

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

**STUDIUM ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ
BODOVÝCH KONTAKTŮ STROJNÍCH SOUSTAV**

**THE ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION STUDY
OF POINT CONTACTS OF MACHINE ELEMENTS**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

elastohydrodynamické mazání, kolorimetrická interferometrie, tloušťka mazacího filmu, tvar mazacího filmu

KEY WORDS

elastohydrodynamic lubrication, colorimetric interferometry, lubricant film thickness, lubricant film shape

MÍSTO ULOŽENÍ HABILITAČNÍ PRÁCE

Areálová knihovna FSI VUT v Brně

©2002 Ivan Křupka
ISBN 80-214-2223-8
ISSN 1213-418X

Obsah

1 ÚVOD	5
2 KAPALINOVÉ MAZÁNÍ	6
2.1 Režimy kapalinového mazání bodových kontaktů nekonformních těles.....	7
2.1.1 Bezrozměrné parametry	8
2.1.2 Mapy režimů kapalinového mazání.....	9
3 TEORETICKÉ STUDIE ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ	10
4 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ	13
5 STUDIUM ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ DIFFERENCIÁLNÍ A KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ.....	18
5.1 Tvar elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhových kontaktech	18
5.2 Centrální a minimální tloušťka elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhových kontaktech.....	19
5.3 Centrální a minimální tloušťka elastohydrodynamického mazacího filmu v eliptických kontaktech	21
SHRNUTÍ	22
LITERATURA.....	23

Ivan Křupka se narodil 20. května 1967 v Liptovském Mikuláši.

V letech 1985–1990 studoval na Fakultě strojní VUT v Brně, obor stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu. Po dvouměsíční praxi v První brněnské strojírně a absolvování vojenské prezenční služby byl v roce 1991 přijat do interního doktorského postgraduálního studia na Fakultu strojní VUT v Brně. Zde se zaměřil na experimentální studium elastohydrodynamického mazání a za dosažené výsledky obdržel v roce 1993 cenu „Talent 92“ – Cenu ministra školství, mládeže a tělovýchovy České republiky za mimořádné výsledky v oblasti výzkumu.



V roce 1995 nastoupil jako odborný asistent na Ústav konstruování, kde pracuje do současné doby. V roce 1997 obhájil disertační práci nazvanou „Experimentální stanovení tloušťky a teploty elastohydrodynamického mazacího filmu“ a obdržel titul Dr. (Ph.D.).

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena na experimentální výzkum elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů. Pro modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách navrhl a odladil několik variant simulátorů. Podílel se na založení „Skupiny pro výzkum elastohydrodynamického mazání“ na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně a vytvoření experimentální laboratoře. Absolvoval odborné stáže na předních zahraničních pracovištích (Tsinghua univerzita, Peking, Čínská lidová republika, Kjúšský technologický institut, Kitakjúšú, Japonsko a Institut National des Sciences Appliquées – Lyonská vědecká a technická univerzita, Villeurbanne Cedex, Francouzská rep.)

Postupy měření mazacích filmů ověřil při studiu elastohydrodynamických mazacích filmů v kruhových i eliptických kontaktech, podporovaném mj. Grantovou agenturou České republiky a Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky. Získané výsledky byly shrnuty do 14 původních článků otištěných v zahraničních tribologických časopisech a knižních publikacích a 20 příspěvků prezentovaných na zahraničních konferencích.

V pedagogické činnosti vede v prvním stupni magisterského studia výuku cvičení kurzů Základy konstruování ZKI a ZKII, CAD a Konstruování a CAD a přednáší základní kurz Základy konstruování ZKI.

1 ÚVOD

„Snad jednou, až se naplní čas, bude rozpoznání a podrobné studium režimu kapalinového mazání, označovaného jako elastohydrodynamické mazání, oceněno jako jeden z nejvýznamnějších objevů tribologického výzkumu 20. století“. Tato slova profesora Duncana Dowsona [1], jsou dokladem významu, který je přikládán úloze výzkumu elastohydrodynamického mazání při poznání procesů probíhajících v mazaných kontaktech velmi zatěžovaných prvků tribologických soustav. Pro tento režim kapalinového mazání je charakteristické vytvoření tenkého mazacího filmu oddělujícího třecí povrchy ve styku zubů ozubeného převodu, vačky a zdvihátka, ve valivém ložisku, u lineárního valivého vedení apod. Tento mazací film nejen zcela přenáší zatížení kontaktní dvojice, ale zároveň zabraňuje styku třecích povrchů, což vede k podstatnému snížení tření a opotřebení.

Cílem habilitační práce je podat systematický výklad výsledků experimentálního a teoretického studia elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů mezi hladkými třecími povrchy za ustálených, izotermických podmínek. Součástí habilitační práce jsou publikace, na nichž je dokumentován přínos autora k objasnění této problematiky. Práce je obsahově členěna do čtyř částí:

První část je věnována historickému přehledu experimentálních a teoretických studií, které přispěly k poznání jednotlivých režimů kapalinového mazání konformních a nekonformních těles. Pomocí map režimů kapalinového mazání je vymezen předmět studia.

Druhá část popisuje výsledky teoretických studií elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů. Jsou zde uvedeny základní rovnice popisující řešený problém a rozebrána jejich semi-analytická a numerická řešení.

Třetí část se zabývá experimentálním výzkumem elastohydrodynamických mazacích filmů v kruhových a eliptických kontaktech optickou interferenční metodou. V této části jsou rovněž ukázány různé přístupy k použití této metody, od jednoduchých komparativních postupů po spektrální analýzu chromatických interferogramů.

Čtvrtá část obsahuje komentovaný soubor šesti publikací autora [2]–[7] popisujících výsledky dosažené při studiu řešené problematiky diferenciální a kolorimetrickou interferometrií.

2 KAPALINOVÉ MAZÁNÍ

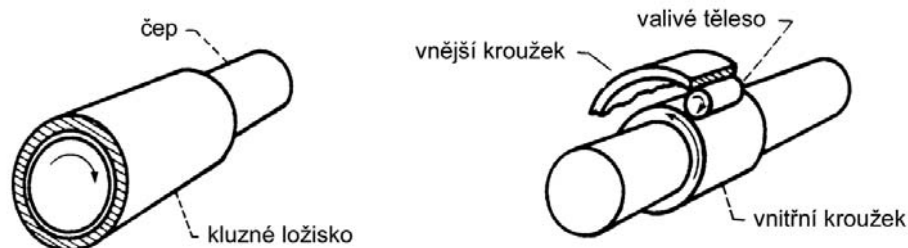
Na počátku 19. století byla situace v poznání mechanismů tření v suchých a mazaných kontaktech značně rozdílná. Teorie suchého tření odvozená Ch. A. Coulombem [8] byla již široce akceptována a v mnoha studiích experimentálně ověřená [9]. Pro mazané kontakty se však obdobnou zákonitost chování nedařilo získat. Při jejich studiu se vycházelo z poznatků získaných u suchých kontaktů s tím, že mazivo bylo chápáno pouze jako prostředek ke snížení tření a opotřebením prostřednictvím jeho vlivu na topografii třecího povrchu. Předpokládalo se, že zatížení v kluzném kontaktu je přenášeno přímo mezi třecími prvky a mazací film tak nebyl považován za objekt samostatného studia. Tento přístup byl charakteristický pro experimentální studie až do počátku 80. let 19. století. Jejich výsledky, ovlivněné rozdílnými experimentálními podmínkami, tak byly často velmi rozporuplné.

V té době však již nedostatečná funkčnost kluzných uložení ve strojních soustavách limitovala další průmyslový rozvoj, zejména v železniční dopravě. To byl také jeden z hlavních důvodů, proč Komise pro výzkum při Britské společnosti strojních inženýrů na svém zasedání v Londýně dne 20. února 1879 zařadila mezi prioritní témata i studium tření mezi tuhými tělesy za vysokých rychlostí. Toto rozhodnutí se ukázalo jako zcela zásadní pro další rozvoj oboru. V dubnu roku 1882 komise pověřila realizací experimentů B. Towera, jehož studie [10], [11] jsou považovány za jeden z rozhodujících kroků ke vzniku *teorie kapalinového mazání*.

Prvním přínosem jeho experimentů bylo zjištění, že pro dosažení opakovatelnosti výsledků je nezbytné zajistit dostatečné mazání kluzného uložení. Prokázal, že v té době používaný způsob mazání prostřednictvím maznice přivádějící mazivo otvorem přímo do kontaktu třecích těles je z tohoto hlediska nevhodný. Při svých experimentech proto zajistil dostatečné mazání ponořením spodní poloviny rotujícího hřídele do olejové lázně. Výsledkem bylo podstatné snížení součinitele tření kluzného uložení až na jednu tisícinu původní hodnoty. Svými experimenty prokázal, že při zajištění dostatečného mazání mohou být třecí povrchy odděleny souvislou vrstvou maziva, která přenáší zatížení mezi tělesy v mazaném kontaktu. Na *mazací film* se začalo pohlížet jako na samostatné *třetí těleso* třecího kontaktu.

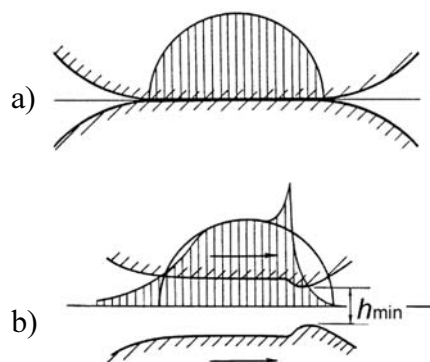
Výsledky experimentálního studia kapalinového mazání se setkaly s okamžitou odezvou. Již necelý rok po uveřejnění první Towerovy studie přednesl v Montrealu O. Reynolds přednášku, ve které poprvé prezentoval základy teorie kapalinového mazání založené na předpokladu laminárního toku viskózní kapaliny. V roce 1886 publikoval analytickou studii [12], v níž použil redukováný tvar Navierových-Stokesových rovnic společně s rovnicí kontinuity a odvodil diferenciální rovnici druhého řádu popisující rozdělení tlaku v klínové mezeře mezi třecími povrchy. Tato rovnice, označovaná jako Reynoldsova rovnice, je považována za základ *teorie kapalinového mazání*.

Na přelomu 19. a 20. století byly první poznatky získané při studiu kapalinového mazání uplatněny při konstrukci a výrobě radiálních kluzných ložisek. V průběhu 20. století detailní experimentální a teoretické studie umožnily nejen podstatné zvýšení jejich účinnosti, ale přispěly i k vývoji zcela nových typů kluzných uložení [13]. Pro tato uložení je charakteristické použití třecích těles zapadajících do sebe s velkou geometrickou shodností. V místě styku *konformně zakřivených třecích povrchů* (obr. 1) dochází vlivem vzájemným pohybu třecích těles a viskozity maziva k nárůstu tlaku v mazacím filmu a vzájemnému oddělení třecích povrchů. Zatížení je přenášeno po relativně velké ploše, která se s rostoucím zatížením mění jen nepatrně. Velikost tlaku generovaného v mazivu proto není obecně dostatečně velká (zpravidla menší než 5 MPa [15]), aby zapříčinila elastickou deformaci třecích povrchů. Za těchto podmínek nastává režim kapalinového mazání označovaný jako hydrodynamické mazání. Chování hydrodynamicky mazaných kontaktů je určeno fyzikálními vlastnostmi maziva, zejména jeho dynamickou viskozitou.



Obr. 1 Příklad konformně a nekonformně zakřivených třecích těles [14]

Pro mazání nekonformně zakřivených třecích povrchů, kdy kontaktní plocha dosahuje často jenom jedné tisíciný stykové plochy hydrodynamického uložení [16], však teorie hydrodynamického mazání vždy nepřinášela očekávané výsledky. V některých případech, při relativně velkém zatížení působícím na tak malé kontaktní ploše, mohou mít kontaktní tlaky hodnoty několik gigapascalů. To způsobuje významné místní elastické deformace třecích povrchů, jejichž velikost je srovnatelná s tloušťkou hydrodynamického mazacího filmu (obr. 2). Takováto situace nastává např. ve styku zubů ozubeného převodu, vačky a zdvihátka, ve valivém ložisku a u lineárního valivého vedení. Za těchto podmínek dochází rovněž k podstatným změnám fyzikálních vlastností maziva (hustoty a dynamické viskozity). Chování mazaného kontaktu je ovlivněno nejen fyzikálními vlastnostmi maziva, ale i mechanickými vlastnostmi kontaktních těles.



Obr. 2 Geometrie třecích těles a rozložení tlaku v kontaktu [17]: a) Hertzův statický kontakt b) elastohydrodynamický kontakt

2.1 REŽIMY KAPALINOVÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ NEKONFORMNÍCH TĚLES

V závislosti na rozsahu elastických deformací třecích povrchů způsobených zatížením nekonformně zakřivených těles a velikostí změny viskozity maziva s tlakem v kontaktní oblasti lze rozlišit čtyři základní režimy kapalinového mazání – *izoviskozně hydrodynamické mazání* (rozsah elastické deformace třecích povrchů je zanedbatelný ve srovnání s tloušťkou mazacího filmu a maximální tlak v kontaktní oblasti není dostatečně velký k významnému zvýšení viskozity maziva), *piezoviskozně hydrodynamické mazání* (maximální tlak v kontaktní oblasti je dostatečně velký k významnému zvýšení viskozity maziva, ale rozsah elastické deformace třecích povrchů je přesto zanedbatelný ve srovnání s tloušťkou mazacího filmu), *elastohydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů* (elastická deformace třecích povrchů je plně srovnatelná s tloušťkou mazacího filmu, avšak výrazný rozdíl v modulech pružnosti třecích povrchů zapříčiní, že relativně nízký tlak v kontaktní oblasti poddajných těles nezpůsobí významné zvýšení viskozity maziva) a *elastohydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů* (elastická deformace třecích povrchů je plně srovnatelná s tloušťkou mazacího filmu, avšak výrazný rozdíl v modulech pružnosti třecích povrchů zapříčiní, že relativně nízký tlak v kontaktní oblasti tuhých těles nezpůsobí významné zvýšení viskozity maziva).

natelná s tloušťkou mazacího filmu a současně viskozitně-tlakové vlastnosti maziva mají značný vliv na tloušťku mazacího filmu). K posouzení, ke kterému režimu kapalinového mazání pro dané provozní podmínky dochází, se používají *mapy režimů mazání*. Jejich uspořádání je určeno použitým souborem bezrozměrných parametrů.

2.1.1 Bezrozměrné parametry

Téměř současně s publikací prvních úspěšných teoretických řešení se objevily snahy o zavedení bezrozměrných parametrů. Bezrozměrné parametry se začaly používat jak při numerické analýze, tak i při prezentaci dosažených teoretických i experimentálních výsledků, především z důvodu možnosti jejich vzájemného porovnání. Mimo jiné se jejich zavedením odstranil i problém používání rozdílných soustav jednotek. Zpočátku sice každý autor zaváděl svůj soubor bezrozměrných parametrů, postupně však byly používány v převážné míře pouze tři z nich.

V roce 1976 D. Dowson a G. R. Higginson [18] zavedli soubor pěti bezrozměrných parametrů tvořený bezrozměrným parametrem tloušťky mazacího filmu H , bezrozměrným parametrem rychlosti U , bezrozměrným parametrem zatížení W , bezrozměrným parametrem materiálů G a parametrem elipticity k . Při jejich použití lze vztah pro tloušťku mazacího filmu v bodovém kontaktu zapsat ve tvaru

$$H = f(U, W, G, k), \quad (1)$$

po dosazení

$$\frac{h}{R_x} = f\left(\frac{u\eta_0}{E'R_x}, \frac{F}{E'R_x^2}, \alpha E', \frac{a}{b}\right), \quad (2)$$

kde h je tloušťka mazacího filmu, R_x redukovaný poloměr třecích povrchů ve směru osy x , u průměrná rychlost ve směru osy x , η_0 dynamická viskozita maziva při nulovém tlaku, E' redukovaný modul pružnosti třecích povrchů, F síla působící na třecí povrchy, α viskozitně-tlakový koeficient maziva, a délka hlavní poloosy bodového kontaktu a b délka vedlejší poloosy bodového kontaktu.

Na základě rozměrové analýzy někteří autoři ukázali, že počet bezrozměrných parametrů lze snížit o jeden. K. L. Johnson [19] zavedl bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu \hat{H} , bezrozměrný parametr viskozity g_V a bezrozměrný parametr elasticity g_E . Tloušťka mazacího filmu tak může být vyjádřena vztahem

$$\hat{H} = f(g_V, g_E, k), \quad (3)$$

po dosazení

$$\frac{h}{R_x} \left(\frac{F}{\eta_0 u R_x}\right)^2 = f\left[\frac{\alpha F^3}{\eta_0^2 u^2 R_x^4}, \left(\frac{F^4}{\eta_0^3 u^3 E' R_x^5}\right)^{2/3}, \frac{a}{b}\right]. \quad (4)$$

Obdobně H. Moes a R. Bosma [20] použili bezrozměrný parametr tloušťky mazacího filmu H^M , bezrozměrný parametr zatížení M a bezrozměrný parametr materiálů L pro vztah

$$H^M = f(M, L, k), \quad (5)$$

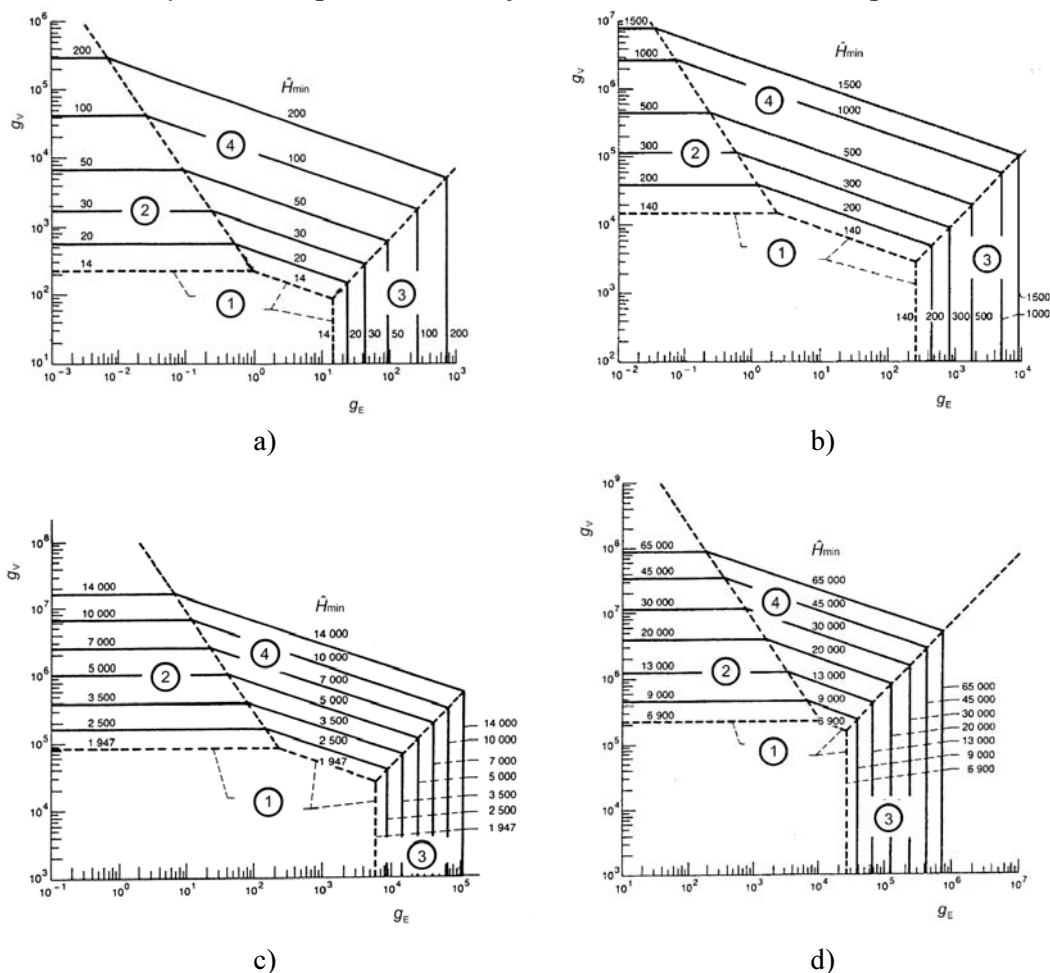
po dosazení

$$\frac{h}{R_x} \left(\frac{E'R_x}{2\eta_0 u}\right)^{1/2} = f\left[\left(\frac{F^{4/3}}{2\eta_0 u E'^{1/3} R_x^{5/3}}\right)^{3/4}, \left(\frac{2\alpha^3 u \eta E'^3}{R_x}\right)^{1/4}, \frac{a}{b}\right]. \quad (6)$$

Pro prezentaci výsledků teoretických a experimentálních studií jsou převážně používány Dowsonovy-Higginsonovy bezrozměrné parametry, které podávají názornější představu o vlivu dominantních provozních parametrů (zatížení, rychlosti třecích povrchů a vlastnosti materiálů) na tloušťku mazacího filmu. U zbývajících dvou sad bezrozměrných parametrů není sice jejich fyzikální význam na první pohled patrný, jsou však vhodné pro grafické rozlišení jednotlivých režimů kapalinového mazání.

2.1.2 Mapy režimů kapalinového mazání

Mapy režimů kapalinového mazání je možné využít jednak u praktických aplikací, kdy u zkoumaného mazaného kontaktu třecích těles umožňují zvolit odpovídající vztah pro stanovení minimální nebo centrální tloušťky mazacího filmu v kontaktu třecích těles. V případě potřeby lze následně upravit některý z provozních parametrů k zajištění požadované funkce třecího uzlu strojní soustavy. Při teoretickém nebo experimentálním studiu je zase možné ověřit, zda jsou hodnoty provozních parametrů vhodně zvolené s ohledem na zkoumaný režim kapalinového mazání. V našem případě tyto mapy (obr. 3) umožňují jednoznačně vymezit oblast elasto-hydro-dynamického mazání tuhých třecích povrchů, které je věnována tato habilitační práce.



Obr. 3 Mapy režimů kapalinového mazání pro a) $k = 0,5$, b) $k = 1$, c) $k = 3$ a d) $k = 6$ [21], [22]

- 1 - izoviskozně hydrodynamické mazání
- 2 - piezoviskozně hydrodynamické mazání
- 3 - elasto-hydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů
- 4 - elasto-hydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů

3 TEORETICKÉ STUDIE ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ

Koncem 50. let 20. století potřebovali Dowson a Higginson osmnáct měsíců, než se jim podařilo úspěšně dokončit numerické výpočty k odvození rovnice pro minimální tloušťku elasto-hydrodynamického mazacího filmu v liniovém kontaktu třecích těles. Protože u bodových kontaktů je navíc nutno při teoretickém řešení zohlednit i tok maziva napříč kontaktní oblastí, byla nedosta-tečná výkonnost dostupných výpočetních prostředků hlavním důvodem, proč první úspěšné nume-rické řešení problému elasto-hydrodynamického mazání bodových kontaktů publikovali A. P. Ranger, C. M. M. Ettles a A. Cameron [23] až v polovině 70. let 20. století. Jejich teoretické řešení poprvé potvrdilo experimentálně získané poznatky o charakteristických rysech mazacího filmu v bodovém kontaktu. Mimo jiné prokázali, že minimální tloušťka mazacího filmu se obvykle na-lézá na bocích kontaktní oblasti v místě podkovovité konstrikce tloušťky mazacího filmu. Regresní analýzou vypočtených hodnot stanovili vztah pro centrální tloušťku mazacího filmu

$$H_c = 1,44U^{0,567}W^{0,035}G^{0,462}, \quad (7)$$

který však, jak se později ukázalo, nesprávně předpovídá zcela opačný vliv zatížení na tloušťku mazacího filmu.

Obdobný přístup použili B. J. Hamrock a D. Dowson u elasto-hydrodynamicky mazaných elip-tických kontaktů [24]–[27]. Ve své studii podrobně popsali vliv bezrozměrného parametru rych-losti U , zatížení W a materiálů G a parametru elipticity k na rozložení tloušťky a průběh tlaku v mazacím filmu. Hodnoty těchto bezrozměrných parametrů byly zvoleny tak, aby v použitém roz-sahu parametru elipticity bylo dosaženo podmínek elasto-hydrodynamického mazání. Na základě třiceti čtyř kombinací provozních podmínek Hamrock a Dowson získali výsledný vztah pro mini-mální tloušťku mazacího filmu

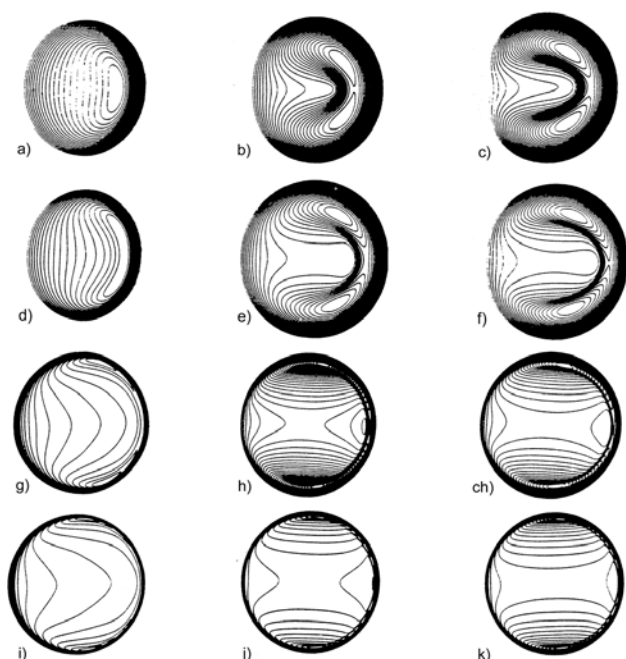
$$H_{\min} = 3,63U^{0,68}W^{-0,073}G^{0,49}(1 - e^{-0,68k}), \quad (8)$$

a centrální tloušťku mazacího filmu

$$H_c = 2,69U^{0,67}W^{-0,067}G^{0,53}(1 - 0,61e^{-0,73k}). \quad (9)$$

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

V roce 1987 A. A. Lubrecht, W. E. ten Napel a R. Bosma [28] publikovali výsledky získané použitím multigradní metody pro řešení úlohy elasto-hydrodynamického mazání kruhových kon-taktů. Pro bezrozměrný parametr materiálů $G = 4000$ a dvě hodnoty bezrozměrného parametru rychlosti U ($6,31 \cdot 10^{-12}$ a $3,23 \cdot 10^{-10}$) a zatížení W ($4,04 \cdot 10^{-8}$ a $2,58 \cdot 10^{-6}$) získali rozložení tloušťky a tlaku v mazacím filmu. Prokázali, že použití multigradní metody může přinést výrazné zrychlení výpočtu. Z vypočítaných rozložení tloušťky mazacího filmu pro maximální Hertzovy tlaky do 1,5 GPa stanovili hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu. Velikost jejich poměru se pohybovala od 1,33 pro malá zatížení až po 3,2 při největším zatížení ($M = 200$). C. H. Venner a W. E. ten Napel [29] jejich přístup dále zdokonalili a v rozsahu bezrozměrného parametru zati-žení M od 3 do 1000 a parametru materiálů L od 0 do 25 stanovili z vypočítaných tvarů mazacího filmu (obr. 4) poměr centrální a minimální tloušťky mazacího filmu. Srovnáním s výsledky pre-zentovanými A. A. Lubrechtem a kol. [29] zjistili, že při velkém zatížení ($M \geq 100$) jsou jejich



Obr. 4 Tvar elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhovém kontaktu [29]
a) $M = 10, L = 0$ g) $M = 200, L = 0$
b) $M = 10, L = 5$ h) $M = 200, L = 5$
c) $M = 10, L = 10$ ch) $M = 200, L = 10$
d) $M = 20, L = 0$ i) $M = 1000, L = 0$
e) $M = 20, L = 5$ j) $M = 1000, L = 5$
f) $M = 20, L = 10$ k) $M = 1000, L = 10$

hodnoty poloviční. Ukázali, že tento rozdíl je způsoben minimální tloušťkou mazacího filmu, jejíž hodnota je výrazně ovlivněna hustotou zvolené sítě, která byla v případě Lubrechtových výpočtů příliš malá. Vypočítané hodnoty použil H. Moes k odvození vztahu pro centrální tloušťku mazacího filmu v kruhovém kontaktu

$$H_c^M = \left\{ \left[\left(1,7M^{-1/9} L^{3/4} t \right)^r + \left(1,96M^{-1/9} \right)^r \right]^{s/r} + \left(47,3M^{-2} \right)^s \right\}^{1/s}, \quad (10)$$

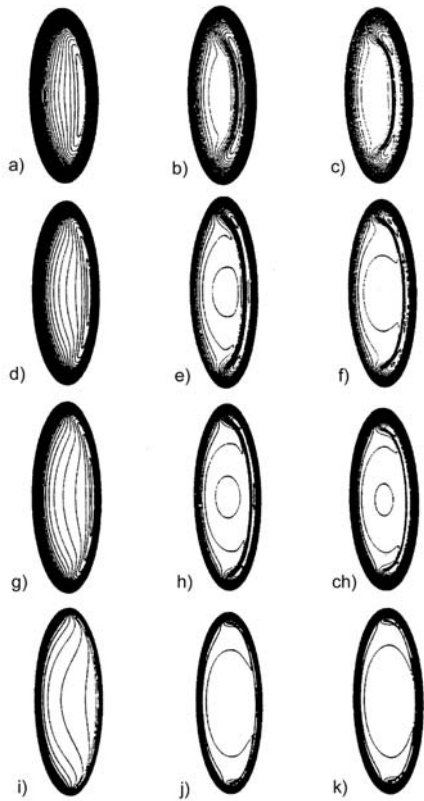
kde

$$r = \exp \left[1 - \frac{6}{(L+8)} \right], \quad s = 12 - 10 \exp(M^{-2}), \quad t = 1 - \exp \left(-0,9 \frac{M^{1/6}}{L^{1/6}} \right).$$

Řešení zavedené Vennerem a ten Napalem použili G. Nijenbanning, C. H. Venner a H. Moes [31] u elastohydrodynamicky mazaných eliptických kontaktů s vektorem rychlosti orientovaným ve směru vedlejší poloosy kontaktní oblasti třecích povrchů. Pro dvě hodnoty podílu redukovaných poloměrů třecích povrchů D (0,2 a 0,4) studovali vliv bezrozměrného parametru zatížení M a parametru materiálů L na centrální a minimální tloušťku mazacího filmu. Ukázali, že poloha minimální tloušťky mazacího filmu se stejně jako u kruhových kontaktů mění v závislosti na velikosti parametrů M a L (obr. 5). Při teoretickém řešení volili rozsah hodnot bezrozměrného parametru zatížení M (5–1000) a parametru materiálů L (0–25) s ohledem na možnost získání rovnice pro centrální tloušťku mazacího filmu pokrývající všechny režimy kapalinového mazání. Při jejím odvozování byly nejprve z vypočítaných hodnot stanoveny rovnice pro jednotlivé režimy kapalinového mazání:

a) izoviskozně hydrodynamické mazání (malé M a $L = 0$)

$$H_{Irc} = \left[145 \left(1 + 0,796D^{14/15} \right)^{-15/7} D^{-1} \right] M^{-2}, \quad (11)$$



Obr. 5 Tvar elastohydrodynamického mazacího filmu v eliptickém kontaktu ($D = 0,2$) [31]

- a) $M = 50, L = 0$ g) $M = 200, L = 0$
b) $M = 50, L = 5$ h) $M = 200, L = 5$
c) $M = 50, L = 10$ ch) $M = 200, L = 10$
d) $M = 100, L = 0$ i) $M = 1000, L = 0$
e) $M = 100, L = 5$ j) $M = 1000, L = 5$
f) $M = 100, L = 10$ k) $M = 1000, L = 10$

b) piezoviskozně hydrodynamické mazání (malé M a velké L)

$$H_{VRc} = [1,29(1 + 0,691D)^{-2/3}]L^{2/3}, \quad (12)$$

c) elastohydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů (velké M a $L = 0$)

$$H_{IEc} = \left[3,18(1 + 0,006 \ln D + 0,63D^{4/7})^{-14/25} D^{-1/15} \right] M^{-2/15}, \quad (13)$$

d) elastohydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů (velké M a velké L)

$$H_{VEc} = \left[1,48(1 + 0,006 \ln D + 0,63D^{4/7})^{-7/20} D^{-1/24} \right] M^{-1/12} L^{3/4}. \quad (14)$$

Sloučením těchto rovnic získali výsledný vztah pro centrální tloušťku mazacího filmu v eliptických kontaktech s vektorem rychlosti orientovaným ve směru vedlejší poloosy

$$H_c^M = \left\{ \left[H_{IRc}^{3/2} + (H_{IEc}^{-4} + H_{00}^{-4})^{-3/8} \right]^{2s/3} + (H_{VRc}^{-8} + H_{VEc}^{-8})^{-s/8} \right\}^{1/s}, \quad (15)$$

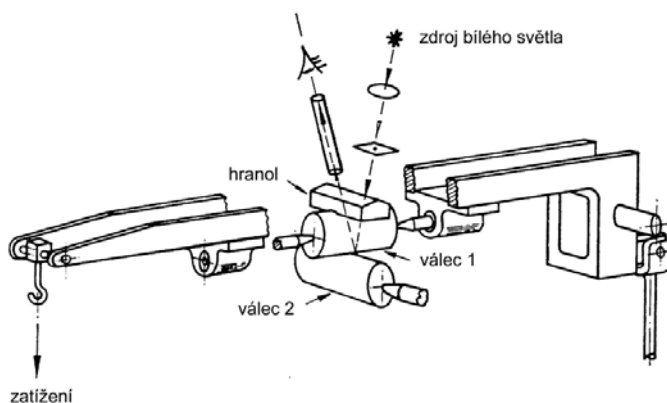
kde

$$s = 1,5 \left[1 + \exp \left(-1,2 \frac{H_{IEc}}{H_{IRc}} \right) \right], \quad H_{00} = 1,8D^{-1}.$$

Ani zavedení multigradních metod pro řešení problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů, které umožnilo získat rozložení tloušťky mazacího filmu pro široké rozmezí provozních podmínek, však nenapomohlo k odvození obdobného vztahu pro minimální tloušťku mazacího filmu pokrývajícího všechny režimy kapalinového mazání. Z tohoto důvodu je i v dnešní době používána pro odhad minimální tloušťky mazacího filmu Hamrockova a Dowsonova rovnice.

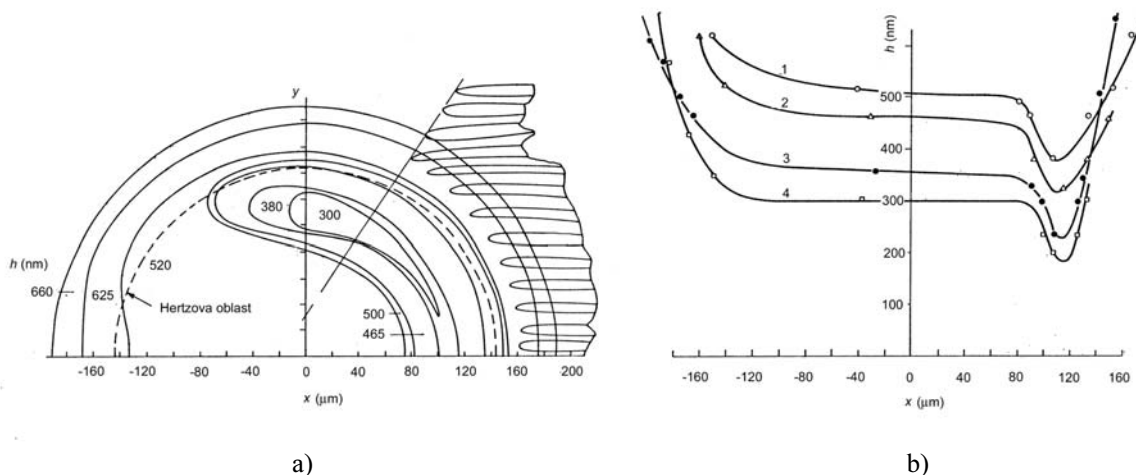
4 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIE ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ

V roce 1961 publikovali J. F. Archard a M. T. Kirk [31] první kvantitativní experimentální studii zabývající se elastohydrodynamickým mazáním bodových kontaktů. Podmínky vyskytující se u bodových kontaktů v reálných tribologických soustavách modelovali v kontaktu dvou válců s mimoběžnými osami. Průběh tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu stanovili ze změny kapacitance mezi třecími povrchy měřené pomocí kapacitního snímače umístěného na povrchu jednoho z válců vyrobeného z polymethylmethakrylátu. Ze srovnání získaných výsledků s hodnotami tloušťky mazacího filmu naměřenými v liniovém kontaktu A. W. Crookem [33] zjistili, že hodnoty tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu jsou přibližně poloviční. Z toho usoudili, že vliv bočního výtoku maziva v bodovém kontaktu má pouze malý vliv na tloušťku mazacího filmu. V průběhu měření Archard a Kirk použili zdroj bílého světla k osvětlení kontaktní oblasti, pro stanovení změny její velikosti se zatížením. Přitom v kontaktní oblasti pozorovali interferenční proužky stejné tloušťky, jejichž barvy se měnily se změnou zatížení a rychlosti třecích povrchů. V následujících studiích [34], [35] ukázali, že tímto způsobem lze získat rozložení tloušťky mazacího filmu v mazaném eliptickém kontaktu mezi dvěma válci vyrobenými z polymethylmethakrylátu (obr. 6). V kontaktní oblasti pozorované mikroskopem přes hranol, vyrobený ze stejného materiálu jako třecí povrchy, zaznamenali dostatečný počet barevných interferenčních proužků ke stanovení rozložení tloušťky mazacího filmu. Vzhledem k použitému materiálu třecích povrchů však bylo jejich studium omezeno na oblast elastohydrodynamického mazání poddajných třecích povrchů.



Obr 6 Zařízení se dvěma zkříženými válci pro studium mazacích filmů [34]

O rok později R. Gohar a A. Cameron [36] poprvé popsali charakteristický tvar elastohydrodynamicky mazaného kruhového kontaktu s podkovovitou konstrikcí ve výstupní oblasti kontaktu. Chování elastohydrodynamického mazacího filmu studovali v kontaktu mezi ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm a deskou vyrobenou z transparentního materiálu o vysokém indexu lomu – speciálního skla ($n = 1,93$), syntetického safíru ($n = 1,77$) a diamantu ($n = 2,2$). Z chromatických interferogramů se jim podařilo získat rozložení tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu (obr. 7) [37]. Vzhledem k použitému materiálu byly rozměry transparentní desky velmi malé a studium tak bylo omezeno na podmínky čistého kluzu. Za těchto podmínek je však tloušťka mazacího filmu výrazně ovlivňována změnou teploty mazacího filmu v závislosti na rychlosti třecího povrchu.

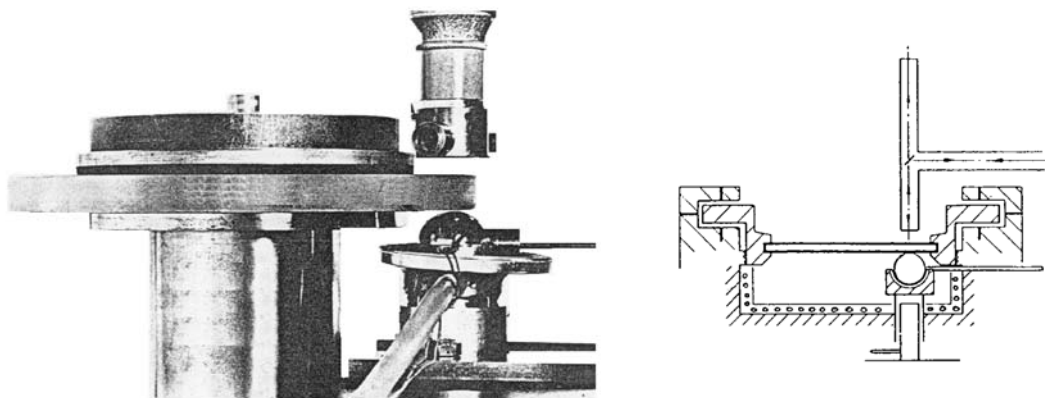


Obr. 7 Rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu [37]

a) vrstevnicový diagram pro $F = 18 \text{ N}$ a $u = 0,04 \text{ m/s}$

b) profily ve směru osy x pro $F = 18 \text{ N}$ a $u = 0,04 \text{ m/s}$ (1), $u = 0,032 \text{ m/s}$ (2), $u = 0,025 \text{ m/s}$ (3) a $u = 0,016 \text{ m/s}$ (4)

C. A. Foord, W. C. Hammann a A. Cameron [38] proto použili experimentální zařízení, u něhož se ocelová kulička o průměru 25,4 mm odvalovala po skleněném kotouči uloženém v aerostatickém ložisku (obr. 8). Aby získali kontrastní interferenční obrazce, opatřili spodní povrch kotouče polopropustnou vrstvou chrómu o tloušťce deseti nanometrů. Při studiu chování elastohydrodynamických mazacích filmů použili polychromatický i monochromatický zdroj světla. To jim umožnilo studovat jak chování mazacích filmů o tloušťkách přes jeden mikrometr (z monochromatických interferogramů), tak stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu z rozlišitelností přibližně 50 nm (z chromatických interferogramů). Ke stanovení absolutních hodnot tloušťky mazacího filmu z chromatických interferogramů použili srovnávací tabulku získanou na soustavě o známé geometrii. Tu tvořila skleněná čočka o poloměru 126,4 mm a skleněný kotouč, jejichž dotýkající se povrchy byly pokryty stejnou vrstvou chrómu, která byla použita i v průběhu vlastních měření. Získaný tvar mazacího filmu použili ke stanovení hodnot centrální a minimální tloušťky a pro třicet tři různých maziv studovali jejich změnu v závislosti na zatížení a rychlostech třecích povrchů. Zjistili, že zatížení má výrazný vliv na minimální tloušťku mazacího filmu, nacházející se v bocích kontaktní oblasti. Hodnoty centrální tloušťky mazacího filmu použili ke stanovení viskozitně-tlakového koeficientu α na základě porovnání získaných hodnot s referenčním vzorkem.

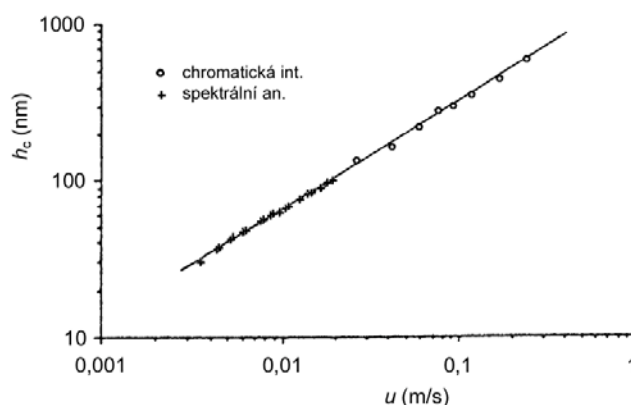


Obr. 8 Zařízení pro měření tloušťky mazacích filmů v kruhových kontaktech za podmínek čistého valení [38], [39]

V následující studii C. A. Foord, L. D. Wedeven, F. J. Westlake a A. Cameron [39] rozebrali přednosti a nedostatky monochromatické a chromatické interferenční metody při studiu chování elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů. Ukázali vliv dielektrické (TiO_2) a chrómové vrstvy na tvar a kontrast monochromatických interferogramů při mnohosvazkové a dvousvazkové interferenci a popsali postup stanovení změny fáze způsobené průchodem a odrazem světla na chrómové vrstvě. Použitím světelného zdroje emitujícího záření o dvou vlnových délkách (546 a 633 nm) získali dichromatické interferenční obrazce umožňující stanovit tvar mazacích filmů s tloušťkami řádu mikrometrů s přesností dosažitelnou při chromatické interferometrii. Ukázali rovněž možnost překonání jednoho z omezení optické interferenční metody, kdy není možné měřit mazací filmy tenčí než je hodnota tloušťky odpovídající prvnímu řádu interference. Po napaření vrstvy oxidu křemičitého o vhodné tloušťce na polopropustnou dielektrickou vrstvu byli schopni měřit tloušťku tenkých mazacích filmů až do deseti nanometrů.

V průběhu 70. a 80. let 20. století se optická interferenční metoda [40] stala nejpoužívanější měřicí metodou ke studiu chování elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů. Umožnila nejen získat detailní informace o tvaru mazacího filmu, ale naměřené hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu byly použity i k ověření teoretických modelů, které byly využívány při návrhu velmi zatížených prvků tribologických soustav. Při zvyšování únosnosti a účinnosti těchto soustav však současně docházelo ke snižování tloušťky mazacího filmu oddělujícího třecí povrchy. Postupně se tak omezená rozlišitelnost konvenční optické interferenční metody, daná šířkou interferenčního proužku, stala limitujícím faktorem dalšího studia problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů.

Tenké mazací filmy o tloušťkách až do 10 nm měřili sice už Westlake a Cameron při užití klínovité vrstvy oxidu křemičitého, nepřekonali však omezenou rozlišovací schopnost chromatické interferometrie. H. A. Spikes a G. Guangteng [41] proto zvolili stejnou soustavu vrstev a zaznamenávali chromatické interferogramy, jejichž barvy se měnily s rotací kotouče, tj. s tloušťkou vrstvy oxidu křemičitého. Při známé tloušťce této vrstvy (od 50 do 200 nm) po obvodu kotouče mohli stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu. Protože však tvar mazacího filmu nemohl být získán z jednoho interferogramu, byla tato metoda velmi nepraktická a možnost jejího použití pro studium elastohydrodynamicky mazaných kontaktů omezená. Tento nedostatek překonali G. J. Johnston, R. Wayte a H. A. Spikes [42] spektrální analýzou interferenčních barev ke stanovení vlnové délky, při které nastává interferenční maximum. Způsob vyhodnocování chromatických interferogramů, společně s užitím soustavy vrstev tvořené vrstvou oxidu křemičitého o tloušťce okolo 500 nm a vrstvou chrómu o tloušťce 20 nm, umožnil měřit tloušťku velmi tenkých mazacích filmů v centrální oblasti kruhového kontaktu (obr. 9). Možnosti metody ukázali Johnston, Wayte



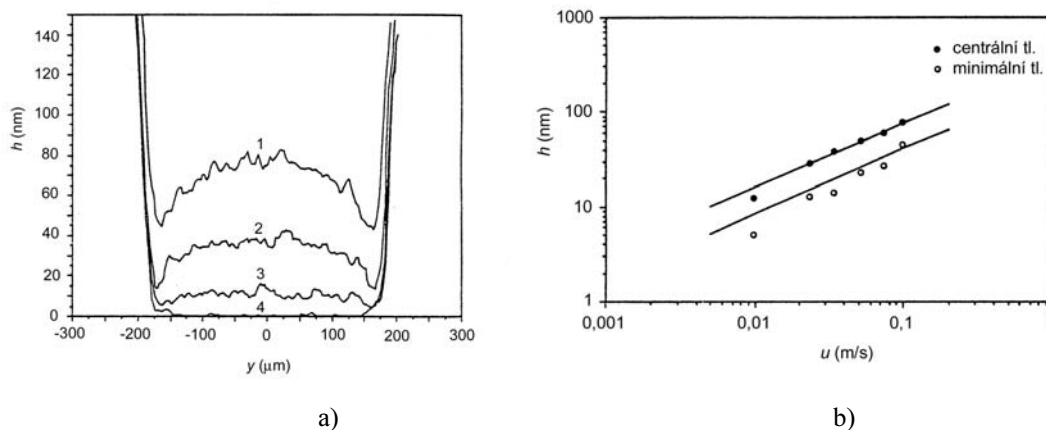
Obr. 9 Srovnání hodnot centrální tloušťky mazacího filmu změřených chromatickou interferometrií a spektrální analýzou chromatických interferogramů pro naftěnický základový ropný olej ($\eta_0 = 0,364$ Pa.s při $24,5^\circ\text{C}$) a $F = 23$ N [42]

a Spikes při studiu chování devíti druhů maziv o dynamické viskozitě od 0,003 do 0,364 Pa.s (při 24,5° C). Pro hodnotu maximálního Hertzova tlaku 0,445 GPa v kontaktu mezi ocelovou kuličkou o průměru 19 mm a skleněným kotoučem získali závislost centrální tloušťky mazacího filmu na rychlosti třecích povrchů $H_c \propto U^{0,7}$ platnou i v oblasti velmi tenkých mazacích filmů s tloušťkami do 15 nm. Stejnou metodou D. Cooper a A. J. Moore [43] a F. M. Baskerville a A. J. Moore [44] prokázali, že Hamrockova a Dowsonova rovnice pro centrální tloušťku elastohydrodynamického mazacího filmu (9) může být užita pro popis chování newtonovských tekutin v mazaných kontaktech i u velmi tenkých mazacích filmů s tloušťkami až do 10 nm.

M. Smeeth, P. Cann a H. A. Spikes [45] použili spektrální analýzu interferenčních barev pro studium vlivu zatížení na tloušťku mazacího filmu v centrální oblasti kruhového kontaktu mezi kuličkou o průměru 19 mm vyrobenou z karbidu wolframu a safírovou deskou, jejíž spodní povrch byl opatřen polopropustnou vrstvou chrómu. V rozsahu hodnot maximálního Hertzova tlaku v kontaktu od 1,63 do 3,41 GPa našli velmi dobrou shodu mezi naměřenými hodnotami centrální tloušťky mazacího filmu a hodnotami spočítanými z rovnice (9). Protože tato metoda umožňovala stanovit pouze centrální tloušťku mazacího filmu, M. Smeeth a H. A. Spikes [46] v následující studii analyzovali interferenční barvy maticovým spektrometrem, což jim umožnilo stanovit rozložení tloušťky mazacího filmu v libovolném řezu v kontaktní oblasti.

Výše uvedený způsob vyhodnocování chromatických interferogramů založený na spektrální analýze interferenčních barev je v dnešní době používán pro stanovení hodnoty tloušťky mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu při studiu chování velmi tenkých mazacích filmů s tloušťkami pod 10 nm, tj. na rozhraní mezi elastohydrodynamickým a mezným mazáním [47]. I když tato metoda umožňuje stanovit tloušťku mazacího filmu i v řezu podél nebo napříč kontaktní oblastí, není obecně vhodná pro studium minimální tloušťky mazacího filmu, jejíž poloha v kontaktu se mění v závislosti na provozních podmínkách. L. Gustafsson, E. Höglund a O. Marklund [48] proto zvolili poněkud jiný přístup k překonání omezené rozlišitelnosti chromatické interferometrie. Samotný princip stanovení tloušťky mazacího filmu z chromatických interferogramů zůstal nezměněn, tj. tloušťka mazacího filmu byla stanovována srovnáním interferenčních barev ve vyhodnocovaném interferogramu s kalibrační tabulkou získanou na objektu o známé geometrii. Gustafsson, Höglund a Marklund však interferogramy zaznamenali na fotografický film a po digitalizaci zpracovali v počítači. Pro porovnávání interferenčních barev použili barevný prostor HSI, pro jehož každou složku (H – barevný tón, S – sytost, I – jas) nejprve z interferogramu kalibrační soustavy (lehce zatížený kontakt mezi ocelovou kuličkou a skleněným kotoučem) stanovili její závislost na tloušťce mazacího filmu. Geometrii třecích těles v kalibrační soustavě získali z teoretického Hertzova řešení. Poté pro každou interferenční barvu ve vyhodnocovaném interferogramu našli jedinou tloušťku mazacího filmu při stejných hodnotách složek H , S a I . Při většině měření však pro zjednodušení stanovovali tloušťku mazacího filmu pouze na základě srovnání barevných tónů. Tímto postupem byli schopni získat rozložení mazacího filmu v bodovém kontaktu v rozsahu od 95 do 700 nm.

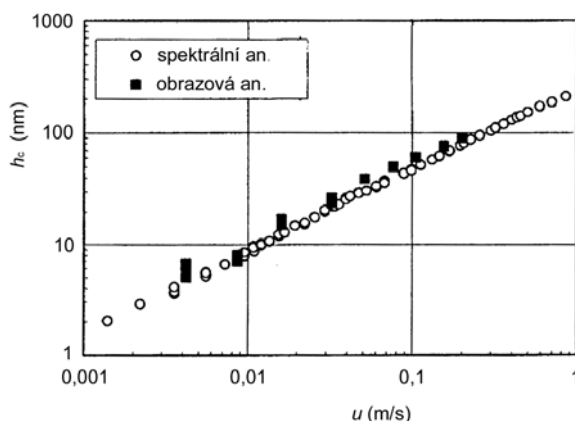
Studium tenkých mazacích filmů umožnila až modifikace této metody, kterou zavedli P. M. Cann, H. A. Spikes a J. Hutchinson [49]. Na spodním povrchu skleněného kotouče použili soustavu vrstev tvořenou vrstvou oxidu křemičitého o tloušťce okolo 500 nm a vrstvou chrómu o tloušťce 20 nm. Ke stanovení závislosti barevného tónu H na tloušťce mazacího filmu použili kotouč s vrstvou oxidu křemičitého o proměnné tloušťce v rozsahu přibližně od 200 do 600 nm. V zatíženém kontaktu nejprve metodou, založenou na spektrální analýze interferenčních barev, stanovili tloušťku této vrstvy a následně k ní přiřadili hodnotu barevného tónu H . Totéž opakovali na různých místech kotouče, až se jim podařilo získat hodnoty barevného tónu H v celém rozsahu tloušťky vrstvy oxidu křemičitého. K zaznamenání chromatických interferogramů použili barevnou televizní kameru, spojenou přes video kartu s počítačem, což sice ve srovnání se záznamem na fotografický film vedlo ke snížení prostorové rozlišitelnosti na 3 μm , ale umožnilo operativnější zpracování chromatických interferogramů. Možnosti metody ukázali na získaných rozloženích



Obr. 10 Rozložení tloušťky mazacího filmu ve směru osy y kruhového kontaktu (a) a hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu (b) pro polyalfaolefinový olej, $F = 17$ N, ($u = 0,097$ m/s (1), $0,034$ m/s (2), $0,01$ m/s (3) a 0 m/s (4) [48]

tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu v kontaktu třecích těles mazaných polyalfaolefinovým olejem o viskozitě $0,056$ Pa.s (při 20°C). I při použití velmi hladkých třecích povrchů (drsnot ocelové kuličky $R_a = 0,012$) zaznamenali vliv povrchových nerovností třecích povrchů na tvar mazacího filmu (obr. 10a). Hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu stanovené s odhadovanou přesností 5 nm srovnali s hodnotami spočítanými z rovnic (8) a (9). V rozsahu tloušťky mazacího filmu od 30 do 80 nm našli velmi dobrou shodu mezi naměřenými a s počítanými hodnotami (obr. 10b). G. Guangteng a kol. [50], [51] metodu dále zpřesnili použitím složek barevného prostoru RGB (obr. 11). Další dílčí úpravy této metody publikovali J. Lord a kol. [52] a J. Molimard a kol. [53].

V následujících letech bylo při experimentálním výzkumu problému elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů prokázáno, že užitím těchto metod je možné stanovit tvar mazacího filmu v rozsahu od 3 do 800 nm s velkou přesností a rozlišitelností. To předurčuje tyto metody, využívající postupy počítačového zpracování obrazu ke stanovení rozložení tloušťky mazacího filmu z chromatických interferogramů, pro studium smíšeného mazání. V tomto režimu mazání jsou sice splněny nezbytné podmínky pro vytvoření elastohydrodynamického mazacího filmu, ale současně dochází k vzájemné interakci mezi povrchovými nerovnostmi třecích povrchů.

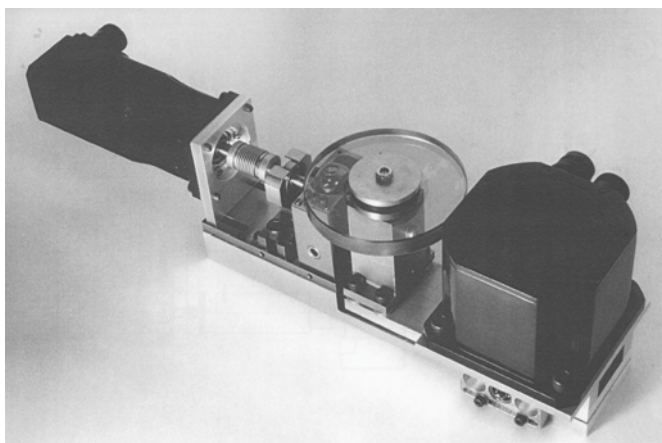


Obr. 11 Srovnání hodnot centrální tloušťky mazacího filmu změřených spektrální a obrazovou analýzou chromatických interferogramů pro polyalfaolefinový olej ($\eta_0 = 0,0238$ Pa.s při 25°C) a $p = 0,45$ GPa [50]

5 STUDIUM ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ DIFFERENCIÁLNÍ A KOLORIMETRICKOU INTERFEROMETRIÍ

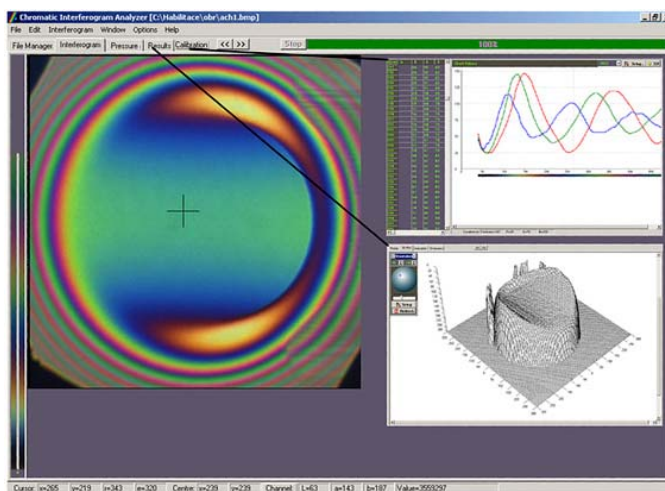
5.1 TVAR ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZACÍHO FILMU V KRUHOVÝCH KONTAKTECH

Tvar mazacího filmu v elastohydrodynamicky mazaných kruhových kontaktech byl autorem studován na experimentálním zařízení vlastní konstrukce (obr. 12) obdobného typu, který použili Foord, Hammann a Cameron. Jeho základními prvky jsou ocelová kulička o průměru 25,4 mm a skleněný nebo safírový kotouč o průměru 100 mm. Kulička tvoří jeden celek s hřídelí, která je využívána k přenosu kroutícího momentu od hnacího motoru. Podmínek čistého valení je dosaženo odvalováním kuličky po kotouči, který je připevněn na hřídeli uložené ve valivých ložiscích.



Obr. 12 Experimentální zařízení pro studium mazacích filmů

Tloušťka mazacího filmu byla stanovována z chromatických interferogramů, jejichž požadovaný kontrast byl získán nanesením polopropustné vrstvy chrómu na spodní povrch kotouče. Diferenciální interferometre [54], metoda vyvinutá za přispění autora na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně, umožnila získat podrobná rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti (obr. 13).



Obr. 13 Software pro stanovení tloušťky mazacích filmů diferenciální kolorimetrií

Aby bylo možné porovnat tvar mazacího filmu se stávajícími teoretickými modely, bylo použito vlastní teoretické řešení [55] založené na postupech použitých Lubrechtem a Venerem (viz str. 10–12). Tímto řešením bylo získáno nejen rozložení tloušťky mazacího filmu, ale i průběh tlaku v mazaném kontaktu, který byl použit pro korekci naměřených hodnot na změnu indexu lomu maziva s tlakem.

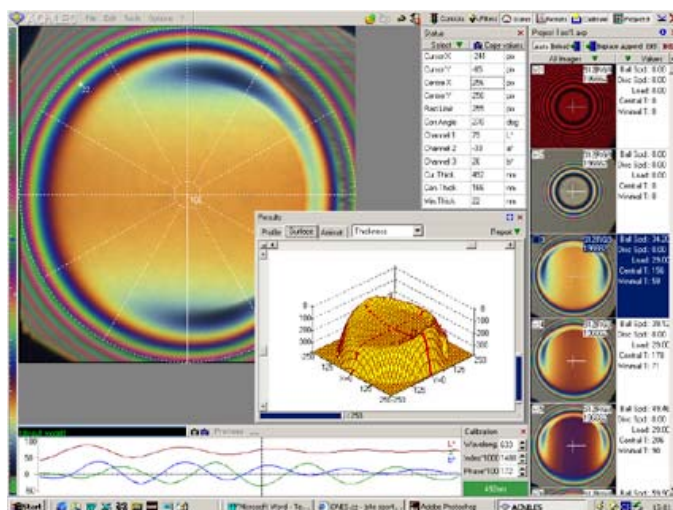
Chování elastohydrodynamického mazacího filmu bylo studováno pro naftenický základový ropný olej. Vlastnosti tohoto maziva jsou podrobně zmapovány v literatuře a za podmínek použitých v této studii bylo možné předpokládat jeho newtonovské chování. Při studiu vlivu provozních podmínek na tvar mazacího filmu byly zvoleny dvě hodnoty maximálního Hertzova tlaku v závislosti na použité kombinaci materiálů třecích těles. U mazaného kontaktu, mezi ocelovou kuličkou a skleněným kotoučem ($p_H = 0,511$ GPa) byla změřena a vypočítána rozložení tloušťky pro pět rychlostí valení třecích povrchů od 0,029 m/s ($U = 6,02 \cdot 10^{-12}$) do 0,1424 m/s ($U = 2,96 \cdot 10^{-11}$). V případě kombinace třecích povrchů ocel-safír ($p_H = 1,06$ GPa) byly zvoleny čtyři rychlosti valení třecích povrchů od 0,0759 m/s ($U = 5,02 \cdot 10^{-12}$) do 0,1789 m/s ($U = 1,18 \cdot 10^{-11}$). Stejně jako v předchozím případě byla srovnána naměřená a vypočítaná rozložení tloušťky mazacího filmu ve směru osy x a y kruhového kontaktu a navíc byly k tomuto srovnání použity i vrstevnicové diagramy.

Získané výsledky [2], [3] ukázaly velmi dobrou shodu mezi naměřenými a vypočítanými tvary elastohydrodynamického mazacího filmu. V kontaktní oblasti je zřetelně ohraničená podkovovitá konstriktce tloušťky mazacího filmu a minimální tloušťka mazacího filmu se pro zvolené provozní podmínky nachází v bocích kontaktu. Největší rozdíl mezi absolutními hodnotami byl nalezen právě v okolí této konstriktce, kde je také největší gradient tloušťky mazacího filmu. V případě vyšších kontaktních tlaků byl pozorován větší rozdíl (až 8 %) i v centrální oblasti mazaného kontaktu, který byl způsoben použitým vztahem pro popis změny hustoty maziva s tlakem, který při tlacích nad 0,5 GPa předpokládá příliš malou stlačitelnost maziva. Ze stanovených tvarů mazacího filmu byly získány hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti, které byly srovnány s hodnotami spočítanými z rovnic (8) a (9). U centrální i minimální tloušťky mazacího filmu bylo pozorováno obdobné chování, které zjistili Cann, Spikes a Hutchinson (obr. 10b).

5.2 CENTRÁLNÍ A MINIMÁLNÍ TLOUŠŤKA ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZACÍHO FILMU V KRUHOVÝCH KONTAKTECH

Výsledky prezentované v předcházející kapitole mimo jiné prokázaly, že s pomocí diferenciální kolorimetrie lze studovat chování elastohydrodynamického mazacího filmu s dostatečnou přesností a rozlišitelností. Při následujícím výzkumu elastohydrodynamického mazání kruhových kontaktů použil autor tuto metodu ke studiu vlivu bezrozměrného parametru materiálů G na centrální a minimální tloušťku mazacího filmu. Vzhledem k časové náročnosti výše uvedeného teoretického řešení byly k porovnání naměřených výsledků použity výstupy Vennerova numerického řešení [29]. Ke stanovení teoretických hodnot centrální tloušťky mazacího filmu byla použita rovnice (10). U minimální tloušťky mazacího filmu byly použity hodnoty poměru centrální a minimální tloušťky mazacího filmu publikované v závislosti na Moesově bezrozměrném parametru zatížení M a materiálu L v kombinaci s rovnicí (10). Údaje získané z Hamrockových a Dowsonových rovnic (8) a (9) byly použity jako referenční hodnoty.

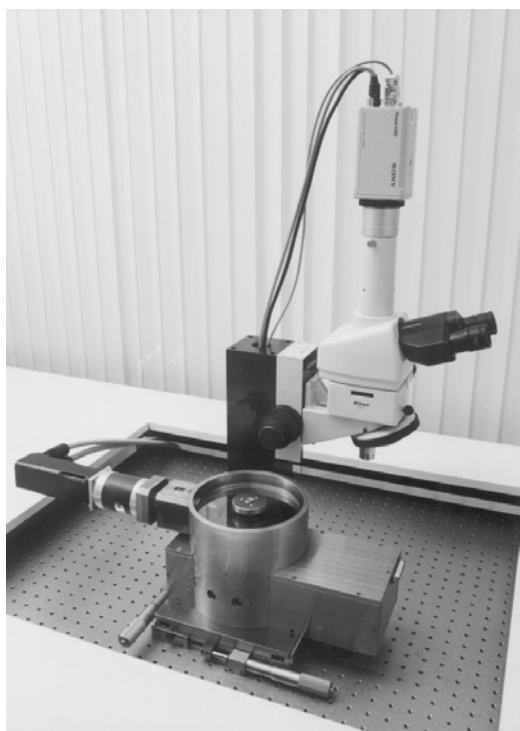
Kombinací třecích povrchů ocel-sklo a ocel-safír mazaných parafinickým nebo naftenickým základovým ropným olejem byly získány hodnoty $G = 1916, 3713$ a 9220 . Maximální Hertzovy tlaky v kontaktu třecích těles byly stejné jako ve výše uvedené studii tvaru mazacího filmu. Naměřené a vypočítané hodnoty centrální a minimální tloušťky byly zobrazeny v závislosti na rychlosti valení třecích těles [4]. Bylo zjištěno, že pro všechny tři hodnoty bezrozměrného parametru G jsou změřené závislosti v logaritmických souřadnicích téměř lineární a s rostoucí hodnotou G se směr-



Obr. 14 Software pro stanovení tloušťky mazacích filmů kolorimetrickou interferometrií

nice těchto závislostí zvyšuje. Tato tendence byla patrná zejména u minimální tloušťky mazacího filmu.

Vzhledem k použité měřicí metodě bylo toto studium omezeno na mazací filmy s tloušťkami nad 60 nm. Při dalším výzkumu mazaných kontaktů autor proto použil upravenou metodu, kolorimetrickou interferometrií [56], která společně se soustavou vrstev na spodním povrchu kotouče, tvořenou vrstvou oxidu křemičitého o tloušťce okolo 200 nm a vrstvou chrómu, umožňuje měřit i tloušťku tenkých mazacích filmů od 3 do 400 nm (obr. 14). Pro studium tenkých mazacích filmů byla navržena i nová měřicí aparatura (obr. 15), pro niž autor navrhl a odladil nové experimentální zařízení, v němž je možné používat standardní ložiskové kuličky o průměru 25,4 mm a zajistit teplotní stabilitu v průběhu měření.



Obr. 15 Měřicí aparatura pro studium tenkých mazacích filmů

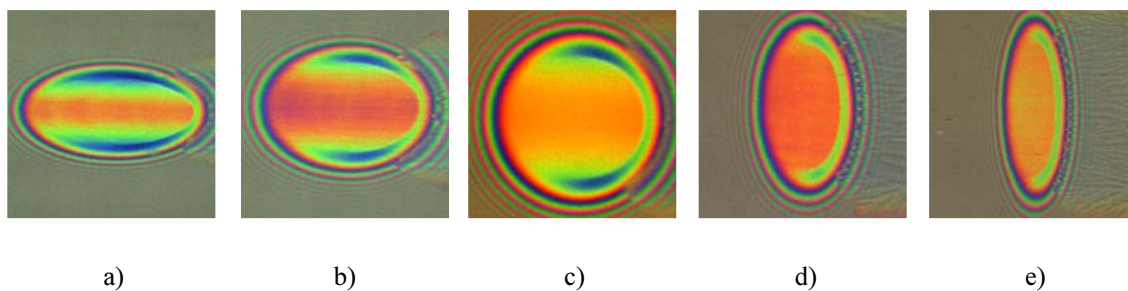
Tyto změny v měřicí aparatuře umožnily podrobné studium [5] centrální a minimální tloušťky elastohydrodynamických mazacích filmů v kruhových kontaktech v rozsahu bezrozměrného parametru materiálů G od 2230 do 9221, rychlosti U od $0,03 \cdot 10^{-11}$ do $3,17 \cdot 10^{-11}$ a zatížení W od $0,39 \cdot 10^{-6}$ do $1,45 \cdot 10^{-6}$. Použitému zatížení odpovídaly hodnoty maximálního Hertzova tlaku v kontaktu od 0,511 do 1,315 GPa.

Ke srovnání naměřených hodnot tloušťky mazacího filmu se současným teoretických řešením problému elastohydrodynamického mazání kruhových kontaktů byly opět použity výsledky Vennerova numerického řešení. Z naměřených i spočítaných údajů byly stanoveny hodnoty exponentu bezrozměrného parametru rychlosti, které potvrdily poznatky získané v předcházející studii. Z těchto výsledků je zřejmé, že vliv rychlosti třecích povrchů je výraznější u minimální tloušťky mazacího filmu. Totéž platí i pro vliv zatížení na tloušťku mazacího filmu v kruhovém kontaktu. Pro dostatečně přesný odhad centrální tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhovém kontaktu tak lze použít jak řešení Hamrockovo a Dowsonovo (9), tak i Vennerovo (10). U změřených hodnot minimální tloušťky mazacího filmu však byla nalezena velmi dobrá shoda pouze s Vennerovým numerickým řešením. Závislost minimální tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu na provozních podmínkách je však natolik komplexní, že ani zavedení multigradních metod pro řešení problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů nenapomohlo k odvození obdobného vztahu, který byl stanoven pro centrální tloušťku mazacího filmu (10).

5.3 CENTRÁLNÍ A MINIMÁLNÍ TLOUŠŤKA ELASTOHYDRODYNAMICKÉHO MAZACÍHO FILMU V ELIPTICKÝCH KONTAKTECH

Poznatky získané autorem při studiu kruhových kontaktů byly použity při plánování experimentů pro studium chování elastohydrodynamických mazacích filmů v eliptických kontaktech. Byly připraveny třecí vzorky (soudečky) o různých poloměrech křivosti, které umožnily studovat chování mazaných eliptických kontaktů s vektorem rychlosti orientovaným jak ve směru hlavní, tak i vedlejší poloosy kontaktní oblasti (obr. 16).

Dvě hodnoty parametru elipticity ($k = 1,854$ a $2,878$) byly zvoleny tak, aby bylo možné porovnat naměřené hodnoty s výsledky numerického řešení, které publikovali Nijenbanning, Venner a Moes (viz str. 12). Pro oba případy bylo stanoveno rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu v širokém rozmezí rychlostí valení třecích povrchů. Změřené průběhy tloušťky mazacího filmu podél osy y eliptického kontaktu vykazovaly stejné charakteristické znaky pozorované u numerického řešení. Ze získaných tvarů mazacího filmu byly opět odečteny hodnoty centrální a minimální tloušťky mazacího filmu. Bylo zjištěno [6], [7], že s rostoucím parametrem elipticity se rozdíl mezi centrální a minimální tloušťkou snižuje a směrnice jejich závislostí na rychlostech třecích povrchů se přibližují. To je také hlavní důvod, proč Hamrock a Dowson získali pro rovnice centrální i minimální tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu téměř shodné exponenty u bezrozměrného parametru rychlosti U .



Obr. 16 Příklad chromatických interferogramů pro $F = 19$ N, $u = 0,025$ m/s a parametr elipticity $k = 0,48$ (a), $0,68$ (b), 1 (c), $1,79$ (d) a $2,82$ (e) (bez měřítka)

SHRNUTÍ

Habilitační práce shrnuje výsledky dosažené při studiu problému elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů mezi hladkými třecími povrchy za ustálených, izotermických podmínek. Jsou v ní rozebrány experimentální i teoretické práce, které v druhé polovině 20. století přispěly k poznání mechanismů mazání těchto kontaktů, čímž přispěly ke zvýšení účinnosti stávajících a vývoji zcela nových typů třecích uzlů tribologických soustav. V této souvislosti je nutné poznamenat, že poznatky získané za výše uvedených podmínek představovaly v každé etapě především východisko k výzkumu dalších komplexních problémů spojených s problematikou elastohydrodynamického mazání. Jednalo se především o změny v rozložení tloušťky a tlaku v mazacím filmu způsobené například:

- nerovnostmi třecích povrchů v důsledku použité dokončovací operace při jejich výrobě, nebo jejich poškození při provozu,
- rozdílnou teplotou mazacího filmu podél a napříč kontaktní oblastí při kluzně-valivém vzájemném pohybu třecích povrchů,
- neneutronovským chováním maziva,
- náhlými změnami v zatížení a rychlostech třecích povrchů.

Stejně tomu je i v současné době, kdy použití pokročilých měřicích metod umožnilo stanovení tvaru velmi tenkých mazacích filmů s tloušťkami v řádu desítek, ale i jednotek nanometrů. Experimentální studium se proto zaměřuje na poznání procesů smíšeného mazání, při kterém hydrodynamický mazací film plně neodděluje třecí povrchy, takže dochází k vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi.

Tímto směrem je orientován i současný výzkum autora, jehož východiska představují vlastní autorovy výsledky experimentálního studia elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů prezentované v této práci. K nim patří zejména:

Návrh, realizace a odladění simulátoru pro modelování podmínek vyskytujících se v reálných tribologických soustavách.

Potvrzení platnosti současných teoretických řešení problému elastohydrodynamického mazání kruhových i eliptických kontaktů mezi hladkými třecími povrchy za ustálených, izotermických podmínek pro mazací filmy s tloušťkami až pod 10 nm.

V průběhu tohoto studia elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů autor dospěl mimo jiné k následujícím poznatkům:

V celém rozsahu testovaných parametrů elipticity $0,48 < k < 2,82$ je zřejmý silný vliv geometrie třecích těles jak na centrální, tak i na minimální tloušťku mazacího filmu, jejichž hodnoty se zvyšují se vzrůstající hodnotou parametru elipticity. S klesající hodnotou bezrozměrného parametru rychlosti U se tento vliv poněkud zeslabuje.

S rostoucí hodnotou parametru elipticity se pro stejné provozní podmínky (zatížení a rychlosti třecích povrchů a teplota maziva) poměr centrální a minimální tloušťky zvyšuje a jeho hodnoty se v důsledku zmenšujícího se bočního výtoku maziva blíží hodnotám tloušťky v ekvivalentním lineárním kontaktu.

Centrální tloušťka mazacího filmu vykazuje v logaritmických souřadnicích lineární závislost na bezrozměrném parametru rychlosti U , zatížení W a materiálů G . Míra této závislosti se mění jen nepatrně se změnou parametru elipticity. Pro odhad centrální tloušťky elastohydrodynamického mazacího filmu proto mohou být s dostatečnou přesností použity rovnice (9), (10) a (11) získané regresní analýzou výsledků numerických řešení.

Minimální tloušťka mazacího filmu vykazuje rozdílné chování pro různé hodnoty parametru elipticity, které je v souladu s výsledky současných numerických řešení [29], [31]. Nicméně v současné době není k dispozici rovnice pro minimální tloušťku elastohydrodynamického mazacího filmu, která by postihovala toto chování. Hamrockova a Dowsonova rovnice (9) však může být

použita k orientačnímu (nahodnocenému) odhadu hodnot minimální tloušťky v elasto-hydrodynamicky mazaném bodovém kontaktu.

Výsledky získané autorem přispěly nejen k objasnění procesů probíhajících v bodových kontaktech mezi třecími povrchy oddělenými tenkým elasto-hydrodynamickým mazacím filmem o tloušťce pod 100 nm, ale vytvořily i podmínky pro navazující studium mazání reálných třecích povrchů. S experimentální aparaturou, na jejímž návrhu a realizaci se autor podílel, tak bude možné např. studovat mazací filmy za podmínek (průběhů rychlostí a zatížení třecích povrchů, velikostí skluzů, drsností třecích povrchů, teploty maziva apod.) vyskytujících se v záběru zubů ozubených kol, vačky a zdvihátka, ve valivém ložisku a u lineárního valivého vedení.

LITERATURA

- [1] DOWSON, D.: *History of Tribology*. New York, Longman Inc. 1979, s. 481.
- [2] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – ČERMÁK, J. – LIŠKA, M.: *Elastohydrodynamic Lubricant Film Shape – Comparison between Experimental and Theoretical Results*. In: DOWSON, D.: *Tribology for Energy Conservation*. Tribology Series 34. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 1998, s. 221–232.
- [3] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – POLIŠČUK, R. – ČERMÁK, J. – LIŠKA, M.: *Experimental Evaluation of EHD Film Shape and Its Comparison With Numerical Solution*. *Journal of Tribology – Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering)*, **122**, 2000, 4, s. 689–696.
- [4] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M.: *An Experimental Study of Elasto-hydrodynamic Central and Minimum Film Thicknesses for Various Material Parameters*. *Lubrication Science*, **12**, 2000, 3, s. 239–251.
- [5] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M.: *Experimental Study of Central and Minimum Elasto-hydrodynamic Film Thickness by Colorimetric Interferometry Technique*. *Tribology Transactions*, **43**, 2000, 4, s. 611–618.
- [6] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – POLIŠČUK, R. – LIŠKA, M.: *Experimental Study of Central and Minimum Film Thickness in Elasto-hydrodynamic Elliptic Contacts*. In: DOWSON, D.: *Tribology Research: From Model Experiment to Industrial Problem*. Tribology Series 39. Amsterdam, Elsevier Science B. V. 2001, s. 495–504.
- [7] KŘUPKA, I. – HARTL, M. – LIŠKA, M.: *Experimental Study of EHD Elliptic Contacts*. In: *Abstracts/Papers/Posters – 2nd World Tribology Congress [CD-ROM]*. Vienna, Österreichische Tribologische Gesellschaft 2001.
- [8] COULOMB, C. A.: *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et à la roideur des cordages*. *Mém. Math. Phys.*, 1785, s. 161–342.
- [9] DOWSON, D.: *History of Tribology*. New York, Longman Inc. 1979, s. 210–224.
- [10] TOWER, B.: *First Report on Friction Experiments (Friction on Lubricated Bearings)*. *Proceeding Institution of Mechanical Engineers*, 1883, s. 632–659.
- [11] TOWER, B.: *Second Report on Friction Experiments (Experiments on the Oil Pressure in a Bearing)*. *Proceeding Institution of Mechanical Engineers*, 1885, s. 58–70.
- [12] 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.
- [13] DOWSON, D.: *History of Tribology*. New York, Longman Inc. 1979, s. 429–442.
- [14] HAMROCK, B. J.: *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, s. 2.
- [15] HAMROCK, B. J.: *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, s. 4.

- [16] BHUSHAN, B. – GUPTA, B. K.: *Handbook of Tribology (Materials, Coatings, and Surface Treatments)*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1991, s. 2.34.
- [17] CHENG, H. S.: *Elastohydrodynamic Lubrication*. CRC Handbook of Lubrication, CRC Press, Boca Raton, 1984, s. 141.
- [18] 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 Engineerings), Journal of Lubrication Technology, **98**, 1976, s. 375–383.
- [19] JOHNSON, K. L.: *Regimes of Elastohydrodynamic Lubrication*. Journal of Mechanical Engineering Science, **12**, 1970, s. 9–16.
- [20] MOES, H. – BOSMA, R.: *Film Thickness and Traction in E.H.L. at Point Contact*. Proceeding of Elastohydrodynamic Lubrication Symposium, Institution of Mechanical Engineers, London, 1972, s. 149–152.
- [21] 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.
- [22] ESFAHANIAN, M. – HAMROCK, B. J.: *Fluid-Film Lubrication Regimes Revisited*. Tribology Transactions, **34**, 1991, s. 618–632.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] HAMROCK, B. J. – DOWSON, D.: *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part IV – Starvation Results*. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Lubrication Technology, **99**, 1977, s. 15–23.
- [28] LUBRECHT, A. A. – TEN NAPEL, W. E. – BOSMA, R.: *Multigrid, an Alternative Method of Solution for Two-Dimensional Elastohydrodynamically Lubricated Point Contact Calculations*. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, **109**, 1987, s. 437–442.
- [29] VENNER, C. H. – TEN NAPEL, W. E.: *Multilevel Solution of the Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contact Problem. Part I: Theory and Numerical Algorithm*. Wear, **152**, 1992, s. 351–367.
- [30] LUBRECHT, A. A. – VENNER, C. H. – TEN NAPEL, W. E. – BOSMA, R.: *Film Thickness Calculations of Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contacts, Using a Multigrid Method*. Transactions of the ASME (the American Society of Mechanical Engineering), Journal of Tribology, **110**, 1988, s. 503–507.
- [31] NIJENBANNING, G. – VENNER, C. H. – MOES, H.: *Film Thickness in Elastohydrodynamically Lubricated Elliptic Contacts*. Wear, **176**, 1994, s. 217–229.

- [32] ARCHARD, J. F. – KIRK, M. T.: *Lubrication at Point Contacts*. Proceedings of the Royal Society of London, **A261**, 1961, s. 535–550.
- [33] CROOK, A. W.: *The Lubrication of Rollers. II. Film Thickness with Relation to Viscosity and Speed*. Philosophical Transactions of the Royal Society London, **A254**, 1961, s. 223–231.
- [34] ARCHARD, J. F. – KIRK, M. T.: *Influence of Elastic Modulus on the Lubrication of Point Contacts*. In: Lubrication and Wear Convention. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1963, s. 181–189.
- [35] KIRK, M. T.: *Hydrodynamic Lubrication of 'Perspex'*. Nature, **194**, 1962, s. 965–966.
- [36] GOHAR, R. – CAMERON, A.: *Optical Measurement of Oil Film Thickness under Elastohydrodynamic Lubrication*. Nature, **200**, 1963, s. 458–459.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] SALEH, B. E. A. – TEICH, M. C.: *Základy fotoniky*. Matfyzpress, vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, 1994, s. 69–86.
- [41] SPIKES, H. A. – GUANGTENG, G.: *Properties of Ultra-thin Lubricating Films Using Wedged Spacer Layer Optical Interferometry*. In: Interface Dynamics (Proceedings of the 14th Leeds-Lyon Symposium on Tribology). London, Mechanical Engineering Publications Limited. 1988, s. 275–279.
- [42] 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.
- [43] COOPER, D. – MOORE, A. J.: *Application of the Ultra-thin Elastohydrodynamic Oil Film Thickness Technique to the Study of Automotive Engine Oils*. Wear, **175**, 1994, s. 93–105.
- [44] BASKERVILLE, F. M. – MOORE, A. J.: *Film Thickness Anomalies in Very Thin Elastohydrodynamic Oil Film*. In: Elastohydrodynamics '96 (Proceedings of the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Elsevier, Amsterdam, 1997, s. 147–157.
- [45] SMEETH, M. – CANN, P. M. – SPIKES, H. A.: *Measurement of Elastohydrodynamic Film Formation in Rolling Contacts at Very High Pressure*. In: Lubricants and Lubrication (Proceedings of the 21st Leeds-Lyon Symposium on Tribology). Elsevier, Amsterdam, 1995, s. 497–502.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.

- [50] 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.
- [51] GUANGTENG, G. – CANN, P. M. – OLVER, A. V. – SPIKES, H. A.: *An Experimental Study of Film Thickness Between Rough Surfaces in EHD Contacts*. Tribology International, **33**, 2000, s. 183–189.
- [52] LORD, J. – MARKLUND, O. – LARSSON, R.: *Multi channel interferometry for measurement of the thickness of very thin EHL lubricant films*, In: Thinning films and tribological interfaces (Proceedings of the 26th Leeds-Lyon Symposium on Tribology), Elsevier, 2000, s. 711–718.
- [53] 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.
- [54] HARTL, M. – KŘUPKA, I. – LIŠKA, M.: *Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of Chromatic Interference Patterns*. Optical Engineering, **36**, 1997, s. 2384–2391.
- [55] ČERMÁK, J.: *Výpočet tlakového pole a tloušťky separačního filmu v elastohydrodynamicky mazaných kontaktech*. Disertační práce, Brno, 1997, 143 s.
- [56] 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.

ABSTRACT

The monograph is devoted to the study of isothermal elastohydrodynamic lubrication of smooth rubbing surfaces. It is mainly concentrated on the behaviour of lubricant film thickness and pressure distribution within point contacts as a function of load, speed and materials of friction bodies.

It is divided into four parts. The first one deals with the process of the recognition of the role of elastohydrodynamic lubricant films in the diminishing of friction and wear in non-conformal contacts. It describes the way of the understanding of fluid film lubrication by the classical experimental and theoretical studies of the 1880s and the differences in the lubrication of conformal and non-conformal contacts, the achievements of the theoretical and experimental studies leading to the description of the main features of elastohydrodynamically lubricated line contacts and the definition of different fluid film lubrication regimes taking place in point contacts. The second part summarises the results of theoretical studies of elastohydrodynamic lubrication of point contacts presented by the end of 20. century. The governing equations of elastohydrodynamic lubrication of point contacts are listed and semi-analytical and numerical approaches to their solution are mentioned. In the third part the experimental studies that use the optical interferometry technique for the determination of film thickness distribution are reviewed. The fourth part contains author's contribution to the understanding of the mechanisms of elastohydrodynamic lubrication of point contacts. It gives the results of experimental investigation of the influence of dimensionless speed parameter U , load parameter W and materials parameter G on lubricant film shape and its central and minimum film thickness within the circular and elliptical contacts. Six papers published in the scientific journals and presented at the tribology conferences are attached.