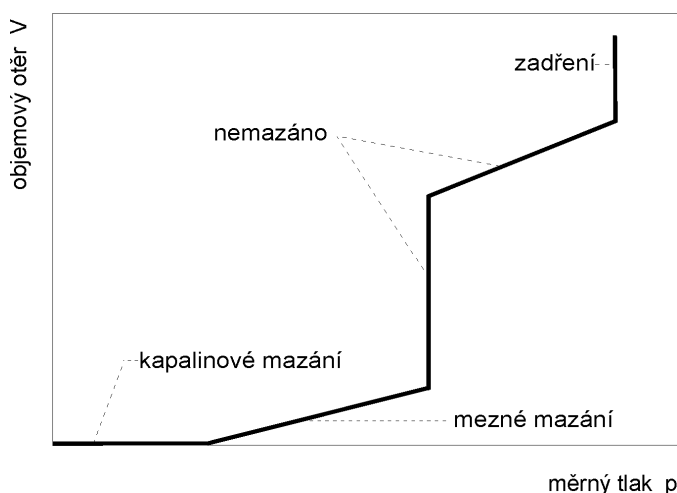
Aby mazací film byl schopen přenášet zatížení působící na třecí povrchy, musí v něm být vyvolán odpovídající protitlak. Toho lze dosáhnout buď hydrostatickým, nebo hydrodynamickým působením. Při hydrostatickém mazání se potřebný tlak v mazacím filmu vytváří externě a mazivo je mezi třecí povrchy zaváděno 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. 2), která udává závislost součinitele tření  $\mu$  v kluzném radiálním ložisku na parametru  $\eta\omega/p$ , kde  $\eta$  je dynamická viskozita maziva,  $\omega$  úhlová rychlost čepu a  $p$  tlak [4]. 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 - meznímu, smíšenému a kapalinovému.

Při vysokých zatíženích a nízkých rychlostech třecích povrchů může docházet k *meznímu 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. 2 Stribeckova křivka



Obr. 3 Závislost objemového otěru  $V$  na měrném tlaku  $p$  [5]

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 3 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.

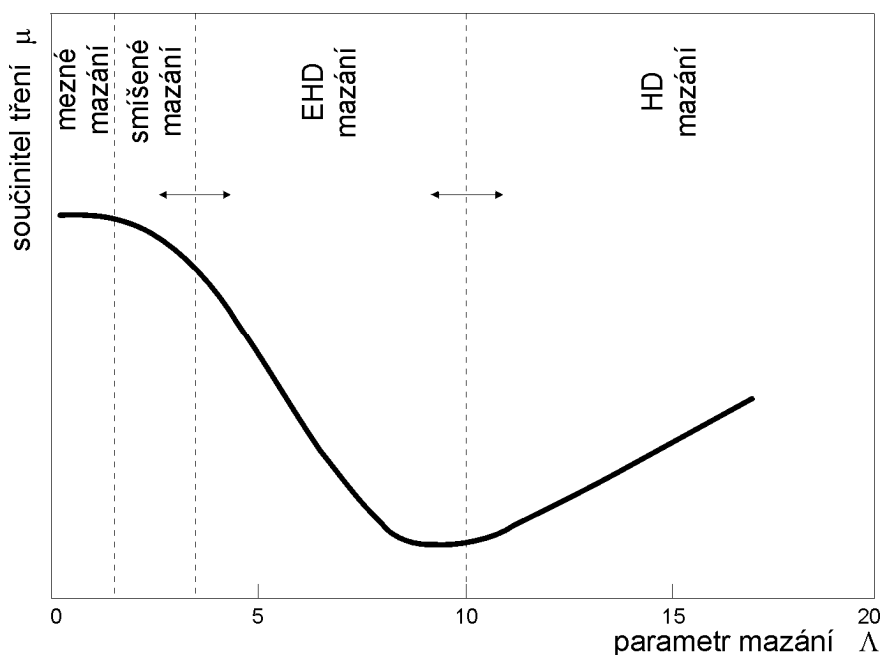
Zkoušky valivých ložisek [6] a ozubení [7] prokázaly, že životnost třecích povrchů nezávisí na samotné tloušťce mazacího filmu, ale na jejím poměru k redukované drsnosti třecích povrchů. Tuto skutečnost vyjadřuje *parametr mazání*  $\Lambda$  definovaný jako

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

kde  $h_{\min}$  je minimální tloušťka mazacího filmu,  $R_{\text{red}}$  je redukovaná drsnost třecích povrchů a  $R_{a1}$  a  $R_{a2}$  jsou střední aritmetické úchytky profilů třecích povrchů. Představu o běžných hodnotách redukované drsnosti třecích povrchů u valivých ložisek dává tab. 1.

Tab. 1 Hodnoty redukované drsnosti třecích povrchů u valivých ložisek [10]

Typ ložiska	Redukovaná drsnost třecích povrchů $R_{\text{red}}$ ( $\mu\text{m}$ )
přesné kuličkové	0,05
kuličkové	0,18
kuželíkové	0,23
válečkové	0,36



Obr. 4 Závislost součinitele tření  $\mu$  na parametru mazání  $\Lambda$  [9]

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  $\Lambda$  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  $\Lambda$  nastává smíšené mazání. Doposud se obvykle uváděl rozsah  $3 > \Lambda > 0,5$ , avšak některé nedávno publikované studie [8] naznačují, že smíšené mazání může nastávat pro  $\Lambda$  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 nerovnosti přenášejí část zatížení. Pro velmi malé hodnoty  $\Lambda$  pak nastává mezní mazání. Je však sporné, zda malé hodnoty  $\Lambda$  mají nějaký fyzikální smysl, protože parametr mazání vychází z drsnosti nedeformovaných povrchů a předpokládá, že drsnost nemá vliv na tloušťku mazacího filmu.

Tabulka 2, která udává hodnoty minimální tloušťky mazacího filmu, parametru mazání a součinitele tření pro jednotlivé režimy mazání, slouží jen pro přibližnou orientaci. Závislost součinitele tření  $\mu$  na parametru mazání  $\Lambda$  je znázorněna na obr. 4.

Tab. 2 Orientační hodnoty minimální tloušťky mazacího filmu, parametru mazání a součinitele tření [11]

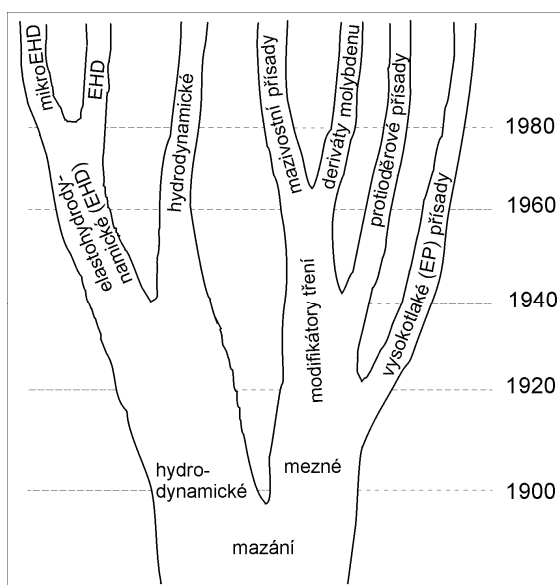
Režim mazání	Tloušťka mazacího filmu $h_{min}$ ( $\mu\text{m}$ )	Parametr mazání $\Lambda$	Součinitel tření $\mu$
mezní	0,005 až 0,1	$< 1$	0,03 až 1
smíšené	0,01 až 1	1 až 3	0,02 až 0,15
elastohydrodynamické	0,01 až 10	3 až 10	0,01 až 0,1
hydrodynamické	1 až 100	6 až 100	0,001 až 0,01

### 1.3 MEZNÉ MAZÁNÍ

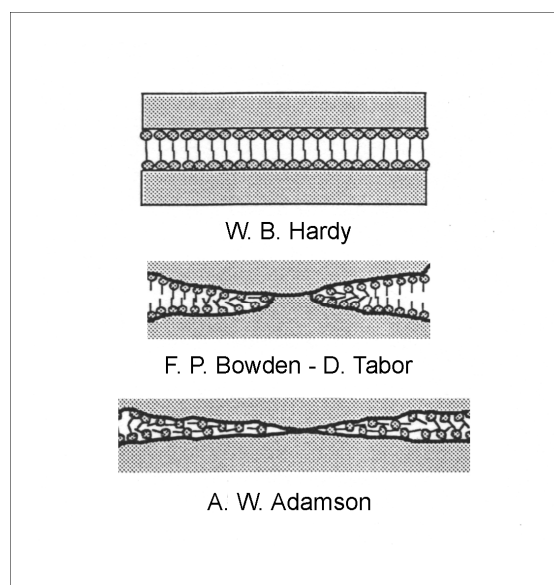
Mezné mazání je režim mazání, při kterém se třecí povrchy nacházejí v bezprostřední blízkosti, takže dochází k vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi. Zatížení není přenášeno hydrodynamickým působením mazacího filmu, ale prostřednictvím velmi tenkého mezného filmu, jehož struktura a vlastnosti jsou odlišné od struktury a vlastností maziva a třecích povrchů. Tento film vzniká fyzikální adsorpcí, chemisorpcí nebo chemickými reakcemi maziva s třecími povrchy.

Obrázek 5 dává přehled o vývoji v oblasti mezného mazání. Termín mezné mazání poprvé použil W. B. Hardy, který roku 1922 napsal [12]: „*Při tzv. úplném mazání zkoumaném Towersem a Osbornem Reynoldsem jsou povrchy tuhých těles vzájemně zcela odděleny mazivem. Avšak existuje jiný druh mazání, při kterém jsou povrchy těles natolik blízko, že přímo ovlivňují fyzikální vlastnosti maziva. Taková situace nastává u suchých povrchů nebo u povrchů pokrytých tenkou vrstvou maziva. Za působení toho co Osborne Reynolds nazývá meznými podmínkami, pak tření nezávisí jen na mazivu, ale také na chemických vlastnostech povrchů. Mezné mazání se tak výrazně odlišuje od úplného mazání, že to vyvolává dojem, že se jedná o dva různé stavy.*“

Již na počátku minulého století vědci zjistili, že dvě maziva se stejnou viskozitou vykazují za stejných provozních podmínek dvě různé hodnoty součinitele tření a zavedli proto pojem „mazivosti“ maziva [14]. Ve dvacátých letech pak ukázali, že mazivost souvisí s adsorpcí povrchových monomolekulárních filmů [15], a že součinitel tření silně závisí na délce molekulárního řetězce [12]. Tyto a další práce [16] objasnily podstatu mezného mazání, která spočívá ve vytváření ochranného povrchového filmu sestávajícího z dlouhých řetězců polárních molekul, které jsou orientovány kolmo k povrchu a jsou k němu připoutány svými polárními konci (obr. 6). Aby takovýto film byl dostatečně trvanlivý, musí být molekulární řetězec lineární a obsahovat alespoň dvanáct atomů uhlíku [18]. Většina rafinovaných ropných olejů jsou sice nepolární nebo málo polární látky, avšak obsahují složky polárního charakteru, které adsorbují na běžně užívaných kovových třecích površích. Takto vzniklé monomolekulární filmy mají nízký součinitel tření, který však se vzrůstající teplotou prudce vzrůstá. Syntetické kapaliny mají větší schopnost vytvářet mezný film než rafinované ropné oleje, avšak z hlediska mazání jsou nejdůležitější *mazivostní zušlechťující přísady*, které obvykle obsahují polární skupinu připojenou k dlouhému řetězci methylenové skupiny, jako je tomu např. u kyseliny stearové či kyseliny olejové.



Obr. 5 Vývoj na poli mezného mazání [13]



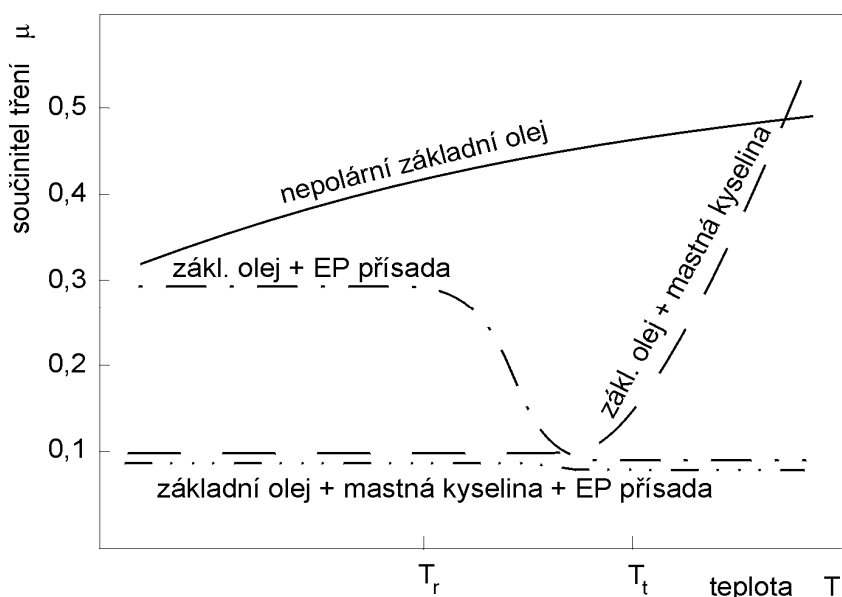
Obr. 6 Adsorpční modely mezného mazání [17]

Se zavedením hypoidních převodů v automobilovém průmyslu na konci dvacátých let vyvstal problém jejich ochrany proti zadírání, protože existující minerální oleje nedokázaly tento úkol uspokojivě plnit. To vedlo k vývoji *vysokotlakých (EP) zušlechťujících přísad*, založených na sloučeninách síry, chloru a olova [19]. Několik let se vedla diskuse o mechanismu jejich působení. V současné době se má za to, že vysokotlaké přísady nevratnými chemickými reakcemi s třecími povrchy vytvářejí vlastní mezný film tvořený oxidy a sulfidy, který omezuje vzájemný styk třecích povrchů a zabraňuje vzniku mikrosvarů [20]. Tento film je pevně připoutaný k třecím povrchům a jeho mazací schopnosti závisí na teplotě. Relativně málo je však známo o jeho tloušťce a chemických procesech probíhajících při jeho utváření.

Pokrok ve vývoji rychloběžných strojů začátkem čtyřicátých let přinesl zvýšení provozních teplot v tribologických soustavách, které vedlo ke snížení viskozity maziva a tím i tloušťky mazacího filmu. Proto bylo zapotřebí najít vhodné *protioděrové zušlechťující přísady*, které by dokázaly snížit opotřebení za vysokých teplot. Roku 1941 O. Beeck a kol. [21] zjistil, že takovou přísadou může být trikresylfosforečnan, který v kombinaci s konvenčními mazivostními přísadami výrazně snižuje opotřebení. Moderní experimentální metody pak teprve nedávno umožnily odhalit, že fosforové protioděrové přísady vytvářejí na třecích površích relativně tlustou vrstvu fosforečnanu železitého či zinečnatého.

Poprvé v sedmdesátých letech přinesla nový požadavek na motorové oleje, který spočíval ve snížení tření a tím i spotřeby paliva. To vedlo k vývoji *modifikátorů tření*, které se v posledních několika letech staly důležitou součástí motorových olejů. Většina těchto zušlechťujících přísad je založená na mastných kyselinách nebo jiných polárních látkách, které jsou velmi podobné mazivostním přísadám. V sedmdesátých letech pak bylo zjištěno, že jako modifikátory tření mohou být užity i sloučeniny molybdenu [22].

Obrázek 7 ukazuje závislost součinitele tření  $\mu$  na teplotě  $T$  pro čtyři různé typy mezných filmů. Nepochlívající základní olej má nejmenší meznou mazací schopnost a součinitel tření se vzrůstající teplotou vzrůstá, což je důsledek porušení slabých vazeb vzniklých fyzikální adsorpcí. Jestliže malé množství mastné kyseliny s teplotou tání  $T_t$  je rozpuštěno v základním oleji, dochází k chemisorpci mastné kyseliny na kovových třecích površích, která je doprovázená vznikem mýdla. Toto mýdlo má velmi nízkou pevnost ve smyku a je dobrým mazivem při teplotách nižších než je teplota tání. Při překročení této teploty však dochází k desorpci mastné kyseliny jejíž důsledkem je ztráta mazací



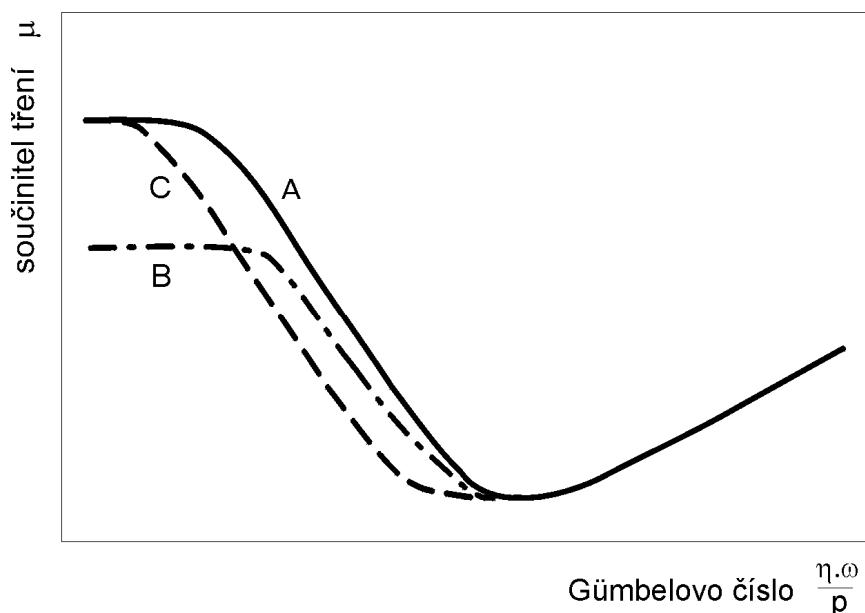
Obr. 7 Závislost součinitele tření  $\mu$  na teplotě  $T$  pro různé typy mezných filmů [23]

schopnosti. V případě, že místo mastné kyseliny je do základního oleje přidána vysokotlaká zušlechťující přísada, která reaguje s třecím povrchem při reakční teplotě  $T_r$ , pak při nižších teplotách nedochází k utváření mezného mazacího filmu. Při překročení této teploty však nastává nevratná chemická reakce mezi zušlechťující přísadou a materiálem třecích povrchů za vzniku nové sloučeniny, která vytvoří vlastní mezný film. Hypoteticky lze do základního oleje přidat malé množství jak mastné kyseliny tak i vysokotlaké zušlechťující přísady a vytvořit tak mazivo s nízkým součinitelem tření v celém rozsahu teplot. V tomto případě by pak mastná kyselina zajišťovala tvorbu mezného filmu při nižších teplotách, zatímco při vyšších teplotách by mezný film vznikl reakcí vysokotlaké přísady se třecími povrchy. Vznik takového maziva je však limitován desorpční.

V závislosti na typu mezného filmu a mechanismu jak ovlivňuje Stribeckovu křivku se rozlišují tři základní případy [24]:

- Mezný film má charakter tenké, pevné a hladké vrstvy pokrývající třecí povrchy, která má za následek snížení součinitele tření. Příkladem může být film vytvořený kyselinou stearovou přidanou do hexadekanu (křivka B na obr. 8).
- Mezný film má charakter několik nanometrů tlusté vrstvy vysoce viskosní tekutiny ulpívající na třecích površích, která vede k posunutí Stribeckovy křivky směrem k nižším hodnotám Gumbelova čísla. Tvorba takového filmu byla prokázána u roztoků polymerů, některých zušlechťujících přísad a směsí základových olejů o různé viskozitě. Příkladem tohoto chování může být směs esteru o vysoké viskozitě a polyalfaolefinového oleje s nízkou viskozitou (křivka C na obr. 8). Naproti tomu však zatím není zcela jasné, zda tyto filmy tvoří také jednoduché uhlovodíky a vysoce rafinované minerální oleje.
- Mezný film ovlivňuje drsnost třecích povrchů, což vede ke změnám hodnot součinitele tření a tudíž i k posunutí Stribeckovy křivky. Tento mechanismus je přisuzován vysokotlakým zušlechťujícím přísadám a v poslední době také přísadám na bázi molybdenu a zinku.

Ve většině reálných tribologických soustav se uplatňuje kombinace všech tří výše uvedených mechanismů, takže Stribeckova křivka leží mezi křivkami B a C na obr. 8.



Obr. 8 Vliv mezného filmu na Stribeckovu křivku.

A Nepolární mazivo

B Mazivo s přísadou tvořící pevný mezný film

C Mazivo s přísadou tvořící kapalinný mezný film

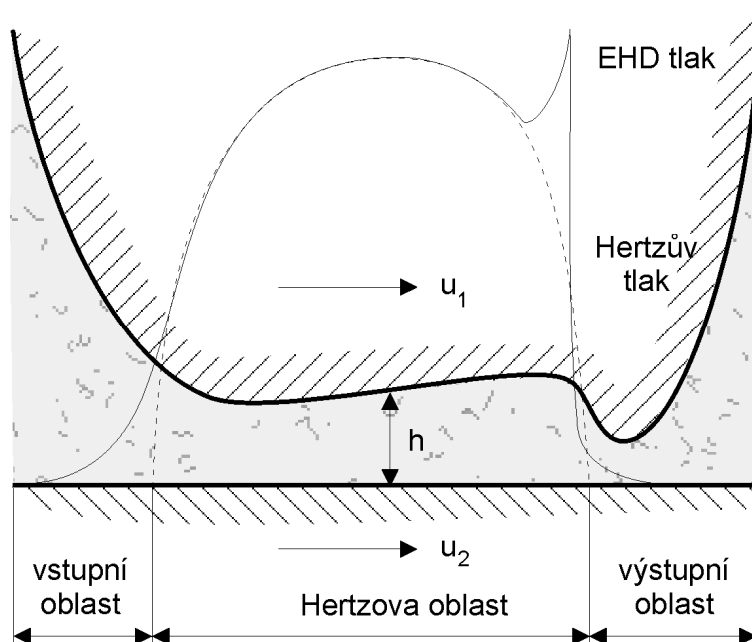


## 1.4 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

Elastohydrodynamické mazání (zkráceně EHD mazání či EHL) je režim kapalinového mazání, při kterém elastické deformace třecích povrchů jsou řádově stejně velké jako tloušťka hydrodynamického mazacího filmu, jehož chování ovlivňují. K elastohydrodynamickému mazání obvykle dochází mezi zatíženými, nekonformně zakřivenými třecími povrchy nacházejícími se v relativním pohybu.

Podle tvaru stykové plochy se elastohydrodynamické mazání rozděluje na *elastohydrodynamické mazání liniových kontaktů* (např. při styku dvou válců) a na *elastohydrodynamické mazání bodových (eliptických) kontaktů* (např. při styku dvou koulí). V závislosti na velikosti Youngových modulů pružnosti třecích povrchů se pak dále rozlišuje elastohydrodynamické mazání tuhých a poddajných třecích povrchů. K *elastohydrodynamickému mazání tuhých třecích povrchů* dochází u třecích povrchů s vysokými moduly pružnosti (např. u kovů), kdy jak elastická deformace třecích povrchů, tak i změna viskozity maziva s tlakem jsou stejně významné pro tvorbu mazacího filmu. K *elastohydrodynamickému mazání poddajných třecích povrchů* dochází u třecích povrchů s nízkými moduly pružnosti (např. u pryže), kdy elastické deformace třecích povrchů jsou velké i při malém zatížení a malý kontaktní tlak má zanedbatelný vliv na viskozitu maziva.

Dvě základní práce, ze kterých vychází teorie elastohydrodynamického mazání – Hertzova teorie styku elastických těles [25] a Reynoldsova teorie hydrodynamického mazání [26] – jsou sice více než sto let staré, avšak k prvnímu pokusu o jejich sjednocení došlo až ve třicátých letech minulého století. Ještě předtím však H. M. Martin [27] publikoval článek, ve kterém popsal aplikaci Reynoldsovy teorie na mazání nekonformně zakřivených dokonale tuhých třecích povrchů. Zde také odvodil rovnici, s jejíž pomocí odhadl, že velikost minimální tloušťky mazacího filmu mezi zuby ozubeného převodu se pohybuje kolem  $0,03 \mu\text{m}$ . Protože tato hodnota je podstatně menší než hodnota redukované drsnosti třecích povrchů, bylo zřejmé, že předpoklady o dokonale tuhých površích a o izoviskozním chování maziva nejsou správné. W. Peppler [28] a A. Meldahl [29] proto řešili problém izoviskozního mazání elastických třecích povrchů a E. K. Gatcombe [30] vzal do úvahy při řešení Reynoldsovy rovnice změnu viskozity maziva s tlakem.

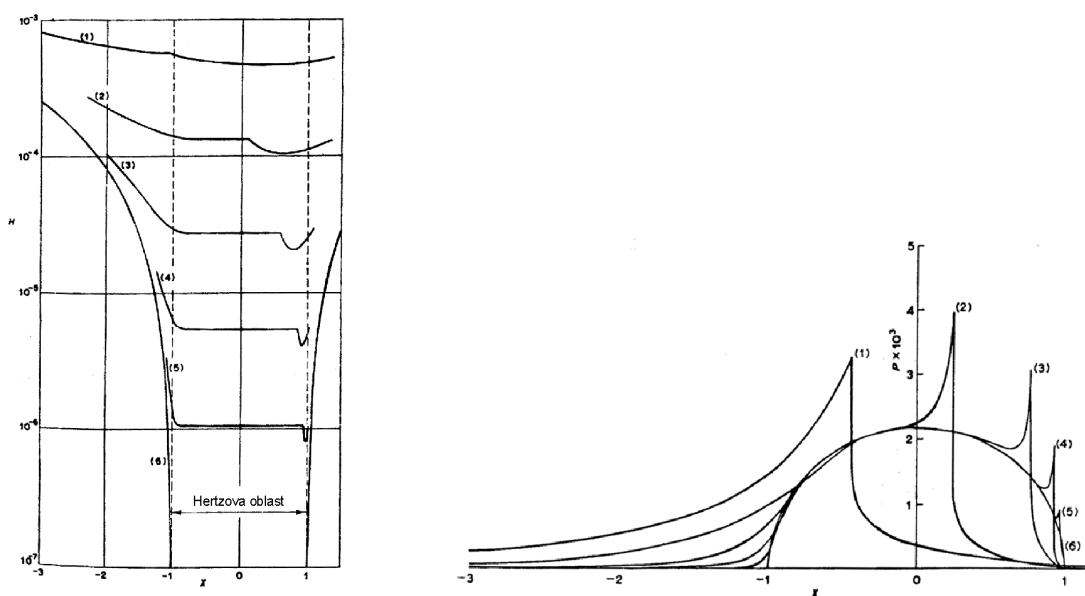


Obr. 9 Elastohydrodynamické mazání liniového kontaktu

Avšak ani tato řešení nepřinesla realističtější odhad tloušťky mazacího filmu. Teprve až A. N. Grubin [31] publikoval roku 1949 první analytické řešení tloušťky elasto-hydrodynamického mazacího filmu v liniovém kontaktu, které bralo do úvahy jak elastické deformace třecích povrchů, tak i závislost viskozity maziva na tlaku. Grubin přitom vycházel 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 Grubinovy práce je odvození rovnice, která umožňuje stanovit tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu a která dává až o dva řády vyšší hodnoty než rovnice Martinova. O dva roky později uveřejnil A. I. Petrusevič [32] tři numerická řešení pro tři rychlosti třecích povrchů získaná metodou pokus-omyl, která potvrdila základní znaky elasto-hydrodynamického kontaktu anticipované Grubinem (obr. 9):

- V centrální (Hertzově) oblasti kontaktu je tenký, přibližně paralelní mazací film, jehož tloušťka se v blízkosti výstupní oblasti kontaktu náhle snižuje.
- Rozložení tlaku v mazacím filmu odpovídá přibližně Hertzovu rozložení.
- V oblasti náhlého snížení tloušťky mazacího filmu se nachází lokální, druhé tlakové maximum označované jako Petrusevičovo.

Během padesátých let bylo publikováno několik numerických řešení elasto-hydrodynamického mazání liniových kontaktů např. [33] založených na užití iterační přímé metody řešení. Tato metoda spočívá ve stanovení rozložení tlaku v kontaktu z Reynoldsovy rovnice řešené pro odhadnutou tloušťku mazacího filmu. Z toho se pak pomocí rovnic elasticity vypočte rozložení tloušťky mazacího filmu, kterým se upřesní její původní odhad, přičemž se celý postup opakuje až do dosažení konvergence. Zásadní nevýhodou této metody je však velmi pomalá a omezená konvergence. Roku 1959 proto přišli D. Dowson a G. R. Higginson [34] s novým přístupem k numerickému řešení problému elasto-hydrodynamického mazání, který byl založen na použití inverzní metody. Při této metodě se pro odhadnuté rozložení tlaku v kontaktu stanoví odpovídající rozložení tloušťky mazacího filmu, jak z invertované Reynoldsovy rovnice, tak i z rovnic elasticity. Poté se na základě vzájemného porovnání obou výsledků zpětně modifikuje výchozí tlakové rozložení a celý proces se opakuje, dokud není dosaženo požadovaného souhlasu mezi oběma výsledky. Podstatné zrychlení konvergence



Obr 10 Rozložení tloušťky a tlaku v liniovém elasto-hydrodynamicky mazaném kontaktu pro  $U = (1) 10^{-9}, (2) 10^{-10}, (3) 10^{-11}, (4) 10^{-12}, (5) 10^{-13}, (6) 0; W = 3 \times 10^{-5}$  a  $G = 5000$  [35]

a použití počítačů umožnilo získat řešení pro různá maziva a materiály třecích povrchů a pro různé hodnoty rychlostí a zatížení (obr. 10) [35]. Na základě regresní analýzy takovýchto řešení bylo odvozeno několik rovnic pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu, mezi nimi např. [36]:

$$H_c = 2,922(W')^{-0,166} U^{0,692} G^{0,470}, \quad (2)$$

$$H_{min} = 1,714(W')^{-0,128} U^{0,694} G^{0,568}, \quad (3)$$

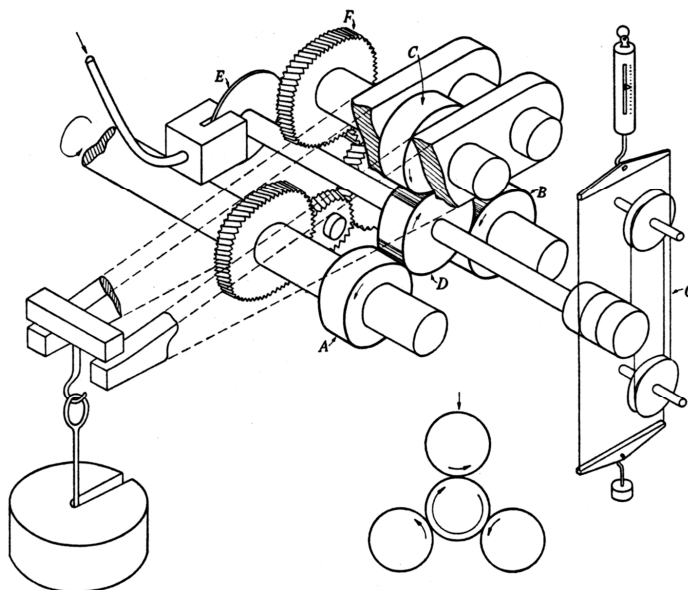
kde  $H_{min}$  je bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu,  $H_c$  je bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu,  $W'$  je bezrozměrný parametr zatížení pro liniový kontakt,  $U$  je bezrozměrný parametr rychlosti a  $G$  je bezrozměrný parametr materiálů. Definice bezrozměrných parametrů a jejich obvyklé hodnoty pro liniové elastohydrodynamicky mazané kontakty jsou uvedeny v tab. 3. Z rovnic (2) a (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 je velmi malý. Minimum tloušťky mazacího filmu se nachází ve výstupní oblasti kontaktu a jeho hodnota činí asi 80 procent hodnoty centrální tloušťky.

Experimentálně se poprvé podařilo prokázat tvar mazacího filmu v elastohydrodynamickém liniovém kontaktu A. W. Crookovi [37] roku 1961, který při svých experimentech použil čtyřdiskového experimentálního zařízení s kapacitním snímačem (obr. 11). O čtyři roky později pak J. W. Kannel [38] za pomoci manganinových tlakových snímačů potvrdil existenci druhého tlakového maxima v elastohydrodynamickém kontaktu. Stejnou metodu použili ve své studii i G. M. Hamilton a S. L. Moore [39], kteří však zjistili, že hodnota experimentálně zjištěného maxima je podstatně menší, než hodnota získaná z numerického řešení [34].

Jestliže při studiu elastohydrodynamického mazání liniových kontaktů teoretické práce předstihly experimentální, u bodových kontaktů tomu bylo naopak. Až do počátku šedesátých let se totiž mělo za to, že v bodových kontaktech může docházet pouze k meznému mazání. Teprve až experimenty provedené J. F. Archardem a M. T. Kirkem [41] na experimentálním zařízení se dvěma zkříženými válci prokázaly existenci kapalinového mazacího filmu v těchto kontaktech. Užití optické interferenční metody M. T. Kirkem [42] a téměř vzápětí i R. Goharem a A. Cameronem [43] (obr. 12a) pak přineslo první informace o tvaru mazacího filmu. Byla prokázána existence podkovovité konstrikce v tloušťce mazacího filmu nacházející se v kontaktní oblasti. Rovněž bylo prokázáno, že minimální tloušťka mazacího filmu se obvykle nalézá na bocích kontaktní oblasti (obr. 12b).

Tab. 3 Bezrozměrné parametry používané v rovnicích pro elastohydrodynamické liniové kontakty [40]  
Veličiny používané k výpočtu bezrozměrných parametrů jsou uvedeny v tab. 4

Označení	Název	Definice	Rozsah hodnot
$H_{min}$	bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu	$\frac{h_{min}}{R_x}$	$1 \times 10^{-5}$ až $2 \times 10^{-4}$
$H_c$	bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu	$\frac{h_c}{R_x}$	$1 \times 10^{-5}$ až $25 \times 10^{-5}$
$W'$	bezrozměrný parametr zatížení pro liniový kontakt	$\frac{w}{E' R_x}$	$1 \times 10^{-6}$ až $1 \times 10^{-5}$
$U$	bezrozměrný parametr rychlosti	$\frac{\eta_0 u}{E' R_x}$	$1 \times 10^{-11}$ až $1 \times 10^{-10}$
$G$	bezrozměrný parametr materiálů	$\alpha E'$	1500 až 6000

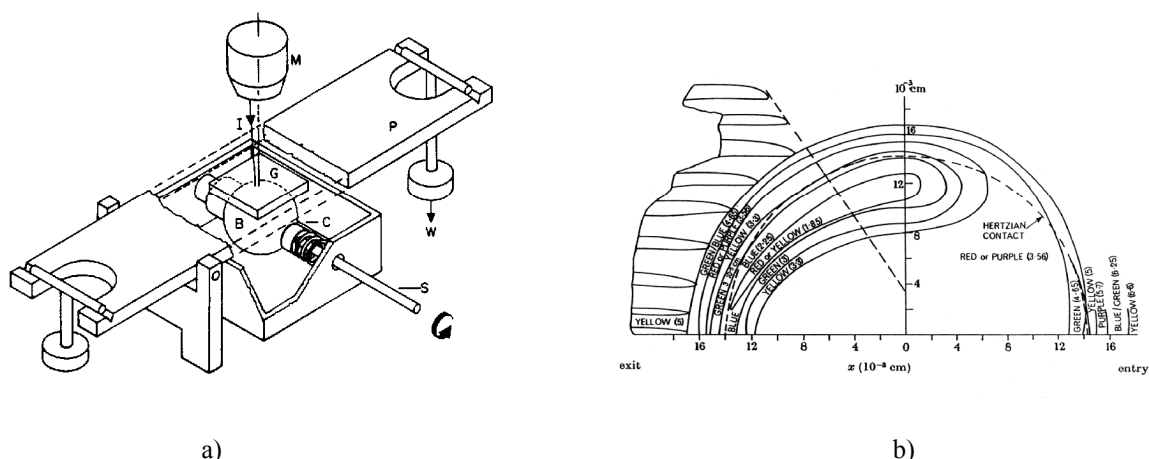


Obr. 11 Čtyřdiskové experimentální zařízení [37]:

- A, B, C, D – disky,  
 E – aerostatické ložisko,  
 F – ozubené soukolí,  
 G – pásová brzda.

Tab. 4 Veličiny používané k výpočtu bezrozměrných parametrů uvedených v tab. 3 a tab. 5

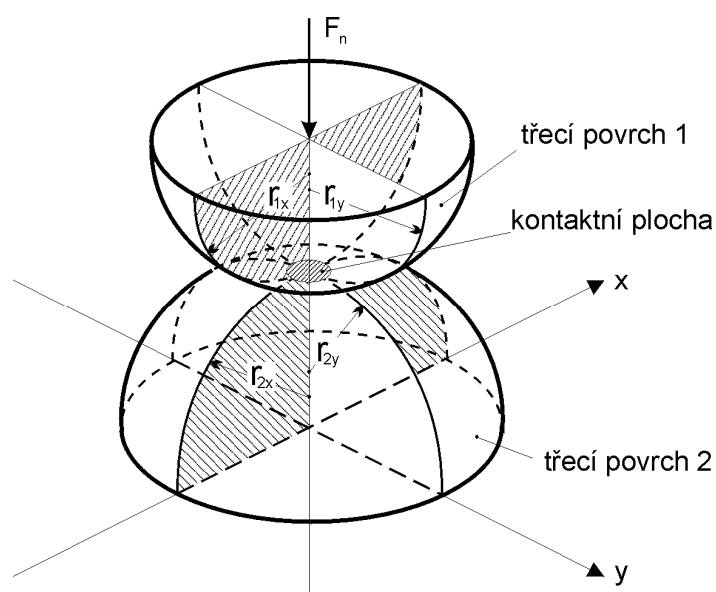
Označení	Název	Definice
$E_1, E_2$ $E'$	Youngův modul pružnosti třecího povrchu 1, resp. 2 redukovaný modul pružnosti	$2 \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$
$F_n$	normálová síla	
$L$	délka kontaktu	
$R_x$	redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy $x$	$\frac{r_{1x} r_{2x}}{r_{1x} + r_{2x}}$
$R_y$	redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy $y$	$\frac{r_{1y} r_{2y}}{r_{1y} + r_{2y}}$
$h_c$	centrální tloušťka mazacího filmu	
$h_{min}$	minimální tloušťka mazacího filmu	
$r_{1x}, r_{2x}$	poloměr třecího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy $x$	
$r_{1y}, r_{2y}$	poloměr třecího povrchu 1, resp. 2 ve směru osy $y$	
$u$	průměrná rychlost ve směru osy $x$	$\frac{u_1 + u_2}{2}$
$u_1, u_2$	rychlost třecího povrchu 1, resp. 2	
$w$	normálová liniová síla	$\frac{F_n}{L}$
$x$	souřadnice ve směru pohybu	
$y$	souřadnice ve směru bočního výtoku maziva z kontaktu	
$\alpha$	viskozitně-tlakový koeficient	
$\eta_0$	dynamická viskozita při nulovém tlaku	
$\nu_1, \nu_2$	Poissonova konstanta třecího povrchu 1, resp. 2	



Obr. 12 Měření tloušťky elastohydrodynamického filmu pomocí optické interferenční metody [44]

- a) Experimentální zařízení:  
 B – ocelová koule, C – skličidlo, G – skleněná deska, I - světelný svazek,  
 M - mikroskop, P – dvojramenná páka, S - hřídel, W - závaží.  
 b) Vrstevnicový diagram rozložení tloušťky mazacího filmu

Problém elastohydrodynamického 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 takové řešení pro kruhový kontakt bylo publikováno až v roce 1965 J. F. Archardem a E. W. Cowkingem [45] a o pět let později dále rozšířeno H. S. Chengem [46] pro eliptický kontakt. První úplné numerické řešení kruhového kontaktu založené na použití inverzní metody řešení popsali A. P. Ranger, C. M. M. Ettles a A. Cameron [47] roku 1975. Podobnou numerickou metodu pak použili i B. J. Hamrock a D. Dowson [48] – [51], kteří získali hodnoty bezrozměrné centrální  $H_c$  a minimální  $H_{min}$  tloušťky mazacího filmu pro třicetčtyři různých kombinací bezrozměrných parametrů rychlosti  $U$ , materiálů  $G$ , zatížení  $W$  a elipticity  $k$ .



Obr 13 Kontakt dvou elastických nekonformních těles [48]

Pomocí regresní analýzy získaných výsledků pak odvodili následující rovnice:

$$H_{\min} = 3,63U^{0,68}G^{0,49}W^{-0,073}(1 - e^{-0,68k}), \quad (4)$$

$$H_c = 2,69U^{0,67}G^{0,53}W^{-0,067}(1 - 0,61e^{-0,73k}). \quad (5)$$

Definice bezrozměrných parametrů a jejich obvyklé hodnoty pro bodové elasto-hydrodynamicky mazané kontakty jsou uvedeny v tab. 5. Geometrie kontaktní oblasti je znázorněna na obr. 13. Ze srovnání rovnic (4) a (5) s rovnicemi (2) a (3) je zřejmé, že při stejných hodnotách bezrozměrných parametrů je tloušťka mazacího filmu v kruhovém kontaktu menší, než v kontaktu liniovém (při stejném  $R_x$ ).

Při styku dvou nekonformně zakřivených mazaných třecích povrchů však nemusí vždy docházet k elasto-hydrodynamickému mazání. V závislosti na velikosti jejich elastických deformací a míře změny viskozity maziva s tlakem se rozlišují čtyři základní případy:

- Velikosti elastických deformací třecích povrchů i změny viskozity maziva s tlakem jsou zanedbatelné, takže podstatně neovlivňují tloušťku mazacího filmu. Tento případ je označován jako *izoviskozně hydrodynamické mazání*. Pro liniový kontakt našel řešení H. M. Martin [27], pro kruhový pak P. L. Kapitza [53].
- Velikost elastických deformací třecích povrchů je sice zanedbatelná, avšak změna viskozity maziva s tlakem je natolik velká, že ovlivňuje tloušťku mazacího filmu. Tento případ je označován jako *piezoviskozně hydrodynamické mazání*. Řešení pro liniový kontakt odvodil např. H. Blok [54].
- Elastické deformace třecích povrchů zásadním způsobem ovlivňují tloušťku mazacího filmu, ale kontaktní tlak je natolik malý, že nezpůsobuje téměř žádnou změnu viskozity maziva. Jedná se o *elasto-hydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů*. Tento případ řešil pro liniový kontakt K. Herrebrugh [55], pro bodový kontakt pak B. J. Hamrock a D. Dowson [56].
- Elastické deformace třecích povrchů i změna viskozity maziva s tlakem zásadním způsobem ovlivňují tloušťku mazacího filmu. V tomto případě jde o *elasto-hydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů*, kdy pro liniový kontakt platí rovnice (2) a (3) a pro bodový kontakt (4) a (5).

Tab. 5 Bezrozměrné parametry používané v rovnicích pro elasto-hydrodynamické bodové kontakty [52]  
Veličiny používané k výpočtu bezrozměrných parametrů jsou uvedeny v tab. 4

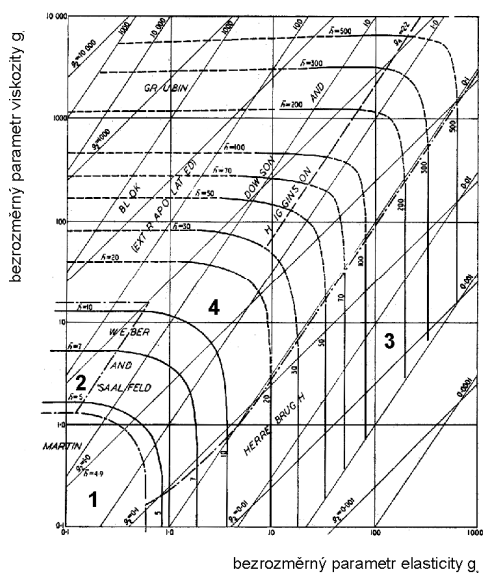
Označení	Název	Definice	Rozsah hodnot
$H_{\min}$	bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu	$\frac{h_{\min}}{R_x}$	$1 \times 10^{-5}$ až $2 \times 10^{-4}$
$H_c$	bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu	$\frac{h_c}{R_x}$	$1,2 \times 10^{-5}$ až $2,5 \times 10^{-4}$
$W$	bezrozměrný parametr zatížení pro bodový kontakt	$\frac{F_n}{E' R_x^2}$	$1 \times 10^{-6}$ až $5 \times 10^{-6}$
$U$	bezrozměrný parametr rychlosti	$\frac{\eta_0 u}{E' R_x}$	$1 \times 10^{-11}$ až $1 \times 10^{-10}$
$G$	bezrozměrný parametr materiálů	$\alpha E'$	3000 až 8000
$k$	parametr elipticity	$1,03 \left( \frac{R_y}{R_x} \right)^{0,64}$	1 až 8

Tab 6 Bezrozměrné parametry používané v mapách režimů mazání na obr. 14

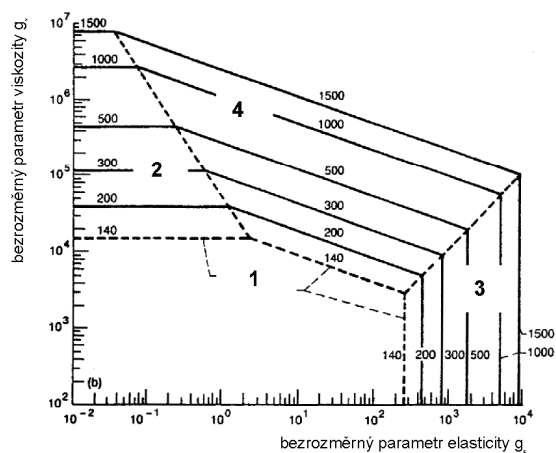
Název	Definice	
	Liniový kontakt	Bodový kontakt
bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu	$H' = H_{\min} \left( \frac{W'}{U} \right)$	$\bar{H} = H_{\min} \left( \frac{W'}{U} \right)^2$
bezrozměrný parametr viskozity	$g_1 = \left( \frac{W'^3 G^2}{U} \right)^{1/2}$	$g_V = \frac{GW^3}{U^2}$
bezrozměrný parametr elasticity	$g_3 = \frac{W'}{U^{1/2}}$	$g_E = \frac{W'^{8/3}}{U^2}$

Někteří autoři např. [57] ukázali, že počet bezrozměrných parametrů nutných k popisu problému elastohydrodynamického mazání jak liniového (tab. 3), tak i bodového (tab. 5) kontaktu, může být v obou případech snížen o jeden, bez ztráty obecnosti (tab. 6). To umožňuje vykreslit závislost bezrozměrného parametru tloušťky mazacího filmu na ostatních bezrozměrných parametrech jako soustavu křivek. Pomocí této mapy lze pak stanovit, který z případů a) až d) v kontaktu nastává. Roku 1970 přišel s takovou mapou pro liniový kontakt K. L. Johnson [58] a o devět let později na jeho základě vypracovali obdobný diagram pro bodový kontakt B. J. Hamrock a D. Dowson [59] (obr. 14).

Užití multigradních neboli vícetřížových numerických metod [61] pro řešení jak liniových, tak i bodových elastohydrodynamicky mazaných kontaktů na konci osmdesátých let, přineslo nejen řádové zrychlení výpočtů, ale i jejich podstatné zpřesnění. Na jejich základě pak byla odvozena rovnice, která umožňuje stanovit centrální tloušťku mazacího filmu v bodovém kontaktu, nejen pro oba případy elastohydrodynamického mazání, ale zahrnuje i režimy izoviskozně a piezoviskozně hydrodynamického mazání [62].



a)



b)

Obr. 14 Mapy režimů mazání pro a) liniový kontakt [58], b) kruhový kontakt [59], [60]  
 (1) izoviskozně hydrodynamické mazání, (2) piezoviskozně hydrodynamické mazání, (3) elastohydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů, (4) elastohydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů

## 1.5 SMÍŠENÉ MAZÁNÍ

Smíšené mazání je režim mazání, při kterém 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 kapalinové (obr. 15). K smíšenému mazání dochází zejména při relativně malých rychlostech třecích povrchů, změnách směru jejich pohybu či při jejich velkém zatížení.

Teoretické práce zabývající se smíšeným mazáním lze na základě použitých přístupů rozdělit do tří základních skupin (tab. 7):

- Práce zkoumající hydrodynamické či elasto-hydrodynamické mazání drsných povrchů mezi kterými nedochází k vzájemné interakci, tzn. že tloušťka mazacího filmu je mnohem větší než redukovaná drsnost třecích povrchů.
- Práce věnující se modelování mazaného kontaktu drsných třecích povrchů, kdy zatížení je z části přenášeno stykem mezi povrchovými nerovnostmi, a z části hydrodynamickým působením mazacího filmu.
- Práce kombinující oba předchozí přístupy a zabývající se mikroelasto-hydrodynamickým mazáním v okolí interagujících nerovností.

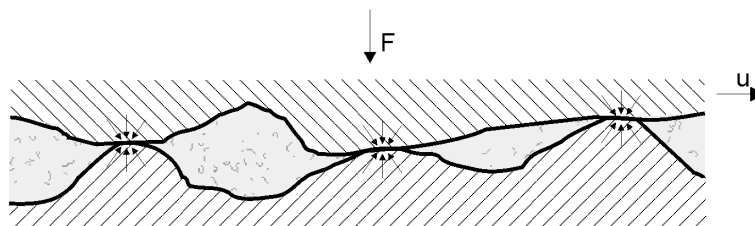
První studie se zabývaly pouze vlivem topografie třecích povrchů na tlak v mazacím filmu. Zpočátku se přitom jednalo o studium hydrodynamického mazání stacionárních třecích povrchů s deterministickými a stochastickými nerovnostmi [64]. Teprve až roku 1972 publikoval K. L. Johnson a kol. [65] řešení elasto-hydrodynamického liniového kontaktu se stacionární jednorozměrnou nerovností založené na Grubinově analýze. Přitom došel k závěru, že v případě podélně orientovaných povrchových nerovností (tj. ve směru pohybu) je střední hodnota centrální tloušťky mazacího filmu u drsných povrchů  $h_c^*$  menší než centrální tloušťka mazacího filmu pro hladké povrchy  $h_c$

$$\frac{h_c^*}{h_c} = 1 - \frac{7}{12} \frac{1}{\Lambda^2}, \quad (6)$$

zatímco u příčně orientovaných nerovností je tomu naopak

$$\frac{h_c^*}{h_c} = 1 + \frac{7}{6} \frac{1}{\Lambda^2}. \quad (7)$$

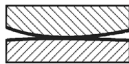
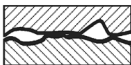
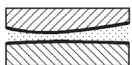

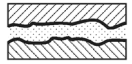
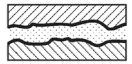
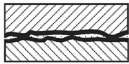
Novější práce vycházejí ze skutečnosti, že tlak v mazacím filmu má za následek změnu topografie třecích povrchů, která zpětně zase ovlivňuje tlak. To znamená, že hydrodynamický tlak vznikající v okolí jednotlivých povrchových nerovností způsobuje jejich elastickou deformaci, která vede k jejich zahlazení. To se projevuje perturbacemi rozložení tlaku. Tento jev je označován jako



Obr. 15 Smíšené mazání



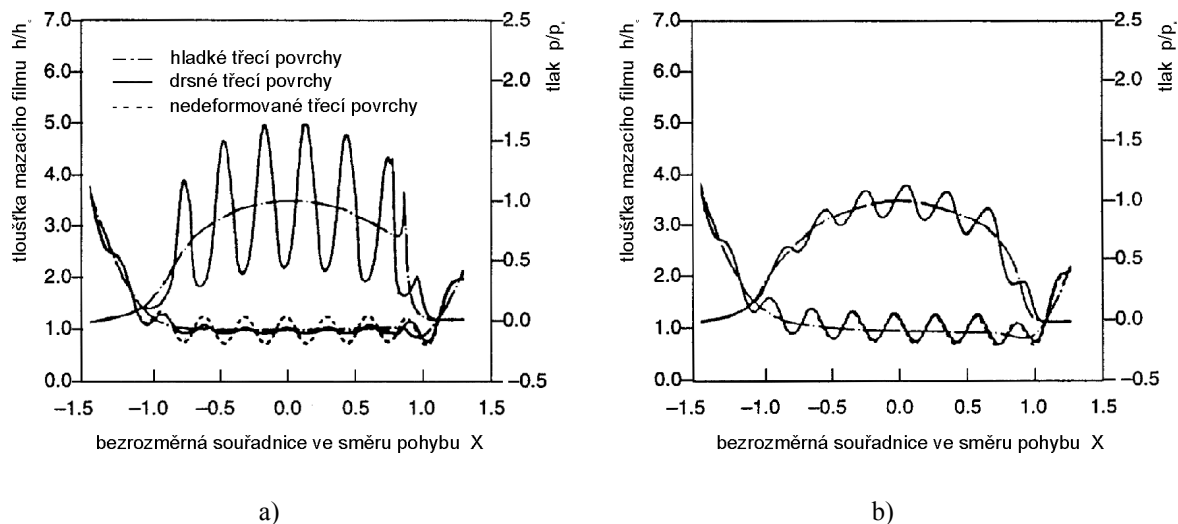
Tab. 7 Vývoj teorií smíšeného mazání [63]

1880		Hladké třecí povrchy Suchý kontakt		
1940 - 1970		Drsné třecí povrchy Suchý kontakt		Hladké třecí povrchy Koherentní mazací film
1970 - 1980		Drsné třecí povrchy Zatížení přenášené stykem povrchových nerovností Tloušťka mazacího filmu stejná jako u hladkých povrchů		Drsné třecí povrchy Nedochází ke styku povrchových nerovností Povrchové nerovnosti ovlivňují tloušťku mazacího filmu
1980 - 1990				Drsné třecí povrchy Povrchové nerovnosti ovlivňují tloušťku mazacího filmu Tlak v mazacím filmu ovlivňuje povrchové nerovnosti
1990		Drsné třecí povrchy Zatížení přenášené jak stykem povrchových nerovností tak hydrodynamickým působením mazacího filmu Mikroelastohydrodynamické mazání		

*mikroelastohydrodynamické mazání* (zkráceně MEHL nebo  $\mu$ EHL). Až do poloviny osmdesátých let se všechna numerická řešení zabývala pouze stykem stacionárního drsného elastického třecího povrchu s pohybující se dokonale tuhou deskou např. [66]. Počátkem devadesátých let se objevily první práce, které braly v úvahu nejen pohyb drsného třecího povrchu [67], ale i teplotní jevy v kontaktu a newtonovské chování maziva [68]. Ukázalo se, že všechny tyto faktory vedou k podstatnému snížení elastických deformací povrchových nerovností, a tím i velikostí perturbací tlaku (obr. 16).

Roku 1964 uveřejnil T. E. Tallian a kol. [69] studii využívající měření elektrického odporu u čtyřkuličkového zkušebního stroje ke stanovení počtu interakcí mezi povrchovými nerovnostmi při elastohydrodynamickém mazání. Na jejím základě publikoval o osm let později K. L. Johnson a kol. [65] relativně jednoduchou teorii smíšeného mazání, která kombinovala teorii styku suchých drsných povrchů rozvinutou J. A. Greenwoodem a B. P. Williamsonem [70] s Grubinovou analýzou vstupní oblasti kontaktu. Tato teorie poprvé brala do úvahy rozdělení výsledného tlaku v kontaktu na příspěvky od styku povrchových nerovností a od elastohydrodynamického mazacího filmu. Johnson přitom došel k závěru, že tuhost mazacího filmu je vyšší než tuhost stýkajících se nerovností, z čehož usoudil, že střední hodnota centrální tloušťky mazacího filmu u drsných povrchů je blízka hodnotě centrální tloušťky pro hladké povrchy. Dále také ukázal, že počet mikrokontaktů mezi povrchovými nerovnostmi závisí na hodnotě parametru mazání  $\lambda$  a že pro  $\lambda = 1$  je pouze 10 % celkového zatížení přenášeno stykem mezi povrchovými nerovnostmi. Johnsonova teorie však nebrala do úvahy vliv topografie třecích povrchů na tlak v mazacím filmu ani účinek mikroelastohydrodynamického mazání, a byla omezena na případy, kdy  $\lambda > 0,5$ .

Tato omezení byla překonána až modely zohledňujícími nejen styk povrchových nerovností, ale i mikroelastohydrodynamické mazání v jejich okolí. Jednu z prvních prací na tomto poli publikovali

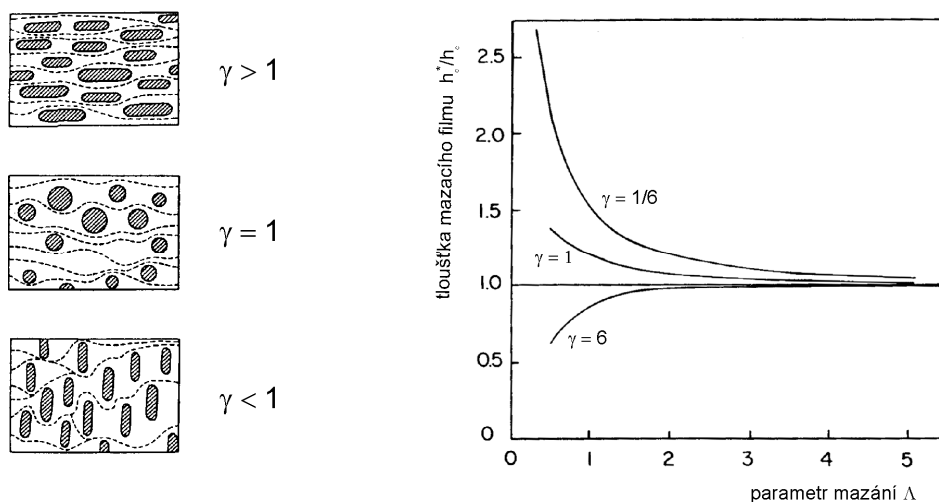


Obr. 16 Mikroelastohydrodynamické mazání liniového kontaktu [68]  
 a) Newtonovská kapalina, b) Nenevtonovská kapalina

N. Patir a H. S. Cheng [71], kteří řešili průměrovanou Reynoldsovu rovnici [72] společně s rovnicí elasticity, kontaktu [73] a mžikových teplot pro tři základní případy orientace povrchových nerovností (obr.17). Ty popsali pomocí korelačního parametru  $\gamma$  [74], který je definován jako

$$\gamma = \frac{\gamma_{0,5x}}{\gamma_{0,5y}}, \quad (8)$$

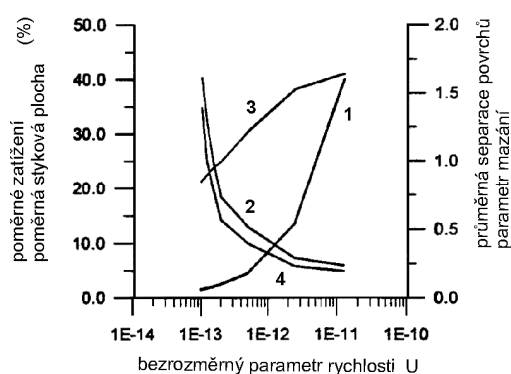
kde  $\gamma_{0,5x}$  a  $\gamma_{0,5y}$  jsou korelační délky ve směru os  $x$  a  $y$  na kterých autokorelační funkce profilu dosahuje 50% počáteční hodnoty.  $\gamma$  může být zjednodušeně interpretováno jako poměr délky ku šířce u „průměrné“ povrchové nerovnosti. Je-li  $\gamma = 0$  jsou povrchové nerovnosti orientovány jen příčně, při  $\gamma = 1$  se jedná o izotropní nerovnosti a při  $\gamma = \infty$  jsou nerovnosti orientovány pouze podélně. Výsledek výpočtů je zobrazen na obr. 17, který ukazuje závislost poměru centrálních tlouštěk



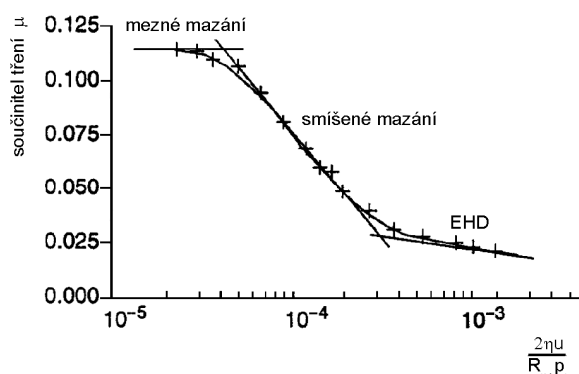
Obr. 17 Vliv orientace povrchových nerovností a parametru mazání na tloušťku mazacího filmu [71]

mazacího filmu u drsných a hladkých třecích povrchů na parametru mazání pro  $\gamma = 1/6, 1$  a  $6$ . Z grafu je zřejmé, že izotropní a příčně orientované nerovnosti zvyšují tloušťku mazacího filmu, zatímco podélně orientované ji snižují. Nevýhody Patirovy a Chengovy metody řešení spočívají zejména v nemožnosti vzít do úvahy změny mikrogeometrie způsobené elastickou deformací, a v užití korelačního parametru, který nejednoznačně definuje orientaci povrchových nerovností. Tyto nedostatky překonaly až nové přístupy k numerickému řešení smíšeného mazání nedávno publikované L. Changem [75] a X. Jiangem a kol. [76]. Jiangův postup umožnil stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu a tlaku v bodovém kontaktu mezi hladkou tuhoun deskou a elastickou koulí s reálnými povrchovými nerovnostmi. Pro popis smíšeného mazání použil Jiang místo parametru mazání, který nebere do úvahy deformace ani třírozměrnou topografii třecích povrchů, tři veličiny – poměrného zatížení, průměrné separace a poměrné stykové plochy. Poměrné zatížení je definováno jako poměr zatížení přenášeného mikrokontakty ku celkovému zatížení. Je-li poměrné zatížení rovné nule dochází k úplnému elastohydrodynamickému mazání, zatímco při hodnotě rovné jedné nastává mezní mazání. Průměrná separace povrchů je podíl střední tloušťky mazacího filmu v Hertzově kontaktní oblasti a střední aritmetické úchyly profilu třecího povrchu. Poměrnou stykovou plochou se rozumí poměr mezi reálnou dotykovou plochou a plochou Hertzova kontaktu. Na obr. 18 je zobrazena závislost všech tří veličin společně s parametrem mazání na bezrozměrném parametru rychlosti. Se snižující se rychlostí nebo klesající dynamickou viskozitou maziva klesá i průměrná separace třecích povrchů a zvyšuje se pravděpodobnost styku povrchových nerovností.

Pro přímé experimentální studium smíšeného mazání se používá tři metod, které jsou založené na měření elektrického odporu, součinitele tření a tloušťky mazacího filmu. Průkopníkem užití měření elektrického odporu ke stanovení doby trvání a velikosti mikrokontaktů byl T. E. Talian a kol. [69], jehož práci dále rozšířil H. Czichos [77]. Myšlenka vymezení oblasti smíšeného mazání na základě měření součinitele tření je sice téměř sto let stará, avšak teprve nedávno ji uskutečnil D. J. Schipper a kol. [78]. Ze získané závislosti (obr. 19) stanovil, že pro  $R_{red}^{3/2} p_s^{1/2} / 2u\eta = 6,5 \times 10^{-5}$  nastává přechod od elastohydrodynamického k smíšenému mazání a pro  $R_{red} / 2u\eta = 1,6 \times 10^{-4}$  přechod od smíšeného k meznímu mazání. Největší přínos ke studiu smíšeného mazání však pochází z experimentů využívajících optickou interferenční metodu k měření tloušťky mazacího filmu. I když její prostorová rozlišitelnost neumožňuje zkoumání reálných povrchů, byla získána celá řada cenných výsledků např. [79] s uměle vytvořeným reliéfem na povrchu hladké ocelové koule. Ty objasňují, jak jednotlivé výstupky či prohlubně ovlivňují tloušťku a tvar mazacího filmu v kontaktu.



Obr. 18 Závislost parametru mazání (1), poměrného zatížení (2), průměrné separace povrchů (3) a poměrné stykové plochy (4) na bezrozměrném parametru rychlosti [76]



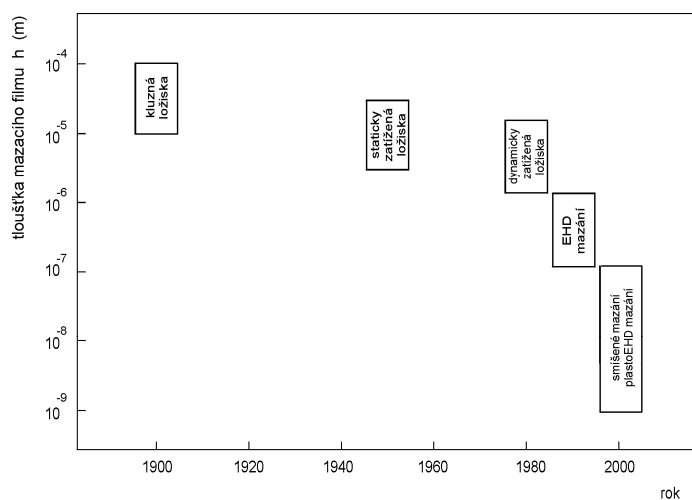
Obr. 19 Experimentálně stanovená závislost součinitele tření pro kontakt dvou nekonformních těles [78]

# 2 TENKÉ MAZACÍ FILMY A JEJICH MĚŘENÍ

## 2.1 MAZACÍ FILMY V STROJNÍCH SOUSTAVÁCH

S rozvojem techniky a technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmů v strojních tribologických soustavách [80]. 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 [26], 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 k zlepšení konstrukce klikových kluzných ložisek, což znamenalo snížení tloušťky hydrodynamického mazacího filmu až na  $10^{-6}$  m. Objev elasto-hydrodynamického 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. 20.

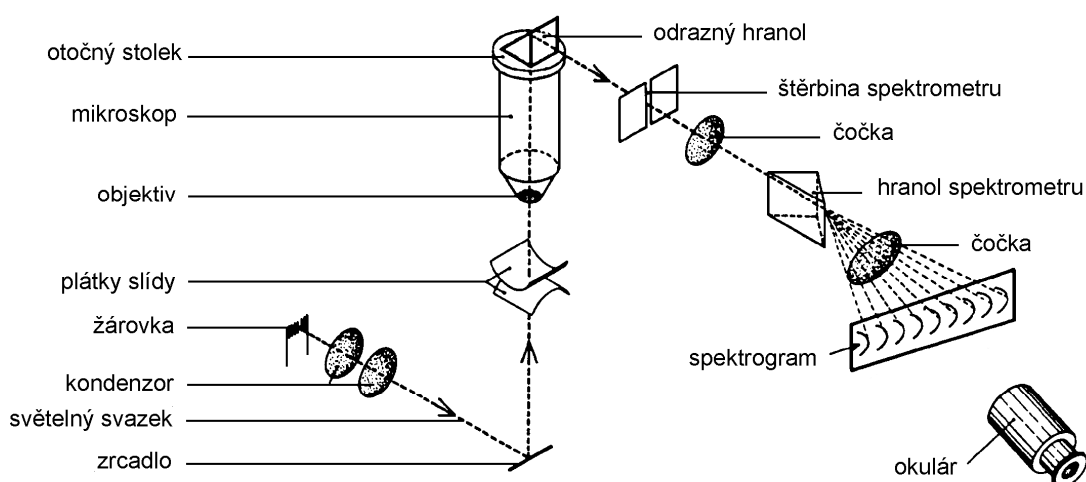


Obr. 20 Vývoj tlouštěk mazacího filmu v strojních tribologických soustavách [81]

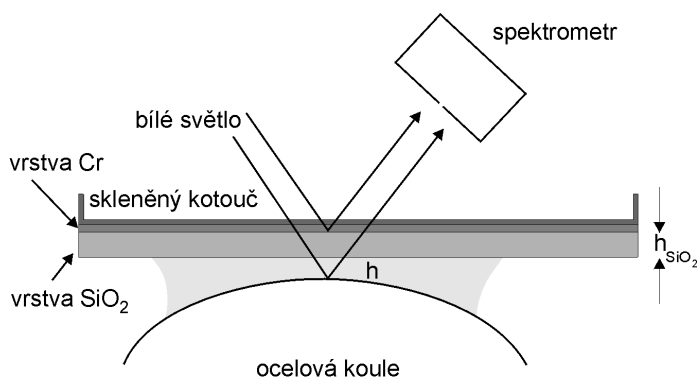
## 2.2 INTERFEROMETRIE VELMI TENKÝCH FILMŮ

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 rozhraní obklopující mazací film odpovídající reflektanci. Té se dosahuje buď užitím dvou postříbřených slídových destiček [82] nebo použitím skleněné desky pokryté vrstvou chrómu na kterou je přitlačována ocelová kulička [83]. 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 [82], [83], 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 [84].

Optickou interferenční metodu, umožňující měření tloušťky a indexu lomu velmi tenkých kapalinových filmů, popsal již roku 1973 J. N. Israelachvili [82]. Její princip je znázorněn na obr. 21. Dva postříbřené plátky slídy, každý nalepený na skleněnou válcovou plochu o poloměru 2 cm, tvoří společně se zkoumanou kapalinou jednoduchý Fizeauův interferometr. Jedna válcová plocha je pevná, zatímco polohu druhé je možné pomocí piezoelektrického krystalu měnit s přesností  $\pm 0,1$  nm. Osy obou válcových ploch jsou přitom orientovány tak, aby mezi oběma tělesy vznikla kruhová kontaktní oblast. Světlo z halogenové žárovky prochází kondenzorem a po odraze na zrcadle dopadá na interferometr, kde nastává mnohosvazková interference. Interferující paprsky jsou prostřednictvím mikroskopového objektivu a odrazného hranolu soustředěny na štěrbinu spektroskopu. Pomocí jeho okuláru je možné pozorovat proužky stejného chromatického řádu jako sérii světlých čar. Zvětšení tloušťky kapalinového filmu odpovídá posuvu těchto čar k větším vlnovým délkám. Z tohoto posuvu je možné stanovit tloušťku filmu s přesností  $\pm 0,1$  nm a jeho index lomu s přesností  $\pm 0,01$ .



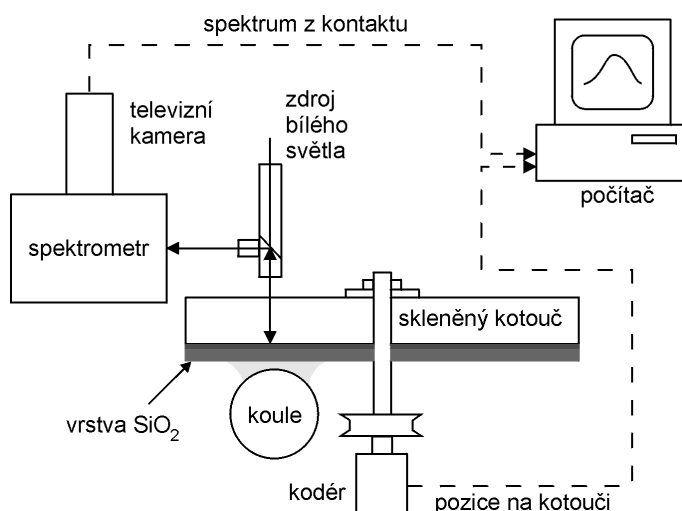
Obr. 21 Měření tloušťky velmi tenkých filmů pomocí proužků stejného chromatického řádu [82]



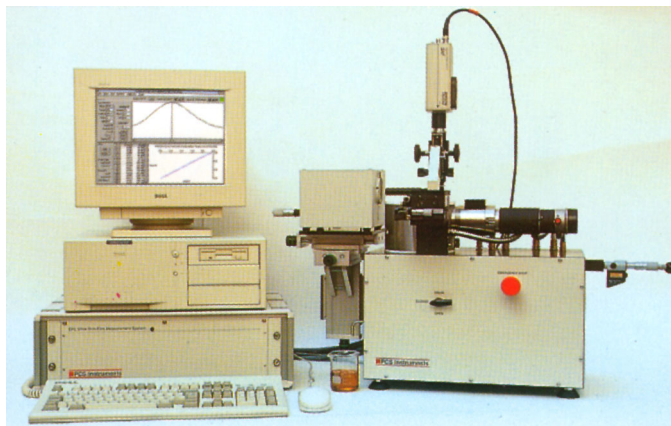
Obr. 22 Princip měření tloušťky velmi tenkých mazacích filmů [13]

Metoda navržená J. N. Israelachvilim sice umožňuje přesné měření tlouštěk velmi tenkých kapalinových filmů, avšak díky použitému materiálu třecích povrchů je omezena jen na malé hodnoty kontaktních tlaků a smykových spádů. G. J. Johnston a kol. [83] 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 [85] bylo od poloviny šedesátých let používáno ke studiu elastohydrodynamických mazacích filmů pomocí konvenční optické interferenční metody [86], [87]. 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 [88] vede k zdánlivému zvětšení tloušťky mazacího filmu a tím i k přesunu interferenčních maxim do viditelné části spektra. Princip metody je znázorněn na obr. 22.

Na obr. 23 je schéma měřicí aparatury. Hladká ocelová kulička o průměru 19,05 nebo 25,4 mm vyrobená z oceli AISI 52100 je pomocí hydraulického pístu přitlačována na povrch skleněného kotouče o průměru 10 cm. Ten je pokryt dvojnásobnou vrstvou, sestávající z poloodrazné vrstvy chrómu o tloušťce 20 nm a vrstvy oxidu křemičitého o tloušťce kolem 500 nm. Druhá strana kotouče



Obr. 23 Schéma aparatury pro studium velmi tenkých mazacích filmů [13]



Obr. 24 Měřicí aparatura vyráběná firmou PCS Instruments [89]

je opatřena protiodrazovou vrstvou. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny, avšak ve většině studií je poháněn pouze jeden z nich, zatímco druhý je unášen. Za tímto účelem je kulička uložena na třech otočných válečcích opatřená hřídelem a přes pružnou spojku poháněná elektromotorem. Podobně může být prostřednictvím reduktoru poháněn i kotouč. Kotouč i kulička společně s testovaným mazivem jsou uzavřeny v temperované komoře. Dosažitelné kontaktní tlaky se pohybují mezi 0,5 až 1,1 GPa (pro safírový kotouč), rychlosti třecích povrchů jsou v rozmezí 0,0002 až 5 ms<sup>-1</sup>. Redukovaná drsnost třecích povrchů je 11 nm.

Jednoduchý metalografický mikroskop s episkopickým osvětlovačem je použit jak pro osvětlení kontaktní oblasti, tak i pro zobrazení interferogramu na štěrbinu spektrometru. Světlo pocházející z rtuťové výbojky dopadá kolmo na kontaktní oblast, kde se odráží na rozhraní mezi chrómovou vrstvou a vrstvou oxidu křemičitého a na rozhraní mezi mazacím filmem a deformovaným povrchem ocelové kuličky. Odražené svazky interferují, přičemž interferenční barvy z centrální oblasti kontaktu jsou difrakční mřížkou spektrometru rozloženy na spektrum, které je zachyceno černobílou televizní kamerou. Její obraz je přenesen do počítače, kde je znázorněn jako závislost intenzity odraženého světla na vlnové délce. Z polohy maxim lze pak stanovit tloušťku mazacího filmu pomocí rovnice

$$nh + n_{\text{SiO}_2} h_{\text{SiO}_2} = \frac{1}{2}(N - \phi)\lambda, \quad (9)$$

kde  $n$  a  $h$  je index lomu a tloušťka mazacího filmu,  $n_{\text{SiO}_2}$  a  $h_{\text{SiO}_2}$  je index lomu a tloušťka vrstvy oxidu křemičitého,  $N$  je řád interference,  $\phi$  je celková změna fáze způsobená průchodem a odrazem světla na jednotlivých rozhraních a  $\lambda$  je vlnová délka, při které nastává interferenční maximum. Indexy lomu maziva i oxidu křemičitého se stanoví z refraktometrických měření, celková změna fáze se zjistí pomocí jednoduché kalibrace [86]. Všechna měření se provádějí na stejném místě kotouče, kde byla na počátku změřena i tloušťka vrstvy oxidu křemičitého. Přesnost metody je  $\pm 5\%$  pro tloušťky nad 10 nm, pro tenčí filmy pak  $\pm 1$  nm. Rozsah měřitelných tlouštěk mazacího filmu se pohybuje od 1 do 500 nm. Měřicí aparatura byla vyvinuta Tribologickým odborem Imperial College of Science, Technology and Medicine v Londýně a od poloviny devadesátých let ji vyrábí anglická firma PCS Instruments (obr. 24).

Jednou z prvních aplikací této měřicí metody bylo stanovení tlouštěk mazacího filmu, při kterých vrstva maziva již netvoří spojitě 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. Z rovnice (5)

plyne, že závislost centrální tloušťky mazacího filmu u kruhového kontaktu na průměrné rychlosti třecích povrchů lze vyjádřit ve tvaru

$$h_c(u) = K \alpha^{0,53} \eta_0^{0,67} u^{0,67}, \quad (10)$$

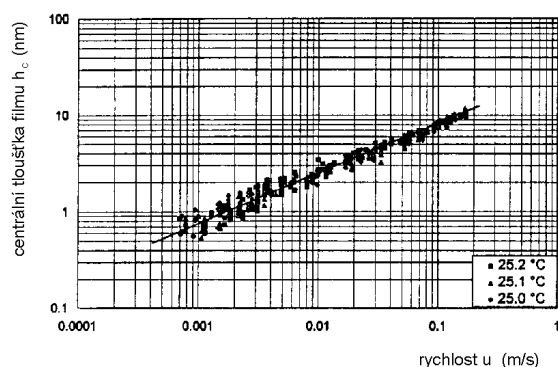
kde  $K$  je konstanta, jejíž hodnota závisí na geometrii a mechanických vlastnostech třecích povrchů a na jejich zatížení. Je-li rovnice (10) znázorněna v logaritmických souřadnicích, jedná se o lineární funkci, jejíž grafem je přímka se směrnici 0,67. Provedená měření prokázala, že lineární alkany jako např. hexadekan  $C_{16}H_{34}$  (obr. 25) vykazují tuto lineární závislost až do tlouštěk filmu kolem 1 nm [90]. Podobné chování bylo pozorováno i u vysoce rafinovaných základových ropných olejů [91] a u polyalfaolefinových syntetických olejů [92]. Z rovnice (10) plyne, že tloušťka mazacího filmu závisí na reologických vlastnostech maziva ve vstupní oblasti kontaktu (obr. 9), která sahá od hranice Hertzovy kontaktní oblasti až do vzdálenosti, kde tloušťka mazacího filmu dosahuje jeden až dvojnásobek centrální tloušťky [93]. 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  $\eta_0$ , a že tudíž až do tloušťky 1 nm nedochází k utváření mezného filmu v kontaktu.

Některé kapaliny, jako např. estery [90], však vykazují při určité tloušťce mazacího filmu odklon od lineární závislosti, přičemž centrální tloušťka mazacího filmu je větší než vyplývá z rovnice (10). To je zřejmé z obr. 26, na kterém jsou znázorněny výsledky měření pro di(2-ethylhexyl)sebakát  $C_{26}H_{50}O_4$ . Příčina takového chování spočívá v utváření *mezného filmu* tvořeného několika monomolekulárními vrstvami vysoce viskózní 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  $h_c$  je v tomto případě dána součtem centrální tloušťky elastohydrodynamického filmu  $h_c^{EHD}$  a celkové tloušťky mezné vrstvy  $h'$

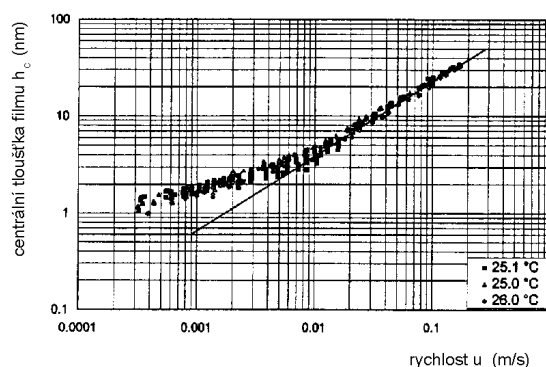
$$h_c = h_c^{EHD} + h' \quad (11)$$

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 oktamethylcyklo-

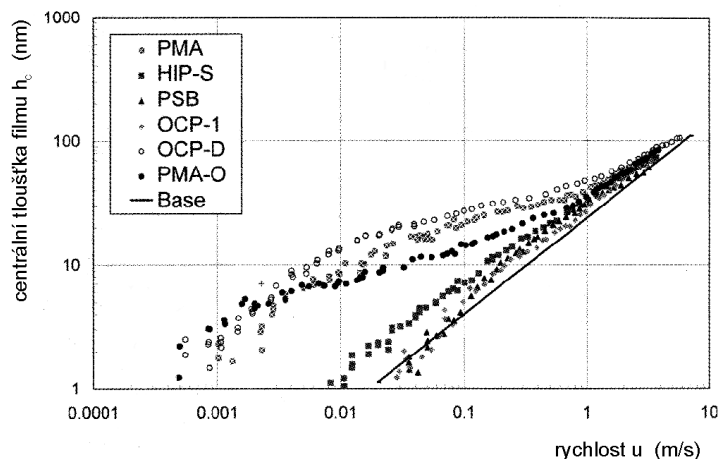


Obr. 25 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro hexadekan [95]



Obr. 26 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro di-2-ethylhexylsebakát [95]



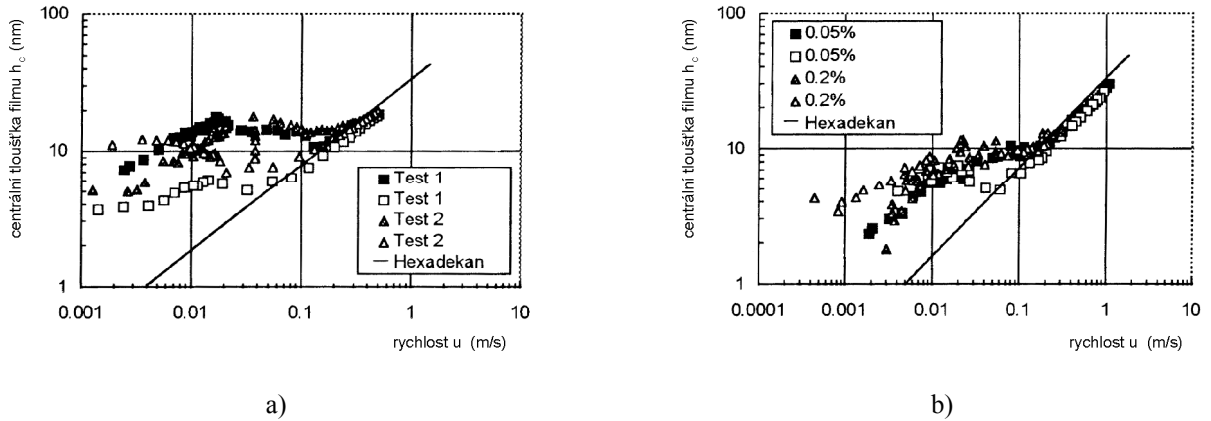


Obr. 27 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro základový ropný olej zahuštěný různými modifikátory viskozity (PMA – polymetakrylát, HIP-S – hydrogenovaný izoprénový kopolymer, PSB – poly(styren-b-izoprén)kopolymer, OCP-1 – olefinový kopolymer, OCP-D – etylenpropylenový kopolymer disperzant, PMA-O – směs polymetakrylátu s olefinovým kopolymerem, Base – základový ropný olej) [96]

tetrasiloxan (OMCTS)  $[(CH_3)_2SiO]_4$  a cyklohexan  $C_6H_{12}$  [94]. Bylo prokázáno, že obě kapaliny vytvářejí mezní 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 vykazuje 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. 27 je zřejmé, že některé modifikátory viskozity rozpuštěné v základovém ropném oleji vytvářejí relativně tlustý mezní film o tloušťkách od 15 do 25 nm [96]. 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 krát větší než viskozita základového oleje  $\eta_0$  [91], [96]. Provedené analýzy ukázaly, že maximální celková tloušťka mezního 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. Příkladem může být roztok polystyrenu v di(2-ethylhexyl)ftalátu [97]. Tento jev lze vysvětlit tvorbou mezního filmu s nízkou koncentrací polystyrenu v blízkosti třecích povrchů.

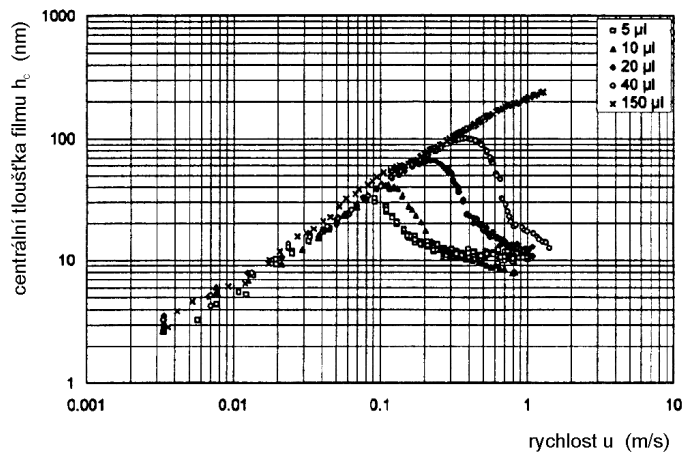
Ve všech výše uvedených případech má mezní film charakter několik nanometrů tlusté vrstvy tekutiny ulpívající na třecích površích, která po zastavení jejich pohybu mizí. Optická interferenční metoda umožnila také studium jiných typů mezních filmů. Bylo prokázáno, že dialkylditiofosforečnan zinečnatý (ZnDDF), který je běžně přidáván jako protioděrová přísada do motorových olejů, vytváří na třecích površích pevný mezní film o tloušťkách 5 až 25 nm [98]. 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. To je patrné i ze závislosti na obr. 28, získaných pro roztoky kyseliny palmitové a kyseliny stearové v hexadekanu [99]. Tyto organické mazivostní přísady používané jako modifikátory tření vytvářejí na třecích površích mezní filmy, které se chovají částečně jako viskozitní tekutinový film a částečně jako pevná vrstva [99]. Při stejných experimentálních



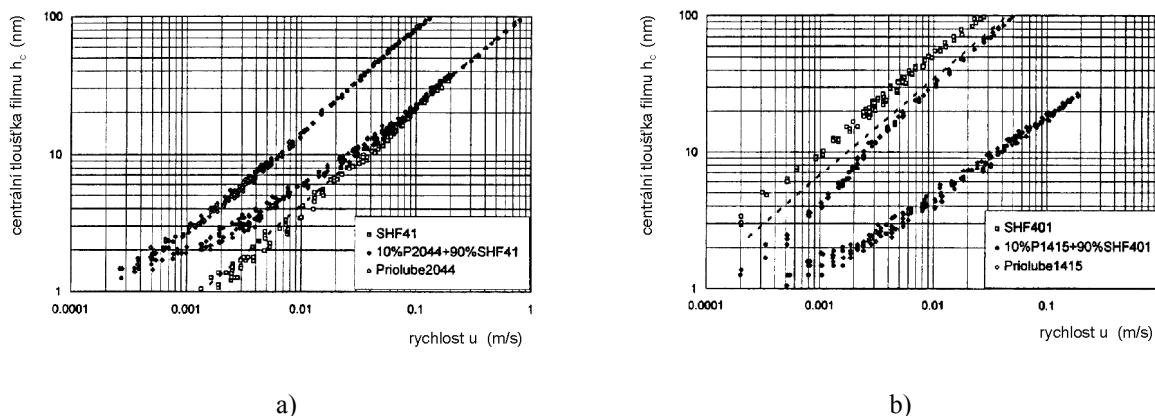
Obr. 28 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro roztok [99]:  
 a) 0,1 hmotn. % kyseliny palmitové v hexadekanu  
 b) 0,05, resp. 0,2 hmotn. % kyseliny stearové v hexadekanu

podmínkách však byly zjištěny odlišné tloušťky mezních 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 (10) 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. 29 je závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro případ, kdy bylo na povrch kuličky dodáno jen velmi malé množství polyalfaolefinového oleje [100]. Z diagramu je zřejmé, že při nižších rychlostech valení se tloušťka mazacího filmu mění v souladu s rovnicí (10) 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 [101]. To však nevysvětluje proč tloušťka mazacího filmu neklesá až



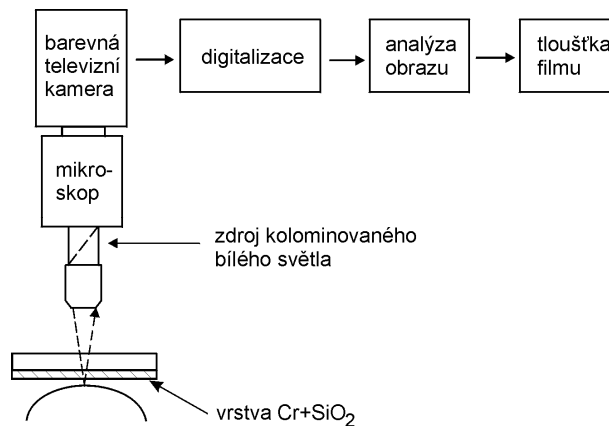
Obr. 29 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro hladovějící kontakt mazaný polyalfaolefinovým olejem [95]



Obr. 30 Závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro roztok [95]:  
 a) 10 hmotn. % esteru o vysoké viskozitě v polyalfaolefinovém oleji o nízké viskozitě  
 b) 10 hmotn. % esteru o nízké viskozitě v polyalfaolefinovém oleji o vysoké viskozitě

k nule, nýbrž na hodnotu kolem 10 až 20 nm. G. Guangteng a H. A. Spikes [100] 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. Protože se však neprokázalo, že van der Waalsovy síly ovlivňují viskozitu maziva, vznikl problém jak experimentálně dokázat jejich existenci v mazaném kontaktu. Za tímto účelem bylo zkoumáno chování binárních směsí tvořených polární a nepolární kapalinou o různých viskozitách [92]. Jelikož velikost van der Waalsových sil závisí na polaritě molekul kapaliny, je zřejmé, že polární molekuly ze směsi budou přitahovány k třecímu povrchu. V jeho bezprostřední blízkosti tak vznikne velmi tenká vrstva těchto molekul, jejíž viskozitu nebude určovat celková viskozita směsi, ale pouze viskozita její více polární složky. Na obr. 30a je závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti třecích povrchů pro syntetický polyalfaolefinový olej o nízké viskozitě, ester o vysoké viskozitě a roztok 10 hmotn. % esteru v polyalfaolefinu. Jak plyne z teorie elastohydrodynamického mazání, vytváří ester při stejných experimentálních podmínkách tlustší mazací film než polyalfaolefinový olej. Film tvořený směsí obou kapalin se při vyšších rychlostech valení chová obdobně jako polyalfaolefinový film, avšak při centrální tloušťce pod 10 nm nastává odklon od lineární závislosti směrem k hodnotám získaným pro čistý ester. To lze vysvětlit tím, že polární molekuly esteru jsou více přitahovány k polárním třecím povrchům než méně polární molekuly polyalfaolefinu. Obr. 30b znázorňuje opačné chování pozorované u roztoku 10 hmotn. % esteru o nízké viskozitě v syntetickém polyalfaolefinovém oleji o vysoké viskozitě. Z obrázku je patrné, že v tomto případě platí teorie elastohydrodynamického mazání až do tloušťky filmu kolem 10 nm, při které se na třecích površích začíná tvořit velmi tenká vrstva polárních molekul esteru majících nízkou viskozitu. Vliv van der Waalsových přitažlivých mezimolekulárních sil na chování tenkého mazacího filmu byl pozorován za zvýšených teplot také u směsi esteru s minerálním olejem [102].

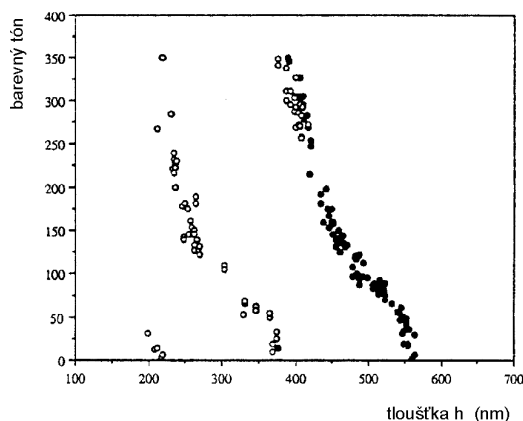
Studium tenkých mazacích filmů mezi drsnými třecími povrchy je mnohem složitější než v případě hladkých povrchů, protože tloušťka mazacího filmu a tedy i režim mazání se mění nejen v závislosti na rychlosti třecích povrchů, ale i uvnitř samotné kontaktní oblasti. První krok v této oblasti podnikli G. Guangteng a H. A. Spikes [103], 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



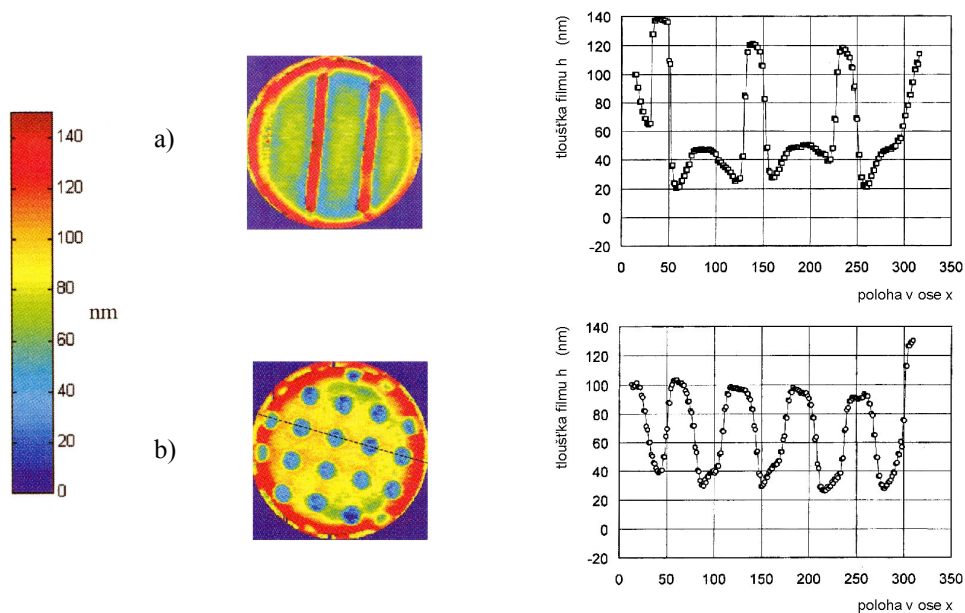
Obr. 31 Schéma aparatury pro mapování tloušťky mazacích filmů [84]

$2 > \lambda > 0,1$  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 [104]. 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. 31) [84]. Přitom vycházeli z práce L. Gustafssona a kol. [105], který navrhl postup, jak získat tvar elasto-hydrodynamického 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 (obr. 32) 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



Obr. 32 Barevný tón jako funkce tloušťky filmu [84]

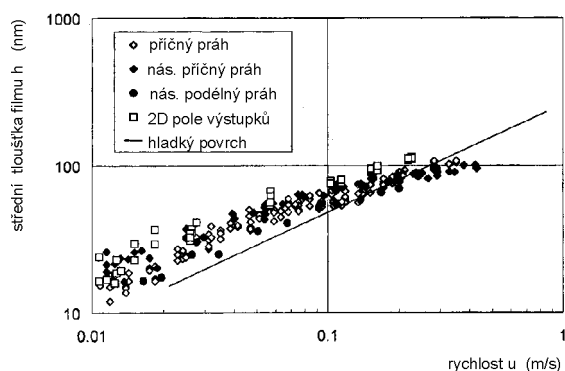


Obr. 33 Rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro [108]:

- a) vícenásobný podélný práh  
 b) pole identických výstupků při rychlosti

křemičitého. Rozsah měřitelných tlouštěk mazacího filmu se pohybuje od 4 do 100 nm. Odhadovaná přesnost metody je  $\pm 5\%$ . Velikost zpracovaného obrazu je  $256 \times 256$  pixelů, jeho prostorová rozlišitelnost 1,3  $\mu\text{m}$ .

Měřicí metoda, umožňující stanovit rozložení tloušťky velmi tenkého mazacího filmu v kontaktu, byla použita k přímému experimentálnímu studiu smíšeného mazání [106]-[108]. 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  $\mu\text{m}$ . 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 nejbližší ke vstupní oblasti kontaktu (obr. 33a). 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. 33b). Z obr. 34 je patrné, že 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.



Obr. 34 Závislost střední tloušťky mazacího filmu na rychlosti valení pro různé typy povrchových nerovností [108]

### 2.3 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. 35). Povrchy bývají obvykle vyrobeny z plátků slídy [109], avšak mohou být také zhotoveny z oxidu hlinitého [110], oceli [111] nebo borokřemičitého skla povlečeného kovovou vrstvou tvořenou např. kobaltem, platinou či zlatem [111]. Kontaktní geometrie má podobu styku dvou válců se zkříženými osami [109], nebo styku koule s deskou [110]. 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. zkrácení, takže s ním spojený povrch mění svoji polohu. V důsledku působení sil krátkého dosahu se pružná konzola deformuje o hodnotu  $\Delta z$ , takže velikost normálové síly může být vyjádřena z podmínky rovnováhy sil

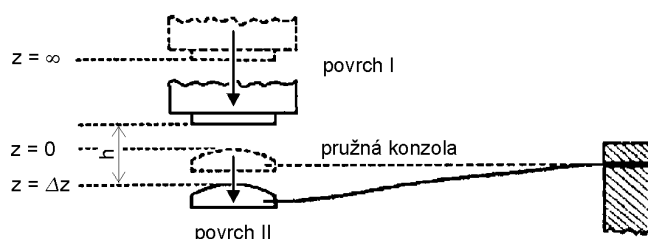
$$F(h) = K\Delta z \quad (12)$$

Jestliže piezoelektrický krystal dále změní svoji délku o hodnotu  $\Delta l$ , pak se vzdálenost obou povrchů změní o  $\Delta h$  a rovnováha sil bude mít tvar

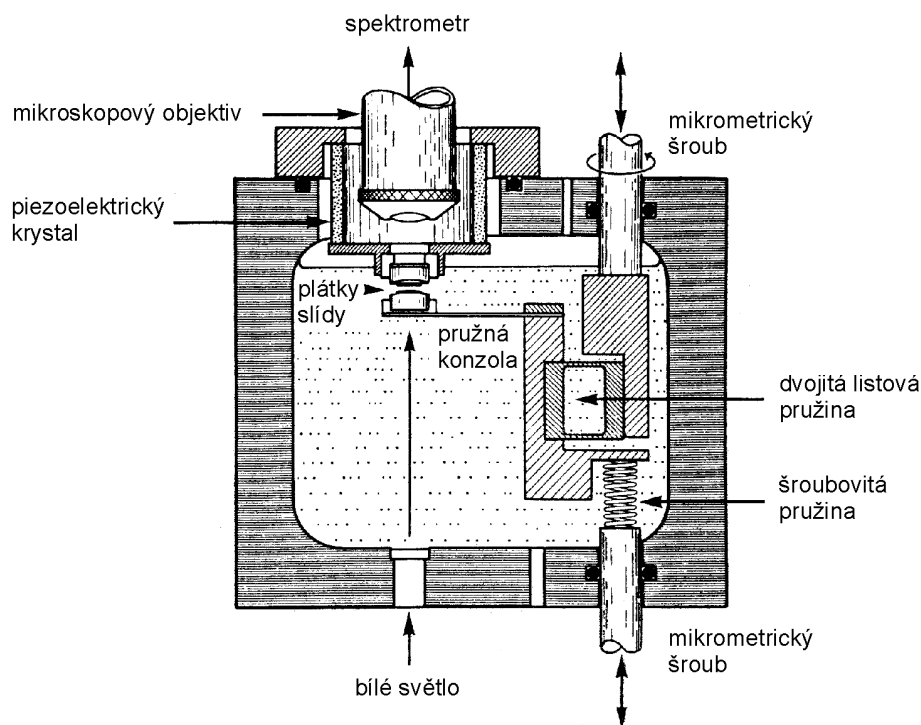
$$F(h - \Delta h) = K(\Delta l - \Delta h) + F(h) \quad (13)$$

Aby bylo možné stanovit velikost síly působící mezi povrchy je zapotřebí znát tuhost konzoly  $K$ , změnu délky piezoelektrického krystalu  $\Delta l$  a změnu vzdálenosti obou povrchů  $\Delta h$ .  $K$  a  $\Delta l$  se stanoví na základě kalibrace provedené před každým měřením. Změna vzdálenosti obou povrchů  $\Delta h$  se určí buď pomocí optické interferenční metody [82], nebo kapacitního snímače [110]. 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 [112], nebo se příčně pohybovat [113].

Pokusy experimentálně stanovit velikost povrchových sil probíhaly od počátku třicátých let [114], [115]. Teprve však až roku 1969 popsali D. Tabor a R. H. S. Winterton [109] 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 [116], jehož zařízení Mark II je na obr. 36. Různé modifikace tohoto zařízení byly použity ve většině experimentálních studií publikovaných v uplynulém čtvrtstoletí. Základem aparatury jsou dva plátky slídy o velikosti asi  $8 \times 8$  mm a tloušťce kolem  $1 \mu\text{m}$  pokryté na vnitřní straně tenkou vrstvou stříbra, které jsou nalepené na dvě opticky hladké skleněné válcové plochy



Obr 35 Princip měření povrchových sil

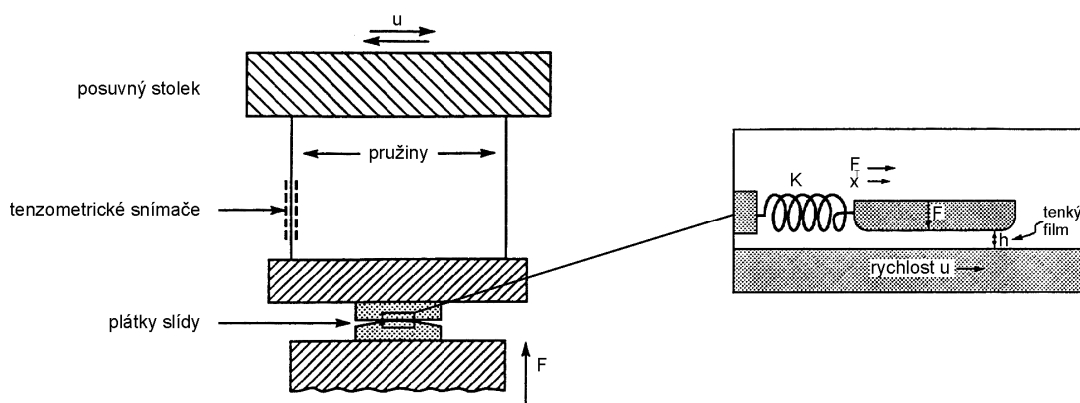


Obr 36 Schéma aparatury Mark II [117]

o poloměru asi 1 cm. Jejich vzájemná vzdálenost je nastavována pomocí třístupňového mechanismu, který je tvořen: (1) horním mikrometrickým šroubem poháněným krokovým motorem (přesnost 1  $\mu\text{m}$ ), (2) dolním mikrometrickým šroubem poháněným synchronním motorem (přesnost 1 nm) a (3) piezoelektrickým krystalem (přesnost  $< 0,1$  nm). Mezi oba mikrometrické šrouby je vložen diferenciální pružinový mechanismus, který sestává z listové ( $K = 10^2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a šroubovitě pružiny s poměrem tuhostí 1000:1. To znamená, že posun dolního mikrometrického šroubu o 1  $\mu\text{m}$  se projeví změnou vzdáleností plátek slídy o 1 nm. Plátky slídy společně s celým mechanismem se nacházejí ve skříni o objemu 350  $\text{cm}^3$ , která je vyplněna kapalinou. Aby se předešlo nežádoucímu vlivu okolních vibrací na měření, je skříň zavěšena na několika šroubovitých pružinách o délce 1 m uvnitř větší dřevěné skříně. Vzdálenost plátek slídy, jejich tvar a index lomu kapaliny jsou měřeny pomocí proužků stejného chromatického řádu [82] (viz kap. 2.2). Přesnost měření vzdálenosti mezi povrchy je přibližně  $\pm 0,1$  nm, citlivost při měření povrchových sil je asi  $10^{-8}$  N.

Od doby svého vzniku byla konstrukce experimentálního zařízení Mark II neustále zlepšována. Mezi významná vylepšení patří zejména použití pružné konzoly s proměnlivou tuhostí [118] a úprava zařízení umožňující příčný pohyb povrchů [119], [120]. Podstata této úpravy je schematicky znázorněna na obr. 37. Piezoelektrický krystal, na kterém je připevněna skleněná válcová plocha s postříbeným plátkem slídy, je nahrazen posuvným stolcem opatřeným pružinovým závěsem. Ten je tvořen dvěma vertikálními listovými pružinami o celkové tuhosti  $3 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , na jejichž konci je připevněna ocelová destička nesoucí postříbený plátek slídy nalepený na skleněnou podložku. Na jedné z pružin jsou umístěny čtyři odporové tenzometry, pomocí kterých je možné z průhybu pružiny spočítat velikost třecí síly s přesností  $10^{-4}$  N. Příčný pohyb je vyvozen prostřednictvím mikrometrického šroubu poháněného reverzibilním elektromotorem, který pohybuje posuvným stolcem upevněným na dvojici listových pružin. Rychlost pohybu může být plynule měněna v rozmezí 0,1 až 100  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , velikost zatížení se pohybuje od + 100 do - 100 g.

Na základě získaných zkušeností postavil v průběhu osmdesátých let J. N. Israelachvili novou aparaturu Mark III [121], která se vyznačuje modulární konstrukcí umožňující použití celé řady



Obr. 37 Princip zařízení pro příčný pohyb povrchů [123]

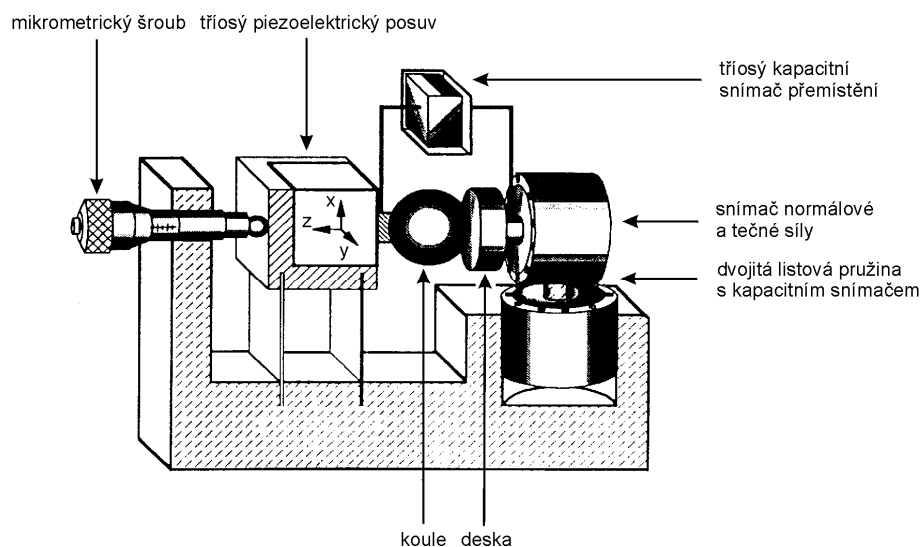
přídavných zařízení. Tuto aparaturu vyrábí americká firma SurForce Corporation ze Santa Barbary v Kalifornii. Aparaturu Mark IV [122], která konstrukčně vychází z experimentálního zařízení Mark III vyrábí Australská národní univerzita v Canbeře (obr. 38).

Roku 1987 publikoval A. Tonck a kol. [110] experimentální zařízení určené k měření intermolekulárních sil působících mezi povrchy vyrobenými z oxidu hlinitého, které jsou vzájemně odděleny vrstvou kapaliny. Velikost spáry mezi oběma povrchy byla měněna prostřednictvím jednoduchého mechanismu pracujícím na principu teplotní délkové roztažnosti. Protože však získané výsledky byly ovlivněny drsností povrchů a hysterezí, byla konstrukce aparatury podstatně přepracována [111], [125]. Princip této nové aparatury označované jako „molekulární tribometr“, je schematicky znázorněn na obr. 39. Koule o poloměru 2,95 mm, vyrobená z borokřemičitého skla, je pevně spojena s třísým piezoelektrickým posuvem, který umožňuje její pohyb vůči křemíkové desce. Ta je společně se snímači normálové a tečné síly (citlivost  $10^{-8}$  N) zavěšená na dvou listových pružinách s proměnlivou tuhostí. Oba povrchy jsou povlečeny vrstvou kobaltu, zhotovenou metodou katodového rozprašování. Ta byla v některých případech ještě překryta vrstvou platiny nebo zlata [111]. Kromě borokřemičitého skla, resp. křemíku, byly použity také koule a desky zhotovené ze zušlechtěné oceli AISI 52100 nebo plátky slídy nalepené na ocelové válcové ploše [111]. Relativní pohyb koule vůči desce je snímán třísým kapacitním snímačem přemístění s přesností 0,01 nm. Další kapacitní snímač je užit k měření elastické deformace listových pružin. Velikost spáry mezi koulí a deskou se stanoví buď na základě údajů kapacitních snímačů [111], nebo z měření velikosti kapacity mezi oběma povrchy [125].



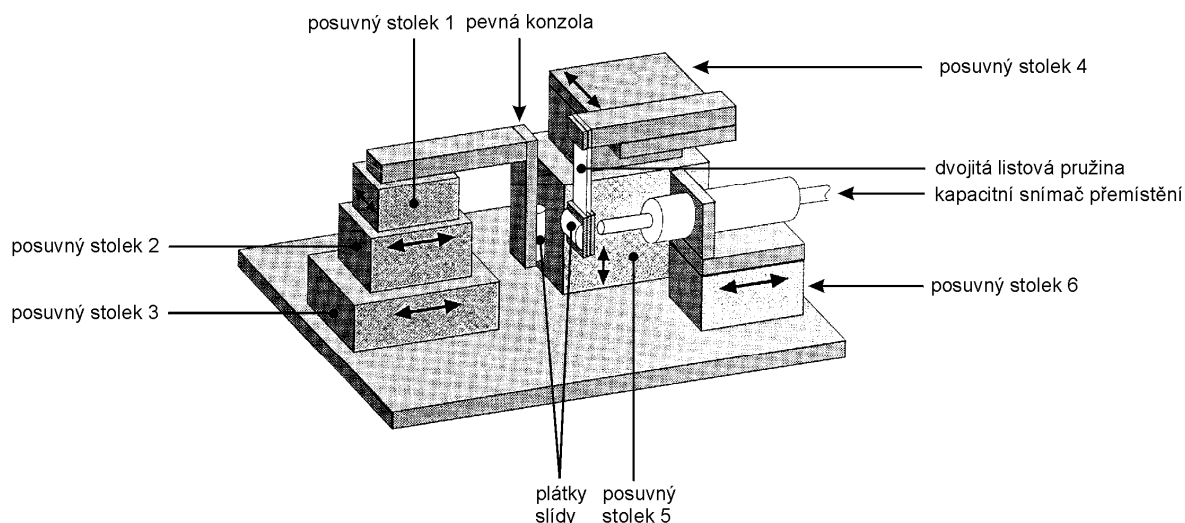
Obr. 38 Aparatura Mark IV vyráběná Australskou národní univerzitou v Canbeře [124]



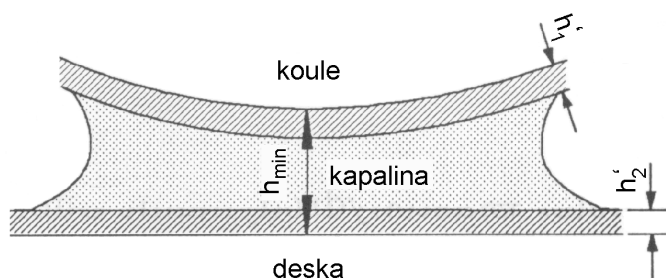


Obr. 39 Molekulární tribometr [125]

Aparaturu určenou primárně ke studiu velmi tenkých mazacích filmů popsali roku 1996 H. Matsuoka a T. Kato [127], [128]. Schéma jejich zařízení je na obr. 40. Mazací film je udržován mezi dvěma plátky slídy o velikosti  $10 \times 10$  mm a tloušťce 10 až  $30 \mu\text{m}$ , které jsou nalepeny na dvě opticky hladké válcové skleněné plochy o poloměru 10 mm. Jedna plocha je připevněna na pevnou konzolu, zatímco druhá je zavěšena na dvojitě listové pružině o celkové tuhosti  $132,5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ , která se následkem působení normálových sil elasticky deformuje. Velikost deformace se stanoví pomocí bezkontaktního kapacitního snímače přemístění, jehož rozlišitelnost se pohybuje kolem  $0,4 \text{ nm}$ . Vzájemný pohyb povrchů v normálovém a tečném směru je realizován prostřednictvím posuvných stolků 1 a 2, z nichž každý se sestává z čtyř listových pružin a piezoelektrického krystalu. Velikost posuvu jednotlivých stolků se určí na základě teznometrického měření deformace pružin. Maximální rychlost pohybu v tečném směru je  $200 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dosažitelný kontaktní tlak je asi  $5 \text{ MPa}$ . Posuvné stolky 3, 4 a 5 poháněné elektrickými motory slouží k hrubému nastavení vzájemné polohy povrchů, stolec 6 je určen k polohování kapacitního snímače přemístění.



Obr. 40 Aparatura pro studium velmi tenkých mazacích filmů [128]



Obr 41 Schéma soustavy tvořené dvěma povrchy vzájemně oddělenými tenkou vrstvou kapaliny

Celková síla působící mezi dvěma povrchy vzájemně oddělenými tenkou vrstvou kapaliny (obr. 41) je dána součtem tří sil odlišného původu – vztlkové hydrodynamické síly  $F_{HD}$ , síly způsobené smáčivostí kapaliny  $F_S$  a povrchové síly  $F_P$

$$F = F_{HD} + F_S + F_P \quad (14)$$

Vztlková 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. Je-li minimální tloušťka vrstvy kapaliny v této mezeře podstatně menší než poloměry obou povrchů, může být při malých hodnotách Reynoldsova čísla proudění popsáno pomocí Reynoldsovy rovnice [26]. Z této rovnice plyne, že vztlková hydrodynamická síla vzrůstá se vzrůstající rychlostí povrchů, viskozitou kapaliny a velikostí nosné plochy, a klesá s růstem minimální tloušťky vrstvy kapaliny. Pokud povrchy nejsou dokonale tuhé, může hydrodynamický tlak způsobit jejich deformaci, která zpětně ovlivňuje původní rozložení tlaku. V tomto případě se jedná o elastohydrodynamické mazání a Reynoldsova rovnice musí být řešena současně s rovnicemi elasticity [25], viz kap. 1.4.

Síla způsobená smáčivostí kapaliny má svůj původ v nerovnováze kohezních sil působících na rozhraní fázi. 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 rozhraní vzduch-kapalina [129], [130]. V případě styku koule s rovinnou deskou je síla způsobená smáčivostí kapaliny [131]

$$F_S = \frac{4\pi r \gamma \cos \theta}{1 + ah_{min}} \quad (15)$$

kde  $r$  je poloměr koule,  $\gamma$  je povrchové napětí na rozhraní vzduch-kapalina,  $\theta$  je úhel smáčení,  $a$  je konstanta a  $h_{min}$  je minimální tloušťka kapalinného filmu. Experimentálně bylo potvrzeno, že síla způsobená smáčivostí kapaliny klesá s klesající tloušťkou mazacího filmu [127].

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 ( $\ll 1 \mu\text{m}$ ), které jsou obtížně měřitelné. J. N. Israelachvili [132] rozděluje tyto síly ve vztahu ke koloidním roztokům na síly van der Waalsovy, síly elektrostatické, síly v elektrické dvojvrstvě, síly 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. K té může docházet buď mezi permanentními dipóly (u polárních molekul) nebo mezi permanentním dipólem a dipólem, který tento permanentní dipól indukuje v jiné molekule.

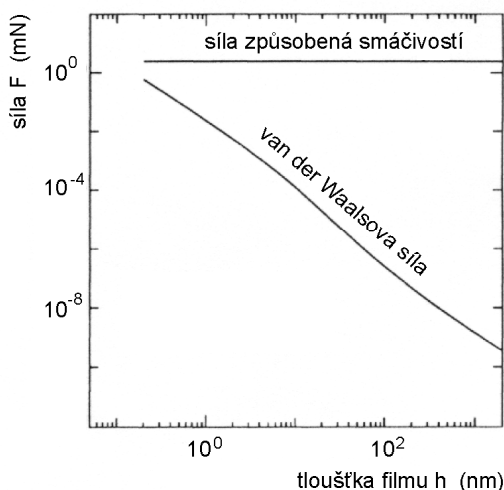
V případě neutrálních atomů nebo molekul pak nastává disperzní interakce, která je důsledkem fluktuační elektronů. Na základě mikroskopické teorie van der Waalsových sil lze stanovit energii interakce mezi makroskopickými tělesy různého tvaru oddělenými vrstvou kapaliny [133]. V případě dvou rovinných povrchů je to [134]

$$u = \frac{A}{12\pi h^2}, \quad (16)$$

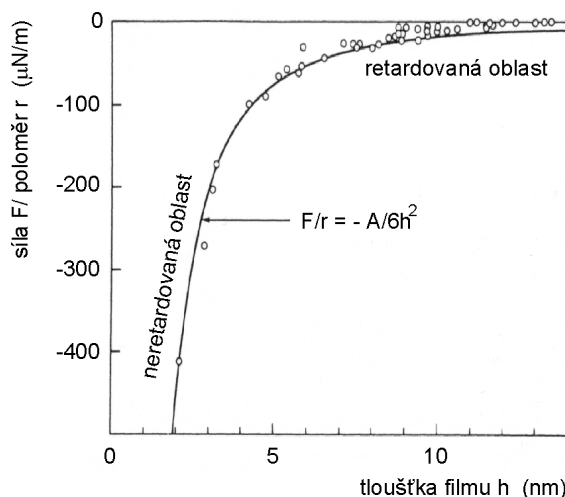
kde  $A$  je Hamakerova konstanta a  $h$  je tloušťka vrstvy kapaliny. Velikost Hamakerovy konstanty závisí na velikosti indexů lomu, dielektrických konstant a absorpčních frekvencích jednotlivých prvků tribologické soustavy a na tloušťce mazacího filmu. Hamakerovu konstantu pro jednoduché soustavy lze stanovit z analytických řešení Lifshitzovy teorie [135], zatímco v případě složitějších soustav je třeba užít numerického řešení [136]. Hodnota Hamakerovy konstanty pro soustavu tvořenou dvěma plátky slídy oddělenými tenkou vrstvou oktamethylcyklotetrasiloxanu (OMCTS) je  $1,4 \cdot 10^{-20}$  J [137]. Z rovnice (16) lze pomocí Děrjaguinovy aproximace [138] spočítat van der Waalsovou sílu působící mezi koulemi o poloměru  $r$  ( $r \gg h$ ) a rovinnou deskou

$$F_{vdW} = 2\pi r u = \frac{Ar}{6h^2}. \quad (17)$$

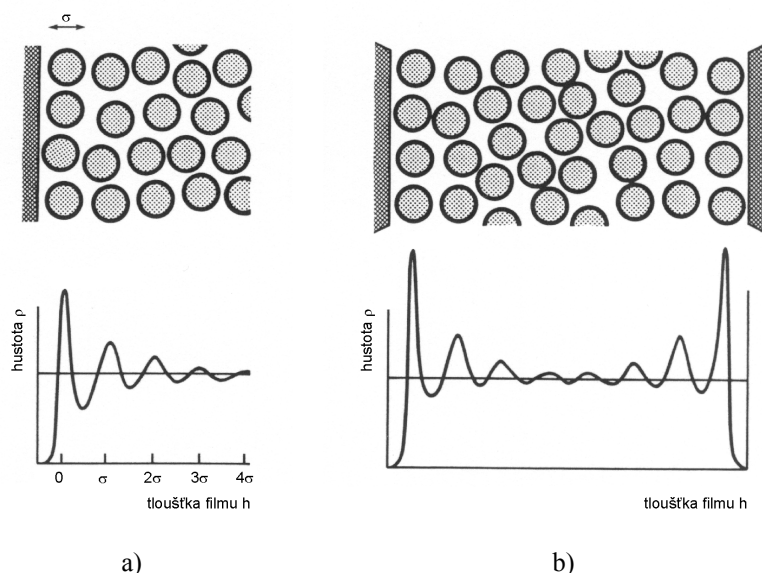
Na obr. 42 jsou znázorněny závislosti síly způsobené smáčivostí kapaliny a van der Waalsovy síly na tloušťce vrstvy kapaliny pro soustavu tvořenou koulemi a rovinnou deskou vzájemně oddělenými vrstvou oktamethylcyklotetrasiloxanu (geometrie soustavy odpovídá konfiguraci povrchů užitých v aparatuře popsané na str. 41) [139]. 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. Přímá experimentální měření van der Waalsových sil působících mezi povrchy oddělenými vrstvou elektrolytického roztoku, provedená v polovině sedmdesátých let, potvrdily platnost Lifshitzovy teorie [116]. Získané výsledky také ukázaly vliv retardačního jevu na velikost van der Waalsových sil při tloušťkách elektrolytu větších než 5 nm (obr. 43).



Obr. 42 Závislost síly způsobené smáčivostí kapaliny a van der Waalsovy síly na tloušťce vrstvy kapaliny pro soustavu tvořenou koulemi a deskou vzájemně oddělenými vrstvou OMCTS [139]

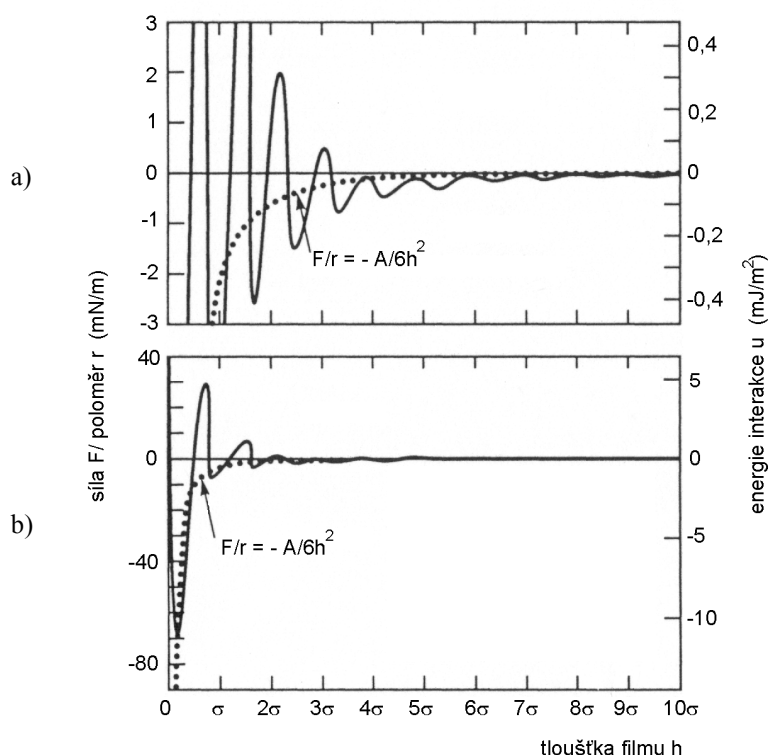


Obr. 43 Experimentálně zjištěná závislost van der Waalsovy síly na tloušťce vrstvy pro soustavu tvořenou dvěma zakřivenými slídovými povrchy o poloměru 1 cm a vrstvou elektrolytu [140]



Obr. 44 Změna hustoty kapaliny v blízkosti fázového rozhraní kapalina-pevná látka v případě [141]:  
 a) izolovaného rozhraní  
 b) dvou tuhých 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. 44a). 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 nacházejícího se mezi dvěma povrchy (obr. 44b). Existence strukturálních sil byla poprvé experimentálně prokázána R. G. Hornem a J. N. Israelachvilim [137], kteří roku 1981 změřili velikost sil působících mezi dvěma



Obr 45 Experimentálně zjištěná závislost strukturální síly na tloušťce vrstvy pro soustavu tvořenou dvěma zakřivenými slídovými povrchy o poloměru 1 cm a vrstvou OMCTS [137]. a) Detail částí závislosti. b) Celková závislost

slídovými povrchy oddělenými vrstvou oktamethylcyklotetrasiloxanu (obr. 45). Následující měření provedená s celou řadou povrchů a kapalin umožnila popsat vlastnosti strukturálních sil, které shrnul J. N. Israelachvili [142], [143]:

- a) U kapalin s inertními, přibližně kulovými a relativně tuhými molekulami, jako jsou např. cyklohexan a oktamethylcyklotetrasiloxan, je perioda oscilace strukturální síly rovna střednímu průměru molekuly  $\sigma$ .
- b) U homologických kapalin sestávající se z lineárních řetězců molekul, jako jsou např. n-oktan, n-tetradekan a n-hexadekan, je perioda oscilace strukturální síly rovna přibližně 0,4 nm, což odpovídá šířce molekulárního řetězce. Z toho plyne, že osy molekul jsou orientovány převážně rovnoběžně s povrchy.
- c) Kapaliny s krátkými řetězci molekul jako např. n-hexan a kapaliny s rozvětvenými řetězci molekul jako např. 2,2,4-trimethylpentan nevytvářejí kvazidiskrétní vrstvy uspořádaných molekul v blízkosti povrchů. Z tohoto důvodu se oscilace strukturální síly projevuje pouze do vzdálenosti (2 až 4)  $\sigma$ .
- d) Závislost strukturální síly na vzdálenosti vykazuje přibližně exponenciální útlum s součinitelem tlumení (1,2 až 1,7)  $\sigma$ .
- e) Při tloušťkách kapalinového filmu menších než 10  $\sigma$  může být strukturální síla větší než van der Waalsova síla, zatímco při větších tloušťkách jsou obě síly přibližně stejně velké.
- f) Kvalita povrchů má přibližně stejně veliký vliv na velikost a průběh strukturálních sil jako vlastnosti kapaliny. Molekuly kapaliny nacházející se v blízkosti povrchů majících pravidelnou krystalovou strukturu jsou uspořádány nejen v podélném, ale také v příčném směru, přičemž průběh strukturálních sil závisí na typu krystalové mřížky. V případě povrchů s náhodnou povrchovou nerovností nevykazuje průběh strukturálních sil prakticky žádné oscilace a je monotónní funkcí vzdálenosti.

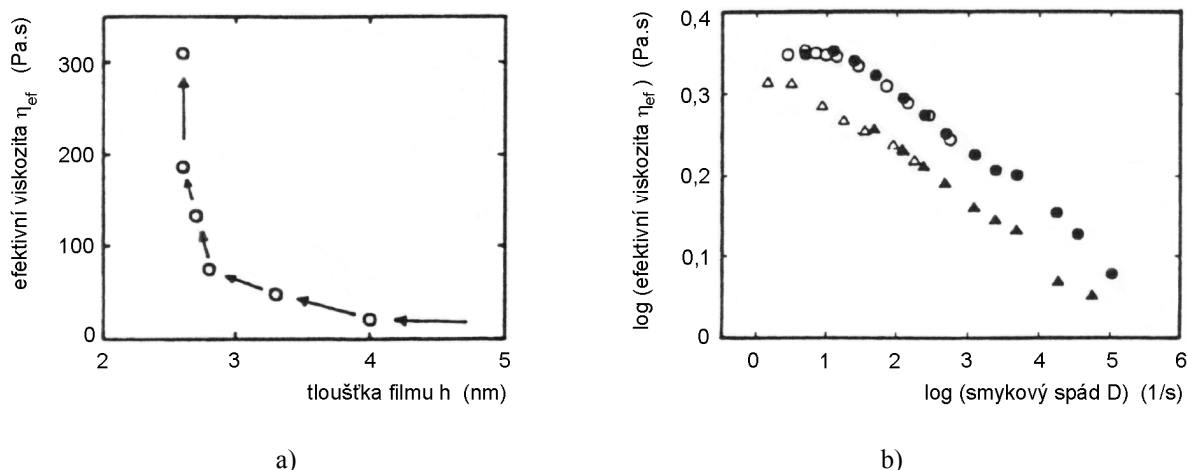
Je-li tloušťka vrstvy kapaliny, nacházející se mezi dvěma povrchy, (5 až 10)  $\sigma$ , není možné považovat kapalinu dále za homogenní kontinuum, jehož statické a dynamické vlastnosti jsou ve všech místech stejné. Tak jako se mění hustota kapaliny napříč filmem, dochází i ke změně její dynamické viskozity [144]. Protože je však zatím nemožné experimentálně stanovit viskozitní profil tenkého filmu, je výhodné zavést *efektivní viskozitu*  $\eta_{ef}$  jakožto průměrnou hodnotu napříč filmem. Efektivní viskozita musí splňovat Newtonovu rovnici

$$\tau = \eta_{ef} \frac{du}{dz} = \eta_{ef} D, \quad (18)$$

kde  $\tau$  je tečné napětí a  $D = du/dz$  je smykový spád, neboli gradient rychlosti ve směru kolmém na pohyb tekutiny. S. Granick a kol. studoval závislost efektivní viskozity na smykovém spádu u tenkých filmů tvořených dodekanem, oktamethylcyklotetrasiloxanem a hexadekanem [145]-[147]. K tomu použil experimentální zařízení pro měření povrchových sil umožňující oscilační příčný pohyb povrchů [148]. 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  $\eta_0$  (obr. 46a). Avšak se zvyšujícím se smykovým spádem nastává pokles efektivní viskozity, který je popsán mocninovou závislostí

$$\eta_{ef} \propto D^{-n}, \quad (19)$$

kde exponent  $n$  má podle Granicka hodnotu v rozmezí 0,5 až 1, nejčastěji však 2/3 (obr. 46b). Platnost rovnice (19) byla potvrzena několika dalšími autory [149]-[151], kteří se však jednoznačně neshodují

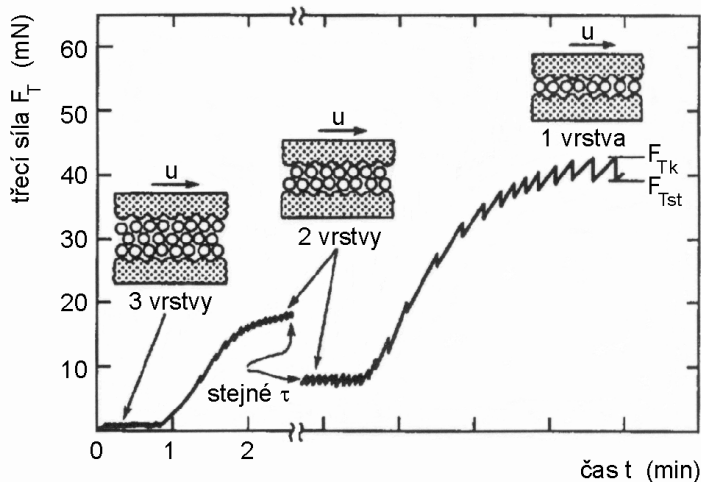


Obr. 46 Výsledky Granickových experimentů pro OMCTS a dodekan [146].

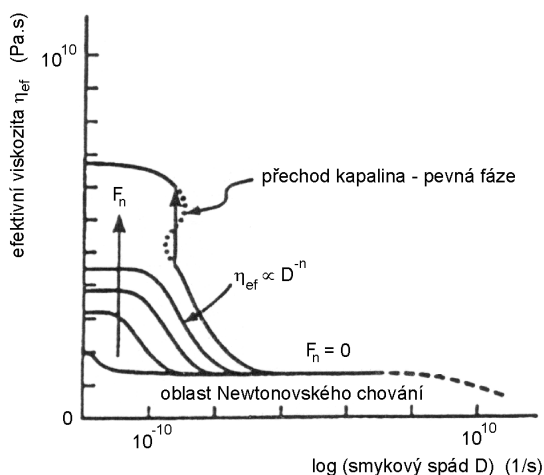
- a) Závislost efektivní viskozity na tloušťce mazacího filmu pro dodekan při nízkém smykovém spádu.  
 b) Závislost efektivní viskozity na smykovém spádu pro OMCTS (trojúhelníky) a dodekan (kroužky) při tloušťce filmu 2,7 nm

v otázce velikosti exponentu  $n$ . Podobné experimenty jako Granick provedl také J. N. Israelachvili a kol. [120], [123], který pozoroval při smyku dvou povrchů oddělených tenkou vrstvou cyklohexanu, resp. oktamethylcyklotetrasiloxanu (obr. 37) „kvantování“ tloušťky filmu projevující se skokem v časové závislosti třecí síly (efektivní viskozity) spojeným s náhlou změnou počtu molekulárních vrstev kapaliny. To je znázorněno na obr. 47, ze kterého je také zřejmé, že při smyku jsou povrchy vzájemně odděleny vždy celočíselným počtem molekulárních vrstev. Bylo rovněž zjištěno, že při tloušťkách filmu menších než  $5\sigma$  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 mnohokrát opakuje proces tuhnutí a tání. Makroskopicky se to projevuje trhavým smykovým pohybem označovaným jako stick-slip, který je příčinou oscilace třecí síly mezi její statickou  $F_{Tst}$  a kinetickou  $F_{Tk}$  hodnotou, jak je patrné na obr. 47. Všechny výše uvedené jevy vzal do úvahy při tvorbě tzv. zobecněné mapy tření znázorněné na obr. 48 G. Luengo a kol. [153].

H. Matsuoka a T. Kato [127], [128], [139] studovali chování oktamethylcyklotetrasiloxanu, cyklohexanu a  $n$ -hexadekanu mezi dvěma tečně se pohybujícími povrchy při mnohem realističtějších



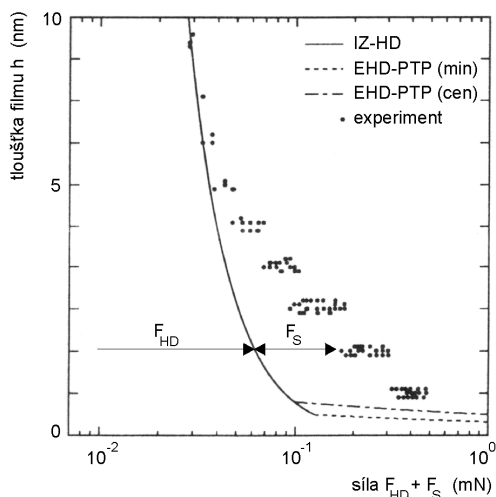
Obr: 47 Experimentálně zjištěná závislost třecí síly na čase pro soustavu dvou slídových povrchů vzájemně oddělených třemi molekulárními vrstvami OMCTS [152]. Součinitel tření zůstává konstantní, pokud je konstantní počet molekulárních vrstev



Obr. 48 Zobecněná mapa tření znázorněná jako závislost efektivní viskozity na smykovém spádu. V mapě je možno rozlišit tři hlavní oblasti: (1)  $F_n = 0$ ,  $\eta_{ef}$  je nezávislé na  $D$ . (2)  $F_n$  a  $D$  jsou malé,  $\eta_{ef}$  je nezávislé na  $D$ , avšak  $\eta_{ef} > \eta_0$ . (3)  $F_n$  je velké,  $D$  je malé,  $\eta_{ef}$  roste se zvyšujícím se  $F_n$  [153]

experimentálních podmínkách než Granick a Israelachvili (obr. 40). Jejich výsledky ukazují, že filmy tlustší jako  $10 \sigma$  se chovají v souladu s konvenční teorií elasto-hydrodynamického mazání. Při nižších tloušťkách filmu však byly u oktamethylcyklotetrasiloxanu a cyklohexanu pozorovány odchylky od teoretických hodnot mající podobu kvantování tloušťky filmu s hodnotou kvanta rovnou střednímu průměru molekuly  $\sigma$  (obr. 49). 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. [111] studoval reologické vlastnosti vytlačovaných filmů, tvořených jednoduchými kapalinami a roztoky polymerů, sevřených mezi koulí a deskou (obr. 39 a 41). 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  $\eta_0$ . 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  $\sigma$ , 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.



Obr. 49 Závislost tloušťky OMCTS filmu na vztlakové hydrodynamické a strukturální síle pro rychlost 0,2 mm/s (IZ-HD - hodnoty stanovené z teorie izoviskozně hydrodynamického mazání, EHD-PTP - hodnoty stanovené z teorie elasto-hydrodynamického mazání tuhých třecích povrchů, (min) - minimální tloušťka filmu, (cen) - centrální tloušťka filmu) [139]

# 3 STUDIUM TENKÝCH FILMŮ KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ

## 3.1 MĚŘICÍ APARATURA

Měřicí aparatura se skládá ze tří základních částí: simulátoru, mikroskopového zobrazovacího systému a řídicí a vyhodnocovací jednotky (obr. 50).

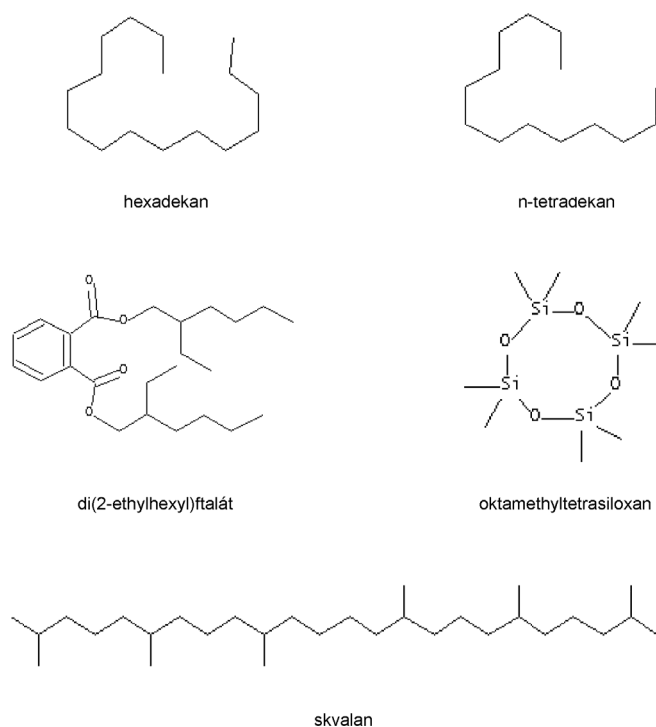
Princip simulátoru vychází z koncepce navržené R. Goharem [85] (viz str. 30). Tenký mazací film je vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou, přičemž osy rotace obou třecích povrchů jsou vzájemně kolmé. Horní strana kotouče je pokryta protiodrazovou vrstvou, spodní pak dvojnásobnou vrstvou chrómu a oxidu křemičitého. Kontakt je zatěžován přes skleněný kotouč, který je společně s pohyblivým závažím umístěn na dvojzvrtné 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



Obr. 50 Měřicí aparatura vyvinutá na Vysokém učení technickém v Brně





Obr. 51 Molekulární struktura kapalin použitých při experimentech [164]

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 [154] (viz str. 54 až 60). Úprava aparatury pro studium tenkých filmů spočívající v redukci otáček ocelové kuličky a použití xenonového vláknového zdroje světla je prezentována v publikaci [157] (viz str. 78 až 83). Doplnění mikroskopového zobrazovacího systému o sekundární dělič svazku a vláknový spektrometr je předmětem článku [158] (viz str. 84 až 92). Experimenty popsané v článcích [155] a [156] byly uskutečněny na měřicí aparatuře v Laboratoři kontaktní mechaniky na Lyonské vědeckotechnické univerzitě.

### 3.2 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). Geometrické rozměry a mechanické vlastnosti třecích povrchů jsou shrnuty v tab. 3 v článku [155] (str. 65) a v tab. 1 v článku [158] (str. 85). Optické vlastnosti vrstvy oxidu křemičitého jsou detailně popsány v článku [155] (viz str. 63 až 64).

V experimentech popsaných v člancích [155] až [158] byly použity následující kapaliny, které reprezentují zástupce jednotlivých skupin maziv:

- a) Di(2-ethylhexyl)ftalát (DOP)  $C_{24}H_{38}O_4$  [155], [156] je ester kyseliny ftalové patřící do skupiny diesterových olejů.
- b) Hexadekan  $C_{16}H_{34}$  [155]-[158] je lineární alkan.
- c) Izoparafinický základový ropný olej [156] 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 %) [156].
- e) Naftenický základový ropný olej [158] je alkylcykloalkán.
- f) N-tetradekan  $C_{14}H_{30}$  [157] je lineární alkan.
- g) Oktamethylcyklotetrasiloxan (OMCTS)  $[(CH_3)_2SiO]_4$  [157], [158] představuje jednoduchý silikonový olej (polysiloxan). Jedná se o inertní a téměř nepolární kapalinu.
- h) Skvalan  $C_{30}H_{62}$  [155], [156] je rozvětvený alkan.

Molekulární struktura výše uvedených kapalin je znázorněna na obr. 51, jejich reologické a optické vlastnosti jsou podrobně popsány v jednotlivých publikacích.

### 3.3 EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY

Všechny experimenty popsané v člancích [155] až [158] byly provedeny při kontaktním tlaku kolem 0,5 GPa. Rychlosti třecích povrchů byly stanoveny podle rovnice (10) 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.

### 3.4 KOLORIMETRICKÁ INTERFEROMETRIE

Kolorimetrická interferometrie [159] byla vyvinuta nezávisle na L. Gustafssonovi a kol. [105] (viz str. 36), 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 [160], 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 [161].

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 (viz str. 30 a 36). Postup měření tenkého filmu je následující:

- a) Na místě, kde je kotouč pokryt pouze vrstvou chrómu je sejmuto 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 chromu 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 [154] (viz str. 54 až 60). Princip měřicí metody je vyložen v článcích [154] (viz str. 55), [155] (viz str. 62 a 63) a [156] (viz str. 72 až 73), kde jsou i příslušné ilustrace. Při měření filmů tenčích jako 20 nm je postup měření dále modifikován, jak je popsáno v článku [158] (viz str. 90). Rozlišitelnost takto upravené měřicí metody je 1 nm, prostorová rozlišitelnost je 1,2  $\mu\text{m}$ .

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 [162]. Postup ověření je podrobně popsán v článcích [155] (viz str. 65 až 67) a [156] (viz str. 73). Opakovatelnost měření je demonstrována v článku [158] (viz str. 89 a 90).

### 3.5 PROUŽKY STEJNÉHO CHROMATICKÉHO ŘÁDU

Použití proužků stejného chromatického řádu pro měření tlouštěk velmi tenkých kapalinových filmů bylo popsáno v kap. 2.2. Princip užití metody vychází z práce G. J. Johnstona a kol. [83], 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  $\lambda_0$  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  $\lambda$  při které nastává interferenční maximum.
- f) Výpočet centrálních tlouštěk filmu  $h_c$  pro jednotlivé rychlosti třecích povrchů z vlnových délek  $\lambda_0$  a  $\lambda$  podle rovnice (9).

Podrobný popis měřicí metody včetně obrázků sejmutých spekter se nachází v článku [158] (viz str. 86 až 89). Tamtéž je popsáno ověření správnosti a opakovatelnosti provedených měření (viz str. 89). Rozlišitelnost metody je lepší jako 1 nm, prostorová rozlišitelnost je 2,5  $\mu\text{m}$ .

### 3.6 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 [158] (viz str. 89 až 92) 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 prouzcích 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).

### 3.7 VÝSLEDKY

Výsledky experimentů publikované v člancích [155] až [158] jsou prezentovány ve formě závislosti centrální, resp. minimální tloušťky mazacího filmu na průměrné rychlosti třecích povrchů. Je-li tato závislost znázorněna v logaritmických souřadnicích (viz str. 32), lze podle jejího tvaru rozdělit výsledky do dvou skupin:

- a) Závislost je v celém rozsahu měření lineární. Takovéto chování bylo pozorováno u hexadekanu (viz [156] obr. 5 na str. 74) a izoparafínického (viz [156] obr. 7 na str. 74) a naftenického (viz [158] obr. 6 na str. 89 a 90) 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 rovnic (4) a (5). Tento typ chování lze dále klasifikovat do dvou skupin:
  - ba) S klesající rychlostí třecích povrchů se tloušťka filmu asymptoticky blíží k tloušťce mezní (imobilní) vrstvy. Ta může být tvořena buď vrstvami uspořádaných molekul o vysoké viskozitě ulpívajících na třecích površích (viz str. 32) jako je tomu v případě skvalanu (viz [156] obr. 6 na str. 74) nebo vrstvami zušlechťujících přísad adsorbovaných na třecích površích jako je tomu u aditivovaného izoparafínického základového ropného oleje (viz [156] obr. 8 na str. 74). Hodnota  $h_{krit}$  pro skvalan je 12 nm, pro aditivovaný izoparafínický 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 (viz [157] obr. 3 na str. 82 a [158] obr. 9 na str. 91) a n-tetradekanu (viz [157] obr. 4 na str. 82). 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 (10) odhadnout pomocí metody nejmenších

čtverců hodnotu viskozitně-tlakového koeficientu  $\alpha$ . Tento koeficient definovaný na základě Barusova vztahu [163] jako

$$\alpha = \frac{d}{dp} \ln \left( \frac{\eta}{\eta_0} \right), \quad (20)$$

umožňuje stanovit, jak se dynamická viskozita kapaliny  $\eta$  mění s tlakem  $p$ . To je zvláště důležité u elastohydrodynamického mazání, kde  $h_c \propto \alpha^{0.53}$ . Velikost viskozitně-tlakového součinitele závisí především na molekulární struktuře kapaliny, její teplotě, a za určitých podmínek také na tlaku. U většiny kapalných maziv se při pokojové teplotě pohybuje mezi 5 až 35 GPa<sup>-1</sup>. Vypočtené hodnoty viskozitně-tlakového součinitele pro di(2-ethylhexyl)ftalát, hexadekan a skvalan jsou uvedeny v tab. 4 v článku [156] (viz str. 75) společně s hodnotami nalezenými v literatuře. Z tabulky je zřejmá velmi dobrá shoda, jak s výsledky získanými pomocí vysokotlaké reometrie, tak i s výsledky odvozenými z interferometrických měření centrální tloušťky.

Předpoklady zavedené v kap. 2.2 (viz str. 32) týkající se vstupní oblasti kontaktu umožňují použití rovnici (10) také k výpočtu efektivní viskozity  $\eta_{ef}$ , která byla definována v kap. 2.3 (viz str. 45). V případě hexadekanu a obou základových ropných olejů je evidentně  $\eta_{ef} = \eta_0$ , z čehož plyne, že nedochází k utváření mezního filmu v kontaktu. To sice dobře koresponduje s výsledky experimentů získanými na obdobné měřicí aparatuře a za podobných experimentálních podmínek [90], [91] (viz str. 32), avšak již nikoli s výsledky měření pomocí metody povrchových sil [147] (viz str. 45). Příčinou může být buď vysoká hodnota smykového spádu (kolem 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>) nebo skutečnost, že použitá kulička nemá atomicky hladký povrch. U skvalanu a u aditivovaného izoparafínického základového ropného oleje byl pozorován několikanásobný nárůst efektivní viskozity s klesající tloušťkou filmu, jak je patrné z obr. 13 v článku [155] (viz str. 69), resp. obr. 10 v článku [156] (viz str. 75). 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  $\sigma$ .

U kapalin vykazujících při nízkých rychlostech třecích povrchů nelineární chování byla pomocí metody nejmenších čtverců stanovena z rovnice (11) celková tloušťka mezní vrstvy  $h'$ , přičemž za centrální tloušťku elastohydrodynamického filmu  $h_c^{EHD}$  bylo dosazeno z rovnice (10). Postup a výsledky výpočtu jsou popsány v článku [156] (viz str. 75 a 76). Bylo zjištěno, že skvalan, oktamethylcyklotetrasiloxan a n-tetradekan vytvářejí na každém z třecích povrchů mezní film mající podobu monomolekulární vrstvy vysoce viskosní kapaliny. Přítomnost tohoto filmu v kontaktu byla pozorována pouze při pohybu třecích povrchů, nikoli však za statických podmínek. U aditivovaného izoparafínického základového ropného oleje je mezní 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 na obr. 8 a 9 v článku [155] (viz str. 66). Z obrázků je zřejmá změna tvaru mazacího filmu s rychlostí třecích povrchů: Zatímco při vyšších rychlostech jsou dobře patrné základní znaky elastohydrodynamického kontaktu (viz str. 18), jako např. podkovovitá konstriktce, s klesající rychlostí dochází k jejich postupnému zeslabování, přičemž se mění i poloha minima tloušťky. Obrázek 9 v článku [156] (viz str. 75) pak ukazuje vliv zušlechťujících přísad na tloušťku a tvar mazacího filmu, jejichž přítomnost v základovém ropném oleji vede při rychlostech třecích povrchů menších jako 0,03 m.s<sup>-1</sup> k nárůstu tloušťky filmu.

## 4 ZÁVĚR

Tato 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 rozhraní kapalina-pevná fáze za vysokých tlaků;
- c) fyzikální vlastnosti a kinetika utváření mezních 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.

Rozsah práce neumožnil zabývat se celou řadou dalších měřicích metod, jako např. mikroskopií využívající interakci meziatomových sil (AFM), transmisní elektronovou mikroskopií o vysoké rozlišitelnosti (HRTEM) či rentgenovou absorpční spektroskopií vazebních stavů (XANES), jejichž užití u tenkých filmů se zdá být sice mimořádně nadějně, avšak zatím se omezuje pouze na základní výzkum. Prostor také nemohl být věnován metodám výpočtového modelování, z nichž bezesporu nejzajímavější je molekulární dynamická simulace (MDS).

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 [155], [156]. 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  $\mu\text{m}$ , maximální počet vyhodnocovaných bodů je 250 000.

- b) Pro měření centrální tloušťky mazacího filmu bylo v některých případech užito proužků stejného chromatického řádu [158]. 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  $\log h = \log f(u)$  [156], [158]. 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 [155]-[158].
- 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 souvisí se třením, a tím i se spotřebou paliva. Budoucí práce budou zaměřeny zejména na výzkum vlivu povrchových nerovností na chování tenkých mazacích filmů.

# SUMMARY

This work is 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 (Chapter 1.1), classification of different lubrication regimes (Chapter 1.2) and description of boundary (Chapter 1.3), elastohydrodynamic (Chapter 1.4) and mixed (Chapter 1.5) 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 (Chapter 2.1). Two main experimental techniques for studying ultrathin lubricating films – ultrathin film interferometry and surface forces balances are described in Chapters 2.2 and 2.3. 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.



# SEZNAM LITERATURY

- [1] Lubrication (Tribology) Education and Research. A Report on the Present Position and Industry's Needs. London, Department of Education and Science HMSO 1966.
- [2] CZICHOS, H.: Tribology (A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear). Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company 1978, s. 45-175.
- [3] PETERSON, M. B.-KOURY, A. J.: Tribological Failures and Mechanical Design. In: Tribological Technology Volume II. Hague, Martinus Nijhoff Publishers 1982, s. 499-534.
- [4] GÜMBEL, L.: Das Problem der Lagerreibung. Monatsblätter d. Berliner Bezirksvereines Deutscher Ingenieure (VDI), 1914, s. 87-104 a s. 109-120.
- [5] BEERBOWER, A.: Boundary Lubrication. In: GRU.IGBEN.72 – Report on Scientific and Technical Forecast, 1972.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] SPIKES, H. A.: Boundary Lubricating Films. In: Proceedings of the International Tribology Conference Yokohama 1995. Tokyo, JSL 1995, s. 49-54.
- [9] HAMROCK, B. J.: Fundamentals of Fluid Film Lubrication. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, s. 42.
- [10] GOHAR, R.: Elastohydrodynamic. Chichester, Ellis Horwood Limited 1988, s. 32.
- [11] BHUSHAN, B.-GUPTA, B. K.: Handbook of Tribology (Materials, Coatings, and Surface Treatments). New York, McGraw-Hill, Inc. 1991, s. 2.32.
- [12] HARDY, W. B.-DOUBLEDAY, I.: Boundary Lubrication – the Paraffin Series. Proceedings of the Royal Society of London, A100, 1922, s. 550-574.
- [13] 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.
- [14] KINGSBURY, A.: A New Oil-Testing Machine and some of its Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), 24, 1903, s. 143-160.
- [15] LANGMUIR, I.: The Mechanism of the Surface Phenomena of Flotation. Faraday Society Transactions, 15, 1920, s. 62-74.
- [16] BAILEY, A.-COURTENAY PRATT, J. S.: The Area of Real Contact and the Shear Strength of Monomolecular Layers of a Boundary Lubricant. Proceedings of the Royal Society of London, A227, 1955, s. 500-515.

- [17] ADAMSON, A. W.: Physical Chemistry of Surfaces. New York, John Wiley & Sons 1967.
- [18] LEVINE, O.-ZISMAN, W. A.: Physical Properties of Monolayers Adsorbed at the Solid Interface. I. Wettability of Aliphatic Polar Compounds and the Effect of Halogenation. The Journal of Chemical Physics, 61, 1957, s. 1068-1077.
- [19] MOUGEY, H. C.-ALMEN, J. O.: Extreme Pressure Lubricants. Automotive Industries, 65, 1931, s. 758-761.
- [20] DAVEY, W.-EDWARDS, E. D.: The Extreme Pressure Lubricating Properties of Some Sulphides and Disulphides in Mineral Oil as Assessed by the Four Ball Machine. Wear, 1, s. 291-304.
- [21] BEECK, O.-GIVENS, J. W.-WILLIAMS, E. C.: On the Mechanism of Boundary Lubrication. II. Wear Prevention by Addition Agents. Proceedings of the Royal Society of London, A177, 1940, s. 103-118.
- [22] ISOYAMA, H.-SAKURAI, T.: The Lubricating Mechanism of Di-thio-dithio-bis(diethylthio-carbamate)dimolybdenum during EP Lubrication. Tribology International, 7, 1974, s. 151.
- [23] CZICHOS, H.: Tribology (A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear). Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company 1978, s. 163.
- [24] SPIKES, H. A.: Some Challenges to Tribology Posed by Energy Efficient Technology. In: Tribology for Energy Conservation (Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B.V. 1998, s. 35-46.
- [25] HERTZ, H.: Ueber die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, 1881, s. 156-171.
- [26] 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.
- [27] MARTIN, H. M.: Lubrication of Gear Teeth. Engineering, 102, 1916, s. 119-121.
- [28] PEPLER, W.: Untersuchungen über die Druckübertragung bei belastetem und geschmierten unclaufenden achsparallelen Zylindern. In: Maschinenelemente-Tatung Aachen. Berlin, VDI Verlag 1935.
- [29] MELDAHL, A.: Contribution to the Theory of the Lubrication of Gears and of the Stressing of the Lubricated Flanks of Gear Teeth. Brown Boveri Review, 28, 1941, s. 374.
- [30] GATOMBE, E. K.: Lubrication Characteristics of Involute Spur-gears – a Theoretical Investigation. Transactions American Society of Mechanical Engineers, 67, 1945, s. 177.
- [31] GRUBIN, A. N.: Fundamentals of the Hydrodynamic Theory of Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces. In: Investigation of the Contact of Machine Components (Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering Book No. 30). Moscow, Gosud. Nauch-Tekh. Izdat. Mash. Lit. 1949, s. 118-196.
- [32] PETRUSEVIČ, A. I.: Osnovnye vyvody iz kontaktno-gidrodinamičeskoj teorii smazki. Izv. AN SSSR. OTN, 2, 1951, s. 209-223.
- [33] WEBER, C.-SAALFELD, K.: Schmierfilm bei Walzen mit Verformung. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 34, 1954, s. 54.
- [34] DOWSON, D.-HIGGINSON, G. R.: A Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Problem. Journal of Mechanical Engineering Science, 1, 1959, s. 6-15.
- [35] DOWSON, D.-HIGGINSON, G. R.-WHITAKER, A. V.: Elasto-hydrodynamic Lubrication: A Survey of Isothermal Solutions. Journal Mechanical Engineering Science, 4, 1962, s. 121-162.

- [36] PAN, P.-HAMROCK, B. J.: Simple Formulae for Performance Parameters Used in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 108, 1989, s. 246-251.
- [37] CROOK, A. W.: Elastohydrodynamic Lubrication of Rollers. Nature, 190, 1961, s. 1182.
- [38] KANNEL, J. W.: Measurements of Pressures in Rolling Contact. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, Part 3B, 180, 1965, s. 135.
- [39] HAMILTON, G. M.-MOORE, S. L.: Deformation and Pressure in an Elastohydrodynamic Contact. Proceedings of the Royal Society of London, A337, 1974, s. 101-121.
- [40] GOHAR, R.: Elastohydrodynamic. Chichester, Ellis Horwood Limited 1988, s. 147.
- [41] ARCHARD, J. F.-KIRK, M. T.: Lubrication at Point Contacts. Proceedings of the Royal Society of London, A261, 1961, s. 535-550.
- [42] KIRK, M. T.: Hydrodynamic Lubrication of 'Perspex'. Nature, 194, 1962, s. 965-966.
- [43] GOHAR, R.-CAMERON, A.: Optical Measurement of Oil Film Thickness under Elastohydrodynamic Lubrication. Nature, 200, 1963, s. 458-459.
- [44] CAMERON, A.-GOHAR, R.: Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contact. Proceedings of the Royal Society of London, A291, 1966, s. 520-536.
- [45] ARCHARD J. F.-COWKING F. W.: Elastohydrodynamic Lubrication at Point Contacts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3B, 180, 1965-1966, s. 47-56.
- [46] CHENG, H. S.: A Numerical Solution of the Elastohydrodynamic Film Thickness in an Elliptical Contact. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 92, 1970, s. 155-162.
- [47] RANGER A. P.-ETTLES C. M. M.-CAMERON A.: The Solution of the Point Contact Elastohydrodynamic Problem. Proceedings of the Royal Society of London, A346, 1975, s. 227-244.
- [48] HAMROCK B. J.-DOWSON D.: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part I – Theoretical Formulation. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, 1976, s. 223-229.
- [49] HAMROCK B. J.-DOWSON D.: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II – Ellipticity Parameter Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, 1976, s. 375-383.
- [50] HAMROCK B. J.-DOWSON D.: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part III – Fully Flooded Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 99, 1977, s. 264-276.
- [51] HAMROCK B. J.-DOWSON D.: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV – Starvation Results. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 98, 1977, s. 15-23.
- [52] GOHAR, R.: Elastohydrodynamic. Chichester, Ellis Horwood Limited 1988, s. 156.
- [53] KAPITZA, P. L.: Gidrodinamičeskaja teorija smazki pri kačenii. Žurnal tehničeskoj fiziki, 25, 1955, s. 747-762.
- [54] BLOK, H.: Discussion of Paper by E. McEwen. Institute of Petroleum Journal, 38, 1952, s. 67.
- [55] HERREBRUGH, K.: Solving the Incompressible and Isothermal Problem in Elastohydrodynamic Lubrication Through an Integral Equation. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 90, 1968, s. 262-270.

- [56] HAMROCK B. J.-DOWSON D.: Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts for Materials of Low Elastic Modulus, Part I – Fully Flooded Conjunction. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, 100, 1978, s. 236-245.
- [57] MOES, H.: Communications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3B, 180, 1965-1966, s. 244-245.
- [58] JOHNSON, K. L.: Regimes of Elastohydrodynamic Lubrication. Journal of Mechanical Engineering Science, 12, 1970, s. 9-16.
- [59] HAMROCK, B. J.-DOWSON, D.: Minimum Film Thickness in Elliptical Contacts for Different Regimes of Fluid-Film Lubrication. In: Elastohydrodynamics and Related Topics (Proceedings of the 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). London, Mechanical Engineering Publications Limited. 1979, s. 22-27.
- [60] ESFAHANIAN, M.- HAMROCK, B. J.: Fluid-Film Lubrication Regimes Revisited. Tribology Transactions, 34, 1991, s. 618-632.
- [61] LUBRECHT, A. A.: The Numerical Solution of Lubricated Line and Point Contact Problem Using Multigrid Techniques. Ph.D. Thesis, University of Twente 1987.
- [62] NIJENBANNING, G.-VENNER, C. H.-MOES, H.: Film Thickness in Elastohydrodynamically Lubricated Elliptic Contacts. Wear, 176, 1994, s. 217-229.
- [63] SPIKES, H. A.: Mixed Lubrication – an Overview. Lubrication Science, 9, 1997, s. 221-253.
- [64] ELORD, H. G.: A Review of Theories of the Fluid Dynamic Effects of Roughness on Laminar Lubricating Films. In: Surface Roughness Effects in Lubrication (Proceedings of the 4th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). London, Mechanical Engineering Publications Limited. 1978.
- [65] JOHNSON, K. L.-GREENWOOD, J. A.-POON, S. Y.: A Simple Theory of Asperity Contact in Elastohydrodynamic Lubrication. Wear, 19, 1972, s. 91-108.
- [66] KWEH, C. C.-EVANS, H. P.-SNIDLE, R. W.: Micro-elastohydrodynamic Lubrication of an Elliptical Contact with Transverse and Three-dimensional Sinusoidal Roughness. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 111, 1989, s. 577-584.
- [67] CHANG, L.-WEBSTER, M. N.: A Study of Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 113, 1991, s. 110-115.
- [68] CHANG, L.-WEBSTER, M. N.-JACKSON, A.: On the Pressure Rippling and Roughness in Elastohydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, 115, 1993, s. 438-444.
- [69] TALLIAN, T. E.-CHIU, Y. P.-HUTTENLOCHER, D. F.-KAMENSHINE, J. A.-SIBLEY, L. B.-SINDLINGER, N. E.: Lubricant Films in Rolling Contact of Rough Surfaces. ASLE (the American Society of Lubrication Engineers) Transactions, 7, 1964, s. 109-124.
- [70] GREENWOOD, B. P.-WILLIAMSON J. B. P.: Contact of Nominally Flat Surfaces. Proceedings of the Royal Society of London, A295, 1966, s. 300.
- [71] PATIR, N.-CHENG, H. S.: Effect of Surface Roughness Orientation on the Central Film Thickness in E.H.D. In: Elastohydrodynamic and Related Topics (Proceedings of the 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). London, Mechanical Engineering Publications Limited. 1979, s.15-21.

- [72] PATIR, N.-CHENG, H. S.: An Average Flow Model for Determining Effects of Three-dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Engineering, 100, 1978, s. 12-18.
- [73] GREENWOOD, B. P.-TRIPP, J. H.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3B, 185, 1971-1966, s. 623.
- [74] PEBLENIK, J.: New Developments in Surface Characterisation and Measurement by Means of Random Process Analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3K, 182, 1967-1968, s. 108.
- [75] CHANG, L.: A Deterministic Model for Line Contact Partial Elastohydrodynamic Lubrication. Tribology International, 28, 1995, s. 75-84.
- [76] JIANG, X.-HUA D. Y.-CHENG, H. S.-AI, X.-LEE, SI. C.: A Mixed Elastohydrodynamic Lubrication Model with Asperity Contact. ASME (the American Society of Mechanical Engineering) Paper 98-TRIB-54, 1998.
- [77] CZICHOS, H.: Untersuchungen über die Verteilung Metallischer und Nichtmetallischer Kontaktenteile bei Mischreibung. Wear, 17, 1971, s. 209-217.
- [78] SCHIPPER, D. J.-DE GEE, A. W. J.: Lubrication Modes and the IRG Diagram. Lubrication Science, 8, 1995, s. 27-35.
- [79] JACKSON, A.-CAMERON, A.: An Interferometric Study of the EHL of Rough Surfaces. ASLE (the American Society of Lubrication Engineers) Transactions, 19, 1976, s. 50-60.
- [80] DOWSON, D.: Developments in Lubrication – the Thinning Film. Journal of Applied Physics D, 25, 1992, s. A334-A339.
- [81] DOWSON, D.: Thin Films in Tribology. In: Thin Films in Tribology (Proceedings of the 19th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Amsterdam, Elsevier Science B.V. 1993, s. 3-12.
- [82] ISRAELACHVILI, J. N.: Thin Film Studies Using Multiple-Beam Interferometry. Journal of Colloid and Interface Science, 44, 1973, s. 259-271.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] EHL Ultra Thin Film Measurement System. London, PCS Instruments.
- [90] GUANGTENG, G.-SPIKES, H. A.: Boundary Film Formation by Lubricant Base Fluids. Tribology Transactions, 39, 1996, s. 448-454.
- [91] 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.

- [92] GUANGTENG, G.-SPIKES, H. A.: Fractionation of Liquid Lubricants at Solids Surfaces. *Wear*, 200, 1996, s. 336-345.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] SPIKES, H. A.: Direct Observation of Boundary Layers. *Langmuir*, 12, 1996, s. 4567-4573.
- [96] SMEETH, M.-SPIKES, H.-GUNSEL, S.: Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers. *Tribology Transactions*, 39, 1996, s. 726-734.
- [97] 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.
- [98] GUNSEL, S.-SPIKES, H. A.-ADERIN, M.: In-Situ Measurement of ZDDP Films in Concentrated Contacts. *Tribology Transactions*, 36, 1993, s. 276-282.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] GUANGTENG, G.-SPIKES, H. A.: The Control of Friction by Molecular Fractionation of Base Fluid Mixtures at Metal Surfaces. *Tribology Transactions*, 40, 1997, s. 461-469.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] 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.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] 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.
- [109] 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.

- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] ISRAELACHVILI, J. N.: Measurement of the Viscosity of Liquids in Very Thin Films. *Journal of Colloid and Interface Science*, 110, 1986, s. 263-271.
- [113] ISRAELACHVILI, J. N.-MCGUIGGAN, P. M.-HOMOLA, A. M.: Dynamic Properties of Molecularly Thin Liquid Films. *Science*, 240, 1988, s. 189-191.
- [114] TOMLINSON, G. A.: Molecular Cohesion. *Philosophical Magazine*, 6, 1928, s. 695-712.
- [115] BRADLEY, R. A.: The Cohesive Force between Solid Surfaces and the Surface Energy of Solid. *Philosophical Magazine*, 13, 1932, s. 853-862.
- [116] 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.
- [117] ISRAELACHVILI, J. N.-ADAMS, G. E.: Direct Measurement of Long Range Forces between Two Mica Surfaces in Aqueous KNO<sub>3</sub> Solutions. *Nature*, 262, 1976, s. 774-776.
- [118] ISRAELACHVILI, J. N.-PASHLEY, R. M.: Measurement of the Hydrophobic Interaction between 2 Hydrophobic Surfaces in Aqueous-electrolyte Solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 98, 1984, s. 500-514.
- [119] ISRAELACHVILI, J. N.-TABOR, D.: The Shear Properties of Molecular Films. *Wear*, 24, 1973, s. 386-390.
- [120] ISRAELACHVILI, J. N.-MCGUIGGAN, P. M.-HOMOLA, A. M.: Dynamic Properties of Molecularly Thin Liquid Films. *Science*, 240, 1988, s. 189-191.
- [121] ISRAELACHVILI, J. N.: Direct Measurement of Forces between Surfaces in Liquid at the Molecular Level. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 84, 1987, s. 4722-4724.
- [122] PARKER, J. L.-CHRISTENSON, H. K.-NINHAM, B. W.: A Device for Measuring the Force and Separation between 2 Surfaces down to Molecular Separations. *Review of Scientific Instrument*, 60, 1989, s. 3135-3138.
- [123] GEE, M. L.-MCGUIGGAN, P. M.-ISRAELACHVILI, J. N.: Liquid to Solidlike Transitions of Molecularly Thin Films under Shear. *Journal of Chemical Physics*, 93, 1990, s. 1895-1906.
- [124] Mark IV Surface Forces Apparatus and Attachments. Canberra, Australian National University.
- [125] GEORGES, J. M.-TONCK, A.-MAZUYER, D.: Interfacial Friction of Wetted Monolayers. *Wear*, 175, 1994, s. 59-62.
- [126] TONCK, A.-HOUZE, F.-BOYER, L.-LOUBET, J. L.- GEORGES, J. M.: Electrical and Mechanical Contact between Rough Gold Surfaces in Air. *Journal of Physics-Condensed Matter*, 3, 1991, s. 5195-5201.
- [127] 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.
- [128] 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.
- [129] 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.

- [130] FISHER, L. R.-ISRAELACHVILI, J. N.: Direct Measurement of the Effect of Meniscus Forces on Adhesion: A Study of the Applicability of Macroscopic Thermodynamics to Microscopic Liquid Interfaces. *Colloids and Surfaces*, 3, 1981, s. 303-319.
- [131] ISRAELACHVILI, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*. London, Academic Press Limited 1997, s. 332.
- [132] ISRAELACHVILI, J. N.: The Forces between Surfaces. *Philosophical Magazine A*, 43, 1981, s. 753-770.
- [133] LIFSHITZ, E. M.: The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids. *Soviet Physics*, 2, 1956, s. 73-83.
- [134] HOUGH, D. B.-WHITE, L. R.: The Calculation of Hamaker Constants from Lifshitz Theory with Applications to Wetting Phenomena. *Advances in Colloid and Interface Science*, 14, 1980, s. 3-41.
- [135] ISRAELACHVILI, J. N.: The Calculation of van der Waals Dispersion Forces between Macroscopic Bodies. *Proceedings of the Royal Society of London*, A331, 1972, s. 39-55.
- [136] PRIEVE, D. C.-RUSSEL, W. B.: Simplified Predictions of Hamaker Constants from Lifshitz Theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 125, 1988, s. 1-13.
- [137] 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.
- [138] DĚRJAGUIN, B. V.: *Kolloidnyj žurnal*, 69, 1934, s. 155-164.
- [139] 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.
- [140] ISRAELACHVILI, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*. London, Academic Press Limited 1997, s. 197.
- [141] ISRAELACHVILI, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*. London, Academic Press Limited 1997, s. 262.
- [142] ISRAELACHVILI, J. N.: Solvation Forces and Liquid Structure, As Probed by Direct Force Measurement. *Accounts of Chemical Research*, 20, 1987, s. 415-421.
- [143] ISRAELACHVILI, J. N.: *Intermolecular and Surface Forces*. London, Academic Press Limited 1997, s. 269.
- [144] 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.
- [145] VAN ALSTEN, J.-GRANICK, S.: Molecular Tribometry of Ultrathin Liquid Films. *Physical Review Letters*, 61, 1988, s. 2570-2573.
- [146] GRANICK, S.: Motions and Relaxations of Confined Liquids. *Science*, 253, 1991, s. 1374-1379.
- [147] CARSON, G.-HU, H.-GRANICK, S.: Molecular Tribology of Fluid Lubrication: Shear Thinning. *Tribology Transactions*, 35, 1992, s. 405-410.
- [148] 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.
- [149] THOMPSON, P. A.-GREST, G. S.-ROBBINS, M. O.: Phase Transitions and Universal Dynamics in Confined Films. *Physical Review Letters*, 68, 1992, s. 3448-3451.
- [150] RABIN, Y.-HERSHT, I.: Thin Liquid Layers in Shear – Non-newtonian Effects. *Physica A*, 200, 1993, s. 708-712.



- [151] URBACH, M.-DAIKHIN, L.-KLAFTER, J.: Dynamics of Confined Liquids under Shear. *Physical Review E*, 51, 1995, s. 2137-2141.
- [152] ISRAELACHVILI, J. N.: Interfacial Forces. *Journal of Vacuum Science and Technology A-Vacuum Surfaces and Films*, 10, 1992, s. 2961-2971.
- [153] LUENGO, G.-ISRAELACHVILI, J. N.-GRANICK, S.: Generalized Effects in Confined Fluids: New Friction Map for Boundary Lubrication. *Wear*, 200, 1996, s. 328-335.
- [154] 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.
- [155] 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.
- [156] 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.
- [157] 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.
- [158] 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.
- [159] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-LIŠKA, M.: Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of Chromatic Interference Patterns. *Optical Engineering*, 36, 1997, s. 2384-2391.
- [160] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK R.-LIŠKA M.: Computer-Aided Chromatic Interferometry. *Computer & Graphics*, 22, 1998, s. 203-208.
- [161] 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.
- [162] 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.
- [163] BARUS, C.: Isotherms, Isopiestic, and Isometrics Relative to Viscosity. *America Journal of Science*, 45, 1893, s. 87-96.
- [164] The Dictionary of Commonly Cited Compounds [online]. Londýn, CRC Press LLC 2002. Dostupné na World Wide Web: <http://www.chemnetbase.com/>.