

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

**Numerická simulace
elastohydrodynamicky mazaného
kruhového kontaktu nehladkých povrchů**

POJEDNÁNÍ KE STÁTNÍ DOKTORSKÉ ZKOUŠCE

VĚDNÍ OBOR:
ŠKOLITEL:
DOKTORAND:
ROZSAH:

KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ
DOC. ING. IVAN KŘUPKA, PH.D.
ING. LIBOR URBANEC
29 STRAN

BRNO, ÚNOR 2007

OBSAH

OBSAH	- 2 -
PŘEDMLUVA	- 3 -
1 ÚVOD	- 4 -
2 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ	- 11 -
3 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ NEHLADKÝCH POVRCHŮ	- 17 -
4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	- 21 -
5 DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	- 22 -
6 ZÁVĚR	- 26 -
SEZNAM LITERATURY	- 27 -

PŘEDMLUVA

V tomto pojednání je předložen souhrn poznatků z oblasti elastohydrodynamického mazání nekonformních kontaktních povrchů se zaměřením na bodový kontakt. Pozornost je věnována především numerické simulaci parametrů elastohydrodynamického mazání. Těmito parametry je tloušťka mazacího filmu a rozložení elastohydrodynamického tlaku v kruhové kontaktní oblasti mezi dvěma povrchy.

První kapitola je věnována obecnému vymezení pojmu elastohydrodynamického mazání. V této části pojednání jsou popsány rovněž způsoby, kterými je problematika mazání kontaktních povrchů v posledních desetiletích studována. Je uveden přehled významných poznatků, kterých bylo z historického hlediska na tomto poli dosaženo. Dále jsou identifikovány a vymezeny studované parametry v oblasti hladkých i nehladkých povrchů.

Druhá a třetí kapitola je v návaznosti na první kapitolu věnována detailnějšímu pohledu na důležité poznatky, které měly z pohledu této disertační práce největší vliv na úroveň poznání dané problematiky. Ve druhé kapitole je pozornost věnována nejznámějším výsledkům numerického řešení problému elastohydrodynamického mazání a historickému vývoji přístupu k numerickému řešení. Třetí kapitola diskutuje souvislost mezi parametry elastohydrodynamického mazání a nehladkými kontaktními povrchy. Závěrem této kapitoly jsou zmíněna východiska v texturách kontaktních povrchů, které mohou mít pozitivní vliv na parametry elastohydrodynamického mazacího filmu.

Čtvrtá kapitola vymezuje cíle disertační práce. Definované cíle jsou výsledkem analýzy současného stavu poznání v dané oblasti s výhledem na využití výstupů disertační práce pro praktické použití v dalším výzkumu elastohydrodynamicky mazaných bodových kontaktů. Je zdůvodněna potřeba a použitelnost matematického (teoretického) modelu pro výzkum v dané oblasti.

Pátá kapitola popisuje dosažené výsledky práce na tématu. Je zde uveden popis použitého matematického modelu a dále modely numerické včetně použitých výkonných multigradních metod, které přináší zcela nové možnosti při řešení tohoto typu úloh. Výsledky numerických simulací parametrů elastohydrodynamického mazání hladkých povrchů i povrchů s vtiskem pro různé parametry kontaktu jsou uvedeny na závěr této kapitoly. Nechybí ani stručné porovnání matematického modelu s výsledky experimentální analýzy.

V poslední kapitole jsou stručně shrnuty výsledky dosavadní práce a předložena témata ke zpracování a dalšímu postupu v této oblasti.

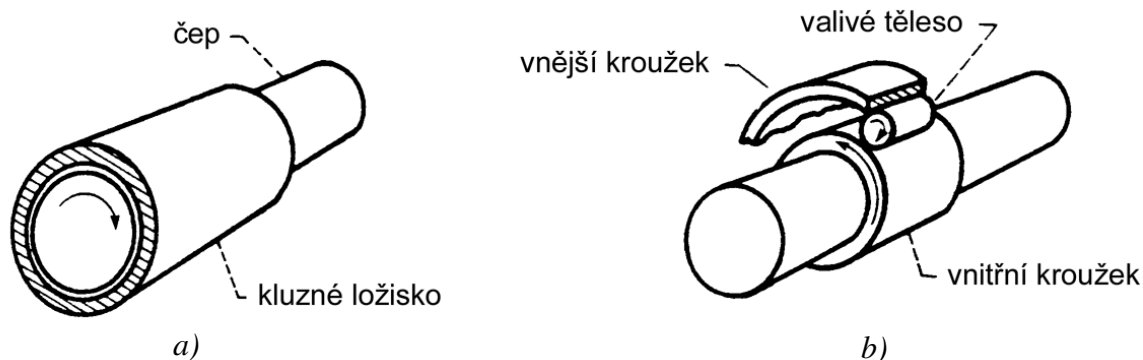
1 ÚVOD

Pro vymezení pojmu elasto-hydrodynamického (EHD) mazání je vhodné nejprve vymežit pojem hydrodynamického (HD) mazání, neboť EHD mazání je modifikací mazání HD.

O HD mazání hovoříme v případě dvou konformních povrchů (Obr. 1.1a), které jsou při vzájemném relativním pohybu plně separovány vrstvou maziva, která zabraňuje vzájemnému kontaktu obou povrchů. Díky vzájemně konvergentním povrchům vytvářejícím klínovou drážku, relativní rychlosti obou povrchů a viskozitě maziva, dochází v mazací vrstvě k rozvoji pozitivního tlakového profilu. Vzhledem k nízkému zatížení kontaktu nezpůsobí tlakový profil rozvinutý ve vrstvě maziva (obvykle pod hranicí 5 MPa) podstatnou elastickou deformaci.

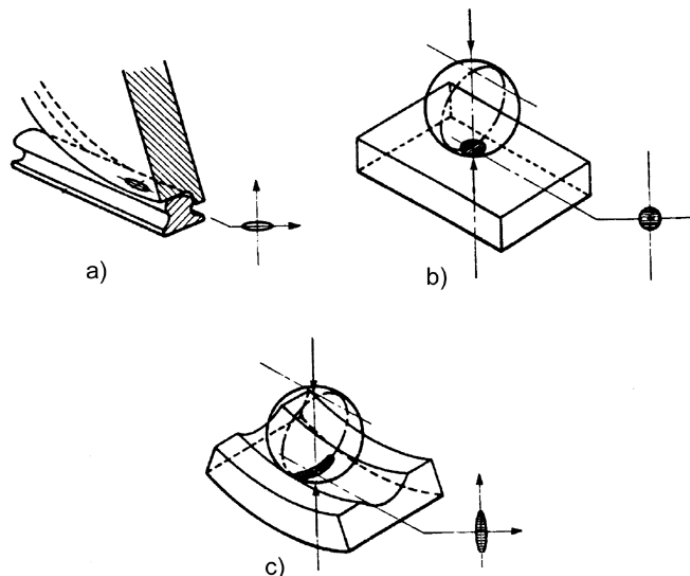
EHD mazání lze popsat jako formu HD mazání s tím rozdílem, že elastická deformace kontaktních povrchů je významná a hovoříme o něm v souvislosti s nekonformními povrchy (Obr. 1.1b). Základní podmínky rozvoje pozitivního tlakového profilu v mazivu uvedené v případě HD mazání jsou i v tomto případě významné. S ohledem na relativně malou velikost kontaktní plochy může tlakový profil v mazací vrstvě dosahovat řádu GPa. Takové zatížení v mazací vrstvě je příčinou elastické deformace kontaktních povrchů, která je řádově větší než minimální tloušťka mazacího filmu (řádově 0.1 μm). Dalším fyzikálním fenoménem s kritickým vlivem na tloušťku mazacího filmu a tlakový profil je tlakově-viskózní chování maziva. V důsledku výrazných tlakových gradientů v kontaktní oblasti dochází rovněž k řádovým rozdílům viskozity maziva v mazací vrstvě.

Jak je patrné z výše uvedeného vymezení pojmu EHD mazání, základními sledovanými parametry jsou tloušťka mazací vrstvy uvnitř kontaktní oblasti (nejčastěji minimální tloušťka a tloušťka ve středu kontaktní oblasti) a tlak v mazací vrstvě (celý tlakový profil a maximální hodnota tlaku). Při studiu parametrů EHD mazání je obvyklé podrobnější členění z hlediska tvaru kontaktní oblasti. Obecně hovoříme o EHD mazání na eliptické resp. kruhové (bodové) oblasti. Předmětem našeho zájmu je případ bodového kontaktu (Obr. 1.2b), neboť jde obecně o variantu bodového eliptického kontaktu, v praxi odpovídající kontaktní geometrii nejrozšířenějšího typu valivých ložisek - ložisek kuličkových.



Obr. 1.1 Základní dva typy valivých povrchů – konformní (a) a nekonformní (b) [1].

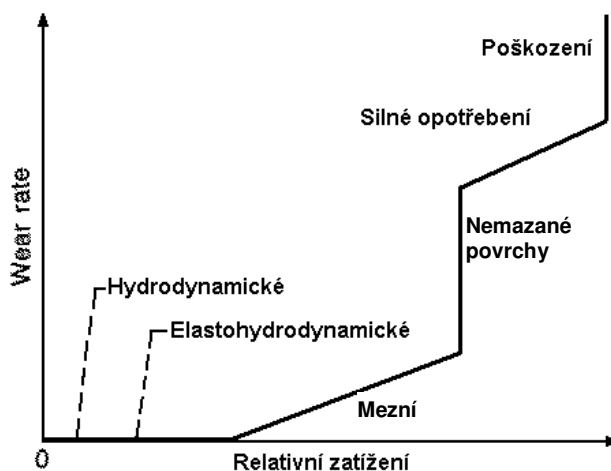
1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ



Obr. 1.2 Příklad eliptického kontaktu s hlavní poloosou orientovanou ve směru valení (a) a příčně ke směru valení (c), a kruhového (bodového) kontaktu (b) [1].

Dalším důvodem je její symetrie vhodná nejen pro matematický popis fyzikálního děje, ale v neposlední řadě rovněž pro experimentální studium.

Pokud jsou kontaktní povrchy strojních součástí navrženy z hlediska jejich činnosti ideálně, jsou za provozu od sebe plně separovány mazacím filmem. Je obecně známo, že dostatečně silná vrstva mazacího filmu má pozitivní vliv na únavovou životnost kontaktních těles, zatímco nedostatečně silná vrstva maziva mezi povrchy může způsobit přímý kontakt obou povrchů a únavová životnost je tímto silně negativně ovlivněna (Obr. 1.3). Kromě tloušťky mazacího filmu, která je dána vhodnou konstrukcí strojní součásti z hlediska mazání, má rozhodující vliv na životnost kontaktních povrchů také drsnost kontaktních povrchů. Četnost a reliéf povrchových nerovností společně s již zmíněnou tloušťkou mazací vrstvy určuje, zda se povrchové nerovnosti dostanou do vzájemného kontaktu, aniž by byly separovány vrstvou maziva. Uvedením těchto charakteristik do vzájemného vztahu je možné definovat, resp. parametrizovat typ mazacího režimu tzv. *parametrem mazání* Λ (1.1).



Obr. 1.3 Vztah mezi režimem mazání a opotřebením kontaktních povrchů. [1]

1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

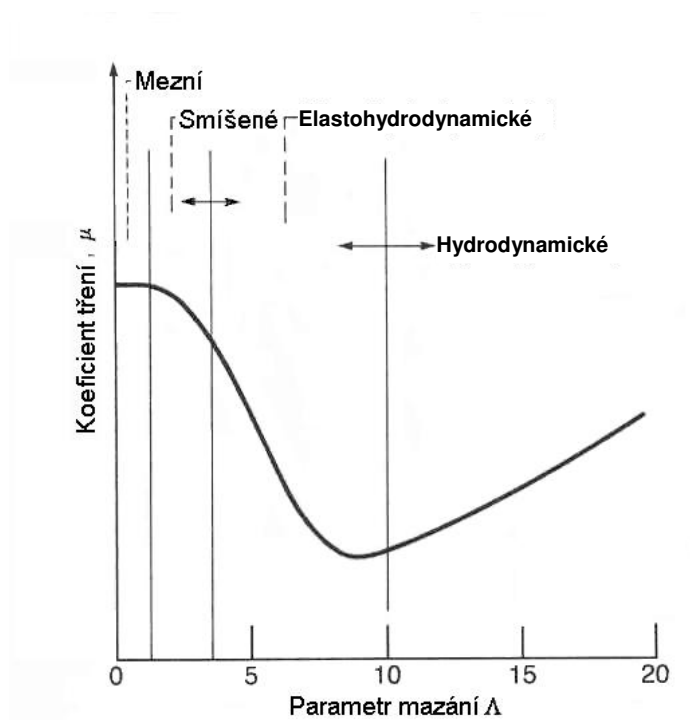
Tento parametr uvádí do souvislosti minimální tloušťku mazacího filmu a střední kvadratickou drsnost kontaktních povrchů podle následujícího vztahu:

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{(R_{q,a}^2 + R_{q,b}^2)^{1/2}} \quad (1.1)$$

kde: $R_{q,a}$... střední kvadratická drsnost povrchu **a**
 $R_{q,b}$... střední kvadratická drsnost povrchu **b**
 h_{\min} ... minimální tloušťka mazacího filmu

Pokud se hodnota *parametru mazání* Λ pohybuje v rozmezí $3 \leq \Lambda \leq 10$, hovoříme o EHD mazání (Obr. 1.4). Z Obr. 1.4 je zřejmé, že EHD mazání je optimální mazací režim z hlediska velikosti součinitele tření a je tedy optimální i z hlediska životnosti kontaktních povrchů.

Historicky lze počátek teoretického zkoumání dějů vznikajících mezi dvěma kontaktními povrchy datovat do roku 1849, kdy se von Pauli a po něm i Firm v roce 1854 [2] zabývali případem hřídele a ložiska za plně HD podmínek. V 90. letech 19. století realizoval Tower sérii experimentů v rámci studia tření mezi povrchy za vysokých rychlostí. Jeho práce přinesla poznání, že tlak v oleji, kterým byl mazán kluzný kontakt, je výrazně vyšší než měrné zatížení kluzného uložení. Toto elementární poznání dále rozpracoval a stanovil rozložení tlaku v kluzném kontaktu [3]-[4]. V roce 1883, tedy ve stejné době jako Tower, definoval rus Petrov tření v ložiscích s kapalinovou vrstvou jako hydrodynamický jev, přičemž odvodil třecí sílu jako funkci dynamické viskozity maziva, styčné plochy, rychlosti pohybu a tloušťky mazacího filmu [5]. HD mazání se tak stalo výchozím bodem pro další zkoumání.



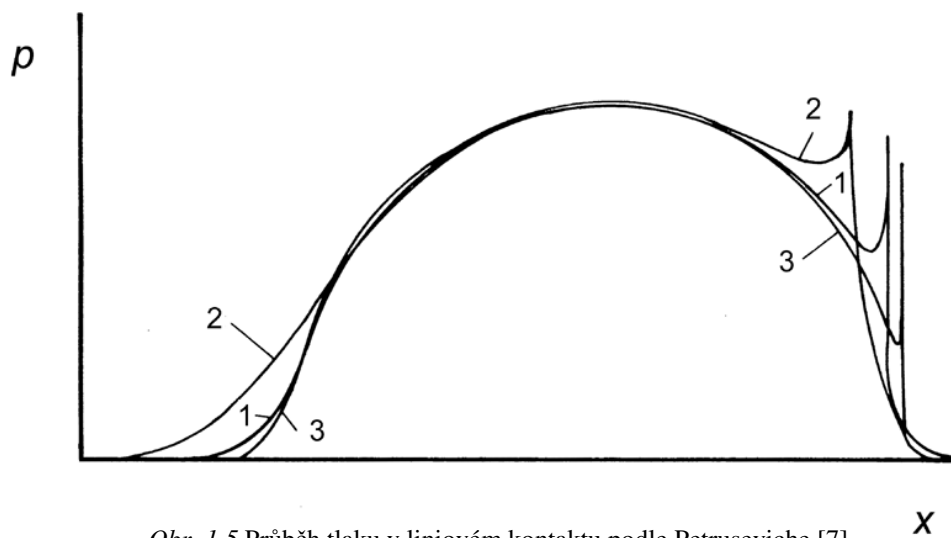
Obr. 1.4 Závislost součinitele tření μ na parametru mazání [1].

1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

Od roku 1949, kdy bylo EHD teoreticky popsáno, byla celá řada studií věnována teoretickým i experimentálním metodám. Rozvoj detailního studia EHD mazání souvisí jednak s rozvojem experimentálních zařízení a metod, dále s rozvojem výpočetní techniky a konečně i s rozvojem numerických matematických metod, které dovolují řešit teoretické problémy popsané komplikovaným matematickým aparátem ve smysluplném čase a s přijatelnou přesností.

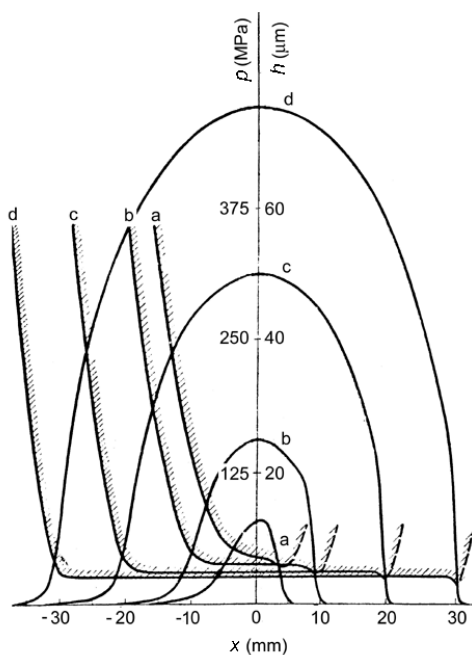
První významnou teoretickou prací na téma elasto hydrodynamického mazání byla průlomová studie Grubina [6] z roku 1949, ve které byla při zkoumání vstupní oblasti kontaktu nekonformních strojních součástí poprvé dána do souvislosti elastická deformace kontaktních těles a tlakově-viskózní závislost použitého maziva pro případ liniového kontaktu. Tato Grubinova práce ukázala, že tloušťky mazacího filmu, které jsou výsledkem jeho ‚elastického‘ modelu, jsou až o dva řády větší než hodnoty predikované na základě hydrodynamické teorie. Pokud jde o ozubení a valivá ložiska, jsou Grubinovy výsledky tloušťky mazacího filmu navíc ve větší shodě s experimentálními výsledky. V roce 1951 Petrusevich [7] potvrdil správnost základních Grubinových předpokladů, když publikoval výsledky řešení rovnic popisujících hydrodynamicky mazaný kontakt s uvažováním elasticity kontaktních těles. Navíc Petrusevichova práce přispěla novými poznatky k dosavadním znalostem o tvaru rozložení mazacího filmu i tlaku v kontaktní oblasti (Obr. 1.5).

EHD problém se díky své teoretické i matematické náročnosti stal předmětem detailního studia až v 60. letech 20. století. Tyto práce byly zaměřeny zejména na liniový kontakt, u kterého bylo možné díky využití geometrické charakteristiky liniového kontaktu dosáhnout jednoduššího jednorozměrného matematického popisu Reynoldsovou rovnicí. Za všechny práce publikované v té době lze zmínit studii Dowsona a Higginsona z roku 1959 [8], která popisuje iterativní postup řešení komplikovaného EHD problému (Obr. 1.6). Díky tomuto numerickému nástroji mohli Dowson a Higginson později předložit empirické formule minimální tloušťky mazacího filmu v liniových kontaktech [1]. Jejich předpoklady o tloušťce mazacího filmu byly potvrzeny experimentálně Crookem v roce 1961 [9]. Crookova práce navíc shledala vliv zatížení kontaktu jako nepodstatný, zatímco vliv rychlosti valení kontaktních těles na tloušťku mazacího filmu jako významný. Vzhledem k omezeným možnostem řešení EHD problému byly práce z té doby změřeny na malá zatížení.



Obr. 1.5 Průběh tlaku v liniovém kontaktu podle Petruseviche [7].

1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ



Obr. 1.6 Rozložení tlaku v mazacím filmu a jeho tloušťky v liniovém kontaktu při rychlosti 0.98 m/s a zatížení odpovídající maximálnímu Hertzovu tlaku a) 77,5 MPa, b) 150 MPa, c) 300 MPa a d) 450 MPa. (Převzato z [8] a [57]).

S rozvojem výpočetní techniky a s tím souvisejících numerických metod bylo možné začít se simulací reálných kontaktních poměrů. První práci na tomto poli prezentovali Houpert a Hamrock v roce 1986 [10], když předložili numerické řešení EHD problému na liniové oblasti bez omezení zatížení kontaktu.

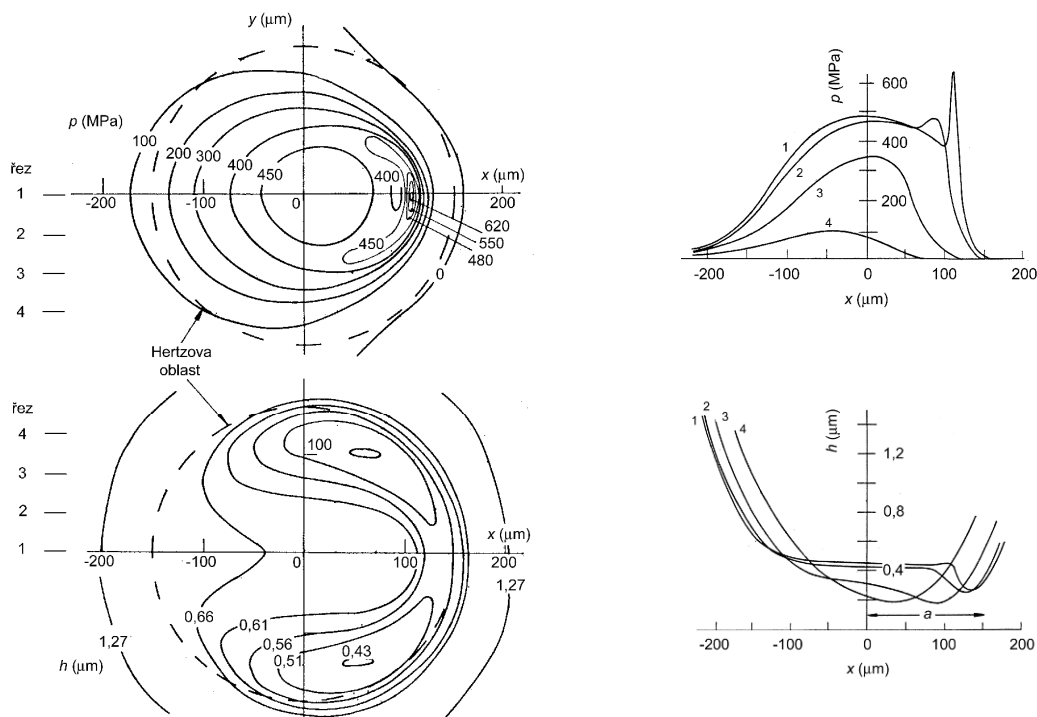
Kromě liniového kontaktu byla pozornost věnována též oblasti bodového (kruhového) kontaktu. Archard a Cowking [11] v letech 1956 až 1965 předložili přibližné řešení bodového kontaktu, které modifikovalo tehdejší úroveň řešení liniového kontaktu pro bodový kontakt ve smyslu zohlednění dvojrozměrnosti bodového kontaktu aproximačním faktorem. Tento faktor redukoval velikost kontaktního tlaku v mazací vrstvě po stranách kontaktní oblasti. Jedno z prvních řešení plně dvojrozměrné úlohy bodového kontaktu, které vycházelo z Grubinova řešení jednorozměrného liniového kontaktu v kombinaci s klasickou Hertzovou teorií elastického kontaktu, předložili Cameron a Gohar v roce 1966 [12] podobně jako Wedeven a kol. v roce 1971 [13]. Dalším krokem bylo zobecnění těchto v zásadě analytických metod pro eliptický kontakt, čímž byla prokázána vzájemná souvislost obou přístupů, resp. nutnost odlišného přístupu při přechodu od liniového kontaktu ke kontaktu bodovému. Cheng v roce 1970 [14] ve své práci prokázal, že velikost kontaktního tlaku, resp. velikost aproximačního parametru zohledňující únik maziva do stran eliptického kontaktu, je závislá na elipticitě kontaktní oblasti a tedy na tom, zda je kontaktní oblast blízká liniovému resp. bodovému kontaktu. Ranger a kol. [15] v roce 1975 prezentovali první plně řešení rovnic popisujících EHD problém s využitím numerického iterativního přístupu. Jejich řešení umožňovalo nalézt centrální a minimální tloušťku mazacího filmu (Obr. 1.7) a na základě provedených výpočtů předložili zobecňující formule pro určení tloušťky mazacího filmu. Podobným způsobem postupovali později v letech 1976 a 1977 i Hamrock a Dowson [16],[17],[18],[19] kteří s cílem zpřesnit predikci minimální a centrální tloušťky mazacího filmu provedli sérii 34 výpočtů pro různé kombinace zatížení, rychlosti valení, materiálu a parametru elipticity kontaktní oblasti. Jejich práce je postavena na nově zavedených bezrozměrných vstupních parametrech, čímž dosáhli významné redukce počtu nezávisle

1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

proměnných pro generování kombinací vstupních veličin. Výsledkem jejich komplexního výzkumu byly prediktivní vztahy pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu zohledňující celou řadu materiálových vlastností nejen kontaktních těles, ale i použitého maziva, zatížení, rychlosti valení a kontaktní geometrie. Jejich komplexní a detailní přístup vyústil v předložení prediktivních vztahů pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu. Mnohé z jejich teoretických studií EHD mazaných eliptických kontaktů se také ukázaly v dobrém souladu s experimentálními pozorováními (např. Koye a Winner z roku 1980 [20]). V roce 1981 aplikovali svoje poznatky na valivá ložiska v knize [21], která obsahovala souhrn poznatků jejich společného úsilí na poli EHD mazání. Jejich přístup byl později využit k dalšímu zpřesnění jejich prediktivních vztahů (např. Chittenden a kol. [22]), což však jen podtrhuje skutečnost, že se jejich výsledky staly na dlouhou dobu etalonem používaným v široké inženýrské praxi až do dnešních dnů.

Ačkoliv se jejich práce stala základem pro výzkum v oblasti EHD mazání bodového kontaktu, úroveň tehdejších použitých numerických metod úzce související s dostupnou výpočetní technikou omezila použitelnost jejich vztahů pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu pro kontaktní tlaky do výše 0.5 GPa. Vyšší zatížení bodového kontaktu a s tím související vyšší hodnoty maximálních kontaktních tlaků nebylo možné analyzovat z důvodů nekonvergence použitých numerických metod, resp. z důvodu neexistence takové výpočetní techniky, která by umožnila získání výsledků numerického řešení v reálném čase i pro vyšší kontaktní zatížení na kontaktní oblasti.

Průlom v této oblasti znamenala práce Lubrechta, ten Napela a Bosmy z roku 1987 [23], která představila zcela nový numerický nástroj použitelný pro řešení matematického problému EHD mazání. Prezentovaná multigradní numerická metoda umožnila provádět rozsáhlejší výpočty na kruhovém kontaktu ve velmi krátkém čase v porovnání s klasickým numerickým přístupem do té



Obr. 1.7 Rozložení tloušťky a tlaku elastohydrodynamického mazacího filmu v kruhovém kontaktu pro $F = 22,2 \text{ N}$ a $u = 0,33 \text{ m/s}$ [15].

1. ÚVOD – ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

doby používaným a umožnila tedy analyzovat případy více zatížených bodových kontaktů. V další práci Lubrecht a kol. [24] prokázal, že rozdíl mezi minimální a centrální tloušťkou mazacího filmu, který byl do té doby vyjádřen poměrem 0,75, se s vyšším zatížením kontaktu zvětšuje. Další zdokonalení multigradní metody dosažené kombinací s multilevel multi-integrací (MLMI) pro řešení elastického integrálu v rovnici elastických deformací (Venner, ten Napel [25],[26], Lubrecht, Venner [27][28]) přineslo další posun a umožnilo řešení EHD problému až do úrovně kontaktního tlaku okolo 3,3 GPa.

Uvedená multigradní numerická metoda spolu s multilevel multi-integrací se stala pilotní numerickou metodou pro výzkum v oblasti EHD mazání až do dnešních dnů i přesto, že byly prezentovány i další metody na odlišných matematických platformách. Takovým příkladem je např. použití Conjugate Gradient Metod (CGM) v kombinaci s technikou Fast Fourier Transformation (FFT) v práci Aie a Sawamiphakdie [29], kdy použili konverze kontaktního problému na problém minimalizace volné deformační energie.

Kromě teoretického přístupu k řešení EHD problému byla současně snaha také o experimentální pozorování kontaktních jevů. Vzhledem ke skutečnosti, že tato práce je zaměřena na teoretické studium EHD mazaného bodového kontaktu, odvoláme se na publikace, které se experimentálním studiem kontaktní problematiky zabývají blíže [30],[31],[32] nebo [33].

Výzkum v oblasti mazání kontaktních povrchů úzce souvisí s významnou tribologickou oblastí, a to výzkumem v oblasti maziv. Ačkoliv jsou vlastnosti použitého maziva kritické pro EHD děje probíhající v mazací vrstvě mezi kontaktními tělesy, výzkum v této oblasti tvoří natolik specifickou oblast, že není účelem se jí v práci zamýšleného rozsahu zabývat (viz. např. [34], [35]).

V následující části se zaměříme na zajímavé teoretické postupy, modely, řešení a výsledky v oblasti hladkých i nehladkých povrchů, která tvoří východiska pro tuto disertační práci.

2 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Tato kapitola diskutuje podle našeho názoru jedny z nejdůležitějších poznatků, které byly do současnosti na poli EHD mazání hladkých povrchů dosaženy a prezentovány. V první kapitole byly zmíněny tři, z dnešního pohledu nejvýznamnější, počiny. Prvním z nich je detailní studie EHD parametrů eliptického kontaktu, kterou provedli Hamrock a Dowson.

Hamrock a Dowson využili pro popis eliptického kontaktu bezrozměrných vstupních veličin W , G a U (viz. rovnice (2.1), (2.2) a (2.3)) [16], díky čemuž snížili počet nezávisle proměnných vstupujících do řešení.

$$\text{Bezrozměrný parametr rychlosti} \quad U = \frac{\eta_0 * V}{E' * R_x} \quad (2.1)$$

$$\text{Bezrozměrný parametr zatížení} \quad W = \frac{w}{E' * R_x^2} \quad (2.2)$$

$$\text{Bezrozměrný parametr materiálu} \quad G = \alpha * E' \quad (2.3)$$

V rovnicích (2.1), (2.2) a (2.3) vystupují tyto následující veličiny:

$$E' \quad \text{tzv. efektivní modul pružnosti kontaktních povrchů} \quad 2 \left(\frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \right)^{-1} \quad \text{kde}$$

veličiny E a μ jsou modul pružnosti a Poissonova konstanta kontaktních povrchů označených jako a, b [Pa]

$$R_x \quad \text{tzv. efektivní poloměr kontaktních těles } a, b \text{ ve směru } x \quad \frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \quad [\text{m}]$$

V parametr průměrné rychlosti kontaktních povrchů ve směrech x a y [m/s]

w normální zatížení kontaktu [N]

α tlakově-viskózní parametr maziva [m^2/N]

η_0 absolutní viskozita použitého maziva při nulovém tlaku a konstantní teplotě [N.s/m^2]

Vzhledem ke skutečnosti, že jejich cílem bylo popsat průběh kontaktních parametrů, tzn. tloušťky mazacího filmu a tlaku v mazací vrstvě, na eliptické kontaktní oblasti, přistupuje ke třem výše uvedeným bezrozměrným vstupním parametrům ještě *parametr elipticity* k (2.4):

$$k = \frac{D_y}{D_x} \quad (2.4)$$

kde D_x, D_y jsou délky os kontaktní elipsy ve směrech x a y .

Posledním obecným parametrem kontaktu je *parametr prokluzu* kontaktních povrchů Σ .

2. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Díky výše uvedené parametrizaci řešení lze funkční závislost řešení, tzn. závislost mezi výstupní hledanou tloušťkou mazací vrstvy a vstupními parametry kontaktu obecně zapsat ve tvaru:

$$H = f(W, U, G, k, \Sigma) \quad (2.5)$$

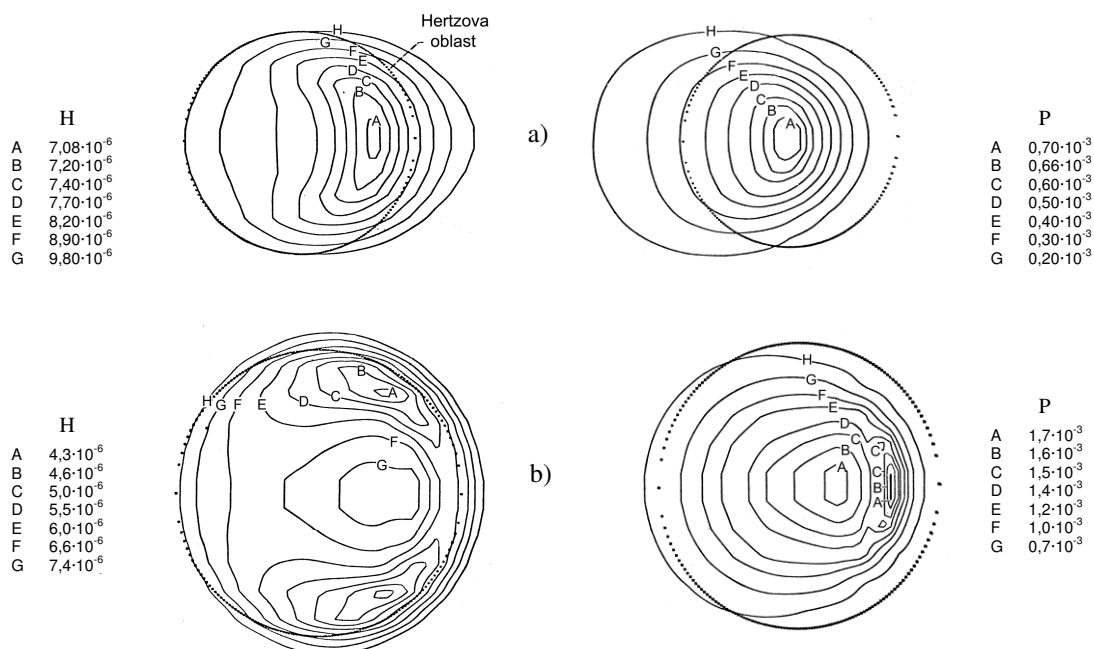
Při uvažování čistého valení bez prokluzu a tedy $\Sigma=0$, byly výsledky prezentované Hamrockem a Dowsonem [17],[18] pro případ elipticity v širokém rozmezí od $k=1$, což odpovídá konfiguraci kuličky na rovině, až do $k=8$ kdy se tvar kontaktní oblast blíží obdélníku jako v případě liniového kontaktu.

Bezrozměrný parametr rychlosti U se pohyboval v rozsahu téměř dvou řádů a bezrozměrný parametr zatížení W v rozsahu jednoho řádu. Vliv bezrozměrného parametru materiálu na minimální tloušťku mazacího filmu byl studován v rámci použití materiálů jako bronz, ocel nebo sliutý karbid a v případě maziv pro parafinové a naftenické oleje. Řešením soustavy Reynoldsovy rovnice, reologických rovnic a rovnice elastické deformace kontaktních těles [16] byly pro 34 kombinací vstupních parametrů obdrženy výsledky, jejichž aproximací založenou na metodě nejmenších čtverců byla získána aproximační bezrozměrná rovnice (2.6), jejíž přesnost vzhledem k výsledkům výpočtů leží v rozmezí $\pm 5\%$:

$$\tilde{H}_{e,\min} = \frac{\bar{h}_{\min}}{R_x} = 3.63U^{0.68}G^{0.49}W^{-0.073}(1 - e^{-0.68k}) \quad (2.6)$$

Stejným postupem byla získána rovněž aproximace centrální tloušťky mazacího filmu (2.7):

$$\tilde{H}_{e,\min} = 2.69U^{0.67}G^{0.53}W^{-0.067}(1 - 0.61e^{-0.73k}) \quad (2.7)$$



Obr. 2.1 Vrstevnice rozložení tlaku a tloušťky elasto hydrodynamického mazacího filmu v eliptické kontaktní oblasti pro parametr elipticity a) $k=8$ a b) $k=1,25$ (hodnoty bezrozměrných parametrů $U = 0,1683 \cdot 10^{-11}$, $W = 0,1106 \cdot 10^{-6}$ a $G = 4522$) [18] (Převzato z [57]).

2. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Na Obr. 2.1 jsou znázorněny vrstevnice rozložení tloušťky mazacího filmu a tomu odpovídající tlakový profil v kontaktní oblasti pro jeden z výpočtů provedených ve studii Hamrock a Dowson.

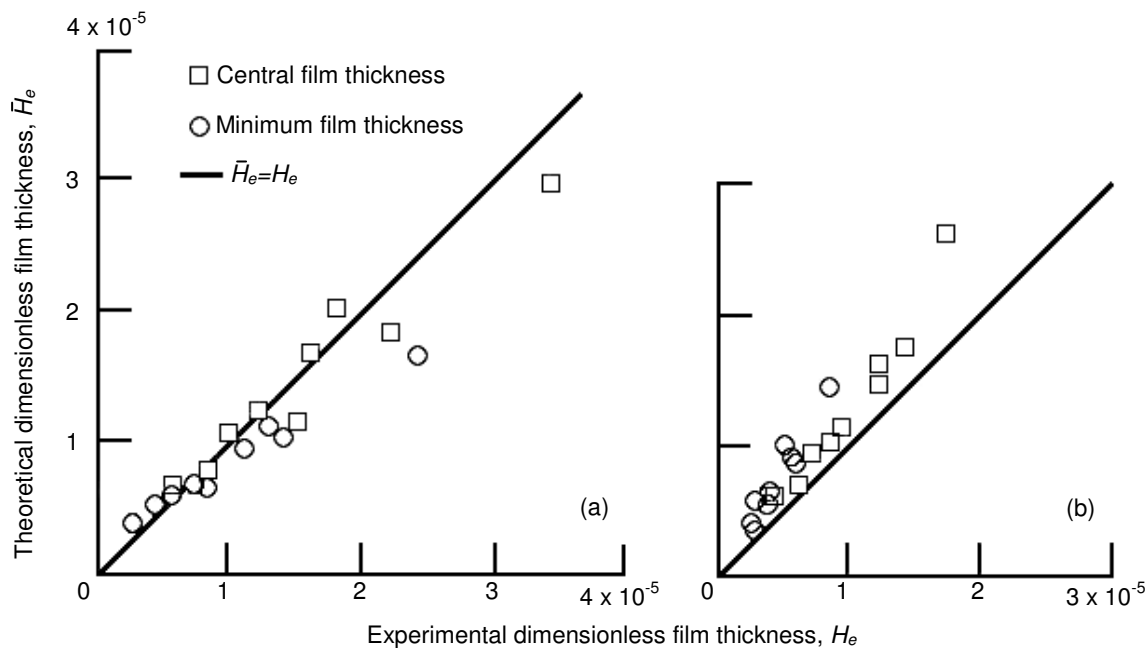
Výsledky teoretického řešení poprvé demonstrovaly to, co již bylo experimentálně pozorováno v roce 1966 za použití optické interferometrie [12]. Vrstevnice tloušťky filmu na Obr.2.1b ukazují dva výrazné „laloky“ s minimální tloušťkou mazacího filmu po stranách výstupní oblasti kontaktu, bezprostředně kopírující okraj Hertzovy kontaktní oblasti v jeho blízkosti.

Na konturách rozložení tlaku v kontaktní oblasti lze pozorovat skutečnost, že tlakový gradient na vstupu do kontaktu je výrazně nižší než gradient na výstupu a dále vrstevnice výrazně vykreslují tlakový extrém ve výstupní oblasti.

Výsledky teoretického řešení Hamrocka a Dowsona se staly předmětem experimentálního ověření v roce 1977, kdy Kunz a Winner [36] prezentovali porovnání hodnot získaných z aproximačních vztahů (2.6) a (2.7) s vlastními výsledky experimentálních pozorování pro bodový kontakt (jednotkový parametr elipticity) za podmínek čistého prokluzu mezi ocelovou kuličkou a safírovým diskem. Použitou experimentální metodou v jejich práci byla optická interferometrie a oblast vstupních parametrů byly v rozsahu 3 rychlostí prokluzu a 2 zatížení kontaktu pro 3 různá použitá maziva. Změřené hodnoty minimální a centrální tloušťky mazacího filmu byly porovnány s hodnotami získanými na základě aproximačních vztahů (Obr. 2.2).

Srovnání experimentálních a teoretických výsledků přineslo zajímavou skutečnost, kdy pro nízká zatížení kontaktu byly výsledky v dobré shodě (Obr. 2.2a), zatímco pro vyšší zatížení (Obr. 2.2b) byl patrný mírný nesoulad mezi oběma skupinami výsledků.

Obecně přijímaným vysvětlením této skutečnosti byl fakt, že experimentální měření bylo provedeno za podmínek čistého prokluzu, což je situace, kdy mohou přestat být zanedbatelné termální efekty uvnitř mazací vrstvy – zejména při větším zatížení. Tento jev – tzv. viskózní ohřev – v teoretickém řešení zanedbaný, mohl být příčinou uvedeného nesouladu.



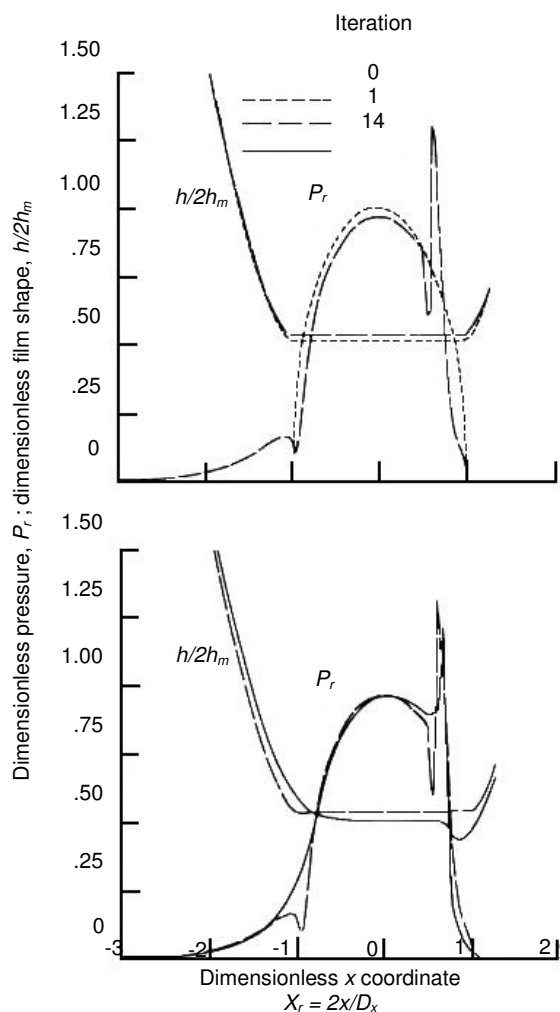
Obr. 2.2 Porovnání teoretické predikce a hodnot získaných na základě experimentálního měření za podmínek čistého prokluzu pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu pro dvě různá zatížení $W=0.1238 \times 10^{-6}$ (a) a $W=0.9287 \times 10^{-6}$ (b) [36] (Převzato z [1]).

2. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Prezentované aproximační vztahy Hamrocka a Dowsona (2.6) a (2.7) se staly základními rovnicemi pro stanovení tloušťky mazacího filmu v kontaktech strojních součástí obecné inženýrské praxe a v mnoha případech jsou používány dosud jako referenční nástroj. A to i přes svoje základní omezení, kterým je velikost maximálního kontaktního tlaku, pro který byly vytvořeny.

Tato skutečnost byla jedním z motivů práce Houperta a Hamrocka [10], která předložila metodu, pomocí které bylo možné studovat kontaktní parametry i pro vyšší tlaky. Jejich studie byla zpracována pro liniový kontakt. Díky předloženému numerickému řešení bylo možné analyzovat kontaktní parametry až do výše zatížení odpovídajícího Hertzovu kontaktnímu tlaku 4.8 GPa v přiměřeném výpočetním čase a s vyšší přesností. Práce Houperta a Hamrocka přinesla zcela nové poznatky o vlivu lokálních jevů v mazací vrstvě. Byly předloženy nové a přesnější výsledky dokumentující lokální maximum tlaku v mazivu v blízkosti výstupní oblasti kontaktu a s ním související lokální redukce tloušťky mazacího filmu (Obr. 2.3). Tyto jevy byly poprvé uvedeny do širší souvislosti, když Houpert a Hamrock konstatovali, že tlakový extrém produkuje v tenké podpovrchové vrstvě kontaktní oblasti výrazná lokální smyková napětí.

Tato smyková napjatost a tedy tlakový extrém mohou redukovat životnost kontaktní oblasti až na polovinu. Velikost tlakové špičky a tedy i její vliv je závislý na zatížení, rychlosti pohybu a také materiálových parametrech.



Obr. 2.3 Profil průběhu tlaku a tloušťky mazacího filmu ve směru valení v iteracích 0, 1 (nahore) a 14 (dole) pro bezrozměrné parametry $U=1.0 \times 10^{-11}$, $W=2.045 \times 10^{-5}$ a $G=5007$ [10] (Převzato z [1]).

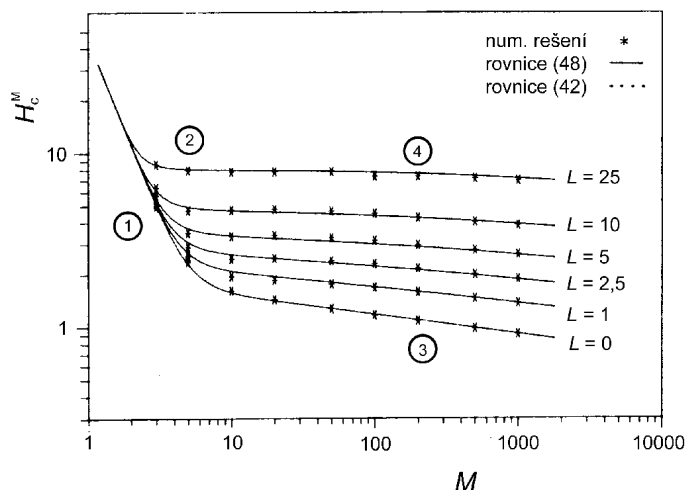
2. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Studie, kterou provedli Houpert a Hamrock, se stala základem pro diskusi o příčinách existence lokálního extrému v rozložení tlaku v blízkosti výstupní oblasti kontaktu doprovázeného lokálním snížením tloušťky mazacího filmu.

Další výzkum tohoto jevu (Hamrock a kol. [37]) přinesl poznatek, že v izoviskózním numerickém modelu se jev lokálního tlakového extrému na rozdíl od viskózního nevyskytuje. S tlakovým extrémem související lokální pokles tloušťky mazacího filmu je v izoviskózním řešení zanedbatelný, případně zcela chybí a tloušťka mazacího filmu je oproti viskóznímu modelu přibližně trojnásobná.

Podobně jako vliv viskozity maziva byl studován i vliv stlačitelnosti maziva na tyto jevy. Bylo prokázáno, že pro fyzikální model s nebo bez uvažování stlačitelnosti mazací vrstvy budou tlaková špička i lokální minimum tloušťky mazacího filmu vždy přítomny (při uvažování viskozity). Tlakový extrém bude v případě nestlačitelného maziva přibližně 3.7 krát vyšší než v případě stlačitelného maziva a lokální minimum tloušťky mazacího filmu bude srovnatelné velikosti, jen průběh tloušťky mazacího filmu po délce kontaktní oblasti bude ve srovnání se stlačitelnou variantou plochý.

Jedním z důvodů, proč byla většina prací zaměřena na numerické řešení liniového kontaktu, je skutečnost, že při takovém řešení lze dosáhnout uspokojivých a detailních výsledků při použití N diskretních bodů výpočetní oblasti. V případě bodového kontaktu vstupuje do řešení ještě jeden rozměr – souřadnice ve směru y . Proto je nutné pro stejně detailní řešení jako v případě liniového kontaktu použít více diskretních bodů s počtem matematických operací $O(N^2)$. Tento fakt vedl Lubrechta, ten Napela a Bosmu k hledání rychlejšího numerického řešení než klasické metody založené na Newton-Raphsonově metodě, příp. Gauss-Seidel relaxaci. V roce 1987 publikovali Lubrecht, ten Napel a Bosma [23] výsledky řešení elastohydrodynamicky mazaného kruhového kontaktu získané s pomocí nového numerického přístupu – *multigridní (vícesítové)* techniky. Vícesítové uspořádání lze interpretovat jako horizontální strukturu několika výpočetních sítí odlišné hustoty diskretizačních bodů. Algoritmus řešení přechází z jedné vrstvy do druhé, čímž je v konečném důsledku dosaženo snížení počtu matematických operací na $O(N \ln N)$ – např. [23], [24], [25], [26], [27], [28].



Obr 2.4 Mapa režimů kapalinového mazání pro kruhový kontakt [26]
 1 - izoviskózně hydrodynamické mazání
 2 - piezoviskózně hydrodynamické mazání
 3 - elastohydrodynamické mazání poddajných třecích povrchů
 4 - elastohydrodynamické mazání tuhých třecích povrchů

2. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ HLADKÝCH POVRCHŮ

Jimi vyvinutá metoda numerického řešení fyzikálních rovnic EHD mazání je dnes nejpoužívanější a je použita i pro numerické řešení v této disertační práci.

Lubrecht [24] v roce 1987 podrobil důkladné analýze nejen Hamrockovy a Dowsonovy aproximační vztahy (2.6) a (2.7), ale také další aproximační přístupy jako např. Chittendena [22]. Tyto aproximační formule porovnal se svými numerickými výsledky pro širší rozsah vstupních parametrů a prokázal omezenou oblast platnosti těchto tradičních vztahů.

Na základě řady numerických výpočtů bylo možné konstatovat, že s rostoucí hodnotou *parametru materiálu M* je tloušťka mazacího filmu v centrální oblasti kontaktu téměř konstantní a minimum tloušťky je rozloženo po stranách ve formě jakýchsi ‚laločků‘. Největší gradient tloušťky mazacího filmu koresponduje s extrémem kontaktního tlaku.

Při zvětšování *parametru materiálu M* a současném snižování *parametru zatížení L* je oblast konstantní tloušťky mazacího filmu velmi velká a blíží se průběhu pozorovatelného při Hertzově suchém kontaktu. Rovněž tak i průběh tlaku je blízký Hertzovu průběhu. Jedním z poznatků plynoucím z jeho práce byla skutečnost, že zatímco v případě liniového kontaktu bylo možné považovat poměr centrální a minimální tloušťky mazacího filmu H_c/H_m za přibližně konstantní, v případě bodového kontaktu toto neplatí. Zatímco pro případ lehce zatíženého kontaktu (izoviskózní mazivo a absolutně tuhé nedeformovatelné kontaktní těleso) je tento poměr 4/3, v případě vyšších zatížení a jiných materiálů (různé hodnoty parametrů *M* a *L*) se mění až do hodnoty 3,2.

Další úpravu *multigradní* metody s cílem zvýšit stabilitu řešení při velkých zatíženích kontaktu uskutečnili Venner a ten Napel [25], [26]. Upravili nejen iterační schéma, ale rozšířili algoritmus i o tzv. ‚*multilevel multi integraci*‘ (integraci na více vrstvách různě hustých sítí) elastického integrálu pro výpočet elastických deformací, čímž dosáhli dalšího zrychlení a možnosti použití výpočetní domény s více diskretizačními uzly. Tak bylo dále možno analyzovat mazaný kruhový kontakt až do úrovně Hertzova kontaktního tlaku 3 GPa a zpřesnit výsledky Lubrechta [23], [24].

Na jejich práci navázal H. Moes [38] proložením jejich výsledků pro centrální tloušťku mazací vrstvy novou aproximačním rovnicí platnou v širokém rozsahu režimů kapalinového mazání. Na Obr. 2.4 je uvedeno srovnání hodnot z Moesovy rovnice centrální tloušťky mazacího filmu s výsledky numerických výpočtů Vennera a ten Napela [26].

Lubrecht, Venner a další používají stejně jako Moes dva bezrozměrné parametry *M* a *L* odvozených z bezrozměrných parametrů použitých Hamrockem a Dowsonem U, W, G (2.1), (2.2) a (2.3) ve tvaru:

$$\text{Parametr materiálu:} \quad M = W(2U)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$\text{Parametr zatížení:} \quad L = G(2U)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

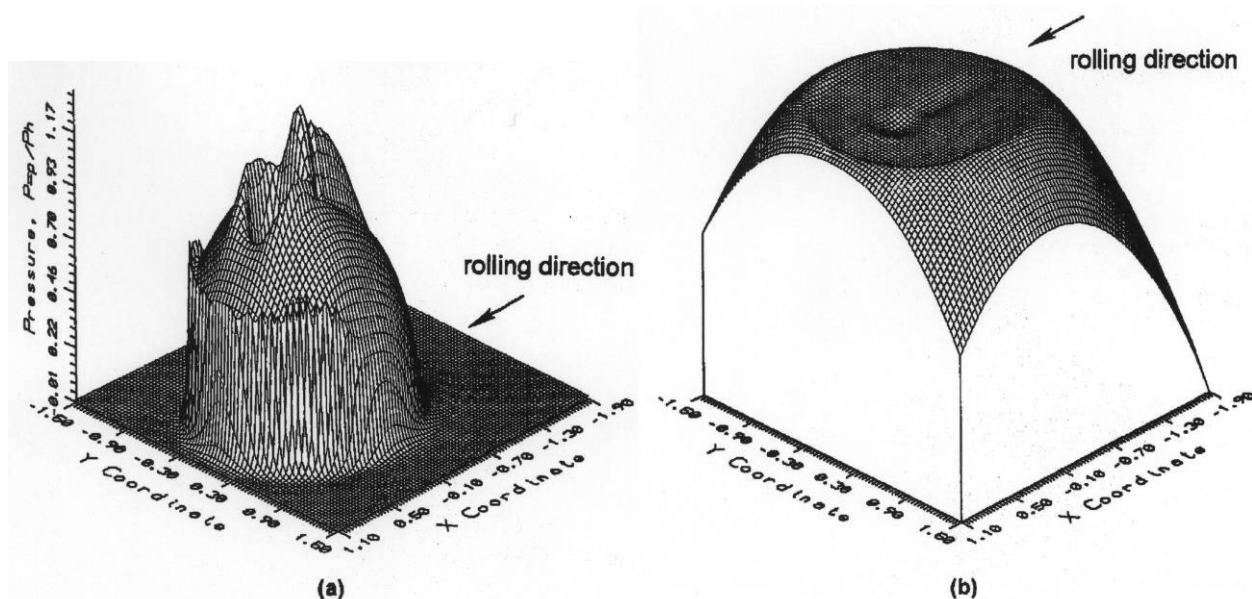
3 ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ NEHLADKÝCH POVRCHŮ

Nehladkými povrchy rozumíme v případě studia parametrů EHD mazání takové povrchy, které se vyznačují modelovaným nebo reálným reliéfem.

V případě modelovaného povrchového reliéfu jsou jeden nebo oba kontaktní povrchy modifikovány nerovnostmi. Pro numerickou simulaci kontaktní úlohy se kontaktní povrch (v matematickém vyjádření rovnice tloušťky mazacího filmu) modifikuje nejčastěji matematickou funkcí popisující tvar povrchové nerovnosti. Matematický tvar takové nerovnosti zpravidla aproximuje skutečnou povrchovou nerovnost. Takovým případem modelové nerovnosti může být vtisk cizí částice. Cílem studia takové matematické povrchové struktury ve vztahu k EHD mazání je obvykle popis vzájemného vztahu mezi parametry tvaru nerovnosti (hloubka vtisku, průměr vtisku, vrcholový úhel vtisku ve tvaru jehlanu apod.) a parametry mazacího filmu. Modelová nerovnost však může být také zcela obecně formulovaná. Může se jednat např. o podélnou, příčnou nebo šikmou harmonickou nerovnost (vlnitost) u níž se sleduje vztah mezi harmonickými parametry (tvarem nerovností) a jejich vlivem na parametry mazacího filmu. Studiu vlivu modelových povrchových charakteristik se v literatuře věnovala a stále věnuje celá řada autorů.

Venner a Lubrecht v roce 1994 uvedli ve své studii [39] výsledky numerických analýz vlivu příčného prahu na tloušťku mazacího filmu v kruhovém (bodovém) kontaktu. Jde o numerické řešení postavené na podkladech experimentálního studia, které v roce 1992 provedl Kaneta a kol. [40].

Cílem bylo ověřit, zda zjednodušený isothermální elastohydrodynamický model Newtonské kapaliny středně zatíženého kontaktu ($p_h=0.54$ GPa) odpovídá realitě.



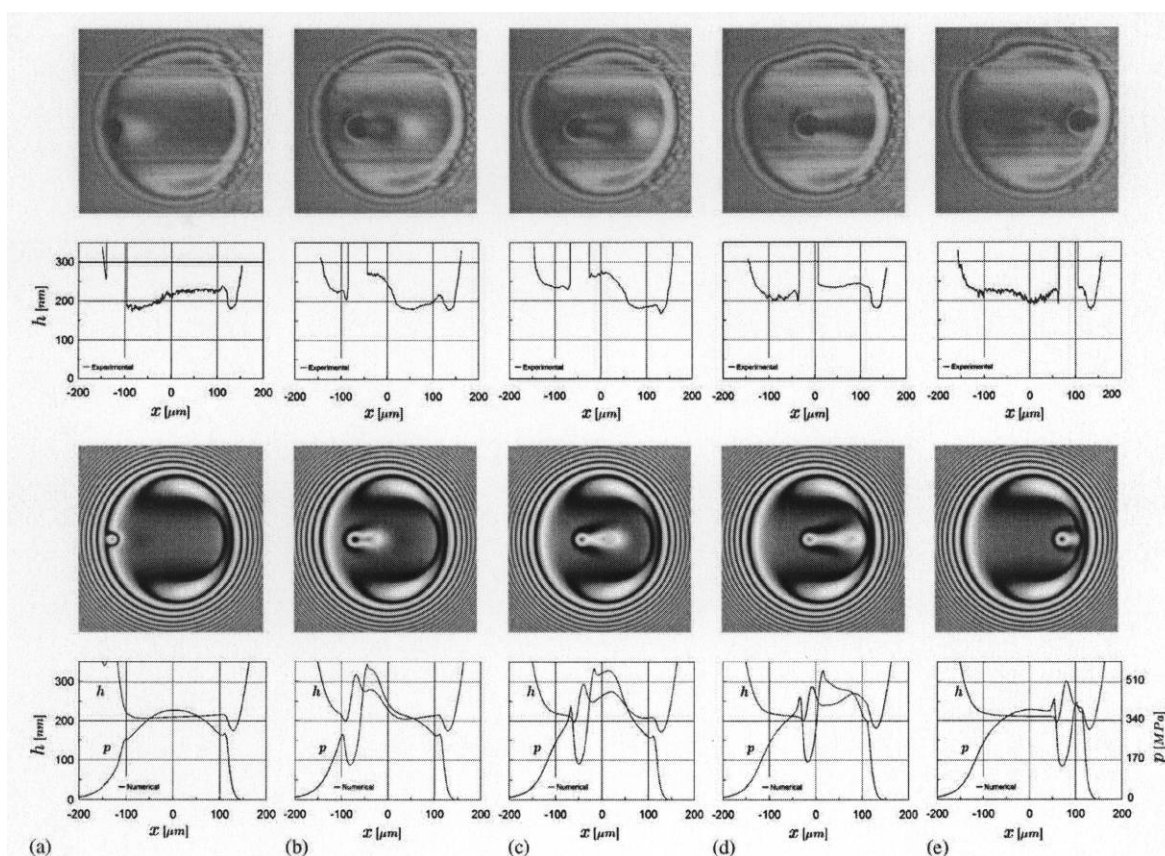
Obr. 3.1 Rozložení průběhu tlaku (a) a tloušťky mazacího filmu (b) v kruhové kontaktní oblasti při plném prokluzu $\Sigma=2$. Bezrozměrné parametry numerického řešení $U=3.47 \times 10^{-11}$, $W=1.39 \times 10^{-5}$ a $G=4616$ [41].

3. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ NEHLADKÝCH POVRCHŮ

Ve své práci Venner a Lubrecht konstatovali, že shoda jejich numerických výsledků tloušťky mazacího filmu s experimentálními výsledky je dobrá i přes pozorované odchylky v místě příčné nerovnosti. Tyto odchylky od měřených hodnot přičítají autoři zjednodušeným rheologickým předpokladům, diskretizační chybě a v neposlední řadě také isothermálnímu předpokladu řešení, které zejména při prokluzu může hrát významnou roli. Potvrdil se rovněž předpoklad, že nestacionární řešení je kombinací jednak modulae tloušťky mazacího filmu pohybující se průměrnou rychlostí obou kontaktních povrchů v kombinaci s tlakovou změnou, a stacionárním řešením pohybujícím se rychlostí kontaktního povrchu s povrchovou nerovností doprovázeným opět tlakovou změnou. Na základě dobré shody výsledků jejich numerického řešení s experimentálními výsledky Venner a Lubrecht podpořili argument, že v případě lehce zatížených nehladkých kontaktů je vliv reologického a termálního chování mazacího filmu malý.

Studie, kterou prezentoval v roce 1994 Ai a Cheng [41] je příkladem numerické simulace vlivu modelového vtisku na parametry EHD kruhového (bodového) kontaktu. Ai a Cheng provedli řadu numerických simulací za různých podmínek prokluzu. Část výsledků tloušťky mazacího filmu při prokluzu porovnali s měřením, které provedl Wedeven a Cusano v roce 1979 [42]. Konstatovali, že s rostoucí mírou prokluzu jsou výraznější změny v rozložení tlaku i mazacího filmu.

Je-li parametr prokluzu $\Sigma > 0$, vzniká na straně "vlečené" hrany vtisku tlakový hřbet, který způsobí dodatečný vtisk na valivém tělese, který se pohybuje kontaktní doménou.



Obr. 3.2 Povrchový mikro-vtisk procházející kruhovou kontaktní oblastí za podmínek částečného prokluzu. Parametry řešení $M=63.8$ a $L=5.8$, $\Sigma=50\%$, polohy vtisku: $X=-0.93$, $X=-0.52$, $X=-0.30$, $X=-0.07$, $X=0.57$. Porovnání s experimentálním měřením [46].

3. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ NEHLADKÝCH POVRCHŮ

V případě opačného prokluzu $\Sigma < 0$ je situace právě opačná – tedy tlakový hřbet a jím způsobený dodatečný vtisk se nachází na čelní (vstupní) straně vtisku.

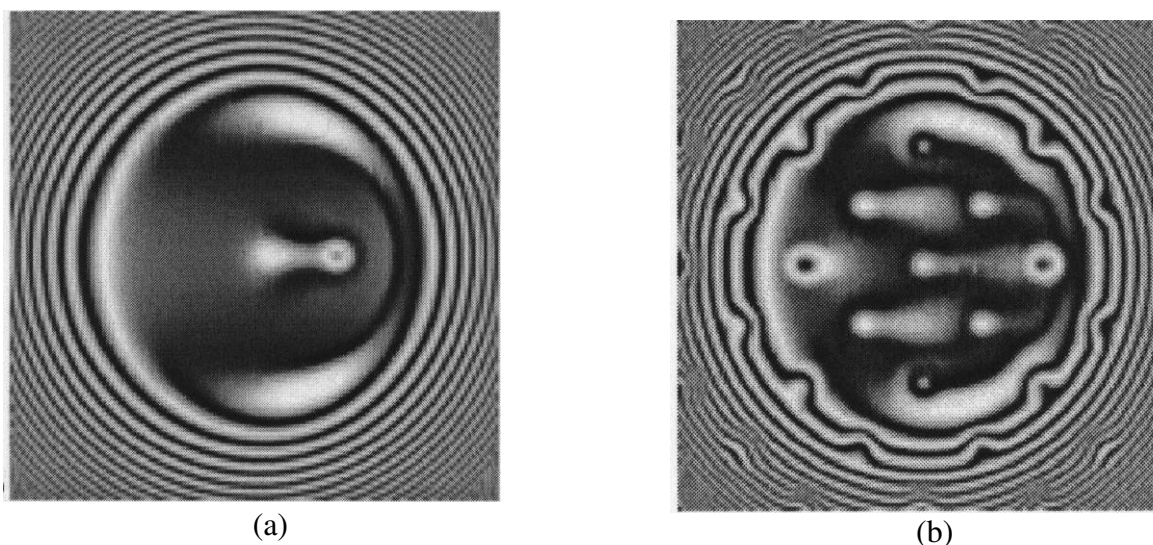
Jedním z nových poznatků, které Ai a Cheng prezentovali, a který potvrdil experimentální pozorování, bylo lokální snížení tloušťky mazacího filmu na hraně dentu, která leží na protilehlé straně výrazné tlakové změny. Toto lokální snížení tloušťky mazací vrstvy naznačuje možnost suchého kontaktu obou kontaktních povrchů za určitých kontaktních podmínek.

V roce 1996 uveřejnili Venner a Lubrecht [43] studii, ve které se věnují vlivu vlnitosti povrchu na parametry elastohydrodynamického mazacího filmu. Jejich práce byla dalším krokem v přiblížení se reálně nehladkým povrchům. Byla použita harmonická příčná vlnitost společně s různými parametry valení/prokluzu. Venner a Lubrecht konstatovali, že i přes harmonickou nerovnost kontaktního povrchu je zachována podobnost s hladkým stacionárním kontaktem pokud jde o oblast s minimální tloušťkou mazacího filmu v bočních lalocích. Tloušťka mazacího filmu – centrální i minimální – je v porovnání s hladkými povrchy vlivem vlnitosti nižší. Bylo též konstatováno, že vlivem prokluzu může být rovněž redukována amplituda povrchové vlnitosti.

Tomuto problému se v roce 1999 Venner a Lubrecht [44] věnovali i nadále. Jak ve své práci uvedli, se snižujícím se poměrem tloušťky mazacího filmu a drsnosti povrchu roste i důležitost vlivu povrchových entit. Zjistili, že díky elastické deformaci kontaktního povrchu se může amplituda povrchové nerovnosti uvnitř a vně kontaktní oblasti lišit. Tuto skutečnost ukázali opět na harmonické vlnitosti v liniovém i bodovém kontaktu. Kvalitativně i kvantitativně vyhodnotili závislost míry redukce amplitudy nerovnosti na počáteční amplitudě, periodě (vlnové délce), kontaktních parametrech a míře prokluzu.

Harmonická nerovnost s dlouhou periodou je v kontaktní oblasti výrazně deformována, zatímco nerovnost s krátkou periodou se nedeformuje téměř vůbec.

Tématu numerického studia vlivu modelových povrchových charakteristik na parametry EHD mazání věnovala pozornost celá řada autorů – kromě výše uvedených např. také Hu a Zhu [45] nebo Mourier, Mazuyer, Lubrecht a Donnet [46]. Numerické studium je ve většině případů věnováno analýze modelových nerovností, neboť z důvodu jedinečnosti každé reálné povrchové nerovnosti je z výsledků analýz reálných povrchů velmi obtížné dosáhnout obecných závěrů.



Obr. 3.3 Vliv částečného prokluzu při průchodu kruhovou kontaktní oblastí na propagaci elastické deformace v okolí mikro-vtisku (a) a lokální zvýšení tloušťky mazacího filmu v mikrotexturované (b) EHD kruhové kontaktní oblasti [46].

3. ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ NEHLADKÝCH POVRCHŮ

Identifikace a popis vlivu tvaru povrchových nerovností na parametry EHD mazacího filmu je základem studia také u reálných povrchových charakteristik. Takovými mohou být jednak jednotlivé povrchové nerovnosti jako např. reálné vtisky cizích částic nebo povrchové vady, případně reálná drsnost povrchu předkládaná při numerickém řešení ve tvaru změřeného 3D reliéfu kontaktního povrchu. Klasifikace reálně drsného povrchu použitého při numerické simulaci je provedena prostřednictvím statistických parametrů drsnosti povrchu. Mezi nemnoha autory, kteří se ve svých studiích věnují numerickému studiu reálně drsných povrchů, je např. Zhu [47],[48],[49] nebo [50], dále Ai a Cheng [51].

Studium vztahů mezi parametry EHD filmu a povrchovými nerovnostmi (povrchových vad příp. povrchů s reálnou drsností) je motivováno snahou o optimalizaci konstrukcí strojních součástí z hlediska nastavení efektivních výrobních postupů, ale hlavně z hlediska dosažení požadované funkce a životnosti díla (ozubená kola, valivá ložiska, mechanismy pracující na principu mazaného kontaktu dvou těles apod.) – např. zohlednění vlivu kontaminace maziva na životnost kontaktních povrchů.

Snahou je tedy zobecnit vliv povrchových nerovností např. v rovnicích životnosti apod. Takové zobecnění je možné jen na základě množiny výsledků numerických analýz případně experimentálních měření s jednoznačně definovanými povrchovými nerovnostmi. To lze jednoznačně zaručit u modelovaných nerovností, nikoliv u reálných drsností povrchů nebo povrchových vad. V takovém případě je vlivem jedinečnosti každého reálně drsného povrchu jakékoliv zobecnění vlivu např. na podpovrchové napětí nebo životnost kontaktních povrchů velmi obtížné mnohdy až spekulativní.

Speciální oblastí, která navazuje na studium modelových i reálných geometrických povrchových charakteristik a získané teoretické i experimentální poznatky, je studium tzv. povrchových textur. Jedná se o záměrně vyrobené povrchové geometrické entity s přesně definovaným tvarem a umístěním, které ovlivňují a modifikují parametry EHD mazacího filmu požadovaným způsobem. Nejčastěji je taková modifikace motivována snahou zajistit optimální mazací poměry mezi kontaktními povrchy v dosud problematických místech. Vychází se přitom z již známých, popsáných a kvantifikovaných souvislostí mezi reálnými povrchovými drsnostmi (entitami) a jejich vlivem na EHD mazací film. Studium těchto záměrných povrchových modifikací je orientováno na optimalizaci velikosti a umístění takových povrchových entit. Příkladem výzkumu v této oblasti jsou práce Křupky a Hartla [52], [53], Hsu [54] nebo Dumont a kol. [55]; této problematice věnují pozornost i Mourier, Mazuyer, Lubrecht a Donnet [46] a další.

Přestože uvedené studie poskytly řadu cenných informací, není celá řada procesů objasněna ani zmapována. Velmi často probíhá teoretické a experimentální řešení zcela odděleně a nekoordinovaně bez vzájemného ovlivnění. Tím je značně narušena průkaznost prezentovaných výsledků a díky rozmělnění teoretického a experimentálního potenciálu, z toho plynoucího nekoncepčního postupu a jisté míry nahodilosti prací na jednotlivých nespolečných pracovištích dochází ke zpomalení postupu při studiu dané problematiky. Proto je tato disertační práce vedena snahou o propojení teoretického a experimentálního přístupu.

4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je vytvoření algoritmu pro numerické řešení EHD mazaného bodového nehladkého kontaktu a porovnání výsledků numerického řešení s výsledky naměřenými kolorimetrickou interferometrií.

Naplnění tohoto cíle předpokládá realizaci následujících dílčích cílů:

1. Vyvinutí numerického algoritmu pro řešení problému EHD mazání bodového kontaktu založený na klasickém Gauss-Seidelově relaxačním schématu pro hladký kontakt.
2. Porovnání výsledků klasického řešení EHD problému hladkých povrchů s publikovanými i naměřenými výsledky.
3. Rozšíření klasického algoritmu pro řešení nestacionární úlohy EHD problému bodového kontaktu, tzn. pro řešení nehladkých povrchů a ověření řešitelnosti nestacionárního problému.
4. Aplikace multigrdních technik na řešení fyzikální soustavy rovnic popisující kontaktní problém, tzn. Multigrdního algoritmu pro numerické řešení Reynoldsovy rovnice kontaktního problému a techniku Multi-Level Multi Integrace pro řešení elastického integrálu rovnice tloušťky mazacího filmu.
5. Ověření přesnosti multigrdního numerického algoritmu pro problém hladkých povrchů porovnáním s publikovanými výsledky.
6. Aplikace multigrdního numerického algoritmu na problém nestacionárního řešení, tzn. nehladkých povrchů.
7. Vymezení modelu nehladkého kontaktního povrchu, který bude použit pro experimentální studium i numerickou analýzu.
8. Porovnání výsledků numerického řešení nestacionárního řešení EHD mazaného bodového kontaktu s výsledky získanými kolorimetrickou interferometrií.

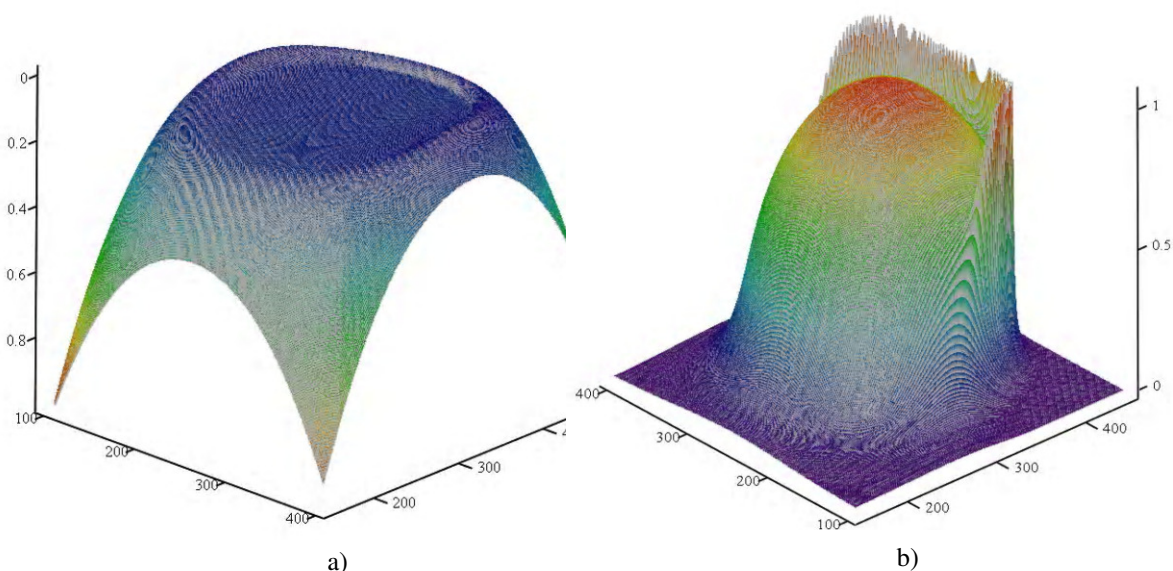
5 DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Prvním dílčím cílem disertační práce byla realizace takového numerického modelu, který by umožnil řešení matematického modelu EHD mazaného hladkého kruhového kontaktu a který by byl založený na klasickém Gauss-Seidelově relaxačním schématu. Zvládnutí této techniky je předpokladem pro aplikaci multigradních (vícevrstevných) numerických schémat řešení.

Jako příklad dílčích výsledků jsou na Obr. 5.1 zobrazeny 3D profily tloušťky mazací vrstvy a tlaku v mazací vrstvě pro kruhovou kontaktní oblast. Na Obr. 5.2 jsou v detailu uvedeny průřezové křivky tloušťky mazací vrstvy 3D profilu z Obr. 5.1 v podélném (a) a příčném (b) směru a jejich porovnání s průběhy získanými experimentálně kolorimetrickou interferometrií.

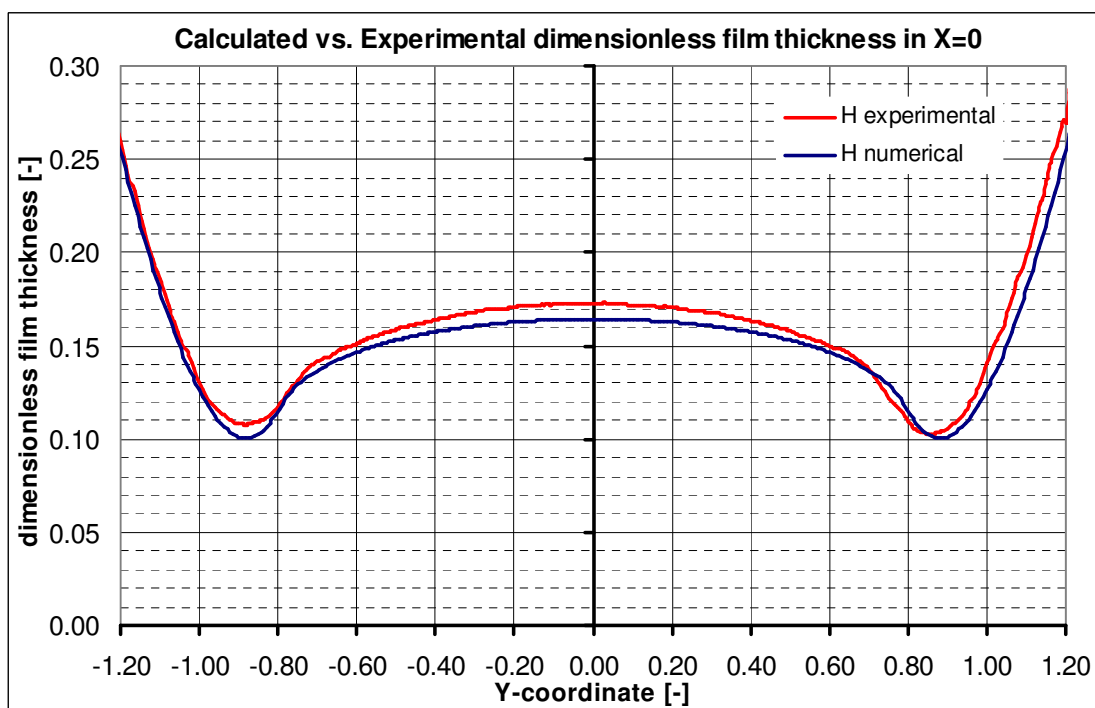
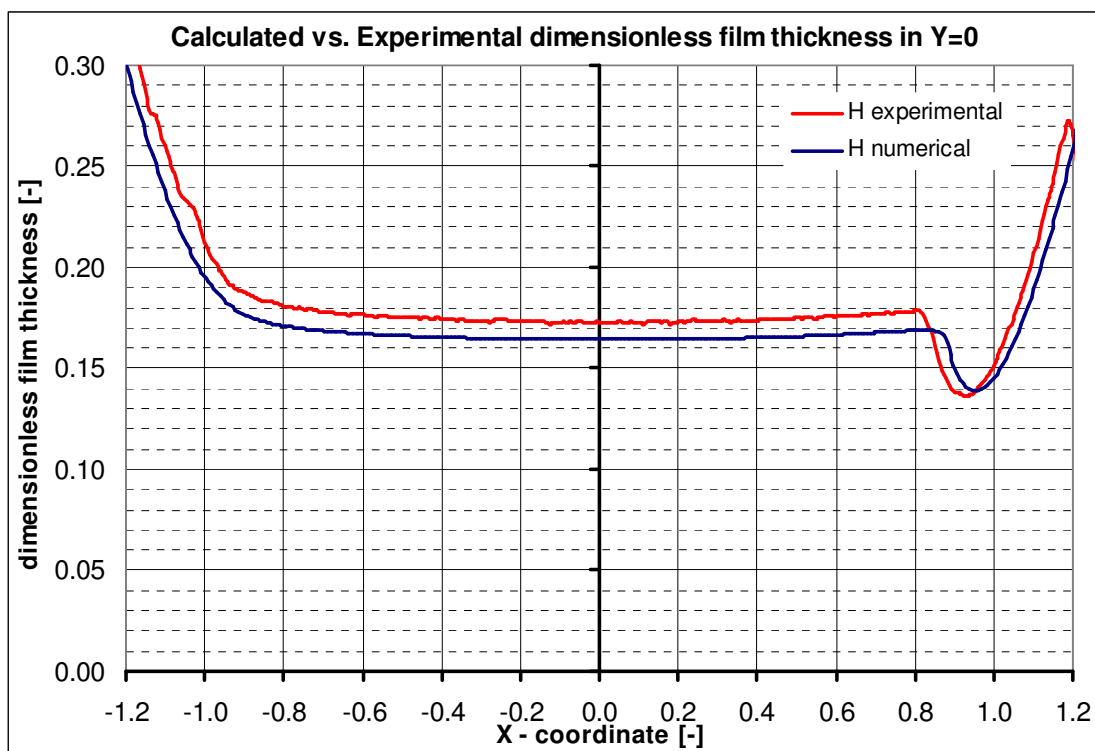
Výsledky prezentované na Obr. 5.1 a Obr. 5.2 jsou uvedeny v bezrozměrných veličinách jako příklad jedné z kombinací vstupních parametrů. Na základě porovnání numerických a experimentálních výsledků lze konstatovat dobrou shodu. Studie byla provedena pro množinu různých rychlostí valení a výsledky numerické analýzy byly porovnány s výsledky experimentálními i výsledky z obecných aproximačních vztahů.

Řešení založené na Gauss-Seidelově relaxačním schématu bylo upraveno pro řešení nestacionárního problému EHD mazání nehladkých povrchů. Vtisk na kontaktním povrchu kontaktního tělesa byl uměle vyrobený Rockwelovým indentorem. Průměr základny vtisku byl přibližně 73 μm a jeho hloubka byla 0.7 μm . V důsledku vtisku indentoru došlo ke zvednutí okraje dentu. Tento zvýšený okraj byl však dodatečně odstraněn leštěním. Na Obr. 5.3 je zobrazena geometrie dentu v 3D podobě (a) a v podobě izolinií povrchové topografie (b).



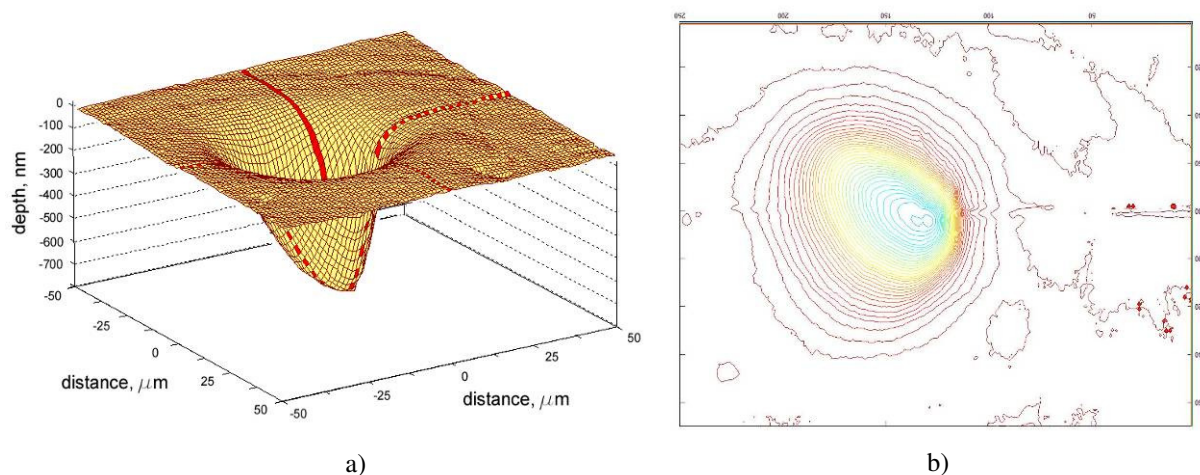
Obr. 5.1 3D-profil rozložení tloušťky mazacího filmu a) a tlaku v mazací vrstvě b) kruhové kontaktní oblasti. Výsledky byly získány numerickým řešením pro bezrozměrné parametry $U=2.40632 \times 10^{-11}$, $W=1.4517 \times 10^{-6}$ a $G=3830$ [56].

5. DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE



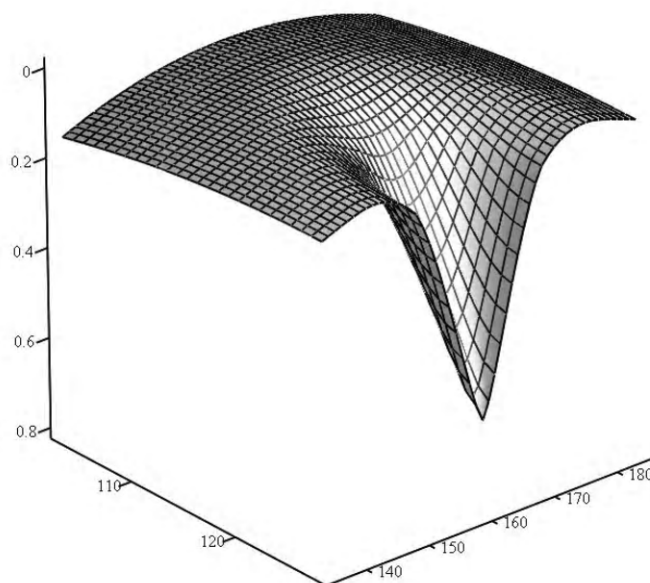
Obr. 5.2 2D-průběhy tloušťky mazací vrstvy v podélném průřezu (horní graf) a příčném průřezu (dolní graf) středem kruhové kontaktní oblasti. Výsledky získané numerickým řešením (modrá křivka) pro bezrozměrné parametry $U=2.40632 \times 10^{-11}$, $W=1.4517 \times 10^{-6}$ a $G=3830$ jsou porovnány s výsledky získanými experimentálně kolorimetrickou interferometrií [56].

5. DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE



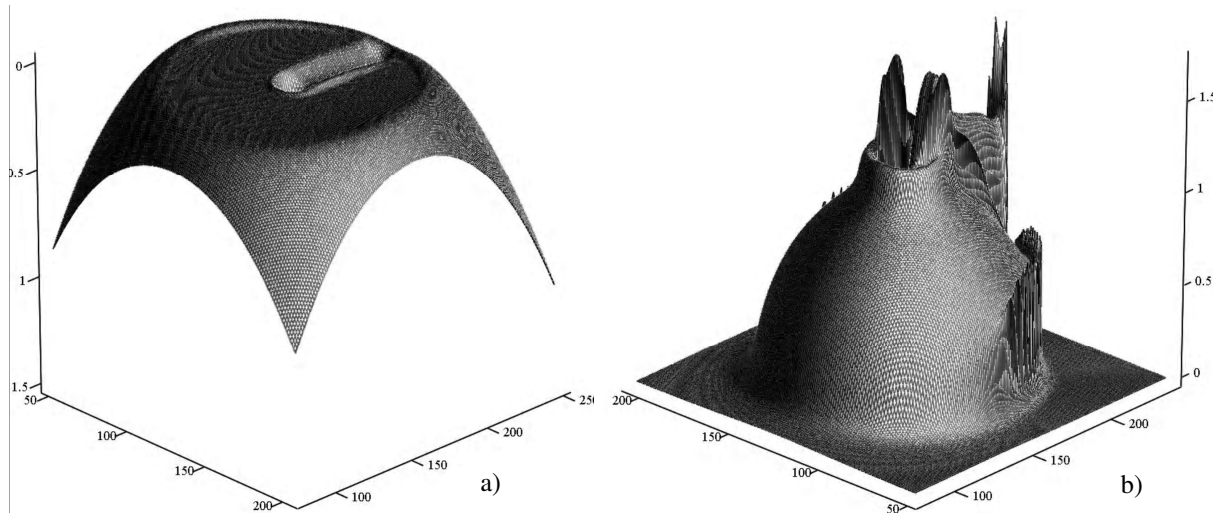
Obr. 5.3 3D-geometrie modelu povrchového dentu a) a 2D izolinie profilu dentu b) použitého pro numerické řešení parametrů mazací vrstvy elastohydrodynamického kruhového kontaktu [56].

Pro účely numerické simulace EHD problému byla skutečná geometrie (Obr.5.3a) aproximována matematickým modelem. Tvar modelového vtisku je zobrazen na Obr.5.4. S použitím této geometrie povrchového vtisku byla uskutečněna série nestacionárních numerických výpočtů. Numerická simulace ukázala skutečnost, že „klasický“ numerický algoritmus založený na principu Gauss-Seidelovy relaxace je nesmírně zdlouhavý nejen z důvodu pomalé konvergence relaxačního kritéria, ale hlavně díky numerické integraci integrálu elastických deformací v rovnici tloušťky mazacího filmu. Výpočetní čas není možné redukovat na únosnou mez ani s využitím dnes již velmi výkonné výpočetní techniky. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k přepracování numerického řešení na algoritmus využívající Multilevel metodu v kombinaci s Multilevel Multi Integrací elastického integrálu. Tímto způsobem bylo možné provést numerické řešení v požadovaném rozsahu. Příklad výsledků takového řešení je uveden na Obr.5.5.



Obr. 5.4 Řez matematickým modelem vtisku použitým pro numerické řešení parametrů mazací vrstvy elastohydrodynamického kruhového kontaktu [56].

5. DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE



Obr. 5.5 Příklad výsledků numerického řešení tloušťky mazacího filmu (a) a rozložení a tlaku v mazací vrstvě (b) pro nehladký povrch s dentem a bezrozměrné parametry řešení $W=5.73053 \times 10^{-7}$, $U=1.40233 \times 10^{-12}$, $G=12550$, parametr prokluzu $\Sigma=+1$ [56].

Z výše uvedeného stručného přehledu dosažených výsledků plyne, že v rozsahu stanovených dílčích cílů disertační práce byly úspěšně splněny body 1 – 7. Tím je vytvořen reálný předpoklad splnění všech cílů disertační práce.

6 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce vymezuje téma disertační práce, kterým je numerická simulace EHD mazaného kruhového kontaktu nehladkých povrchů. Postupně je uveden výběr prací a studií, které zásadním způsobem ovlivnily úroveň poznání v dané oblasti. Je předložen přehled současného stavu a popis výsledků teoretických studií věnovaných EHD mazání nehladkých kontaktních povrchů bodového kontaktu. V tomto pojednání je rovněž definován cíl disertační práce zahrnující osm dílčích etap, jejichž úspěšné naplnění je nutnou podmínkou jeho splnění. Dále jsou stručně předloženy dílčí výsledky prvních sedmi etap, na jejichž základě je vymezen rozsah teoretického studia vlivu modelového vtisku na parametry EHD mazaného bodového kontaktu a jeho porovnání s experimentálními výsledky získanými kolorimetrickou interferometrií. Úspěšné zvládnutí poslední osmé dílčí etapy je předpokladem splnění celkového cíle disertační práce, kterým je vytvoření algoritmu pro numerické řešení EHD mazaného bodového nehladkého kontaktu a porovnání výsledků numerického řešení s výsledky naměřenými kolorimetrickou interferometrií.

SEZNAM LITERATURY

- [1] HAMROCK, B.J. (1994): *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. McGraw-Hill, Inc. The United States Of America.
- [2] CAMERON, A. (1966): *Principles Of Lubrication*. Longman Green & Co., Ltd., London.
- [3] TOWER, B. (1883): *First Report on Friction Experiments (Friction on Lubricated Bearings)*. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, p. 632-659.
- [4] TOWER, B. (1885): *Second Report on Friction Experiments (Experiments on the Oil Pressure in a Bearing)*. Proceeding Institution of Mechanical Engineers, p. 58-70.
- [5] DOWSON, D. (1979): *History of Tribology*. New York, Longman Inc., p. 301-308.
- [6] GRUBIN, A.N. (1949): *Fundamentals of the Hydrodynamic Theory of Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces. Investigation of the Contact Machine Components*. Kh.F.Ketova, (Ed.). Translation of Russian Book No.30, Central Scientific Institute for Technology and Mechanical Engineering, Moscow, chap. 2. (Available From Department of Scientific and Industrial Research, Great Britain, Trans. CTS-235 and Special Libraries Assocoation, Trans. R-3554).
- [7] PETRUSEVICH, A.I. (1951): *Fundamental Conclusion From the Contact-Hydrodynamic Theory of Lubrication*. Izv. Akad. Nauk, SSSR. Otd. Tekh. Nauk., vol. 2, pp. 209-233.
- [8] DOWSON, D. and HIGGINSON, G.R. (1959): *A Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Problem.*, J. Mech, Eng. Sci., vol.1, no. 1, pp. 6-15.
- [9] CROOK, A.W. (1961): *Elasto-Hydrodynamic Lubrication of Rollers.*, Nature, vol.190, p. 1182.
- [10] HOUPERT, L.G. and HAMROCK, B.J. (1986): *Fast Approach fro Calculating of Film Thicknesses and Pressures in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads.*, J. Tribol., vol.108, no. 3, pp. 411-420.
- [11] ARCHARD, J.F., and COWKING, F.W. (1956-1965): *Elastohydrodynamic Lubrication at Point Contacts.*, Proc. Inst. Mech. Eng., Part 3B, 180, pp. 47-56.
- [12] CAMERON, A. and GOHAR, R. (1966): *Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contact.*, Proc. R. Soc. London, Ser.A, 291, pp. 520-536.
- [13] WEDEVEN, L.D., EVANS, D., and CAMERON, A. (1971): *Optical Analysis of Ball Bearing Starvation.*, ASME J. Lubr. Technol., 93, pp. 349-363.
- [14] CHENG, H. S. (1970): *A Numerical Solution of the Elastohydrodynamic Film Thickness in an Elliptical Contact.*, ASME J. Lubr. Technol., 92, pp. 155-162.
- [15] RANGER, A.P., ETTLES, C.M., and CAMERON, A. (1975): *The Solution of the Point Contact Elastohydrodynamic Problem.*, Proc. R. Soc. London, Ser.A, 346, pp. 227-244.
- [16] HAMROCK, B.J. and DOWSON, D. (1976): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part I – Theoretical Formulation.*, ASME J. Lubr. Technol., 98, pp. 223-229.
- [17] HAMROCK, B.J. and DOWSON, D. (1976): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part II – Ellipticity Parametr Results.*, ASME J. Lubr. Technol., 98, pp. 375-383.
- [18] HAMROCK, B.J. and DOWSON, D. (1977): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III – Fully Flooded Results.*, ASME J. Lubr. Technol., 99, pp. 264-276.
- [19] HAMROCK, B.J. and DOWSON, D. (1977): *Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part IV – Starvation Results.*, ASME J. Lubr. Technol., 99, pp. 15-23.

SEZNAM LITERATURY

- [20] KOYE, K.A. and WINNER, W.O. (1980): *An Experimental Evaluation of the Hamrock and Dowson Minimum Film Thickness Equations for Fully Flooded EHL Point Contacts.*, J. Lubr. Technol., Vol. 103, No. 2, pp. 284-294.
- [21] HAMROCK, B.J. and DOWSON, D. (1981): *Ball Bearing Lubrication - The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts.*, Willey Interscience, New York.
- [22] CHITTENDEN, R.J., DOWSON, D., DUNN, J.F., and TAYLOR, C.M. (1985): *A Theoretical Analysis of the Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Concentrated Contacts: Part II .*, Proc. R. Soc. London, Ser.A, 397, pp. 245-269.
- [23] LUBRECHT, A.A., TEN NAPEL, W.E. and BOSMA, R. (1987): *Multigrid, An Alternative Method for Solution of Two-Dimensional Elastohydrodynamically Lubricated Point Contact Calculations.*, ASME J. Tribol., 109, pp. 437-443.
- [24] LUBRECHT, A.A. (1987): *The numerical solution of the elastohydrodynamically lubricated line and point contact problem, using multigrid techniques.* Thesis, University Enschede, The Netherlands.
- [25] VENNER, C.H. and TEN NAPEL, W.E. (1992): *Multilevel Solution of the Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contact Problem: Part I – Theory and Numerical Algorithm.*, Wear, 152, pp. 351-367.
- [26] VENNER, C.H. and ten NAPEL, W.E. (1992): *Multilevel Solution of the Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contact Problem: Part II – Smooth Surface Results.*, Wear, 152, pp. 369-381.
- [27] LUBRECHT, A.A., VENNER, C.H., TEN NAPEL, W.E. and BOSMA, R. (1988): *Film Thickness Calculations in Elastohydrodynamically Lubricated Circular Contacts, Using a Multigrid Method.*, ASME J. Tribol., 110, pp. 503-507.
- [28] VENNER, C.H. and LUBRECHT, A.A. (2000): *Multilevel Methods in Lubrication.* ELSEVIER, Tribology series, 37.
- [29] AI, X. and SAWAMIPHAKDI, K. (1999): *Solving Elastic Contact Between Rough Surfaces as an Unconstrained Strain Energy Minimization by Using CGM and FFT Techniques.*, ASME J. Tribol., 121, pp. 639-647.
- [30] KANETA, M., KANADA, T. and NISHIKAWA, H. (1996): *Optical Interferometric Observations of the Effects of a Moving Dent on Point Contact EHL.*, In Proceedings of 23rd Leeds-Lyon Symposium, 1996, pp. 69-79.
- [31] KANETA, M. and NISHIKAWA, H. (1999): *Experimental Study on Microelastohydrodynamic Lubrication.*, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 213, Part J, pp. 371-381.
- [32] HARTL, M., KŘUPKA, I., POLIŠČUK, R. and LIŠKA, M. (1999): *An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry.*, Trib. Trans., 42, 2, pp. 303-309.
- [33] KŘUPKA, I., HARTL, M., POLIŠČUK, R., ČERMÁK, J. and LIŠKA, M. (2000): *Experimental Evaluation of EHD Film Shape and Its Comparison With Numerical Solution*, ASME J. Tribol., 122, pp. 1-8.
- [34] ROELANDS, C.J.A. (1966): *Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature-Pressure Relationship of Lubricating Oils*, Ph.D. Thesis, Technical University Delft, Delft, The Netherlands, (V.R.B., Groningen, The Netherlands).
- [35] BARUS, C. (1893): *Isothermals, Isopiestic and Isometrics relative to Viscosity*, Am. J. of Science, 45, 87-96.
- [36] KUNZ, R.K. and WINNER, W.O. (1977): *Discussion on pp.275-276 of Hamrock, B.J. and Dowson, D., Isothermal Elastohydrodynamical Lubrication of Point Contacts, Part III- Fully Flooded Results.*, J. Lubr. Technol., vol. 99, no.2, pp.264-275.
- [37] HAMROCK, B.J., PAN, P., and LEE, R.T. (1988): *Pressure Spikes in Elastohydrodynamically Lubricated Junctions.*, J. Tribol., vol. 110, no. 2, pp 279-284.
- [38] NIJENBANNING, G., VENNER, C.H. and MOES, H. (1994): *Film Thickness in Elastohydrodynamically Lubricated Elliptic Contacts*, WEAR, 176, pp.217-229.

SEZNAM LITERATURY

- [39] VENNER, C.H. and LUBRECHT, A.A. (1994): *Numerical Simulation of a Transverse Ridge in a Circular EHL Contact Under Rolling/Sliding.*, ASME J. Tribol., 116, pp. 751-761.
- [40] KANETA, M., SAKAI, T. and NISHIKAWA, H. (1992): *Optical Interferometric Observations of the Effects of a Bump on Point Contact EHL.*, ASME J. Tribol., 114, pp. 779-784.
- [41] AI, X. and CHENG, H.S. (1994): *The Influence of Moving Dent on Point EHL Contacts.*, STLE Tribology Trans., 37, 323-335.
- [42] WEDEVEN, L.D. and CUSANO, C. (1979): *Elastohydrodynamic Film Thickness Measurement of Artificially-Produced Surface Dents and Grooves.*, ASLE Trans., 22, 4, pp. 369-381.
- [43] VENNER, C.H. and LUBRECHT, A.A. (1996): *Numerical Analysis of the Influence of Waviness on the Film Thickness of a Circular EHL Contact.*, Trans. ASME, J. Tribol., 118, 153-160.
- [44] LUBRECHT, A.A. and VENNER, C.H. (1999): *Elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces.* Proc Instn Mech Engrs, Part J., 213, 397-404.
- [45] HU, D. and ZHU, D. (2000): *A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts.*, ASME J. Tribol., 122, 1-9.
- [46] MOURIER, L., MAZUYER, D., LUBRECHT, A.A. and DONNET, C. (2006): *Transient Increase of Film Thickness in Micro-Textured EHL Contacts.*, Tribology International, 39, 1745-1756.
- [47] ZHU, D. (2002): *Elastohydrodynamic Lubrication in Extended Parameter Ranges – Part I: Speed Effect.*, Trib. Trans., 45, 540-548.
- [48] ZHU, D. (2002): *Elastohydrodynamic Lubrication in Extended Parameter Ranges – Part II: Load Effect.*, Trib. Trans., 45, 549-555.
- [49] ZHU, D. (2003): *Elastohydrodynamic Lubrication in Extended Parameter Ranges – Part III: Contact Ellipticity Effect.*, Trib. Trans.
- [50] ZHU, D. (2004): *Elastohydrodynamic Lubrication in Extended Parameter Ranges – Part IV: Effect of Material Properties.*, Trib. Trans., 47, 7-16.
- [51] AI, X. and CHENG, H.S. (1996): *The Effects of Surface Texture on EHL Point Contacts.*, Trans. ASME, J. Tribol., 118, 59-66.
- [52] KŘUPKA, I. and HARTL, M. ():
- [53] KŘUPKA, I. and HARTL, M. ():
- [54] HSU, S. (2006): *Design of Surface Textures for Heavily Loaded Contacts.*, 61st STLE Annual Meeting, Calgary.
- [55] DUMONT, M.L., LUGT, P.M. and TRIPP, J.H. (2002): *Surface Feature Effects in Starved Circular EHL Contacts.*, Trans. ASME, J. Tribol., 124, 358-366.
- [56] URBANEC, L. (2004): *Numerical Solution of Contact Pressure Distribution and Film Thickness in EHL Point Contact.* Overall Project Report No. CTC-2002-019, Timken Česká republika s.r.o, Czech Technical Centre Brno.
- [57] KŘUPKA, I. (2002): *Studium elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních soustav, Habilitační práce, VUT FSI Brno.*