



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MAZÁNÍ PLASTOVÝCH PŘEVODŮ

Lubrication of polymer gears

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Poledník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Radim Poledník**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mazání plastových převodů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době dochází k výraznému rozvoji technických plastů, které se stále častěji používají v silových strojních součástech. To přináší zvýšení produktivity a snížení ceny výroby. Pro zajištění spolehlivé funkce je nutné aplikovat mazivo pro snížení tření a opotřebení. To je docíleno vytvořením mazací vrstvy oddělující povrchy součástí. V rámci této práce budou studovány mazací filmy v kontaktech plastového materiálu s ocelí nebo jiným tuhým materiálem na optickém tribometru.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je popsat schopnost utváření mazacího filmu v kontaktech s plastovým materiálem při použití kapalných maziv.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu poznání,
- úprava zařízení a příprava vzorků z technických plastů,
- realizace měření na tribometrech,
- porovnání s teorií a publikace výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

MARX, N., GUEGAN, J., SPIKES, H. A. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. Tribology International, 2016, 99: 267-277.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je popsání vlivu vstupních parametrů jako je unášecí rychlost, zatížení, teplota, dynamická viskozita a tlakově viskózní koeficient na schopnost utváření mazacího filmu v bodových a eliptických kontaktech pomocí metody optické interferometrie. Na základě dat byly vytvořeny regresní vztahy užívající formu bezrozměrných parametrů rychlosti U , zatížení W a materiálu G . Tyto vztahy pro centrální a minimální tloušťku byly následovně doplněny o geometrickou funkci implementující elipticitu k , dále došlo k srovnání s již existujícími predikcemi pro EHD mazání. Měření tloušťek a nové regresní vztahy vedou k lepšímu pochopení utváření mazacího filmu, což může vést k efektivnějšímu návrhu kapalinově mazaných plastových převodů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Soft EHD, transientní režim, izoviskózně elastický režim, mazání polymerů, tloušťka filmu, eliptický kontakt, optická interferometrie

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to describe the influence of input parameters (rolling speed, load, temperature, dynamic viscosity and pressure coefficient of the lubricant) on film thickness in point and elliptical contacts using optical interferometry. Regression based film thickness formula has been obtained using universal form of non-dimensional parameters of entrainment speed U , load W and material G . Equations were also complemented by the function of ellipticity k . New regression formulas for central and minimum film thickness have been compared with existing EHL thickness equations. These film thickness measurement and new regression formulas have applicability to our understanding of the performance and more effective design of lubricated gears from polymeric materials.

KEYWORDS

Soft EHL, transitional regime, elastic-isoviscous, polymer lubrication, film thickness, elliptical contact, optical interferometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLEDNÍK, R. *Mazání plastových převodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za jeho odborné rady, připomínky a vždy vstřícný a energický přístup. Také bych rád poděkoval své rodině za vždy poskytnutou morální podporu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Mazání plastových převodů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šperky, Ph. D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

.....
Radim Poledník

OBSAH

1. ÚVOD	13
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Polymery a jejich základní pojmy	14
2.1.1 Mazání polymerů	14
2.2 Mazání a režimy mazání	15
2.2.1 Hydrodynamické mazání	16
2.2.2 Elastohydrodynamické mazání (EHD)	16
2.2.3 Režimy kapalinového mazání nekonformních těles	17
2.2.4 Bezrozměrné parametry	17
2.3 Mechanismy kontaktu u ozubených kol	19
2.3.1 Kinematika	19
2.3.2 Silové poměry	20
2.3.3 Kontaktní oblast	21
2.3.4 Viskoelastická	22
2.4 Studie zabývající se kontaktem poddajných materiálů	23
2.4.1 Experimentální studium soft-EHL kontaktu optickou interferometrií	23
2.4.2 Studium tření v kontaktech ozubených kol (PEEK)	26
2.4.3 Vliv viskoelastivity na formování filmu v IE	27
3. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	29
3.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z řešerše	29
3.2 Závěry plynoucí z řešerše	30
3.3 Cíl diplomové práce	30
4. MATERIÁL A METODY	31
4.1 Optický tribometr	31
4.2 Materiál	31
4.2.1 Modul pružnosti PMMA	32
4.3 Maziva	32
4.4 Rozsahy měření	33
4.5 Postup práce	33
5. VÝSLEDKY	35
5.1 Bodový kontakt v TR režimu	36
5.1.1 Centrální tloušťka – h_c	38
5.1.2 Minimální tloušťka – h_0	39
5.1.3 Vliv teploty na centrální tloušťku kontaktu	40
5.2 Eliptický kontakt v TR režimu	43
5.2.1 Centrální tloušťka – h_c	44
5.2.2 Minimální tloušťka – h_o	45
5.2.3 Srovnání profilu tlouštěk u eliptických kontaktů	46
5.3 Tvorba regresivních vztahů	47
5.3.1 Regresivní analýza parametrů U , W , G	48
5.3.2 Regresivní analýza vlivu elipticity	48
6. DISKUZE	51
6.1 Bodový kontakt – h_c	51
6.2 Obecný eliptický kontakt – h_c	53
6.2.1 Složka elipticity	55
6.3 Obecný eliptický kontakt – minimum h_o	56

6.3.1	Minimum – $h_{0(exit)}$	57
6.3.2	Minimum – $h_{0(side)}$	58
7.	ZÁVĚR	60
8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
9.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	64
10.	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	66
11.	SEZNAM TABULEK	68
12.	SEZNAM PŘÍLOH	69

1. ÚVOD

1

Ve strojírenství se stále ve větší míře uplatňují polymerní materiály, které díky relativně snadné výrobě a s ní souvisejícími nízkými náklady postupně nahrazují kovové konstrukční materiály. Tento trend se uplatňuje i v ozubených převodech, a to převážně ve výrobcích spotřebního segmentu, kde jsou aplikovány při nižších zatíženích. Nesporným benefitem je jejich nízká výrobní cena, chemická inertnost, hustota a absence potřeby stálého mazání. Ačkoliv nejsou plastová soukolí ve většině zařízení mazána, jejich spolehlivost vysoce roste při oddělení povrchů souvislou vrstvou mazacího oleje, která zabraňuje vzájemnému kontaktu a snižuje tak tření a proces opotřebení. Přímé mazání také odvádí teplo, které je výrazným limitujícím faktorem použití i v náročnějších silových součástech a aplikacích tradičně určených pro ocelová soukolí [1].

Vzhledem k nízkému modulu pružnosti polymerů oproti kovům se při kontaktu plastové povrchy větší mírou deformují. Vlivem větší stykové plochy kontaktní tlak nedosahuje hodnot, které ovlivňují viskozitu maziva oddělující povrchy. Tento režim mazání je označován jako „soft-EHD“ [2].

Na Ústavu konstruování (ÚK) v rámci Fakulty strojního inženýrství je dlouhodobě veden výzkum v oblasti tribologie za pomoci metody založené na optické interferenci, která umožňuje s vysokou přesností určovat tloušťky mazacího filmu. Cílem této diplomové práce je studium parametrů, které ovlivňují tloušťku mazacího filmu v režimu soft-EHD při kontaktu plastového disku s ocelovou kuličkou či soudečkem na optickém tribometru.



Obr. 1-1 Ozubené soukolí s plastovým kolem zalitým kovovým jádrem firmy Intech [3]

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Polymery a jejich základní pojmy

Plasty či polymery jsou látky tvořené makromolekulárními řetězci, které vznikají spojením (polymerací) malých uhlovodíkových molekul. Polymerní látky vykazují širokou škálu mechanických vlastností, především vlivem aditiv a rozvětvenosti, či stupně uspořádanosti řetězců. Rozlišujeme strukturu relativně uspořádanou, *semikrystalickou* a nahodilou, *amorfní*. Semikrystalické látky jako PA, PE, PP, PTFE, kde podíl uspořádané struktury vůči amorfni dosahuje 40 až 90 %, vykazují vyšší modul pružnosti, pevnost a houževnatost. Oproti tomu amorfni látky jako PMMA, PS či PC vykazují vyšší tvrdost, křehkost a obvykle i index lomu [4].

Výhodou plastů, jako levnější alternativy kovů je zejména jejich nízká hustota, odolnost proti korozi a schopnost tlumit vibrace a nárazy. Nevýhodou je nízká pevnost a tepelná vodivost, navlhavost, sklon k tečení (creep) a poměrně velká tepelná roztažnost. Výrazným limitem užití plastů je teplota. U amorfni struktur rozlišujeme teplotu skelného přechodu T_g . Při překročení této teploty dochází k poklesu modulu pružnosti, téměř o tři řády. Zatímco amorfni plasty (T_g , cca 100 °C) jsou běžně užívány pod touto teplotou, semikrystalické látky pod T_g křehnou a výrazně ztrácí své mechanické vlastnosti [4].

Tab 2-1 Fyzikální vlastnosti technických polymerů [5]

Polymer	Horní pracovní teplota [°C]	Teplotní vodivost [W/mK]	Teplotní roztažnost [K ⁻¹]	Modul pružnosti [GPa]
Polykarbonát (PC)	125	0,2	70×10^{-6}	2,4
Polyamid (PA)	110–180	0,25	90×10^{-6}	3,3
Polyetheretherketon (PEEK)	250	0,25	60×10^{-6}	2,5
Polytetrafluorethylen (PTFE)	260	0,25	130×10^{-6}	0,5
Polyethylen (PE)	95	0,45	170×10^{-6}	0,5-1,2

2.1.1 Mazání polymerů

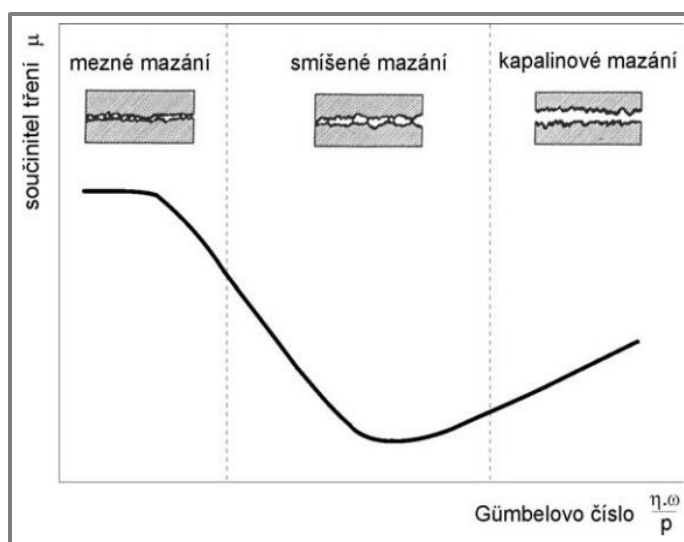
Ze široké škály polymerů vykazuje značná část samomazné tribologické schopnosti. Vzhledem k tomu rozdělujeme mazání na suché a kapalinové (popř. plastickým mazivem). Samomazné polymerní materiály jsou schopny na povrchu v místě kontaktu vytvořit přenosový film. Mechanismus tohoto mazání se odvíjí od složení materiálu, topologie povrchu, provozních podmínek kontaktu a vlastností kontaktního povrchu. V inženýrských aplikacích, např. u ložisek a ozubených kol, se ujal polymery složené ze základové matice (PE, PA), výztuhy v podobě skelných či uhlíkových vláken nebo nanočástic a pevného maziva s vrstvitou strukturou (PTFE, grafit, MoS₂) [6].

Mazání plastickým či olejovým mazivem dramaticky snižuje opotřebení, odděluje třecí povrchy, snižuje součinitel tření, odvádí teplo a snižuje rychlost otěru. Pro mazání je nepříznivý výskyt nečistot a částeczek vzniklých při otěru, které se mísí s mazivem. Nutné je však u kol z kompozitních plastů, zejména se skelnými vlákny. Při běhu za sucha se vlákna porušují a vzniklý prach vede k rychlému obrušování boků zubů [4][5].

2.2 Mazání a režimy mazání

Při vzájemné interakci relativně se pohybujících povrchů dochází vznikem pasivních odporů ke tření a opotřebení materiálu. Úlohou mazání je zabránit kontaktu třecích ploch a snížit jejich degradaci vytvořením ideálně souvislého, separujícího filmu kapalného, pevného či plynného skupenství. Mezi sekundární úlohy tohoto mazacího filmu může patřit odvod tepla, odstranění částic vzniklých opotřebením nebo dosažení korozivzdorných vlastností [7].

Rozlišuje se kapalinový *hydrostatický*, *hydrodynamický* a *elastohydrodynamický* režim mazání, kde povrchy odděluje koherentní mazací film, dále pak režimy, u kterých dochází k bezprostřední interakci povrchů, tedy mazání *mezní* a *smíšené* (příp. *tuhými mazivy*). S výjimkou hydrostatického mazání lze režimy znázornit tzv. *Stribeckovou křivkou* (obr. 2-1), která vyjadřuje závislost součinitele tření μ v kluzném radiálním ložisku na *Gümbelově čísle*, což je bezrozměrná veličina součinu $\eta\omega/p$, kde η je dynamickou viskozitu maziva, ω je úhlová rychlost čepu a p kontaktní tlak.



Obr. 2-1 Stribeckova křivka [7]

U *mezního mazání* je zatížení přenášeno převážně po výčnělcích povrchů. Třecí síla je zde zastoupena zejména silou potřebnou pro porušení adhezních spojů. Tenká vrstva mazacího filmu je vytvořena chemickou reakcí povrchů, nebo adsorpcí molekul maziva. Takovýto film může být tvořen pouze jednou molekulární vrstvou [7].

S narůstající rychlostí třecích povrchů a klesajícím zatížením dochází k přechodovému stavu mezi mezním a kapalinovým mazáním, označovaným jako *smíšené mazání*. Třecí povrchy dosud nejsou odděleny souvislým hydrodynamickým filmem a stále dochází ke kontaktu povrchových nerovností. Ty se deformují, přičemž v místech styku převládá mezní mazání, zatímco v okolí mazání kapalinové.

S dále se navyšujícím Gümbelovým číslem dochází již k úplnému oddělení povrchů koherentním mazacím filmem. Tento kapalinový režim je charakteristický navýšením součinitele tření, které je spjato s vlivem reologických vlastností maziva, a to zejména viskozitou. Kapalný režim lze rozdělit dle konformity styků povrchů. U konformně zakřivených hovoříme o *hydrodynamickém mazání*, naopak u nekonformně zakřivených o *mazání elastohydrodynamickém* [7].

Konečnou pravděpodobnost či míru dotyku, od které se také odvíjí životnost součástí [7] pak vyjadřuje vztah, do kterého je kromě tloušťky filmu h zaimplementován také faktor redukované drsnosti třecích povrchů R_{red} . Tento jev vyjadřuje *parametr mazání* Λ .

$$\Lambda = \frac{h}{R_{red}} = \frac{h}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}} \quad (1-1)$$

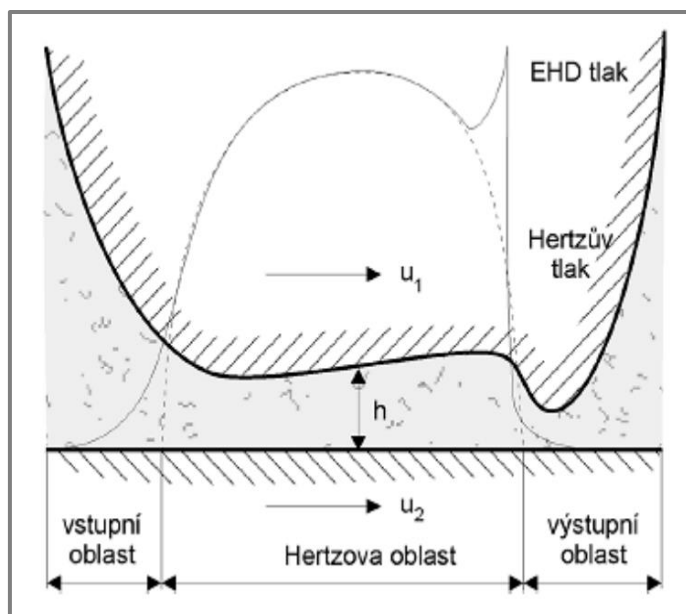
Kde Rq_a a Rq_b jsou průměrné kvadratické úchyly profilu těl. Parametrem mazání je možné na Stribeckově křivce vymezit jednotlivé druhy mazacích režimů. Například pro hrubé vymezení elastohydrodynamického mazání je udáváno: $3 \leq \Lambda < 10$.

2.2.1 Hydrodynamické mazání

Při styku třecích povrchů dochází vlivem konformity k rozložení tlaku po relativně velké ploše. Velikost této stykové plochy se v reakci na změnu zatížení pohybuje jen nepatrně. Vznik hydrodynamického tlaku v kontaktu je podmíněn dostatečně velkým relativním pohybem a vzájemným sklonem povrchů. U tohoto mazání nedochází k významným deformacím povrchů.

2.2.2 Elastohydrodynamické mazání (EHD)

Vznik EHD kontaktu je podmíněn zatíženími, relativně se pohybujícími povrchy s nekonformním stykem (Obr. 2-2). Při velkém zatížení působícím na malé kontaktní ploše dochází k velkému nárůstu kontaktního tlaku. Tyto tlaky, které se pohybují v jednotkách gigapascalů, způsobují významné elastické deformace. Charakteristickým znakem EHD mazání je řádově stejně velká deformace ve srovnání s tloušťkou mazacího filmu (0,1 až 1 μm) [8]. Tlak v kontaktu také signifikantně ovlivňuje viskozitu a hustotu maziva. Chování kontaktu je pak ovlivněno nejen fyzikálními vlastnostmi maziva, ale i mechanickými vlastnostmi kontaktních povrchů.



Obr. 2-2 Rozložení tlaku v EHD kontaktu [8]

2.2.3 Režimy kapalinového mazání nekonformních těles

U zatížených, nekonformně zakřivených těles lze na základě různých modulů pružnosti, resp. elastických deformací a změny viskozity maziva v kontaktu, rozlišit čtyři základní režimy kapalinového mazání.

1. Piezoviskózní elastický režim (PE)
2. Viskózní režim tuhých těles (VR)
3. Izoviskózní režim tuhých těles (IR)
4. Izoviskózní elastický režim (IE)

EHD mazání tuhých třecích povrchů, které bylo popsáno v předchozí kapitole, zastupuje *piezoviskózně elastický* režim (velikost elastické deformace kontaktních povrchů je srovnatelná s tloušťkou mazacího filmu). Toto elastohydrodynamické mazání, v obecné terminologii tzv. „hard-EHL“ se například vyskytuje ve styku zubů ocelových ozubených kol, u valivých ložisek a u vaček.

Viskózní režim tuhých těles nastává u kontaktů poměrně tuhých těles, u kterých se projevují jen nepatrné elastické deformace. Viskozita maziva v kontaktním místě podstatně roste. Tento režim se v praktických aplikacích objevuje vzácně [1].

Izoviskózní režim tuhých těles (někdy označováno jako hydrodynamické mazání), je definován jako stav kontaktu těles, u kterého jsou elastické deformace třecích povrchů zanedbatelné oproti tloušťce mazacího filmu. Maximální tlak v kontaktu nedosahuje hodnot ovlivňujících viskozitu maziva.

Izoviskózní elastický (IE) režim poddajných povrchů, též „soft-EHL“ je typický pro kontakt těles, u kterých mají jeden či oba interagující povrchy nízký modul pružnosti, typicky v rozmezí 1 MPa a 100 MPa [9]. Vlivem významné elastické deformace dochází ke zvětšení stykové plochy a rozložení kontaktního tlaku. Tento relativně nízký tlak nenavyšuje viskozitu maziva v kontaktní oblasti. Toto chování lze sledovat například u těsnících kroužků, lidských kloubů a v oblasti kontaktu plastových součástí [8].

2.2.4 Bezrozměrné parametry

Ve snaze teoreticky popsat mechanismus mazání byly zavedeny tzv. *bezrozměrné parametry*. Během času se tyto parametry unifikovaly a začaly se obecně užívat při numerických analýzách a interpretacích teoretických i experimentálních výsledků. Na základě prací Dowsona a Higginsona [10], Johnsona [11] určili Esfahanian a Hamrock bezrozměrné predikční vztahy pro tloušťku filmu v bodovém kontaktu [12]. Rozlišují minimální tloušťku filmu v centrální oblasti H_c a celkové minimum H_0 : pro piezoviskózně elastický režim (PE)

$$H_c = 2,55 g_v^{0,53} g_e^{0,13}, H_0 = 1,69 g_v^{0,49} g_e^{0,17}, \quad (1-2)$$

pro viskózní režim tuhých těles (VR)

$$H_{c/0} = 5,35 g_v^{0,375}, \quad (1-3)$$

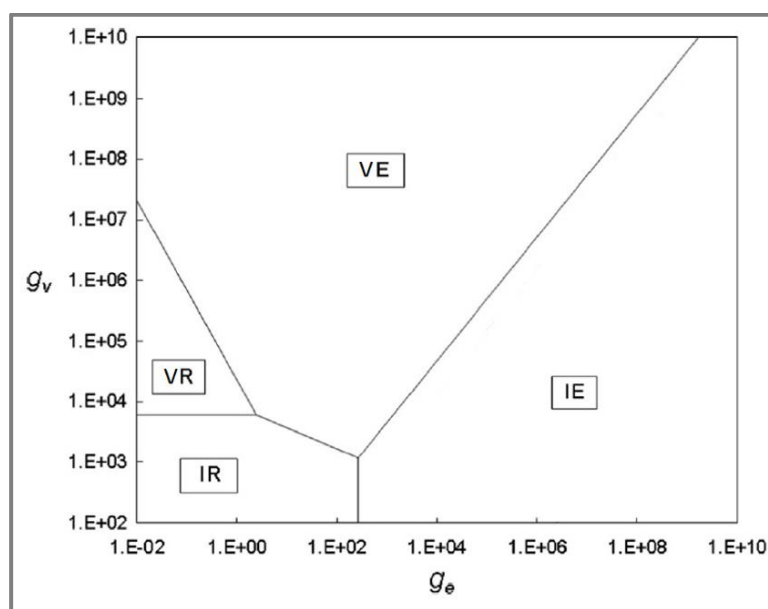
pro izoviskózní režim tuhých těles (IR)

$$H_{c/0} = 134, \quad (1-4)$$

a pro izoviskózní elastický režim (IE)

$$H_c = 5,08g_e^{0,67}, H_0 = 3,28g_e^{0,67}, \quad (1-5)$$

kde $H = \left(\frac{h}{R'_x}\right)\left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}}\right)^2$, parametr viskozity $g_v = \bar{G}\frac{\bar{W}^3}{\bar{U}^2}$, parametr elasticity $g_e = \frac{\bar{W}^{8/3}}{\bar{U}^2}$ a $\bar{U} = \frac{U\eta_0}{E';R'_{ix}}$, $\bar{W} = \frac{W}{E';R'_{ix}{}^2}$, $\bar{G} = \alpha E'$, h je tloušťka filmu, U střední rychlost, W zatížení, η dynamická viskozita, α tlakově viskózní koeficient maziva. Redukovaný poloměr R'_x je definován jako $\frac{1}{R'_x} = \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}}$ a redukovaný modul pružnosti E' jako $\frac{2}{E'} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}$, kde jsou R_{x1}, R_{x2} poloměry těles ve směru rychlosti a E_1, E_2 s ν_1, ν_2 , jsou moduly pružnosti těles a Poissonova čísla [1]. S tímto popisným aparátem, definujícím jednotlivé režimy kapalného mazání, sestavili Esfahanian a Hamrock mapu *režimů mazání* (Obr. 2-3).



Obr. 2-3 Režimy kapalinového mazání pro bodový kontakt [1]

2.3 Mechanismy kontaktu u ozubených kol

Při implementaci prediktivních vztahů popisujících tloušťku mazacího filmu na reálný kontakt boků zubů u dvou spoluzabírajících kol je nutné vymezit základní kinematiku a geometrii kontaktu. Pro plastová soukolí, tj. pro prediktivní vztahy izoviskózně elastického režimu, jsou vstupními parametry velikost zátěžné síly, případně rozložení kontaktního tlaku, průběžná změna poloměru křivosti při záběru, rychlost povrchů a materiálové vlastnosti (modul pružnosti, viskoelasticita). Parametry se liší u každého druhu soukolí, tj. u čelního s přímými či šikmými zuby, šroubového, kuželového či šnekového.

Pro analogii s reálným ozubením je nutné brát v potaz, že prediktivní vztahy tlouštěk jsou definovány pro neměnné kvazi statické podmínky. Obecně v trilogických studiích mazání ozubení dochází k cílenému zjednodušení na zkoumání chování po délce záběrové přímky a chování liniového kontaktu dvou kol s čelním ozubením [13]. Analogie mechanismu záběru je v této kapitole popsána právě na tomto ozubení, konkrétně s přímými zuby.

2.3.1 Kinematika

Střední obvodová rychlost u je u čelního ozubení dána:

$$u = \omega_1 r_1 \sin \psi = \omega_2 r_2 \sin \psi \quad (1-6)$$

kde ω je obvodová rychlost, r poloměr roztečné kružnice a ψ úhel záběru. Při postupném záběru dochází vlivem měnících se tečných rychlostí ke skluzu. Rozdíl těchto rychlostí je nazýván skluzová rychlost. Tato rychlost nabývá největší velikosti při vstupu a výstupu ze záběru je definována:

$$v_{slide} = v_{1t} - v_{2t} \quad (1-7)$$

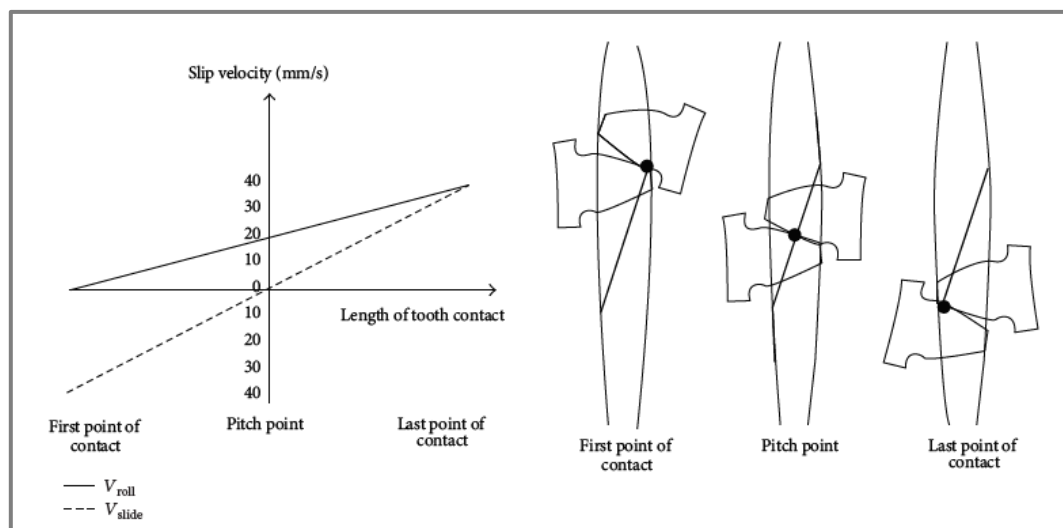
kde v_{slide} je skluzová rychlost, v_{1t} a v_{2t} tečné rychlosti pastorku a spolu-zabírajícího kola. Valivá rychlost v_{roll} je dána:

$$v_{roll} = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2. \quad (1-8)$$

Teoretická míra skluzu je pak poměrem rychlostí skluzu a valení.

$$SRR(\%) = 2 \frac{|v_{slide} - v_{roll}|}{v_{slide} + v_{roll}}. \quad (1-9)$$

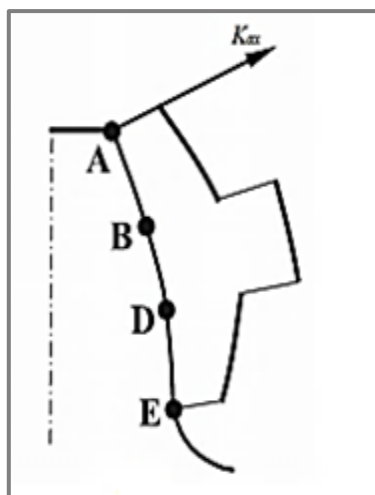
Poměr skluzu a valení (*Slide-to-roll ratio*) SRR je nulový v případě čistého valení, kdy se oba třecí povrchy pohybují stejně rychle shodným směrem, mazivo pak urazí totožnou vzdálenost jako povrchy. Tento stav však nastává pouze v okamžiku průchodu přes bod dotyku roztečných kružnic. Během kontaktu se SRR neustále mění, roste ze záporných hodnot (pata) do kladných (hlava). Viz Obr. 2-4 se zobrazením průběhů poměru valivé a skluzové rychlosti po délce záběru zubu [13,14].



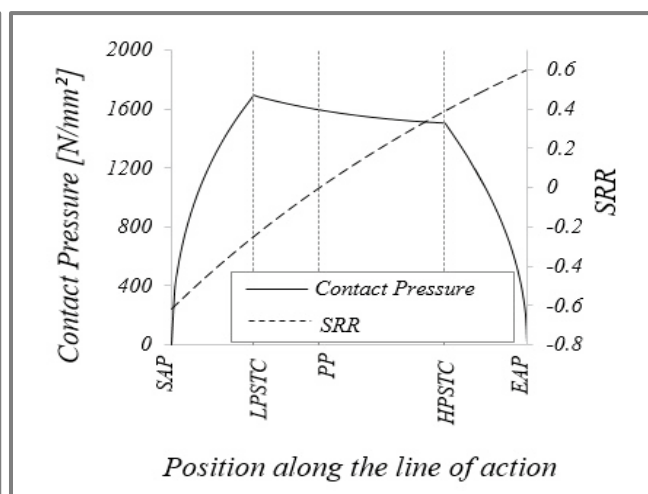
Obr. 2-4 Poměr valivé a skluzové rychlosti po délce záběru zubů [13]

2.3.2 Silové poměry

Z pohledu popisu kontaktní oblasti je nejdůležitější normálová síla F_n , která vytváří vzájemné působení mezi zabírajícími boky zubu. Normálová síla, působící kolmo na bok zubu, slouží pro výpočet napětí a určení Hertzova kontaktního tlaku. Pro aplikaci Hertzovy teorie je užito zjednodušení v přirovnání kontaktu ke styku dvou válců s rovnoběžnými osami (liniový kontakt). Poloměry křivosti evolvent buků zubů se však při záběru mění, a proto je i Hertzovo napětí proměnlivé. Zároveň je nutné zohlednit počet zubů v záběru, který se skokově mění. S ním je spjata i skoková změna kontaktního tlaku.



Obr. 2-5 Rozložení tlaku [15]



Obr. 2-6 Průběh kontaktního tlaku po boku zubu – planetová převodovka [16]

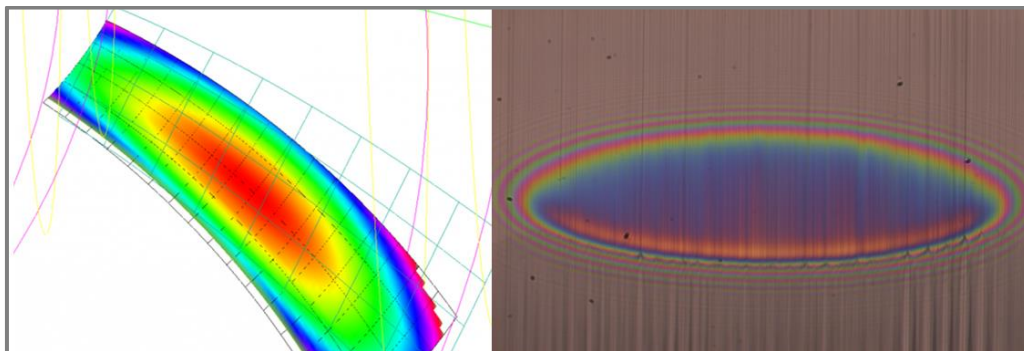
Na Obr. 2-5 je zobrazena teoretická distribuce maximálního kontaktního tlaku po boku zubu čelního ozubeného kola. V bodech B a D lze pozorovat měnící se dvoupárový záběr na jednopárový a naopak. Rozdílná velikost normálové síly na hlavě (A-B) a patě (D-E) zubu je způsobena měnící se ohybovou tuhostí [15]. Na Obr. 2-6 je numerický výpočet kontaktního tlaku planetové převodovky, konkrétně kontaktu centrálního a satelitního kola, graf také obdobně demonstuje dvoupárový a jednopárový pozvolnější přechod kontaktního tlaku [16].

2.3.3 Kontaktní oblast

U čelních ozubených kol s přímým ozubením zaujímá kontaktní oblast liniový tvar, jenž je v okamžiku záběru vlivem deformace zredukován na úzký obdélník. V průběhu záběru se rozděluje na jednotlivé páry zubů. Se zvyšující se tvarovou komplexností (šikmé ozubení, zakřivené, šroubové či kuželové soukolí) se oblast záběru přibližuje k tvaru zdeformované elipsy. Nepřesností výroby a uložení pak dále dochází k nerovnoměrnému zatížení.

Z pohledu praktické inženýrské aplikace ozubených převodů se může jevit tribologické studium EHD bodového a eliptického kontaktu, kterým se také zabývá tato práce, vzdálené od reálných zdeformovaných eliptických či hranově zatížených kontaktů ozubených kol.

Z hlediska formování EHD mazacího filmu lze liniový kontakt¹ a jeho střední oblast chápat jako 1D úlohu. V reálných aplikacích tento kontakt, vzhledem k cílenému broušení boků zubů potlačující hranové napětí, přechází do tvaru *hranově zatíženého*. Bodový kontakt, který je předmětem mnoha studií, je pak vzhledem k nutnosti zohlednění bočního výtoku mnohem komplexnější (2D úloha). Ve finále pak eliptický kontakt kombinuje mechanismy liniového i bodového. S navyšujícím se parametrem křivosti dochází k redukci bočního výtoku a střední oblast začíná vykazovat chování blízké kontaktu liniovému. Nalezení predikčních vztahů tloušťky filmu u eliptického kontaktu umožní vytvoření hodnotnější analogie vzhledem k reálným aplikacím, tedy kontaktům (Obr. 2-7) převládajících u šikmých a zakřivených zubů, přenášejících vyšší zatížení.



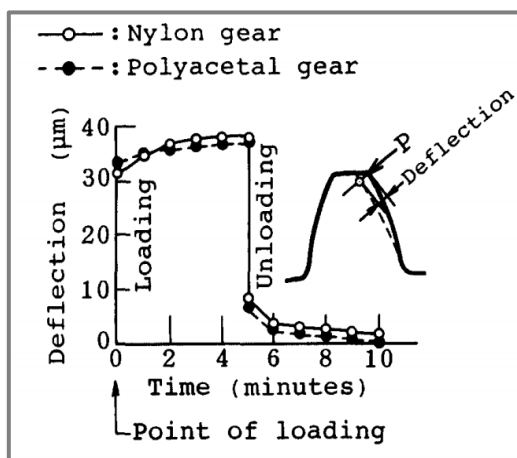
Obr. 2-7 Srovnání geometrie kontaktu kuželového soukolí se zakřivenými zuby s eliptickým kontaktem z tribometru [17]

¹ *Z hlediska simulace liniového kontaktu je výzkum tribologických mechanismů kontaktu často realizován na aparatuře dvou rotujících válců. Předmětem zkoumání je vliv maziva, materiálu a povrchových nerovností, zejména pak slouží k jednodušší analýze a validaci studií teplot, tření a opotřebení oproti reálným ozubeným kolům [14]. Benefitem je jednoduché ovládání zátěžné síly a relativního skluzu. Přírozenou nevýhodou je zanedbání měnícího se úhlu záběru, průměry disků reprezentují pouze křivost jediného bodu na evolventně boku zubu a především absence měření tloušťky filmů oddělujících povrchy.

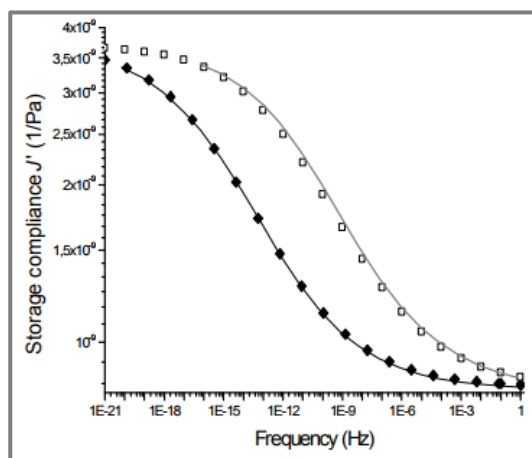
2.3.4 Viskoelasticita

U plastových soukolí je potřeba brát v potaz jejich reálné deformační vlastnosti, tedy zahrnutí *viskoelasticity* polymerních materiálů. Složitá struktura polymerů způsobuje, že na vnější namáhání reagují zpožděnou elasticou deformací doprovázenou plastickou složkou. Při vnitřním tlumení materiálu dochází k přeměně části mechanické energie v teplo. Zahřívání materiálu, navlhavost a doba zatížení pak tyto viskoelastické vlastnosti dále ovlivňují [18].

Jeden z nejjednodušších projevů pozoruje ve svých experimentech Tsukamoto [19]. Při odtížení nylonového a POM zubu pozoruje zpožděné, hysteretní tečení materiálu (creep), viz Obr. 2-8. Dále konstatuje, že po dlouhodobém statickém zatížení (pod mezí kluzu) již nedochází k návratu do původní polohy a dochází ke vzniku plastické deformace.



Obr. 2-8 Časová relaxace polymerů [19]



Obr. 2-9 Viskoelastické vlastnosti PA66 [18]

Při záběru ozubených kol dochází k cyklickému dynamickému namáhání. Během něj působí zátěžná síla po velmi krátký okamžik. Problematikou viskoelastického chování u ozubených kol se jako jeden z mála věnuje tým E. Letzeltera, který vytvořil zobecněné řešení Kelvinova numerického modelu pro popis záběru čelních ozubených kol, konkrétně z polyamidu 6.6 (PA 66)[18]. Studie se také zabývá experimentálním ověřením a poukazuje na míru schopnosti elastické deformace buzené pulzujícím kontaktním tlakem². Na Obr. 2-8 je experimentálně změřená křivka schopnosti materiálu reagovat a pružně absorbovat kontaktní tlak vzhledem k frekvenci zatěžování. Z grafu je patrné, že se vzrůstající frekvencí dochází ke snižování relativního útlumu. Spodní plná křivka reprezentuje chování PA 66 při 0 °C, horní při 30 °C.

² Frekvenci tohoto zatěžování lze v analogii k měření na tribometru chápat jako rychlost otáčení.

2.4 Studie zabývající se kontaktem poddajných materiálů

2.4

Kapitola je zaměřena na rozbor stěžejních studií, které se zabývají kontakty v horní hranici IE režimu. Cílem rozboru je shrnutí dosavadních poznatků z experimentálních studií a objasnění základních přístupů k problematice.

2.4.1 Experimentální studium soft-EHL kontaktu optickou interferometrií

2.4.1

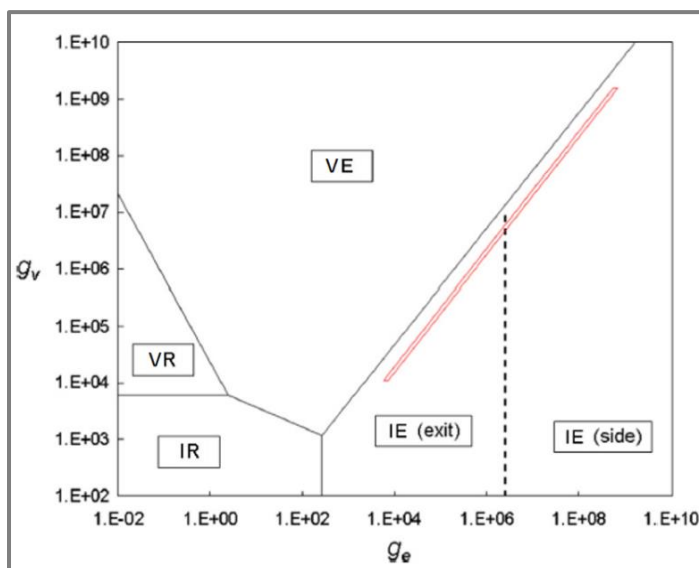
MARX, N., et al. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contact using optical interferometry. *Tribology International*. [1]

Nigel Marx byl v roce 2015 první, kdo úspěšně aplikoval metodu optické interferometrie na studium nekonformního bodového kontaktu v IE režimu. Pro popis tloušťky filmu použil vyřezaný průhledný disk z polymethylmethakrylátu (PMMA) a odlitý z polyuretanu (PU). Tyto materiály vykazují dostatečnou pevnost a jsou svými moduly pružností srovnatelné s konstrukční plasty (POM, PA). Experiment byl realizován v konfiguraci bodového kontaktu, tj. styk transparentního plastového disku a ocelové kuličky ($\varnothing$ 19 mm).

Tab 2-2 Vlastnosti polymerních disků [1]

Materiál	Drsnost povrchu	Modul pružnosti	Poissonovo číslo
PMMA	<4 nm	3,3 GPa	0,39
PU	<4 nm	1,85 GPa	0,48

Cílem práce bylo experimentálně ověřit predikce pro centrální (h_c) a minimální (h_o) tloušťky filmu v konfiguraci bodového kontaktu, které ve svých analytických studiích predikuje Hook [20]. Ten rozděluje izoviskózní elastický režim na dvě podoblasti: oblast, kde se minimální tloušťka nachází v centrální části výtoku maziva (v ose x), kterou označuje jako minimum $h_{0(exit)}$ a oblast minima lokalizovaného v boční konstrikci v oblastech bočního výtoku $h_{0(side)}$. Přechod minima z oblasti boční konstrikce do centrálního výtoku je podmíněn zvýšením zatížení či rychlosti viz Obr. 2-10.



Obr. 2-10 Rozdělení IE režim s vyznačenou oblastí měření Marxe [1]

Při interferometrickém zkoumání kontaktu poddajných těles nastávají problémy se světelnou intenzitou paprsků. Transparentní polymery obecně vykazují poměrně nízkou odrazivost. Nízká světelná intenzita odražených paprsků pak způsobuje velmi malé odchylky pro konstruktivní či destruktivní interferenci se světelným paprskem, který polymerem z větší části projde a odrazí se od reflexivního kovového povrchu kuličky nazpět.

Marx tento problém vyřešil vhodnou volbou polymeru a aplikací polopropustné vrstvy chrómu, která se běžně užívá ve studiích kontaktů v PE režimu. Napařená vrstva na spodní kontaktní ploše rotujícího disku navyšuje odrazivost a umožňuje interferometrické měření. Problémem u poddajných materiálů je narušení této vrstvy. U materiálů s velmi nízkým modulem pružnosti dochází vlivem deformace základového materiálu i k degradaci vrstvy chrómu, což v konečném důsledku znesnadňuje a částečně omezuje užití interferometrie.

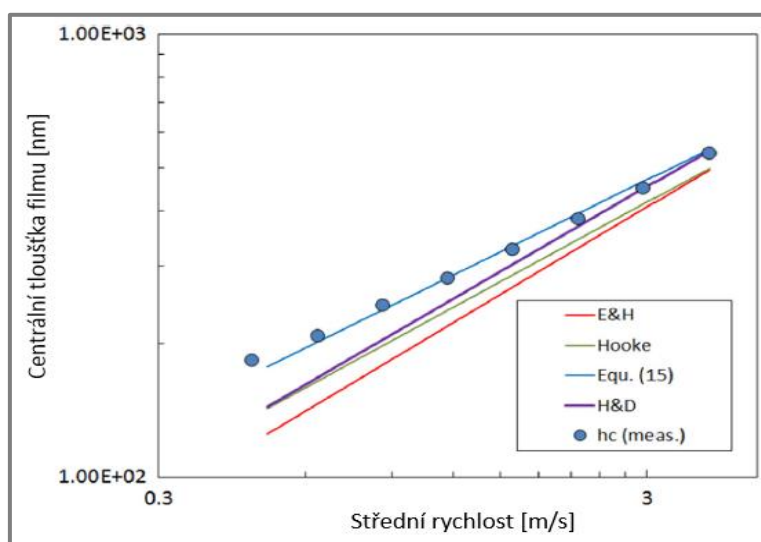
Jak je zobrazeno na Obr. 2-10, Marx pro experiment vybral polymery, spadající při EHD mazání i díky vyššímu modulu pružnosti do horní hranice izoviskózně elastického režimu (IE). Na základě variace rychlosti, materiálu, viskozity, relativního skluzu a zatížení regresně koriguje Hooky predikční vztahy pro tloušťky filmu (IE režim), viz vzorce:

$$\frac{h_c}{R'_x} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right)^2 = 2,7 g_e^{0,725}, \quad (1-10)$$

$$\frac{h_{0(exit)}}{R'_x} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right)^2 = 2,1 g_e^{0,725}, \quad (2-11)$$

$$\frac{h_{0(side)}}{R'_x} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right)^2 = 2,9 g_e^{0,9}. \quad (3-12)$$

Marx dále konstatuje, že teoretické vztahy pro IE režim (Hook, Dawson, Hamrock) predikovaly tenčí filmy, než byly pozorovány při jeho měření (Obr. 2-11).



Obr. 2-11 Srovnání experimentu s predikční tloušťkou, PMMA, GTL4, SRR = 0, W = 10 N

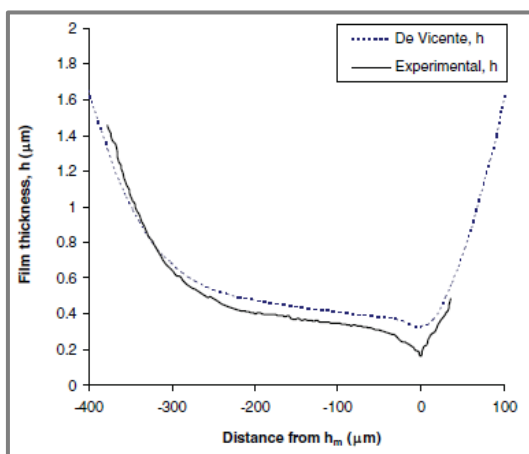
MYANT, C., et al. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions* [21].

Tato studie z roku 2010 užívá konfiguraci skleněného disku a polydimethylsilikonem (PDMS) obalené ocelové kuličky. U polymeru doplněného o plnivo snižující optický rozptyl je dynamicko-mechanickou analýzou (DMA) stanoven modul pružnosti na 2,8 MPa. Myant užívá starší metody monochromatické interference, u které je výsledný obraz vyhodnocen na základě světelné intenzity. Tloušťka filmu je v práci srovnána s predikčními vztahy Hamrocka a Dowsona [10] a korekčními od De Vicenta [22] pro izoviskózní elastický EHD režim.

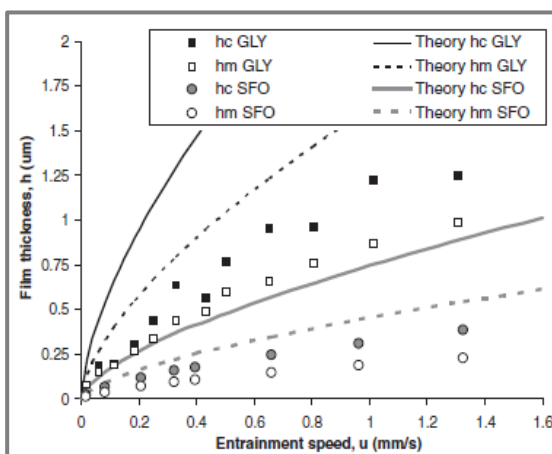
Kontakt byl zkoumán v podmínkách čistého skluzu, při rychlostech do $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, mazání bylo realizováno rostlinným olejem (SFO) a ředěným glycerolem (GLY). Celá experimentální studie byla proměřena za velice nízkých zatížení v řádech desítek milinewtonů. Maynt naměřil relativně silný odklon centrálních tloušťek h_c od numerických predikčních vztahů. Na základě vlastní regrese pak přichází se vztahy pro tloušťky:

$$h_c = 3,3\bar{U}^{0,63}\bar{W}^{-0,13}R'_x \quad (1-13)$$

$$h_0 = 2,8\bar{U}^{0,68}\bar{W}^{-0,20}R'_x \quad (1-14)$$



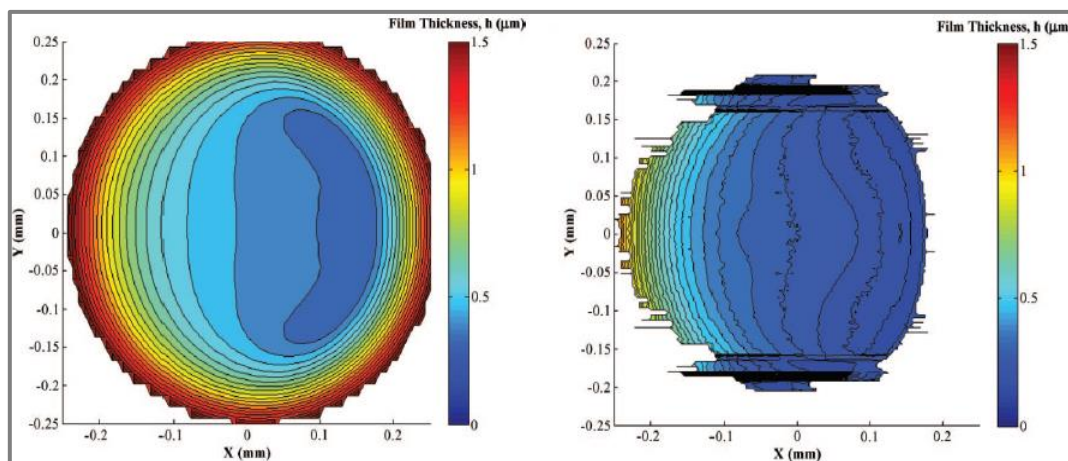
Obr. 2-12 Profil tloušťky ve středním EI režimu



Obr. 2-13 Srovnání měření s predikcí De Vicenta

Z neznámého důvodu není ve studii porovnání s predikčními vztahy Hookea, které vykazují s regresními vztahy Mayanta pro centrální tloušťku značnou podobnost³. Interferogramy bodového kontaktu této studie nejsou dostatečně kvalitní pro přesné rozlišení minimální tloušťky v oblasti výtoku a podkovité konstrikce (viz. Obr. 2-14).

³ Hooke: $h_c = 3,56\bar{U}^{0,6}\bar{W}^{-0,13}R'_x$; $h_{0(exit)} = 3,83\bar{U}^{0,6}\bar{W}^{-0,13}R'_x$ [20]



Obr. 2-14 Teoretická (vlevo) a experimentálně naměřená tloušťka filmu, PDMS, SRR=0; zatížení $w = 0,3 \text{ mN}$, rychlost $u = 660 \text{ mm s}^{-1}$

2.4.2 Studium tření v kontaktech ozubených kol (PEEK)

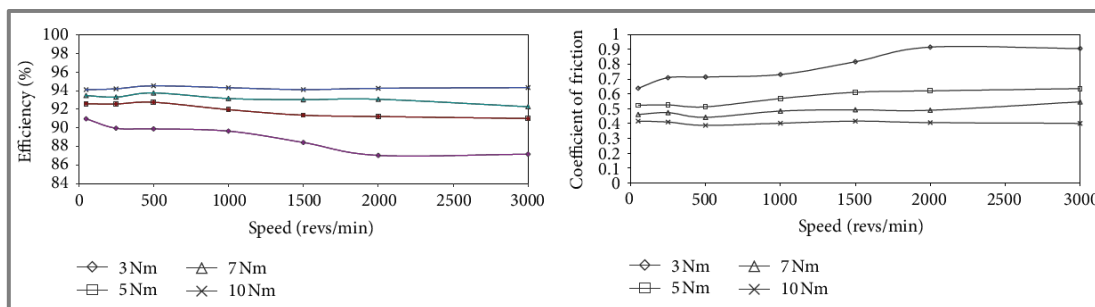
DEARN, K., et. al. Lubrication regimes in high-performance polymer spur gears. *Advances in Tribology*. [13]

Studie Dearn se věnuje vlivu geometrie záběrového úhlu na koeficient tření. Autor přistupuje k predikci tloušťky filmu skrze efektivitu přenosu momentu na soukolí umístěné v zařízení měřící s vysokou přesností vstupní a výstupní momenty na převodu. Vzorec odvozený Waltonem v záběru dvou polyacetalových kol (POM/POM) je Dearnem použit u kombinací polyetherketenových (PEEK) a ocelových kol. Získaná efektivita slouží jak vstup pro:

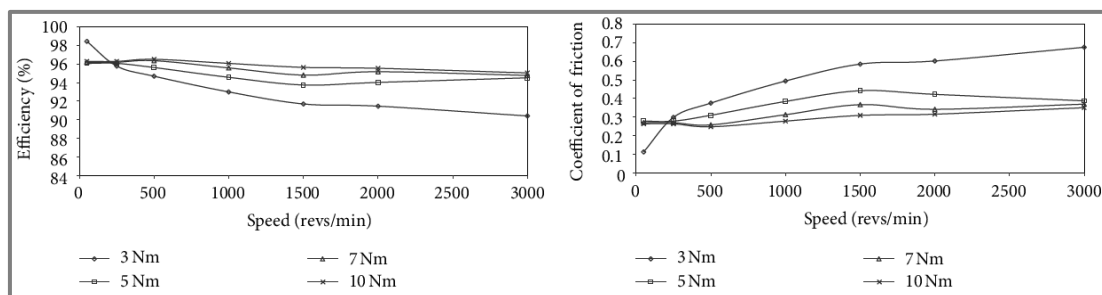
$$\eta = 1 - \left(\frac{1+i}{\gamma_1 + \gamma_2} \right) \frac{\mu}{2} (\gamma_1^2 + \gamma_2^2), \quad (1-15)$$

kde η je efektivita soukolí, γ úhel záběru, μ koeficient tření, i převodový poměr.

Na základě vypočteného koeficientu tření a Stribeckovy křivky probíhá kontakt kol při nižším zatížení ve smíšeném režimu mazání. Dle dat z měření nevykazuje kontakt znatelně vyšší efektivitu oproti suchému kontaktu. Dearn dále srovnává různé kombinace materiálů a úhlů záběru.

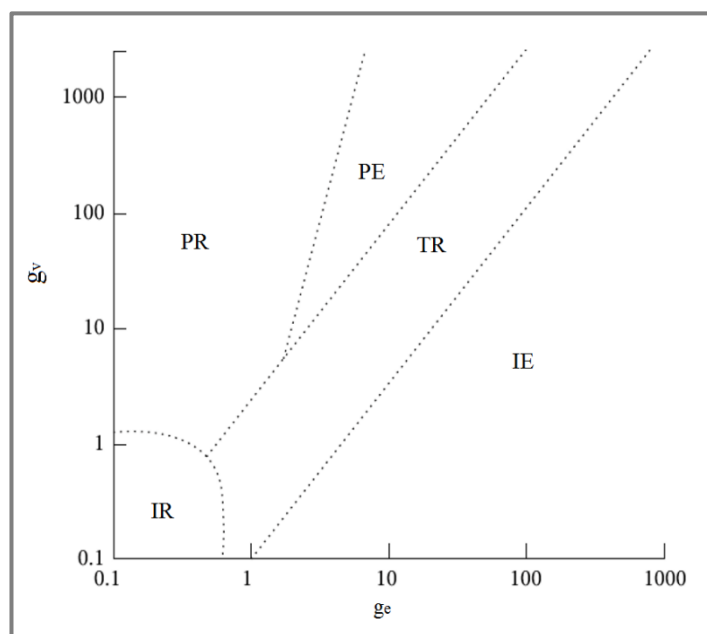


Obr. 2-15 PEEK/ocel, účinnost a odvozený koeficient tření, smíšený režim [13]



Obr. 2-16 Kombinace PEEK/PEEK, účinnost a odvozený koeficient tření, kapalinový režim [13]

Je zjištěno, že při vyšším záběrovém úhlu 30° (běžný úhel 20°) dochází v kontaktu k plně kapalinovému mazání EHD, ve kterém se obecně značně snižuje opotřebení. Potvrzuje se, že s narůstající zátěží dochází k menšímu tření a zvýšení efektivit téměř u všech kombinací materiálů. Nejvyšší efektivitu dosahuje kombinace PEEK/PEEK (nad 90 %) při úhlu záběru 30° , při aplikaci vyšších zatížení pak kontakt přechází do elastohydrodynamického mazání, konkrétně do *transientního režimu*. V článku je uvedena Johnsova mapa EHL mazání [11]. Tato mapa se liší od mapy Asfahaniana a Hamrocka doplněním právě o transientní režim (TR) mezi piezoviskózní (PE) a izoviskózní režim (IE). Na vertikální ose je opět parametr viskozity g_v a na horizontální elasticity g_e (Obr. 2-17).



Obr. 2-17 Mapa elastohydrodynamického vytvořená Johnsonem [11]

2.4.3 Vliv viskoelastivity na formování filmu v IE

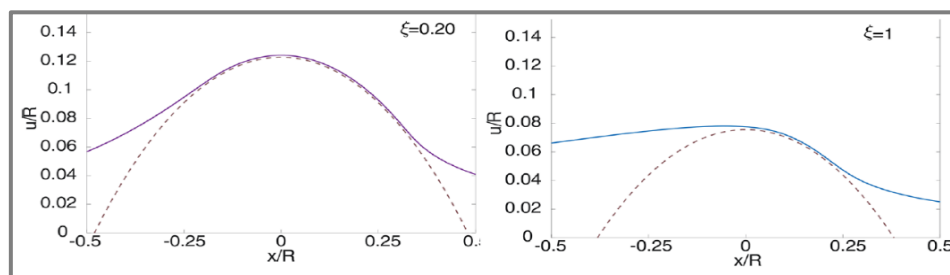
2.4.3

UTIGNANO, C.- DINI, D. Soft Matter Lubrication: Does Solid Viscoelasticity Matter? *ACS Applied Materials & Interfaces* [23]

Relativně nová studie z roku 2017 se zabývá vlivem viskoelastivity polymerního materiálu na tvorbu filmu v IE-EHD režimu. Autoři v článku porovnávají vlastní numerický model s interferometrickým měřením centrálních tloušťek na PMMA disku. Pro popis zavádějí *bezrozměrnou rychlost* (časový poměr):

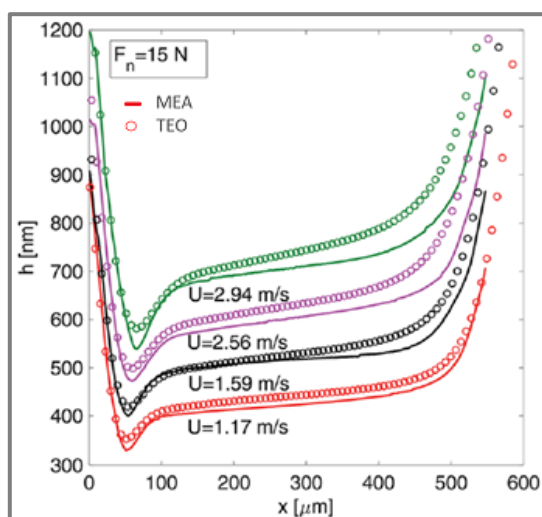
$$\xi = \frac{U\tau}{R} \quad (1-15)$$

kde je U rychlost povrchů (za podmínek čistého valení rovna unášivé rychlosti), τ relaxační čas materiálu⁴ a R bezrozměrná vzdálenost. ξ pak vyjadřuje poměr času potřebného k elastické reakci materiálu a času k zaplavení mazivem oblasti s poloměrem R . Na Obr. 2-18 jsou výsledky numerické simulace materiálové odezvy PMMA v závislosti na popsané bezrozměrné rychlosti.

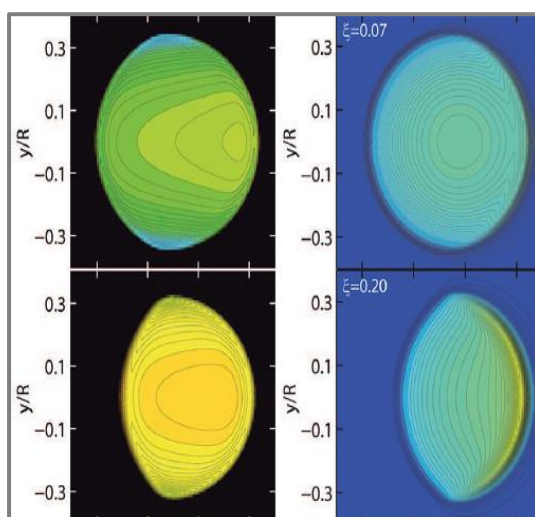


Obr. 2-18 Rozložení deformace v závislosti na bezrozměrné rychlosti ξ

Utignano po implementaci komplexního viskoelastického modulu pružnosti do EHD rovnic pozoruje odklon naměřených tloušťek od modelu (chyba 8 %). Nelineární viskoelastické chování se v centrálním profilu ($y/R=0$) projevuje především na vstupu maziva do kontaktu. Na obr. 2-19 lze pozorovat s postupně se navyšující unášecí rychlostí teoreticky značné zvýšení náklonu filmu vůči vstupu maziva. Dalším projevem relaxace polymeru je výrazné smrštění v horizontálním řezu na výstupu (viz obr. 2-20) při vysokých rychlostech ξ (nízký relaxační čas, vysoké unášivé rychlosti). Utignano dále sestavuje hypotézu postupného přesunu tlaku do přední oblasti s projevem v podobě vzniku nové minimální tloušťky.



Obr. 2-19 Srovnání predikčního modelu Utignana a naměřené tloušťky, $w = 15$ N



Obr. 2-20 Viskoelastický projev deformace kontaktní oblasti

⁴ Relaxační čas je časová hodnota, kterou potřebují makromolekuly ke změně uspořádání v polymeru.

3. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z rešerše

3.1

Z rešeršní části vyplývá, že experimentální výzkum tloušťek mazacího filmu metodou optické interferometrie je možný i u poddajných těles, konkrétně polymerních materiálů vykazujících vyšší pevnostní vlastnosti. Většina publikací využívající tuto metodu studuje kontakt mezi kovovou nebo keramickou kuličkou a skleněným či safírovým diskem [2]. Na základě zkušeností s touto metodou byly vytyčeny G. Pollem a A. Gabellim [24] základní překážky pro užití u poddajných materiálů:

- tloušťka filmu se v soft-EHD režimu pohybuje ve velkém rozsahu a může dosahovat až řádů mikrometrů,
- polymery vykazují špatnou odrazivost,
- vrstvy zlepšující tuto odrazivost mají mírnou tendenci ovlivňovat elastický, charakter povrchu a samy o sobě jsou náchylné k opotřebení,
- většina poddajných materiálů má vysokou drsnost a zároveň je poměrně obtížné tyto povrchy vyleštit.

V roce 2015 pak Marx poprvé úspěšně použil chrómovou vrstvu na PMMA a PU pro studium kontaktu s ocelovou kuličkou. Disky byly podvrstveny 20-30 nm tenkou vrstvou, která neovlivnila mechanické vlastnosti důležité pro formování bodového kontaktu [1]. Zmíněný problém odrazivosti lze překonat buď nanesením semi-chrómové vrstvy, jak učinil Marx, nebo kombinací dvou materiálů, které mají na rozhraní s mazivem stejný rozdíl indexu lomu. U této dvojice (plastový disk a skleněná kulička) je pak potřeba u kuličky zamezit parazitním odleskům vzniklých totálním odrazem, případně pronikání paprsků skrze spodní hemisféru.

Z dostupných zdrojů je vidět, že mapa režimu mazání od Esfahaniana a Hamrocka [12] se liší od mapy Johnsona [11] o *transitní režim*. Tento režim, kde Johnson doporučuje plastová soukolí mazat minerálním olejem, je Dearnem [13] označen právě jako provozní režim kontaktu kol při plně kapalinovém mazání. Existuje zde rozpor mezi novější studií Marxe podloženou experimentem, která své výsledky srovnává na vztazích ignorujících predikční vztahy pro transientní režim. Marx na druhou stranu validizuje teorii pro izoviskózní elastický režim, kterou Hook na základě numerického modelu rozdělil na oblast s polohou minima u bočního výtoku $h_{0(side)}$ a na oblast výtoku po směru osy $h_{0(exit)}$.

Utignano [23] v roce 2017 porovnává numerický model zahrnující viskoelasticitu materiálu (PMMA) s interferometrickým měřením v konfiguraci *ball-on-disc*. Při rychlostech nad $1,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatížení 15 N a viskozitě maziva $0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (obdobný olej užil Marx), $SRR = 0$ pak v podélném řezu tloušťky filmu ($y/R = 0$) nezaznamenal numerickou očekávané náklonění vstupní oblasti kontaktu vůči vtoku maziva, geometrická strmost na vstupu je vyšší (viz Obr. 2-19). Znatelnější projevy viskoelastického chování na formování filmů očekává při vyšších rychlostech.

Existuje zde prostor pro systematické experimentální zkoumání transientní oblasti. Konkrétně pro ověření predikčních vztahů pro bodový a eliptický kontakt s polymerem (PMMA), jenž je se svým modulem pružnosti podobný běžně užívaným konstrukčním plastům pro ozubené převody. Dále pak pro popis míry vlivu jednotlivých bezrozměrných parametrů (příp. vliv viskoelasticity materiálu) na formování tloušťky filmu.

3.2 Závěry plynoucí z rešerše

Z dostupných experimentálních studií zkoumajících problematiku kontaktu poddajných těles v elastohydrodynamickém režimu mazání lze vyvodit tyto obecné závěry.

- Pro aplikaci optické interferometrie vyplývají vysoké požadavky na geometrickou přesnost vzorku. Polymer musí vykazovat vhodné optické vlastnosti v kombinaci s potřebnými technologickými úpravami pro měření, především dokonale hladký povrch pro následné napaření chromové vrstvy.
- Dosavadní měření metodou optické interferometrie, se zabývají studiem kontaktu ocelové kuličky s PMMA za izotermních podmínek. Modul pružnosti je však u polymerů na rozdíl od kovů vysoce závislý na teplotě, příspěvek jeho změny na tloušťku filmu prozatím nebyl pozorován.
- Viskoelastická materiálu by při nižších rychlostech (do $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) neměla ovlivňovat tloušťku mazacího filmu.
- Neexistuje jednotná mapa EHD režimů mazání pro kontakt poddajných materiálů používaných pro plastová ozubená kola, která by jasně definovala oblast přechodu z IE mazání k oblastem přechodu do PE režimu.
- Transientní režim (TR) obecně není rozlišován, ačkoliv se v něm realizují i experimentální studie.
- Jediné dosavadní experimentální interferometrické studie realizované v TR byly provedeny v konfiguraci bodového kontaktu. Vliv vstupních podmínek na utváření mazacího filmu u geometrie s elipticitou mimo bodový kontakt prozatím není znám (míra bočního výtoku, chování minimální tloušťky atd.).

3.3 Cíl diplomové práce

Cílem práce je popsat utváření mazacího filmu v kontaktech mezi ocelovou kuličkou a plastovým diskem při použití kapalných maziv. Práce má obsahovat analýzu bodového a eliptického kontaktu při přechodu z oblasti izoviskózního režimu (IE) do piezoviskózně elastického (PE), tj. transientní oblast (TR).

K dosažení cíle je potřeba provést tyto dílčí cíle:

- implementace optické interferometrie
- objasnění vlivu elipticity na tloušťku mazací vrstvy při kontaktu s plastovým diskem
- objasnění významu vlivu jednotlivých bezrozměrných parametrů

Výsledky experimentální části diplomové práce budou následně porovnány s dostupnými publikovanými výsledky, konkrétně predikčními vztahy, které definují tloušťky filmu v režimech mazání, ve kterých operují plastová soukolí. Výstupem práce je publikace.

4. MATERIÁL A METODY

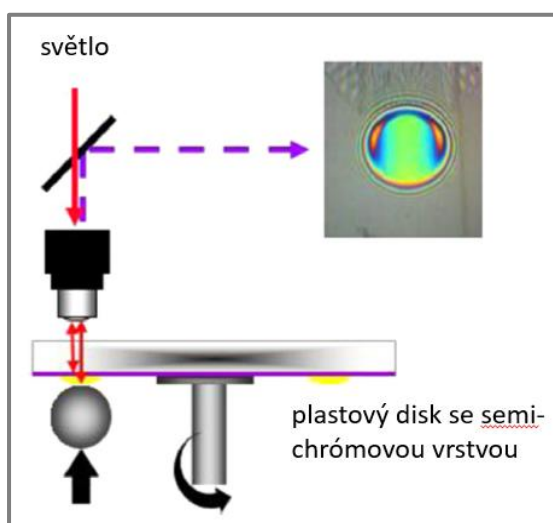
4

4.1 Optický tribometr

4.1

Měření bylo provedeno na optickém tribometru sestaveném na ÚK. Konstrukce umožňuje simulaci kontaktu, v tomto případě ocelové kuličky či soudečků s plastovým diskem. Nezávislý relativní pohyb (míra skluzu) obou komponent je řízen servomotory skrze frekvenční měniče. Zátěžná síla je pak realizována mechanismem dvojzvrtné páky, na kterou je přidáváno závaží pro vytvoření požadovaného zatížení, resp. tlaku. Temperace kontaktu je realizována skrze výhřev přiváděného maziva.

Princip optické interferometrie spočívá v konstruktivním či destruktivním skládání světelných paprsků. V tomto případě paprsků halogenové či xenonové lampy (bílé světlo), jenž se odrazí od spodní polopropustné vrstvy a paprsků, které vrstvou prochází, prostupují mazivem, odráží se od lesklého povrchu kuličky a putují zpět (opět prochází mazivem, vrstvou chrómu a diskem). V místě kontaktu vznikají tzv. *interferogramy*, což jsou obrazce reprezentující svými barevnými mapami právě tloušťku filmu. Pro správné přiřazení barev k odpovídajícím tloušťkám je využit software Achilles, ve kterém je prvotně prováděna také kalibrace celého měření.



Obr. 4-1 Princip měření tloušťky mazací vrstvy metodou optické interferometrie [1]

Záznamovou aparaturu tribometru s mikroskopem je možné doplnit o vysokorychlostní kameru.

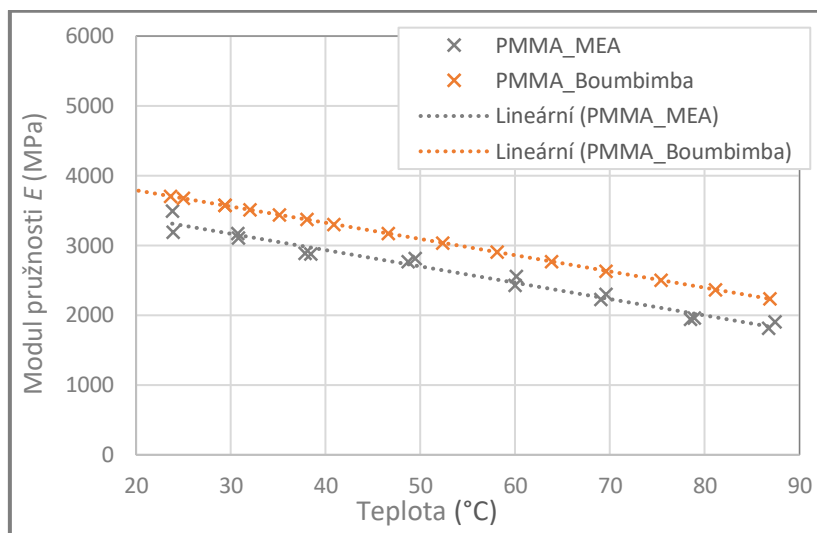
4.2 Materiál

4.2

Při výzkum soft-EHD kontaktu optickou interferometrií je pro metodu v konfiguraci *ball-on-disk* nutné zajistit transparentní disk z polymerního materiálu (PMMA, PU, PC). Kromě homogenních optických vlastností materiálu musí být podstavy disků vysoce hladké ($R_a \approx 0,001$), což umožňuje rovnoměrné napaření tenké semireflektivní vrstvy chrómu (20-30 nm). Disky je možné vyrobit buď z prefabrikovaných desek, nebo odlitím. V tomto případě byly laserem nařezány z extrudované polymethylmethakrylátové (PMMA) desky. Tento polymer opticky vyhovuje (index lomu $n=1,490$) a zároveň je se svou kvalitou povrchu vhodný pro přímé napaření semi-chrémové vrstvy.

4.2.1 Modul pružnosti PMMA

Modul pružnosti E je základní vstupní parametr, jenž určuje charakter IE režimu. U PE - EHD režimu nedochází vlivem teploty ke znatelné změně modulu pružnosti ať ocelové kuličky nebo skleněného či safírového disku. Modul pružnosti je však u plastů na teplotě výrazně závislý.



Obr. 4-2 Lineární závislost $E = f(T)$ čistého PMMA dle Boumbimba [25] a naměřeného modulu E

V případě připodobnění ke kontaktu dvou plastových ozubených kol, u kterých při záběru boků zubů dochází i k čistému skluzu, je potřeba zahrnout i proměnný modul pružnosti na teplotě. Pro určení modulu $E = f(T)$ byla užita Hertzova teorie, konkrétně poloměr deformované oblasti bodového kontaktu, ze kterého byl zpětně dopočítán modul pružnosti pro danou teplotu, viz Obr. 4-2. Tento přístup ve své práci užil i Marx[1], který se však omezil pouze na teplotu 40 °C. Modul pružnosti byl vyjádřen z poloměru bodového kontaktu a :

$$a^3 = \frac{3FR'}{2E'} \quad (4-1)$$

kde R' je redukovaný poloměr, F zatížení a E' redukovaný modul pružnosti. Měření proběhlo v teplotním rozsahu 24,1 ÷ 86,7 °C při zatížení 10; 15 a 20 N, odchylka měření vůči získané lineární funkci⁵ je ± 2,2 %. Poissonovo číslo bylo převzato z literatury [1].

4.3 Maziva

Vzhledem k omezené chemické komptabilitě PMMA došlo k částečnému zúžení výběru maziv. Tento polymer značně reaguje s oleji na bázi esteru či polyethylenglykolu. Maziva užitá v této práci vykazují stabilní tlakově-viskózní koeficient při teplotě okolo 23 °C. V experimentech byla užitá maziva (viz Tab 4-1), která již prošla měřeními na rotačním viskozimetru na pracovišti ÚK.

⁵ $E = -23,4t + 3868,4$

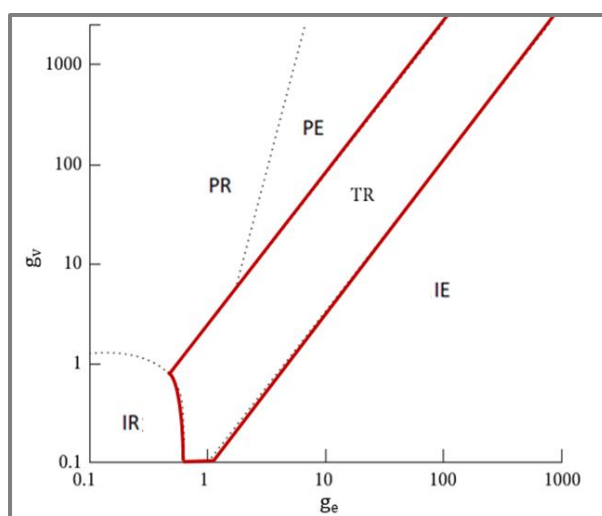
Tab 4-1 Vlastnosti maziv

Mazivo	Tlakově-viskózní koeficient α (GPa ⁻¹)	Dynamická viskozita η (Pa·s)	Teplota t (°C)
KTF1	34,8	0,070	24,1
HC 32/130	20,0	0,053	23,1
PAO6	11,2	0,046	24,8

4.4 Rozsahy měření

V EHD mapě režimů je předmětem zájmu této práce oblast přechodu mezi izoviskózním a piezoviskózně elastickým EHD režimem, viz Obr. 4-3. Na osách mapy jsou bezrozměrné parametry viskozity g_v a elasticity g_e .

4.4



Obr. 4-3 Transientní oblast EHD režimu, mapa pro bodový kontakt [13]

Důležitými vstupními parametry jsou kromě změny modulu pružnosti také rychlost, zatížení a druh maziva. Za podmínek čistého valení je zkoumaný interval v rozmezí $0,1 \div 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, při zatíženích v řádech jednotek až desítek newtonů ($\approx 5 \div 20 \text{ N}$) odpovídajících malým Hertzovým tlakům v řádech desítek megapascalů. Mazání bylo realizováno syntetickými oleji běžně užívanými při mazání plastických převodů (příkladem HC 32/130; viskozita při 40°C , $18 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

4.5 Postup práce

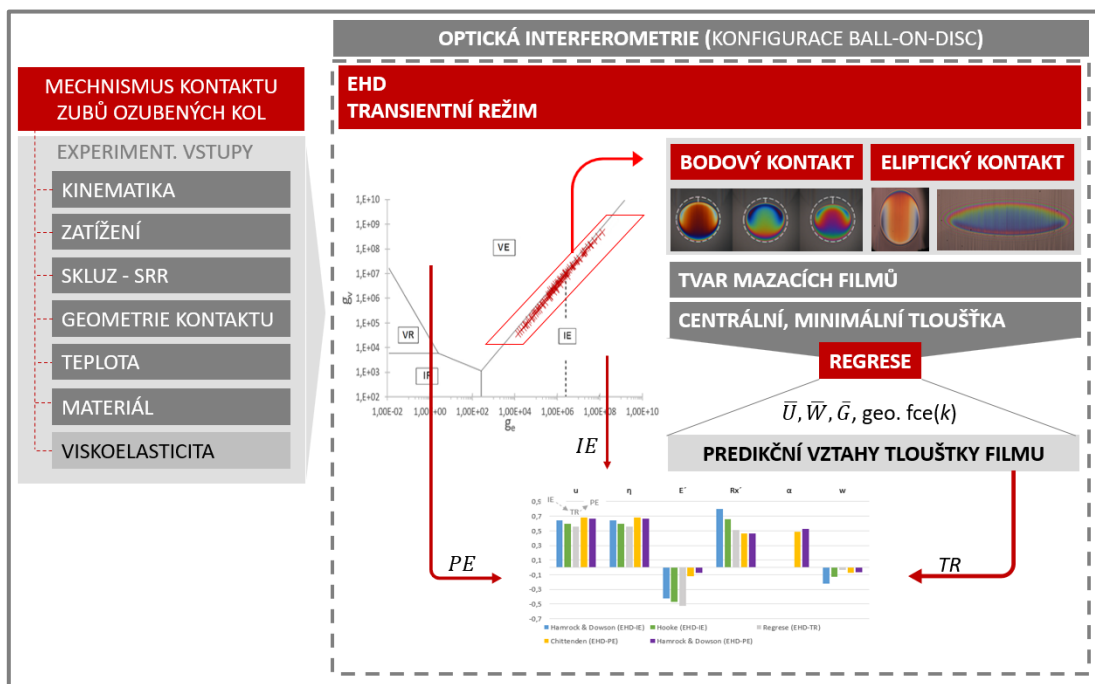
4.5

Předmětem práce je zmíněné zkoumání bodového a eliptického kontaktu v EHD režimu mazání, konkrétně v hraniční oblasti přechodu z IE do PE oblasti metodou optické interferometrie. Užití této metody je podmíněno aplikací mechanicky odolné polopropustné vrstvy na kontaktní plochu PMMA disku s ocelovou kuličkou.

Prvotní experimenty proběhly v konfiguraci bodového kontaktu. V době těchto měření existovala pouze jediná experimentální studie [1]. Po úspěšném srovnání průběžně dosažených výsledků na bodovém kontaktu, bylo zahájeno systematické proměřování tloušťek mazacích filmů také na eliptických kontaktech.

V rámci analogie k reálnému kontaktu ozubených plastových kol byl při experimentech pozorována systematická změna vlivu rychlosti, zatížení, viskozity,

tlakově-viskózního koeficientu, SRR, teploty (příp. modulu pružnosti) a elipticity k . Užitím sady soudečku s rozlišnými elipticitami ($k < 1$, $k > 1$) pak bylo možné pozorovat změnu mechanismů podílejících se na formování centrálních a minimálních tloušťek h (redukce bočního výtoku, proporcionální deformace kontaktní elipsy). Po proměření dostatečného množství dat došlo k užití regresního SW aparátu a získu nových vztahů pro určení zmíněných tloušťek filmu v transientním režimu (TR).

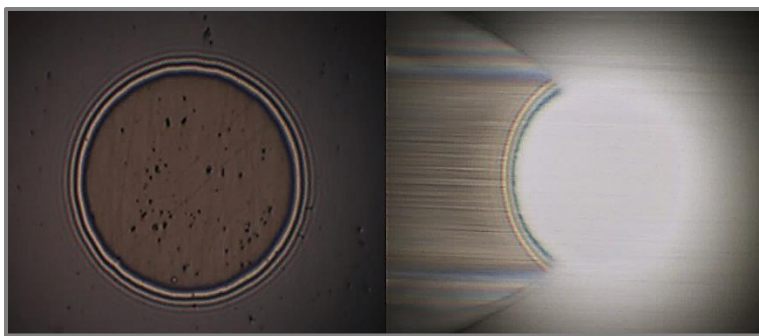


Obr. 4-4 Diagram postupu práce

5. VÝSLEDKY

V experimentech níže popsáných je postupně objasněn vliv jednotlivých vstupních parametrů (unášející rychlost, viskozita, zatížení, tlakově viskózní koeficient, modul pružnosti, geometrie, teplota) na centrální (h_c) a minimální tloušťku filmu (h_0). Díky variaci elipticity kontaktu bylo možné vytvořit regresní analytické vztahy implementující právě proměnlivost elipticity k . Matematická forma regresních vztahů respektuje zavedený tvar bezrozměrných EHD parametrů ($\bar{U}, \bar{W}, \bar{G}$).

Základním předpokladem užití optické interferometrie je úspěšná aplikace chrómové polopropustné vrstvy, viz Obr. 5-1. Tato semi-chromatická vrstva nanesená na PMMA disk sice umožňuje snímání vysoce kvalitních interferogramů, zároveň však vykazuje oproti aplikaci na skleněných či safírových discích mnohem vyšší sklon k degradaci. Konkrétně za podmínek vyšších skluzů či při experimentech probíhajících při teplotách nad 40 °C došlo k odlupování malých segmentů vrstvy, což vedlo k znesnadnění dalších měření. Vzhledem k náchylnosti vrstvy bylo měření vlivu poměru skluzu a valení odloženo.

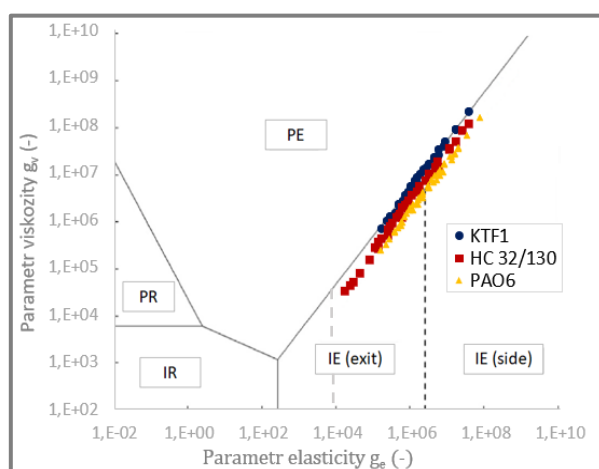


Obr. 5-1 Vlevo interferogram statického kontaktu s aplikací polopropustné chromatické vrstvy, vpravo interferogram bez vrstvy

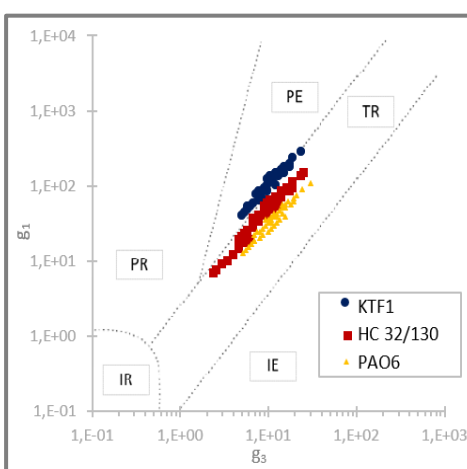
5.1 Bodový kontakt v TR režimu

Na Obr. 5-2 a 5-3 jsou zobrazeny EHD mapy režimů mazání pro bodový kontakt ($k = 1$) s body reprezentujícími realizovaná měření. Vstupní podmínky experimentů jsou obdobné Marxově studii, tj. stálá teplota ($23 \pm 0,5$) °C, nulový prokluz ($SRR = 0$), řádově obdobně viskózní oleje, zatížení a rychlosti.

Z map je zřejmé, že s modulem pružnosti PMMA disku (3300 MPa) je dosaženo přechodové hraniční oblasti mezi IE a PE režimem, dále označované jako *transientní* (TR). Měřené body také překračují Hookovu teoretickou hranici [20], na které by mělo dojít k přesunu globální minimální tloušťky z oblasti bočních laloků konstriktce $h_{0(side)}$ do centrálního výtoku $h_{0(exit)}$ [20], viz hranice v IE oblasti ($g_e = 2,6 \cdot 10^6$) na Obr. 5-2. Tento přechod byl prozatím pozorován v jediné studii [1], na základě které je posunut na přibližnou hodnotu parametru elasticity $g_e = 10^4$. Pozorované chování minimálních tloušťek je dále rozvinuto v kap. 5.1.2 níže.

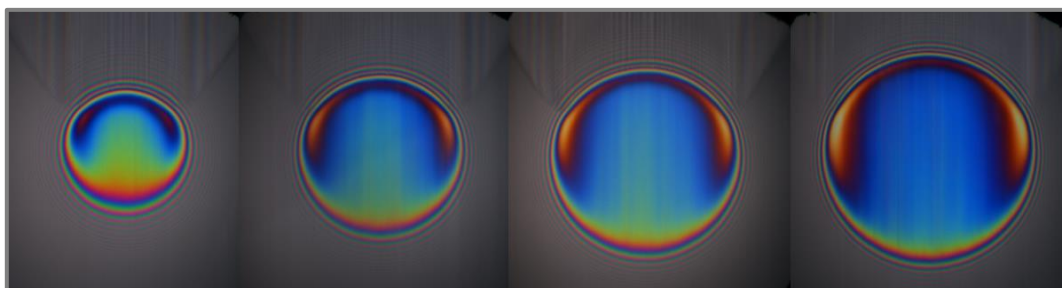


Obr. 5-2 Mapa režimů kapalinového mazání pro bodový kontakt dle Esfahania a Hamrocka [12]



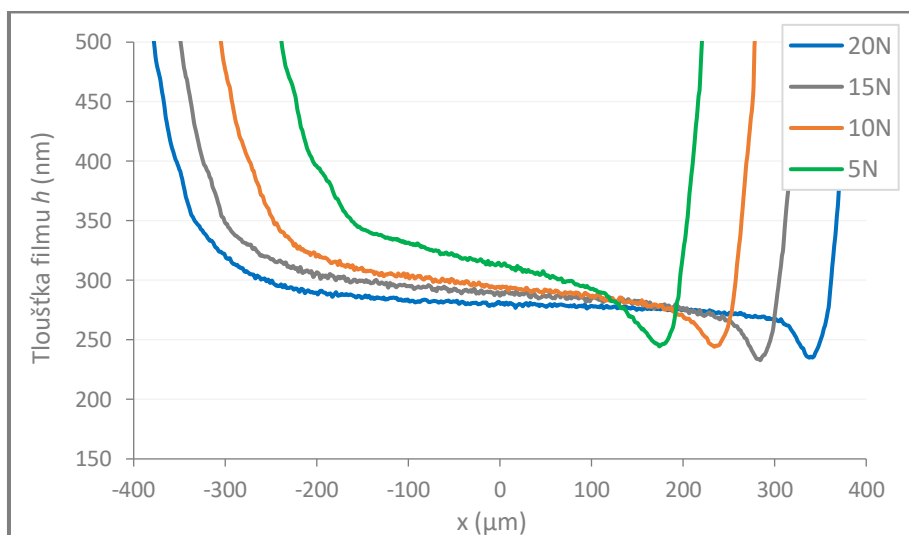
Obr. 5-3 Mapa režimů pro bodový kontakt dle Myerse [26]

Veškeré naměřené interferogramy bodového kontaktu vykazují typickou podkovitou konstriktci tloušťky (Obr. 5-4). Na obrázku lze pozorovat postupně se snižující vliv zatížení. Kontakt zatížený normálovou silou 5 N vykazuje značně odlišné tloušťky (barvy) v centrální oblasti než zatížení 10; 15 a 20 N. Tato odchylka je pozorována již při nižších rychlostech, kdy kontakt ještě vykazuje dobrou stabilitu.

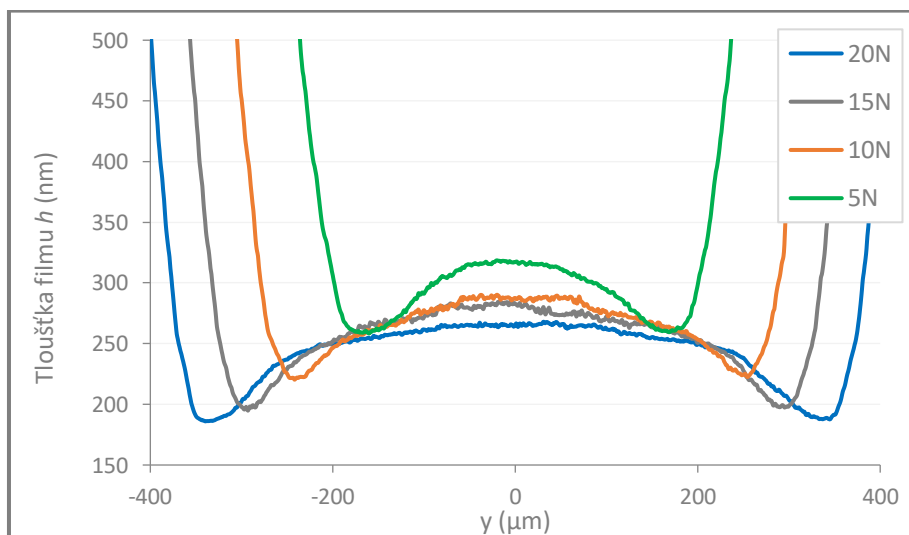


Obr. 5-4 Interferogramy kontaktu při zatíženích 5; 10; 15 a 20 N, rychlost $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minerální olej HC 32/130

Na Obr. 5-5 a Obr. 5-6 jsou vyobrazeny profily filmů výše zmíněných zatížení, měření bylo provedeno za podmínek čistého valení při fixní unášivé rychlosti $350 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Velikost kontaktní oblasti se výrazně zvětšuje s navyšující se zátěžnou silou. Ve srovnání s touto oblastí dochází u centrální a minimální tloušťky filmu na výstupu k relativně malé změně ($y/R = 0$). Mnohem větší změna je pozorována v oblasti bočních laloků. Zatímco u minimální tloušťky $h_{0(exit)}$ v podélném směru dochází při navýšení zatížení z 10 na 20 N (Herzův tlak 40 na 50 MPa) ke zmenšení tloušťky o cca 20–30 nm, v příčném směru dochází v lalocích $h_{0(exit)}$ k rozdílu 40–50 nm.



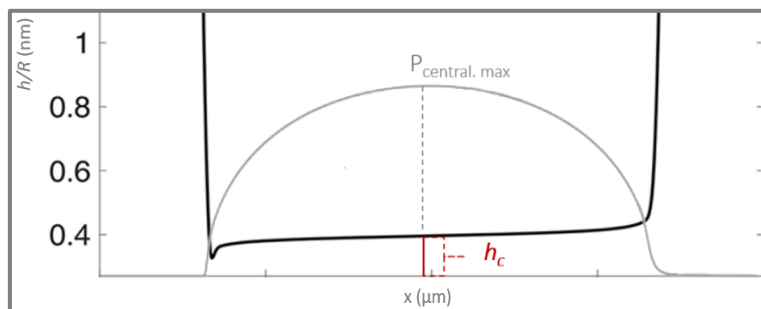
Obr. 5-5 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($y/R = 0$), rychlost $350 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teplota 23°C , minerální olej HC 32/130



Obr. 5-6 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($x/R = 0$), rychlost $350 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teplota 23°C , minerální olej HC 32/130

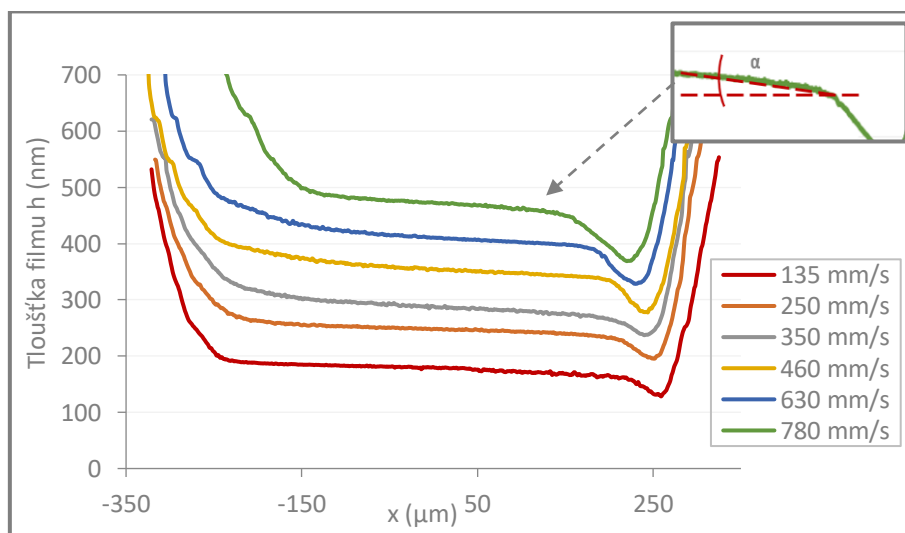
5.1.1 Centrální tloušťka – h_c

Tvar centrálního filmu vykazuje se zvyšující se rychlostí vzrůstající náklon (úhel α) v centrální oblasti filmu. Tento náklon způsobuje mírnou nejednoznačnost polohy tloušťky h_c . V této práci je za hodnotu centrální tloušťky považován bod konvexně-konkávního přechodu ve střední oblasti pod očekávaným tlakovým maximem (Obr. 5-7). Obdobným způsobem byla určena h_c u eliptických kontaktů.



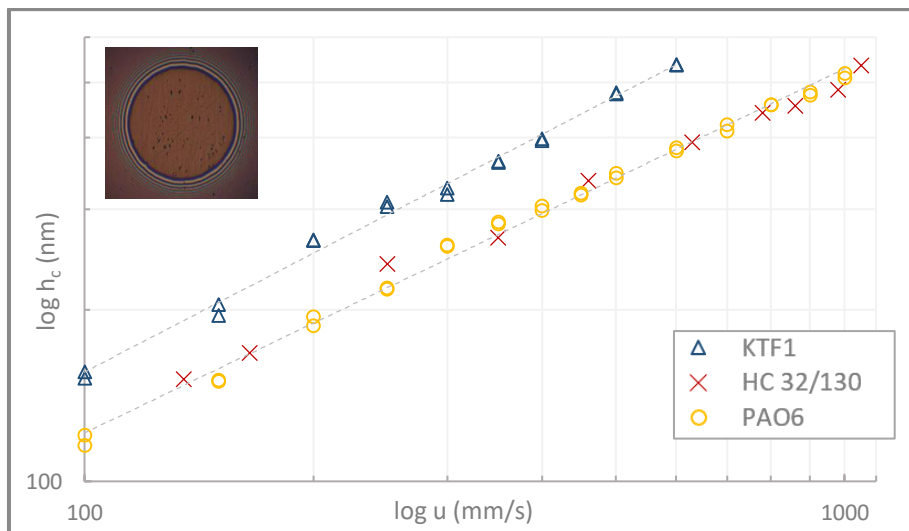
Obr. 5-7 Definovaná centrální tloušťka h_c

Na Obr. 5-8 je souhrn profilů ($y/R = 0$). Při nižších rychlostech je centrální oblast téměř vodorovná, blízká profilu piezoviskózního kontaktu. S narůstající rychlostí dochází k mírnému zvlnění profilu a v oblasti za středem kontaktu ($x/R > 0$) k postupnému náklonu proti směru vstupu maziva. Při nízkých kontaktních tlacích (cca 50 MPa) v IE a TR-režimu dochází k zanedbatelnému ovlivnění viskozitou maziva. Couettova rychlostní složka toku nad Poisselovou (viskózně-tlakový příspěvek maziva) proporčně převládá. Za teoretickým tlakovým maximem ($P_{cental. max}$) ve střední oblasti kontaktu lze pak očekávat zrychlování maziva právě Couettovou složkou.



Obr. 5-8 Závislost tloušťky filmu h na rychlosti, zatížení 10 N, teplota 23 °C, minerální olej HC32/130

Na Obr. 5-9 je viditelná mocnná závislost centrální tloušťky h_c na rychlosti u tří maziv (viz Tab 4-1) při zatížení 20 N ($SRR = 0$). Exponenty této závislosti poměrově odrážejí viskozity daných maziv.

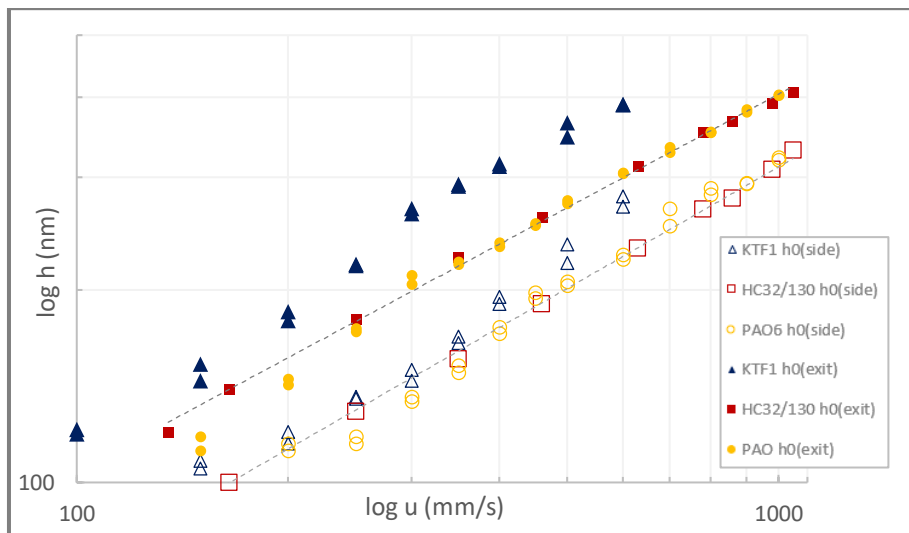


Obr. 5-9 Centrální tloušťka filmu h_c , zatížení 20 N, 23 °C

5.1.2 Minimální tloušťka – h_0

5.1.2

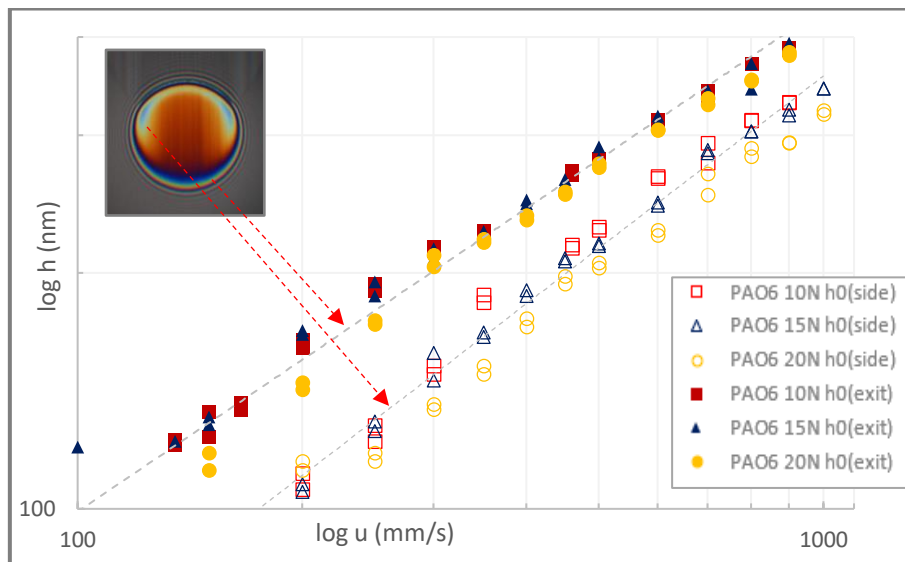
Na Obr. 5-10 je graf srovnávající maziva a chování lokálních minim uvnitř bodového kontaktu. Při zatížení 20 N dochází k zřetelnému rozlišení mezi minimální tloušťkou na výstupu z kontaktu $h_{0(exit)}$ a zaznamenaným globálním minimem $h_{0(side)}$ v bočních lalocích. Tloušťka filmu $h_{0(side)}$ vykazuje téměř poloviční hodnoty měřené unášivé rychlosti 1170 mm·s⁻¹. Teplota maziv se při měřeních pohybovala v rozmezí (23 ± 0,5) °C.



Obr. 5-10 Minimální tloušťka filmu $h_{(exit)}$ a $h_{(side)}$, zatížení 10 N, 23 °C

Na proložených mocninných trendech na Obr. 5-11 (PAO6) je pozorovatelná mírná sbíhavost trendů funkcí pro minimum $h_{0(side)}$ a $h_{0(exit)}$. Jednotlivá maziva ji vykazují s odlišnými mocninnými závislostmi. Při vyšších zatíženích či s dále se navyšující rychlostí je očekáváno prolnutí těchto trendů, tedy již zmíněný přesun globálního minima z boků do centrálního výstupu.

Během měření byl dále pozorován značný rozdíl mezi stabilitou tloušťky těchto minim. Při velice drobné pulzaci kontaktu způsobené geometrickými nepřesnostmi, byla zvláště u vyšších rychlostí pozorována vyšší fluktuace u minima $h_{0(side)}$. Toto chování nebylo pozorováno v případě $h_{0(exit)}$.

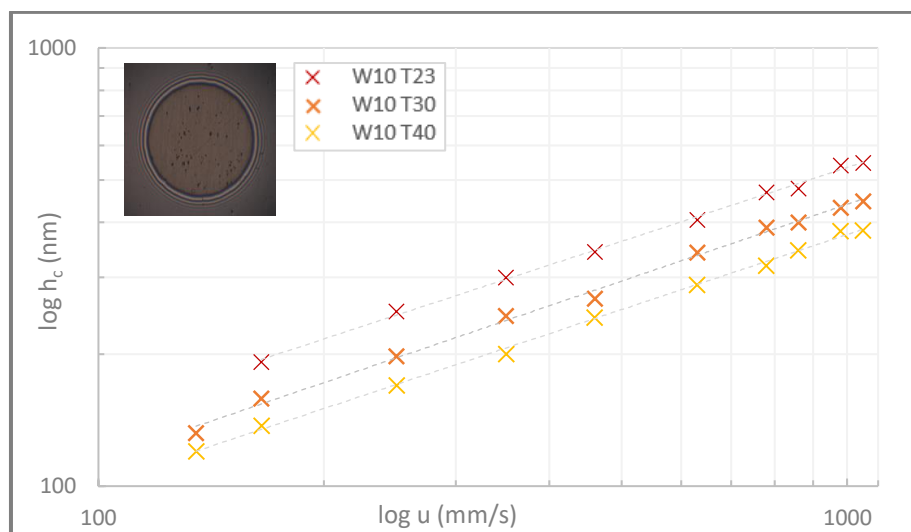


Obr. 5-11 Minimální tloušťka filmu h_0 , zatížení 20 N, 23 °C

5.1.3 Vliv teploty na centrální tloušťku kontaktu

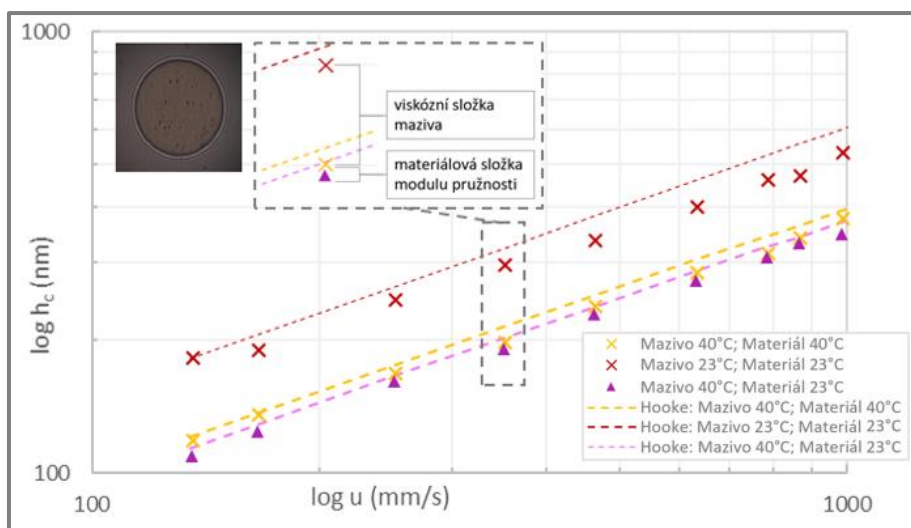
Při zahřívání dochází k výrazným změnám tloušťky mazacího filmu. Tento jev je v PE režimu spjat především se změnou dynamické viskozity maziva η či případným příspěvkem tlakově viskózního koeficientu α . V případě teploty kontaktu zahrnující polymery je nutné zohlednit jejich teplotně podmíněný modul pružnosti E . U PMMA je pak modul v oblasti skelného stavu lineárně závislý na teplotě [25].

Na Obr. 5-12 je záznam velikosti centrální tloušťky v závislosti na rychlosti u tří izotermně provedených experimentů (23, 30 a 40 °C) s minerálním olejem třídy III+. Teplota kontaktního povrchu plastového disku byla realizována po dobu 30 minut skrze zaplavení kontaktu mazivem, které bylo vyhřáto na požadovanou teplotu v temperované lázni tribometru. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti polymeru je užit předpoklad minimálního teplotního gradientu mezi mazivem a kontaktní plochou disku. Proložené mocninné trendy sice reprezentují chování kontaktu jako celku, z experimentů však nelze jednoznačně vypočítat příspěvek materiálové složky.



Obr. 5-12 Centrální tloušťka filmu h_c , zatížení 10 N, teploty 23, 30 a 40 °C, HC 32/130

Cílem dalšího měření bylo zaznamenání ovlivnění tloušťky filmu právě pouhou změnou modulu pružnosti. Při nárůstu teploty z 23 na 40 °C dochází u oleje HC 32/130 k poklesu viskozity o 50 %, modul pružnosti PMMA klesá o 12 % dle kap. 4.2.1. Následující graf (Obr. 5-13) znázorňuje míru příspěvku složky maziva a materiálu. Měření bylo opět nejprve provedeno při teplotě 23 °C, následně byl disk z tribometru vyjmut a mazivo bylo temperováno na 40 °C. Neprohřátý disk byl poté rychle nasazen a neprodleně bylo realizováno měření. Z grafu je mírně patrná složka modulu pružnosti, která přispívá k snížení celkové tloušťky filmu. Rozdíl je viditelný převážně do 600 mm·s⁻¹. I přesto, že situace je v analogii k plastovým převodům víceméně teoretická (předeřtý olej maže chladnější ozubené soukolí), z měření je znatelný příspěvek modulu pružnosti polymerního materiálu, u kterého lze s narůstající teplotou ozubených plastových převodů očekávat vyšší vliv na formování tloušťky filmu.



Obr. 5-13 Experiment rozlišující vliv materiálové a viskózní složky na centrální film h_c , $W = 10$ N, HC 32/130

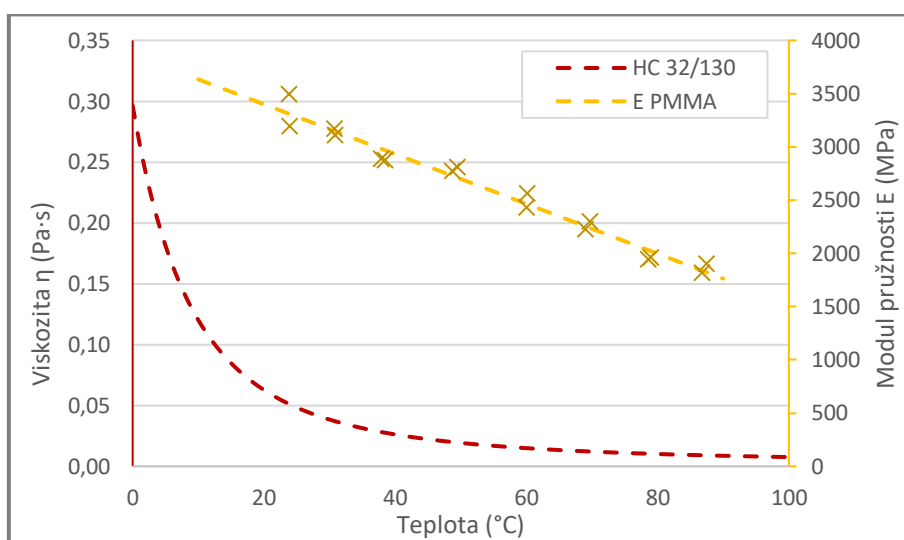
Po zprůměrování rozdílů tloušťek filmu h_c , při změně teploty z 23 na 40 °C (při rychlostech do 1000 mm·s⁻¹) je možné vyjádřit výsledný poměr složky změny modulu

pružnosti PMMA vůči vlivu viskozity maziva HC 32/130, tento průměrný poměr je dle měření 1:9.

V porovnání s predikcí Hooka (viz Obr. 5-13), která pro bodový kontakt vykazuje nejvyšší míru shody, je příspěvek materiálové složky vyšší (viz Tab 5-1). Postupně se navyšující vliv materiálové složky je způsoben lineárně závislým modulem pružnosti, který vykazuje s rostoucí teplotou vyšší pokles než dynamická viskozita (Obr. 5-14).

Tab 5-1 Tabulka poměrů složek vůči teplotě maziva a materiálu 23 °C, HC 32/130

Teplota (°C)	20	30	40	50	60	70	80	90
Poměr složek maziva : materiálu (predikce Hook)	1:8,6	1:8,2	1:7,8	1:7,3	1:6,7	1:6,0	1:5,4	1:4,8

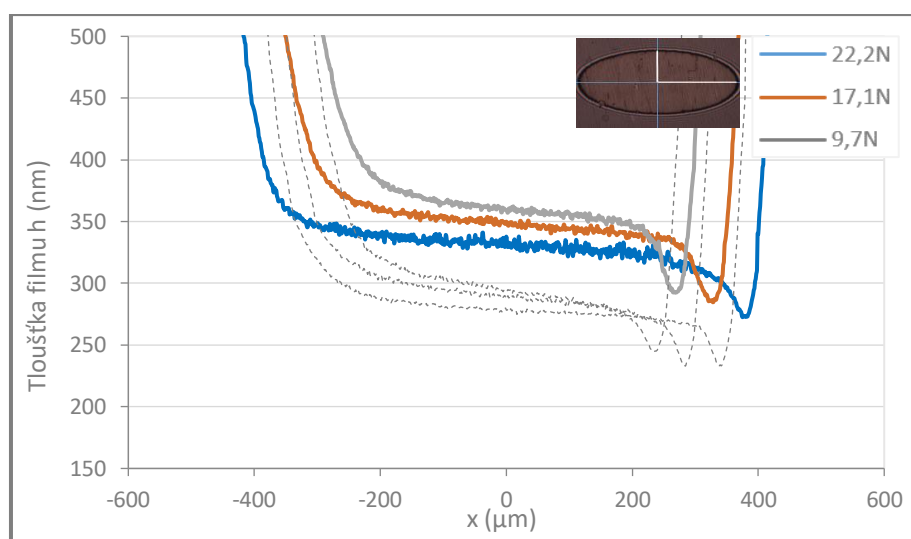


Obr. 5-14 Vliv teploty na změnu modulu pružnosti E a viskozitu maziva η .

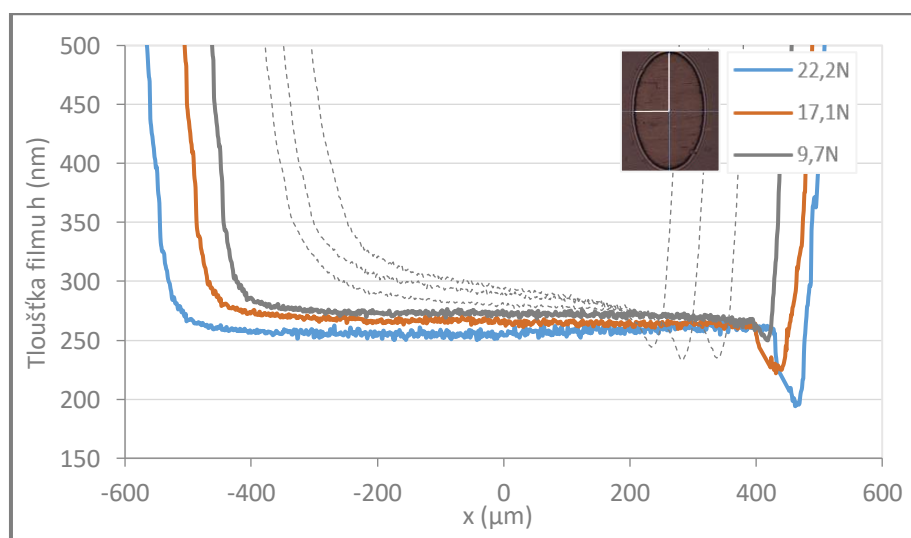
5.2 Eliptický kontakt v TR režimu

Interferometrické měření tloušťek filmů bylo provedeno při eliptickém kontaktu v TR režimu dle dostupné literatury poprvé. Tloušťka filmu byla pozorována u elipticit $k = 0,74; 1,9; 2$ a $2,9$.

U širokého eliptického kontaktu (elipticita $k > 1$) s hlavní poloosou kolmou na vektor unášivé rychlosti se centrální tloušťka filmu h_c při stejných vstupních podmínkách (teplota $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, PAO6, rychlost $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, obdobné zatížení) jako u bodového kontaktu znatelně navýšila (na obr. čárkované šedé kontury). Se zvyšující se elipticitou se postupně redukuje boční výtok maziva. Oproti bodovému kontaktu dochází k znatelnějšímu proporčnímu zvětšení kontaktu ve směru toku maziva (osa- x), v kterém lze očekávat vyšší odpor či tuhost materiálu. Široký kontakt také vykazuje vyšší náklon filmu v centrální oblasti ($x \in (-200; 200)$) než náklon u bodového kontaktu.



Obr. 5-15 Závislost tloušťky filmu h_c na zatížení ($y/R = 0$), rychlost $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teplota $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, PAO6, elipticita $k = 2$

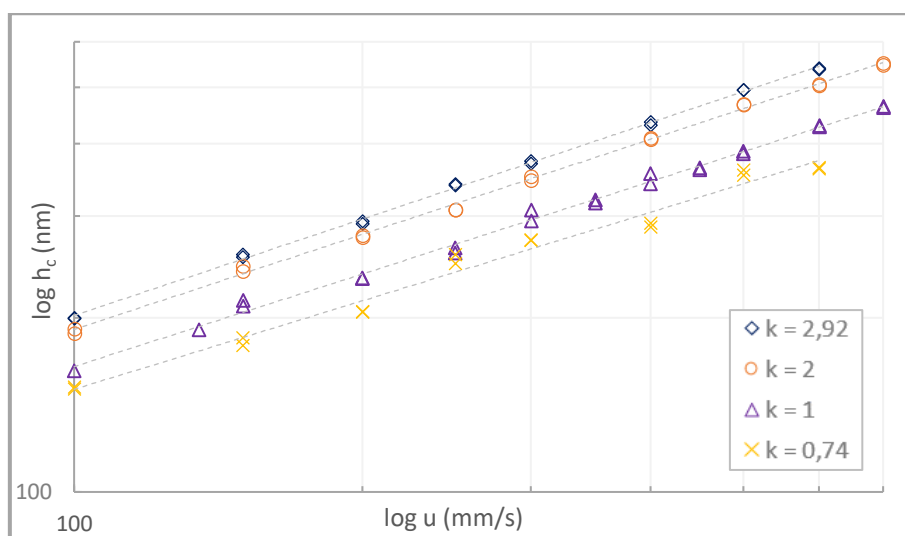


Obr. 5-16 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($x/R = 0$); rychlost $300\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teplota $23\text{ }^{\circ}\text{C}$; PAO6, elipticita $k = 0,74$

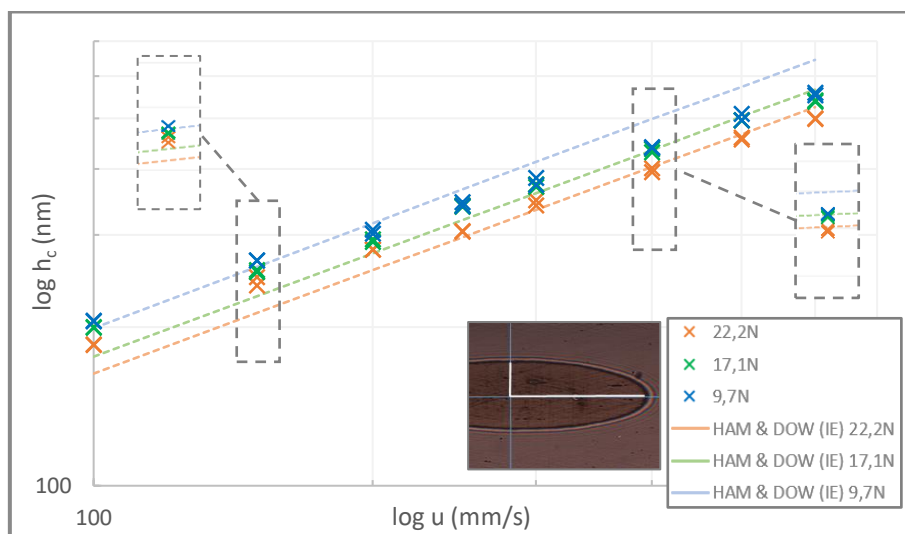
Úzký eliptický kontakt ($k < 1$) s nižší podélnou tuhostí ve směru osy x, pak vykazuje opět oproti bodovému kontaktu, velmi sníženou citlivost tloušťky h_c na změnu zatížení. Náklon profilu filmu v centrální oblasti (viz výše) je téměř nulový. U úzkého kontaktu je očekáván významnější vliv bočního výtoku, jenž převážně ovlivňuje minimální tloušťku po bocích $h_{0(side)}$ (viz kapitola 5.2.2).

5.2.1 Centrální tloušťka – h_c

V grafu na Obr. 5-17 je možné pozorovat chování centrální tloušťky h_c v závislosti na rychlosti, napříč základními měřenými geometriemi. S přibývajícím rychlostí dochází k zesilujícímu příspěvku geometrické složky na tvorbu filmu. Tento efekt je na rozdíl od PE režimu mazání mnohem výraznější. V grafu jsou data proložena trendy s obdobnými mocninnými koeficienty (0,5 až 0,55).



Obr. 5-17 Závislost tloušťky centrální tloušťky h_c na rychlosti, zatížení 17,1 N; teplota 23 °C, PAO6



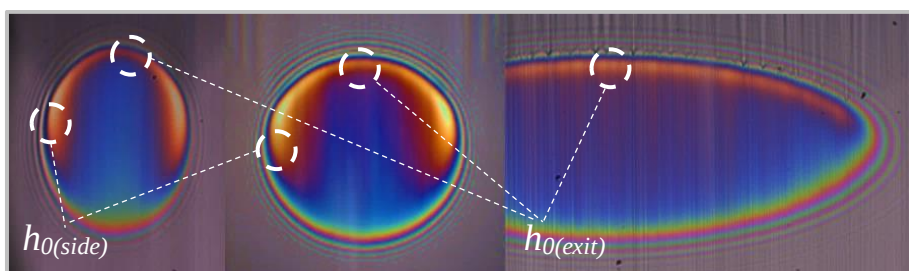
Obr. 5-18 Závislost tloušťky centrální tloušťky h_c na rychlosti, zatížení 9,7; 17,1 a 22,2 N; teplota 23 °C, HC 32/130, $k=2,92$

V grafu (Obr. 5-18) je u širokého kontaktu pozorován s postupně stoupající rychlostí pozvolnější růst (nižší exponent mocninné závislosti trendu) centrální tloušťky, než je očekáváno predikčním vztahem Hamrock-Dowsona pro EI režim [27]. Kromě odlišného trendu je také predikcí značně nadhodnocen vliv zatížení w viditelný v detailech grafu.

5.2.2 Minimální tloušťka – h_0

5.2.2

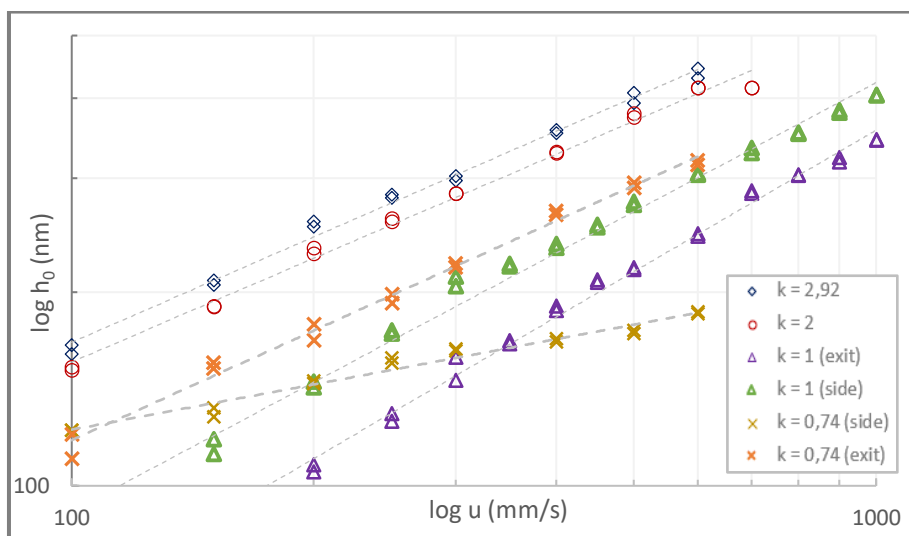
Minimální tloušťky $h_{0(side)}$ a $h_{0(exit)}$ sledované u bodového kontaktu lze také pozorovat u měřené elipticity $k=0,74$. U eliptických kontaktů s křivostí $k < 1,38$ (poměr křivostí 1,58) se dle studie Hooka [20] nachází globální minimum na bocích v $h_{0(side)}$. U nejbližší měřené křivosti $k = 1,9$ tato oblast již zaniká a globální minimum je lokalizováno v $h_{0(exit)}$ (viz. Obr. 5-19).



Obr. 5-19 Interferogramy, minimální tloušťky. Zleva: elipticita $k=0,74$; 1 a 1,9.

Na Obr. 5-20 je demonstrováno chování minim h_0 u jednotlivých elipticit k v závislosti na unášivé rychlosti. Trendy prokládající chování minima $h_{0(exit)}$, vykazují obdobné mocninné koeficienty jak u širokého ($k>1$), tak i u bodového kontaktu, úzký se mírně vymyká. Fyzikální podstata mechanismu přispívajícího k formování minimální tloušťky $h_{0(exit)}$ v podélném směru je obdobná. Pro tato data je možné užít formálně stejný regresní vztah.

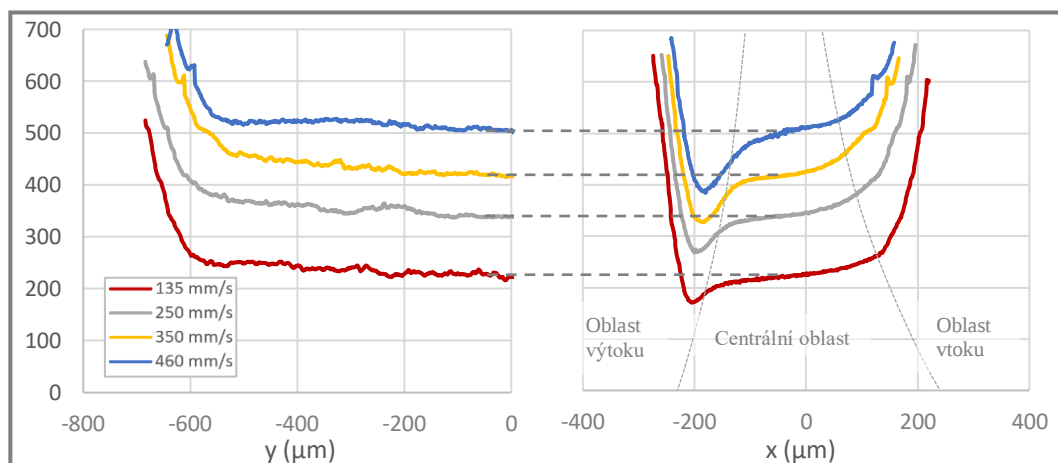
Minimální tloušťka $h_{0(side)}$ vykazuje u *úzkého* kontaktu ($k=0,74$) značně odlišné chování. Oproti bodovému je u *úzkého* kontaktu proporčně umocněno vytlačování maziva v příčném směru (osa-y), což může být projevem zvýšení příspěvku složky Poisselova toku. Stejně jako v případě Hooka [20] a Marxe [1] je potřeba zavedení nového korekčního vztahu pro tloušťku $h_{0(side)}$.



Obr. 5-20 Minimální tloušťka filmu h_0 , zatížení 17,1 N, 23 °C, PAO6

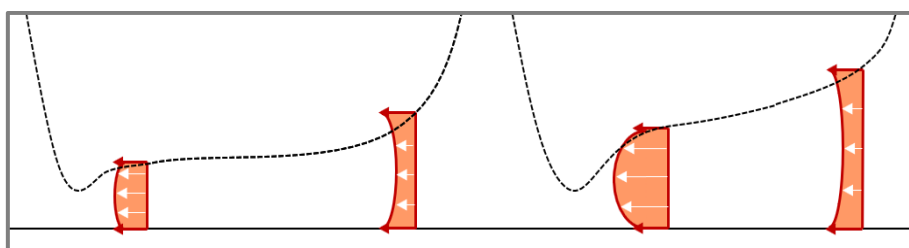
5.2.3 Srovnání profilu tloušťek u eliptických kontaktů

Na obrázcích níže lze pozorovat dva značně odlišné mechanismy průchodu maziva kontaktem. U širokého kontaktu (Obr. 5-21) si lze v řezu po směru unášivé rychlosti v ose x povšimnout silnější závislosti centrální tloušťky na rychlosti, než je tomu u úzkého kontaktu (Obr. 5-23).



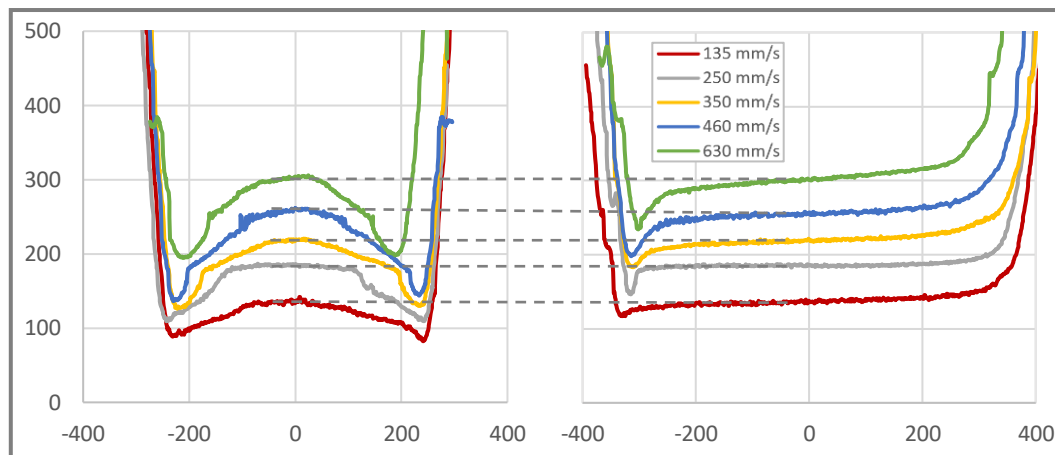
Obr. 5-21 Profily tloušťek filmů u širokého eliptického kontaktu ($k=2,92$), $w = 10$ N, HC 32/130, SRR = 0, $k = 2,9$

V tomto řezu je také viditelný již zmíněný náklon v centrální části profilu, který se při zvyšující se rychlosti plynuleji napojuje na oblast vtoku maziva do kontaktu. Tato vstupní oblast vykazuje snižující se geometrickou strmost, jenž je pravděpodobně spjata s rozložením kontaktního tlaku do oblasti vtoku. V rámci předpokladu zachování kontinua toku (množství maziva na vstupu je rovno množství na výstupu) lze očekávat vyšší rychlostní rozdíl mezi vstupem maziva do kontaktu a výstupem do konstrikce s minimální tloušťkou $h_{o(exit)}$.



Obr. 5-22 Rozdíl Couettových toků mezi různě nakloněnými profily

V tomto kontaktu je také pozorovatelná proporční změna mezi velikostí deformace poloos. Při změně unášecí rychlosti ze 140 na 460 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ dochází k 20% zúžení v podélném směru, šířka kontaktu (na obr. pouze poloosa) vykazuje změnu cca 5 %. Elipticita kontaktu se navyšuje. V příčném řezu není pozorován žádný relikv boční konstrikce s $h_{o(side)}$.



Obr. 5-23 Profily tlouštěk filmů u úzkého eliptického kontaktu ($k=0,74$), $w = 15$ N, HC 32/130, SRR = 0

U úzkého kontaktu nebyla mezi velikostmi poloos pozorována výrazná proporční změna. V příčném řezu lze pozorovat silně se zvětšující konstrikci na bocích s výrazným minimem $h_{0(side)}$ (viz Obr. 5-23).

5.3 Tvorba regresivních vztahů

Transientní oblast je odbornou literaturou značně opomíjena. Prediktivní vztahy obecně platné pro konkrétní režim (PE, EI) lze rozdělit na predikce zahrnující parametr elipticity k a vztahy, které jsou odvozeny pouze pro bodový kontakt [1][22].

Některé predikční vztahy zahrnující vliv elipticity nebo poměry poloměrů křivostí pak vykazují omezenou platnost pouze na určité geometrie. Příkladem je Hamrock-Dowsonův vztah pro centrální tloušťky v PE-EHD oblasti [27]:

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

který je určen pouze pro elipticity $k \geq 1$. Dle literatury lze pak dále rozlišit přístup založený na respektování obecně užívaných bezrozměrných parametrů, jenž jsou úspěšně ověřeny v piezoviskózním režimu, příkladem Chittendenův [28] vztah:

$$H_c = 3,06 \bar{U}^{0,68} \bar{W}^{-0,073} \bar{G}^{0,49} \left[1 - 1 e^{-3,36 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)} \right]. \quad (5-2)$$

Nebo vztahy tyto parametry neužívající, příkladem budiž Moesův vztah pro bodový a úzký eliptický kontakt v IE režimu [29]:

$$\hat{H}_{IE,c} \approx 3,18 \left(1 - 0,006 \ln \omega + 0,63 \omega^{-\frac{4}{7}} \right)^{-\frac{14}{25}} \omega^{\frac{1}{15}} M^{-\frac{2}{15}} \quad (5-3)$$

kde:

- ω je efektivní poměr křivostí
- $\hat{H}$ parametr tloušťky filmu
- M bezrozměrný parametr zatížení dle Moese

Při regresní analýze byl užit přístup regrese pomocí bezrozměrných parametrů $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$ v kombinaci s následným proložením vhodnou analytickou funkcí popisující vliv elipticity. Zde došlo k porovnání exponenciální funkce užívající univerzálně rozšířenou formu

$$h = A \cdot \bar{U}^{x_1} \bar{W}^{x_2} \bar{G}^{x_3} [1 - B e^{-c \cdot k}] \quad (5-4)$$

s predikčním vztahem pro IE-EHD dle Hooka:

$$h = A \cdot \bar{U}^{x_1} \bar{W}^{x_2} [\ln(k)] + B, \quad (5-5)$$

užívajícího pro popis vlivu elipticity logaritmickou funkcí.

5.3.1 Regresivní analýza parametrů U , W , G

Z přibližně 750 interferogramů naměřených bodových a eliptických kontaktů byly odečteny centrální a minimální tloušťky filmů. U každého měření byly na základě vstupních podmínek určeny příslušné hodnoty bezrozměrných parametrů $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$. Odečtením funkce s vlivem elipticity ze vztahu 5-1 či 5-2 zůstanou v rovnici pouze koeficientem násobené bezrozměrné parametry v mocninné závislosti. Po zlogaritmování lze rovnici zapsat ve tvaru (5-6) a následně převést do lineární podoby (5-7):

$$\ln(h_c) = f(k) \cdot x_1 \ln(U) \cdot x_2 \ln(W) \cdot x_3 \ln(G) \cdot \ln(R'_x), \quad (5-6)$$

$$\bar{y} = \ln(f(k)) + x_1 \bar{U} + x_2 \bar{W} + x_3 \bar{G} + \bar{R}'_x. \quad (5-7)$$

Členy $\bar{y}$, $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$, $\bar{R}'_x$ jsou známy. Pro následnou regresi byla užito Gauss-Newtonova metoda⁶ pro hledání mocninných koeficientů x_1, x_2, x_3 v prostředí SW Minitab® 18.1. Získaný regresní vztah s mocninnými koeficienty pro bodový kontakt ($k = 1$) vypadá například takto:

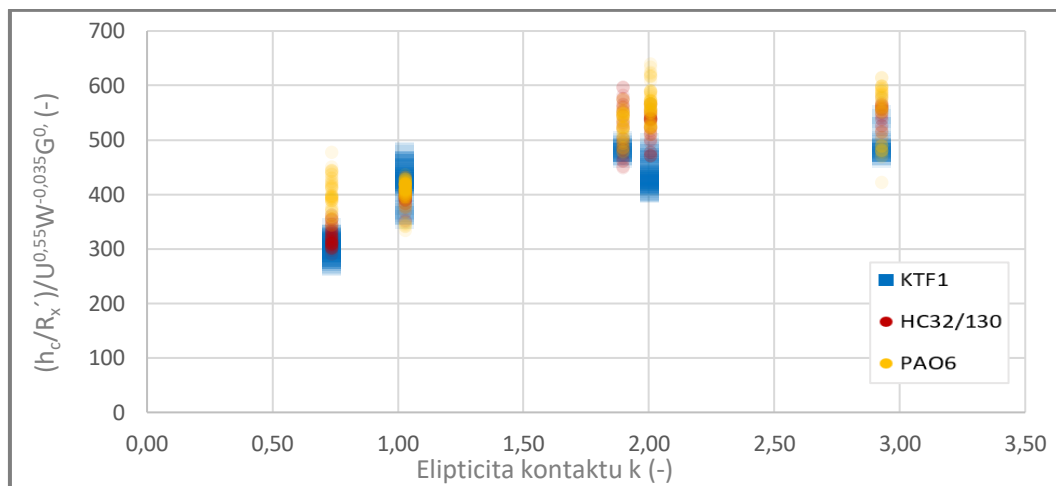
$$h_c = f(k) \cdot U^{0,6} W^{-0,078} G^{0,028} \cdot R'_x. \quad (5-8)$$

Obdobným způsobem bylo postupováno při regresi u obecného eliptického kontaktu a určování mocnin u minimálních tlouštěk $h_{o(side)}$ a $h_{o(exit)}$.

5.3.2 Regresivní analýza vlivu elipticity

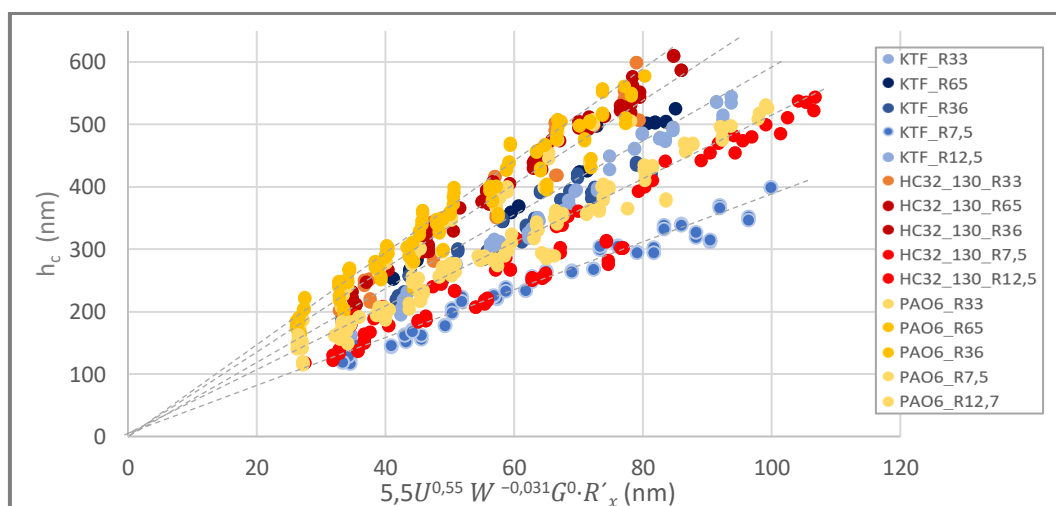
Na Obr. 5-24 je vyjádřena závislost tloušťky h_c po vydělení členy zahrnující parametry $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$ na poměru elipticity k . V dalším kroku bylo zapotřebí tato data proložit geometrickou funkcí respektující elipticity $k < 1$ (viz Obr. 5-24). Nejnižší odchylky vykazuje funkce $f(k) = A \cdot [1 - B e^{-c \cdot k}]$ v Hamrock-Dowsonově tvaru. Data byla doplněna o podmínku počátku funkce v teoretickém bodě $[0,0]$.

⁶ Pro počáteční hodnotu koeficientů byly užity mocniny z rce (5-13), tj. $x_1 = 0,63$; $x_2 = -0,067$; $x_3 = 0,53$. Okrajové podmínky parametrů: $0 < x_1 < 1$; $-1 < x_2 < 0$; $0 < x_3 < 1$.

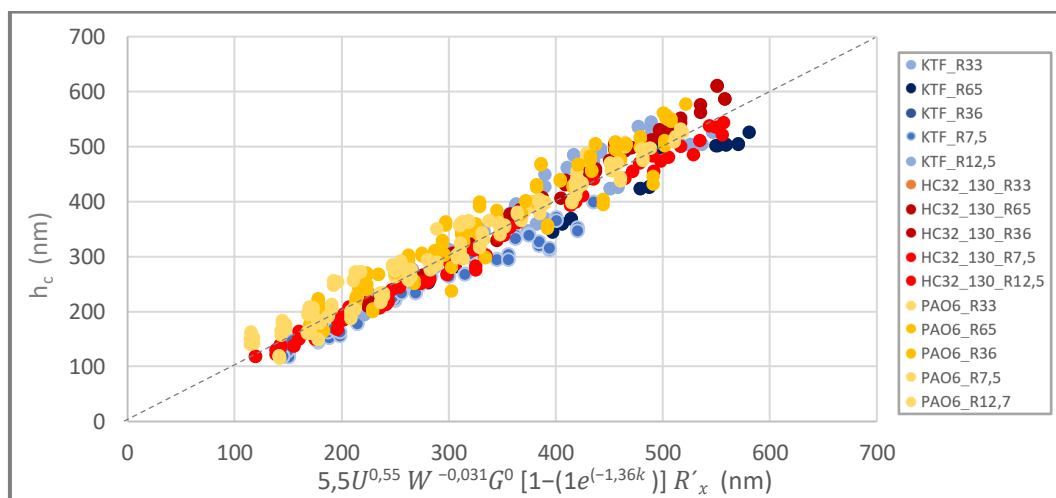


Obr. 5-24 Regresivně získaná mocnná složka U , W , G u tří maziv v závislosti na elipticitě k . Pozn. pro názornost četnosti jsou body nadefinovány s částečnou průhledností.

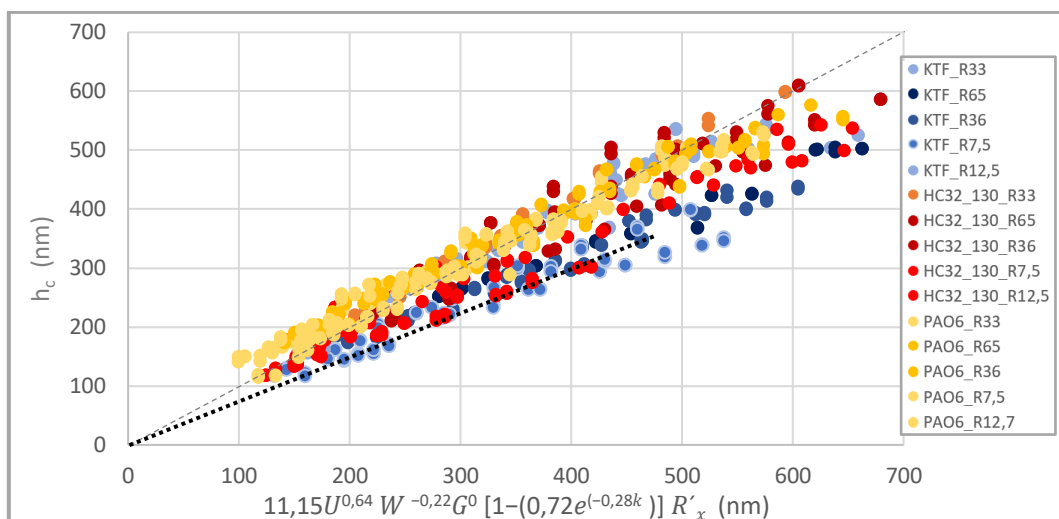
Na Obr. 5-25 a Obr. 5-26 je graficky vyjádřen rozdíl po proložení dat geometrickou funkcí. Míru odchylky vyjadřuje odklon od znázorněné přímky.



Obr. 5-25 Regresivně získaná funkce bez zahrnutí geometrické funkce.



Obr. 5-26 Regresivně získaná funkce včetně zahrnutí geometrické složky rce.



Obr. 5-27 Odchylka měření vůči Hamrock-Dowsonova vztahu pro IE režim [27]

Na Obr. 5-27 je grafické vyjádření odchylky měření od Hamrock-Dowsonova predikčního vztahu. Tato odchylka s postupným navýšením rychlosti a zatížením roste. Značný odklon je pozorovatelný u elipticit $k=0,74$ (R7,5) a 2,9 (R65) naznačený tečkovanou čarou.

6. DISKUZE

Tato kapitola pojednává o výsledcích regresivní analýzy pro bodový a následně obecný eliptický kontakt.

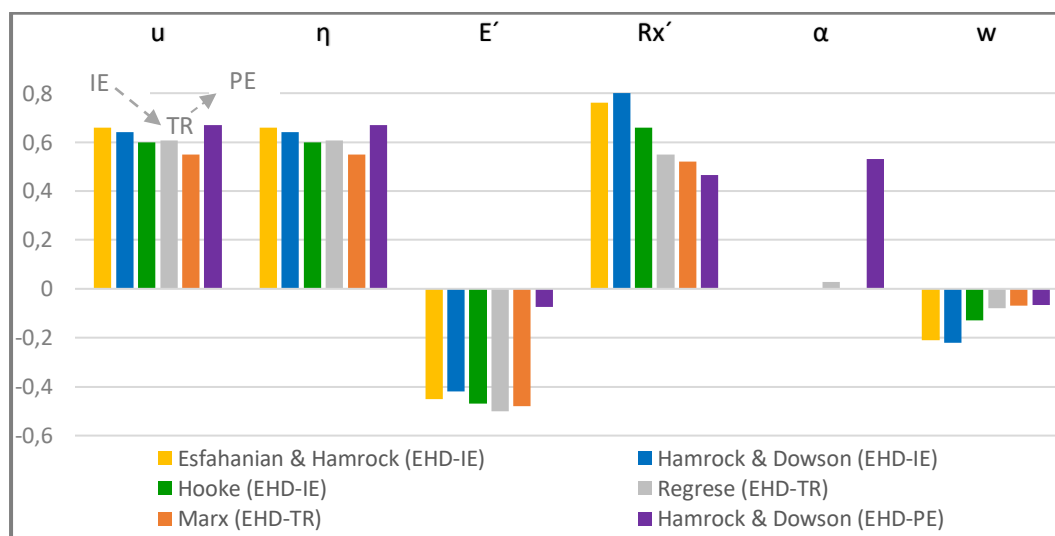
Po dosažení do regresivně korigovaných vztahů a následné úpravě na jednotlivé vstupní parametry bylo možné srovnat jejich význam prostřednictvím velikostí mocnin (např. Obr. 6-1) s obdobným způsobem upravenými predikčními vztahy pro IE a PE režim. Poměr rozložení mocnin u jednotlivých parametrů pak reprezentuje vliv na formování daného filmu (h_c , $h_{o(exit)}$, $h_{o(side)}$). Na základě výsledků z bodového kontaktu (viz kap. 6.1) lze považovat tento přístup za validní.

6.1 Bodový kontakt – h_c

6.1

U bodového kontaktu byla vytvořena samostatná regrese pro elipticitu $k = 1$. Na Obr. 6-1 je srovnání vztahů určených pro izoviskózní IE (Hamrock & Dowson [10], Esfahanian & Hamrock [12], Hooke [20]), *transientní* TR (Marx [1]) a piezoviskózní elastickou PE-oblast [12].

V grafu je pozorovatelné, že predikční vztah pro PE režim (*Hamrock & Dowson EHD-PE*, rovnice. 5-1) obecně vykazuje oproti IE a TR větší váhu u mocnin viskozity a rychlosti. Značné snížení oproti IE je pak v mocnině redukovaného modulu pružnosti E' a poloměru křivosti R_x' . Řádově vyšší tlaky v PE kontaktu pak korespondují s vlivem tlakově viskózního koeficientu α . Tyto vlastnosti PE jsou pak pozorovatelné i vůči vztahům pro obecnější eliptický IE kontakt. Dále je třeba brát v potaz, že při experimentech nedošlo k variaci R_x' a E' , v regresi bezrozměrných parametrů pak mají tyto parametry tendenci doplňku.



Obr. 6-1 Srovnání významů vstupních parametrů mezi IE a TR režimem, bodový kontakt, centrální tloušťka h_c

Výsledné parametry regrese (*Regrese EHD-TR*) vykazují obdobnou váhu parametrů rychlosti u a viskozity η jako původní predikční vztah Hooka. U těchto členů je obecně vzhledem k většímu rozsahu vstupních hodnot experimentu očekávána nižší chyba. Ve srovnání s mocninnými parametry Marxova korigovaného vztahu došlo k velmi mírnému navýšení váhy mocnin napříč veškerými parametry. V proporčním rozložení lze pozorovat výraznou shodu, která koresponduje i s výslednými

predikčními vztahy. Marxova korekce byla provedena na mazivech s podobnými tlakově viskózními koeficienty ($\alpha = 14$ a 15 GPa^{-1}). K měření v rámci této práce byla užita maziva s rozdílnějšími hodnotami ($\alpha = 11; 20$ a 34 GPa^{-1}). I přes tuto variaci je z výsledků patrné, že vliv tlak-viskózního koe. je v TR režimu možno považovat za zanedbatelný.

Ve srovnání s PE-režimem ($E' = -0,073$) je nejvyšší rozdíl pozorován v případě redukovaného modulu E' , u kterého došlo k řádovému zvýšení vlivu. To obecně potvrzuje fakt, že transientní režim je svými mechanismy (podíl deformace a následného rozložení tlaku) bližší IE než PE-režimu. Výsledný vztah (rovnice 6-1) je uveden níže:

$$\begin{array}{l} \text{Regrese} \\ \text{(EHD-TR)} \end{array} \quad h_c = 6,74 \bar{U}^{0,6} \bar{W}^{-0,08} \bar{G}^{-0,03} R'_x, \quad (6-1)$$

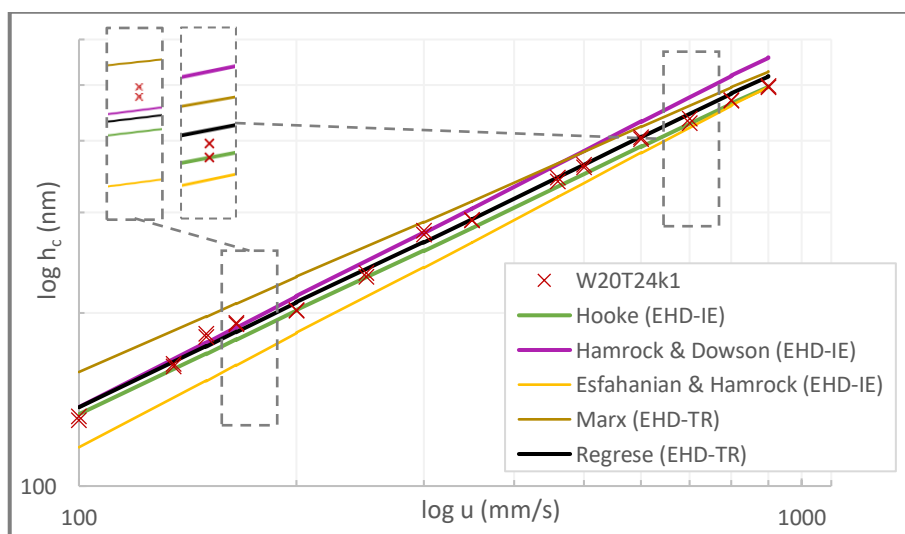
$$\begin{array}{l} \text{Marx} \\ \text{(EHD-TR)} \end{array} \quad h_c = 2,6 \bar{U}^{0,55} \bar{W}^{-0,07} \bar{G}^0 R'_x, \quad (6-2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Hooke} \\ \text{(EHD-EI)} \end{array} \quad h_c = 3,56 \bar{U}^{0,6} \bar{W}^{-0,13} \bar{G}^0 R'_x. \quad (6-3)$$

V tabulce Tab 6-1 je zobrazena průměrná relativní chyba predikcí vůči 170 naměřeným centrálním tloušťkám. Nejnižší chyba byla zaznamenána u Hooke a její regresivní formy od Marxe. Předmětem zájmu je především tento vztah (rovnice 6-2), který je upraven právě pro transientní oblast. Pro měření v rychlostním rozsahu $0-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (zatížení $10-20 \text{ N}$) vykazuje průměrnou relativní chybu $7,1 \%$ (viz Obr. 6-2).

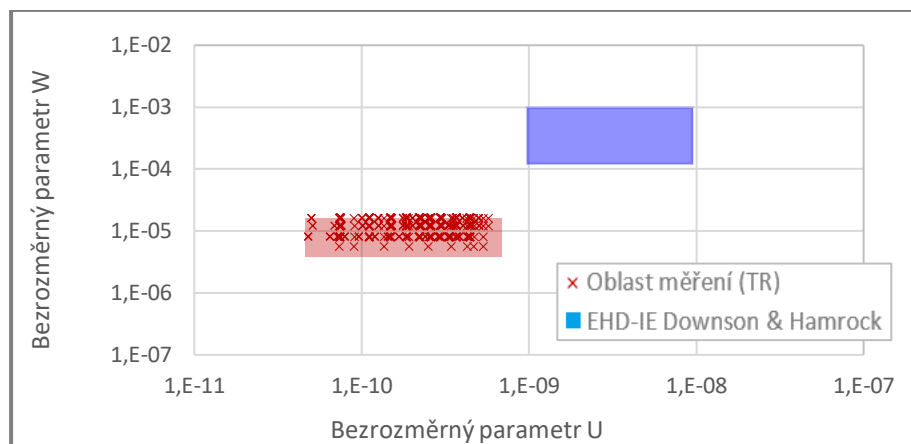
Tab 6-1 Srovnání relativních chyb predikcí vůči měření bodového kontaktu

Predikce	Esfahanian & Hamrock	Hamrock & Dowson	Hooke	Regrese	Marx
Režim platnosti	EHD-IE	EHD-IE	EHD-IE	EHD-TR	EHD-TR
Relativní chyba vůči měření (%)	11,6	7,2	6,3	3,56	7,1



Obr. 6-2 Centrální tloušťka h_c , 10 N , 24°C , PAO6, bodový kontakt ($k = 1$)

I přes pravděpodobně podobné mechanismy deformace kontaktu, lze považovat relativní chybu IE-predikcí za poměrně vysokou. Toto odchýlení lze vysvětlit oblastí, pro kterou byly dané vztahy odvozeny. Jak již poznamenal Marx, Hamrock-Dowsonovo řešení bylo například odvozeno pro řádově odlišnou oblast, viz Obr. 6-3.

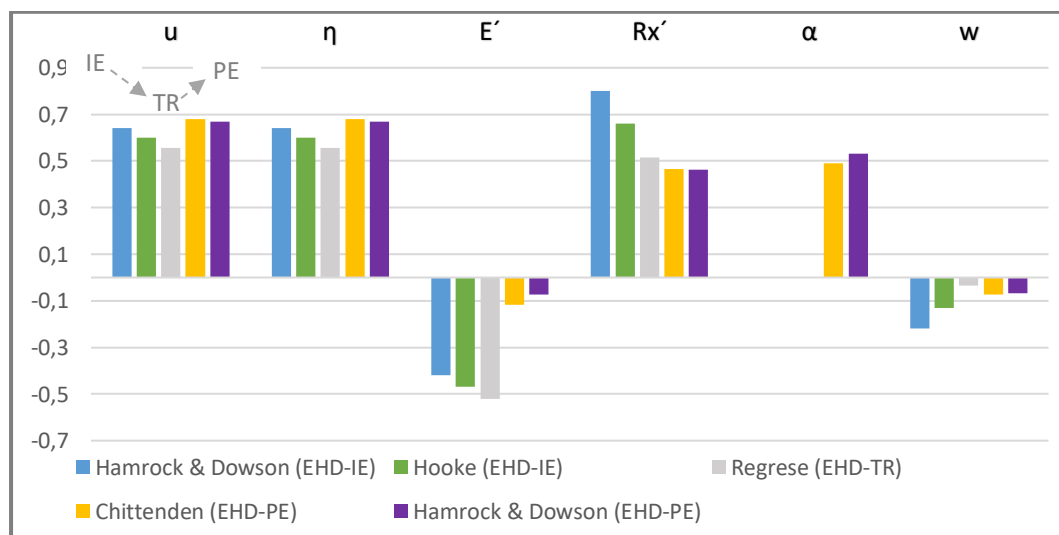


Obr. 6-3 Oblast odvození predikcí Ham-Dow, oblast měření DP (bodový kontakt)

6.2 Obecný eliptický kontakt – h_c

6.2

Úpravou obecného regresního vztahu pro centrální tloušťku h_c (rce. 6-5) u elipticity $k=0,74; 1; 1,9; 2$ a $2,9$ byly získány váhy parametrů (viz Obr. 6-4). Ty jsou srovnány s parametry predikcí pro PE a IE režim zahrnující proměnou elipticitu kontaktu k . Konkrétně jsou to predikce vyjádřené bezrozměrnými parametry $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$ pro PE režim: Hamrock-Dowsonon [10], Chittenden [8] a pro IE tj. Hook [20] a Hamrock-Dowson [27].



Obr. 6-4 Srovnání významů vstupních parametrů s proměnou elipticitou k , centrální tloušťka h_c

U měřených centrálních tloušťek byl napříč elipticitami k pozorován obdobný mocninový trend (viz Obr. 5-17). Na základě této relativní podobnosti lze očekávat jednotný mechanismus tvorby centrální tloušťky h_c . Ve srovnání s bodovým kontaktem (Hooke), došlo k mírnému snížení vlivu bezrozměrného parametru

rychlosti $\bar{U}$. Za povšimnutí stojí snížení vlivu $\bar{W}$, který se převážně projevuje v mocnině zatížení w (rovnice 6-5).

Tento fakt koresponduje s nízkým vlivem zatížení především u elipticity $k > 1$. Profil tloušťky podél osy-x vykazuje při aplikovaných silách v rozsahu 5-22 N výrazně klesající závislost na zatížení. Při měření byl za centrální film h_c považován inflexní bod ve středu kontaktní oblasti, určení polohy tohoto bodu zanáší mírnou systematickou chybu (Obr. 5-7). U širokých kontaktů dochází v podélném řezu ($y/R = 0$) se zvyšujícím se zatížením k postupnému snižování náklonu centrální oblasti. Fenomén snižujícího se náklonu byl při vyšších zatíženích zaznamenán u bodového kontaktu Marxem [1] a u liniového Fangem [30]. Výsledný vztah (rovnice 6-5) je ve srovnání s EI a PE uveden níže:

$$\begin{array}{ll} \text{Ham \& Dow} & h_c = 2,69\bar{U}^{0,67}\bar{W}^{-0,067}\bar{G}^{0,53}[1 - 1e^{-0,73k}]R'_x, \\ \text{(EHD-PE)} & \end{array} \quad (6-4)$$

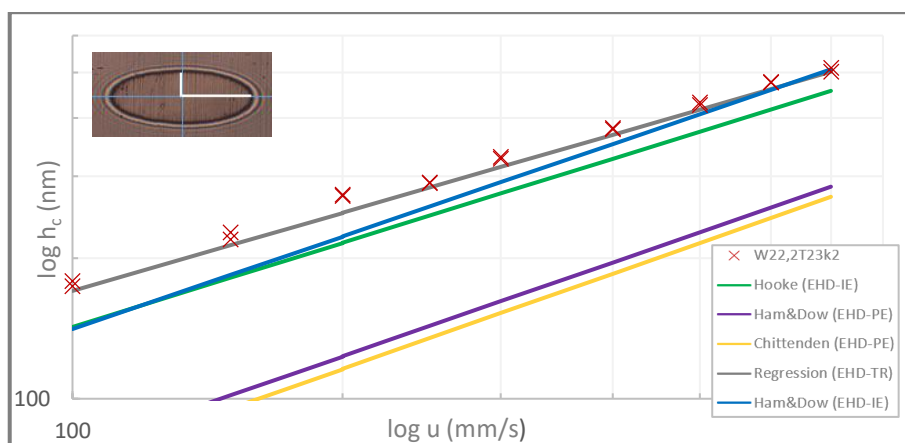
$$\begin{array}{ll} \text{Regrese} & h_c = 5,5\bar{U}^{0,55}\bar{W}^{-0,031}\bar{G}^0[1 - 1e^{-1,36k}]R'_x, \\ \text{(EHD-TR)} & \end{array} \quad (6-5)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Ham \& Dow} & h_c = 11,15\bar{U}^{0,64}\bar{W}^{-0,22}\bar{G}^0[1 - 0,72e^{-1,28k}]R'_x. \\ \text{(EHD-IE)} & \end{array} \quad (6-6)$$

Tab 6-2 Srovnání relativních chyb predikcí vůči měření obecného eliptického kontaktu – h_c

Predikce	Chittenden	Hamrock & Dowson	Regrese	Hooke	Hamrock & Dowson
Režim platnosti	EHD-PE	EHD-PE	EHD-TR	EHD-EI	EHD-EI
Platnost pro elipticity k	$\langle 0;8 \rangle$	$\langle 1;8 \rangle$	$\langle 0;3 \rangle$	$\langle 0;8 \rangle$	$\langle 1;8 \rangle$
Relativní chyba vůči měření (%)	31,27	31,59	8,71	11,7	12,7

V tabulce Tab 6-2 je srovnání relativní chyby mezi naměřenými daty a zmíněnými prediktivními vztahy. U vztahů pro EI režim lze stejně jako u bodového kontaktu pozorovat nižší relativní chybu. Kromě již zmíněné oblasti platnosti predikcí je chyba navýšena i o rozdíl zahrnutí úzkého eliptického kontaktu, viz níže.



Obr. 6-5 Centrální tloušťka h_c , zatížení 22,2 N; teplota 23 °C; HC 32/130; $k=2$

6.2.1 Složka ellipticity

Nejvyšší míra shody regresivně získané geometrické složky byla nalezena ve tvaru Hamrock-Dowsona, tj.:

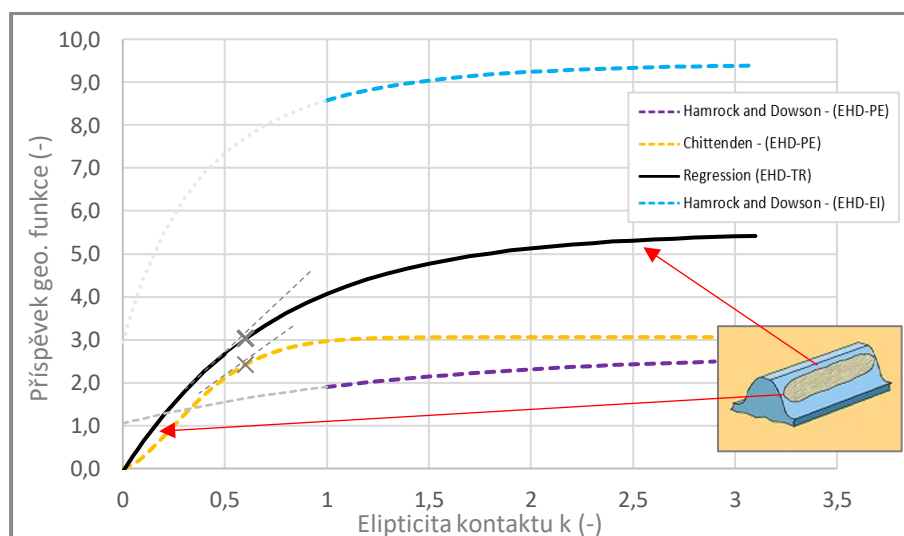
$$h_c = A \cdot \bar{U}^{x_1} \bar{W}^{x_2} [1 - B e^{-Ck}] R'_x. \quad (6-6)$$

Ve srovnání jednotlivých geometrických funkcí (Ham-Dow., Chittenden) lze pozorovat značný rozdíl ve velikosti příspěvku jednotlivých funkcí. Napříč režimy je také patrný proporcionální nárůst vlivu mezi jednotlivými elipticitami.

Přínosem této práce je regresivní zahrnutí i úzkého kontaktu ($k < 1$). V intervalu úzkého kontaktu se směrnice růstu funkce značně přibližuje k Chittendenovu vztahu (EHD-PE, platnost od $k > 0$). Při přechodu přes elipticitu bodového kontaktu však u PE-funkce dochází k poměrně rychlému limitně-asymptotickému ustálení. Chittenden v piezoviskózním režimu nepředpokládá rozdíl mezi bodovým a širokým eliptickým kontaktem (event. liniovým stykem).

V intervalu platnosti Hamrock-Dowsonova vztahu pro elipticitu $k \in \langle 1; 8 \rangle$ vykazuje regresní geometrická funkce pro TR režim vyšší gradient růstu než PE-funkce. Jinými slovy, s rostoucí elipticitou dochází v transientním režimu k mnohem signifikantnějšímu vlivu na tloušťku h_c .

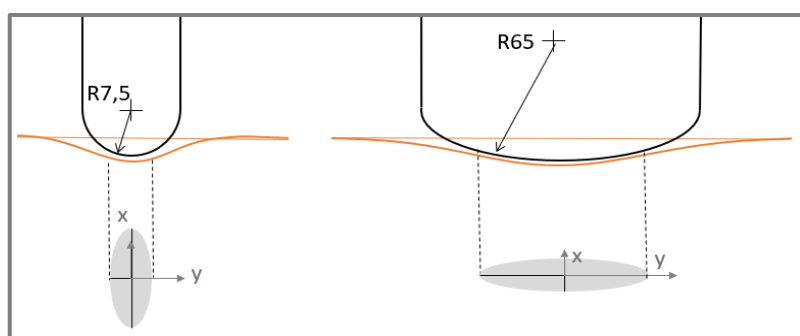
V předchozích kapitolách bylo zaznamenáno snížení vlivu zatížení na formování centrální tloušťky h_c u širších eliptických kontaktů, výraznější nárůst vlivu geometrie u $k > 1$ pravděpodobně koriguje právě vliv zatížení.



Obr. 6-6 Příspěvek geometrické složky

6.3 Obecný eliptický kontakt – minimum h_0

Tvar mazacího filmu je v TR režimu (eventuálně IE) u úzkého a širokého ($k=0,74$ a $2,9$) eliptického kontaktu značně odlišný. Do úzkého kontaktu vstupuje mazivo podél hlavní poloosy, k majoritnímu ovlivnění filmu však dochází ve směru osy-y, na vedlejší poloosách. Naopak u širokého ($k=2,92$) kontaktu s redukovaným bočním výtokem dochází majoritně k podélné deformaci (viz. profily v kap. 5.2), ve směru osy-x. U polymerního materiálu s nízkým modulem pružnosti E byla zaznamenána tendence ovlivňování tvaru mazacího filmu ve směru, ve kterém klade materiál větší odpor vůči deformaci (tuhost). U úzkého kontaktu například dochází k silnějšímu ovlivnění míry bočního výtoku a s ním spjaté minimální tloušťky $h_{0(side)}$.



Obr. 6-7 Schéma geometrie kontaktu, vlevo úzký kontakt R7,5 ($k=0,74$) vpravo kontakt široký R65 ($k=2,9$)

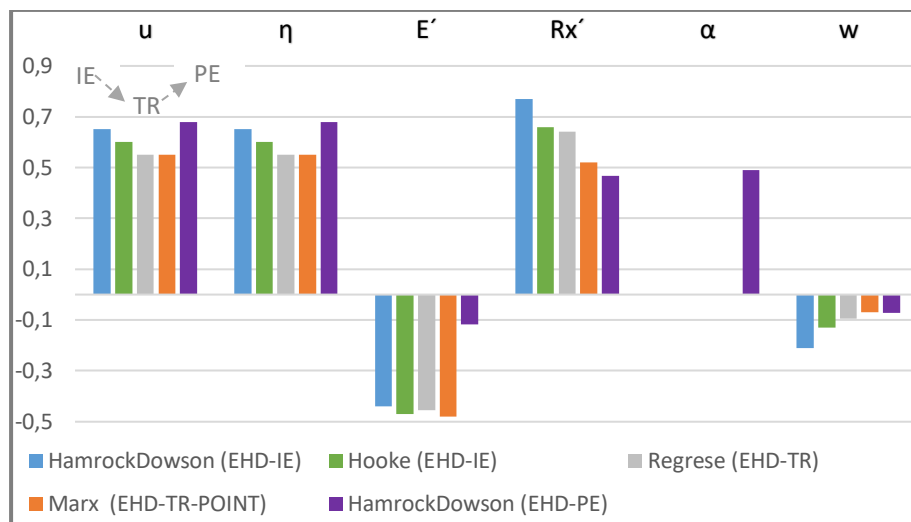
Minimální tloušťka filmu h_0 se dle studie Hooke [20] nachází při elipticitě $k < 1,58$ na bocích podkovité konstrikce⁷. Při měření s elipticitou $k=1,89$ byla lokalizována minimální tloušťka na výstupu podél osy-x (tzn. $h_0=h_{0(exit)}$), u bodového kontaktu naopak po bocích ($h_0=h_{0(side)}$), hypotéza tedy nebyla vyvrácena.

Přechod minimální tloušťky $h_{0(side)}$ z boků konstrikce na výstup $h_{0(exit)}$ nebylo vzhledem k nestabilitě kontaktu možno pozorovat (vůle letmého uložení kuličky, házení disku).

⁷ Hooke toto tvrzení podmiňuje obecnými podmínkami EHD mazání či velmi vysokými zatíženími.

6.3.1 Minimum – $h_{0(exit)}$

Na Obr. 6-8 je zobrazeno srovnání váhy jednotlivých vstupních parametrů u predikčních vztahů pro minimální tloušťky $h_{0(exit)}$ na výstupu z kontaktu v podélném řezu.



Obr. 6-8 Srovnání významů vstupních parametrů s proměnou elipticity k , minimální tloušťka $h_{0(exit)}$

Regresně získaný vztah (rce 6-7) vykazuje stejnou mocninnou závislost na bezrozměrném parametru $\bar{U}$, jaká byla sledována i u centrální tloušťky h_c . Stejně mocniny $\bar{U}$ vykazují u predikcí tlouštěk h_c a $h_{0(min)}$ i numerické predikce. Oproti predikcím pro centrální film došlo ke zvýšení váhy mocniny zatížení w . Ta ve srovnání se vztahy pro PE a IE vykazuje teoretický přechod v podobě parametru zatížení $\bar{W}$. Vliv tlakově-viskózního koeficientu α nebyl zaznamenán.

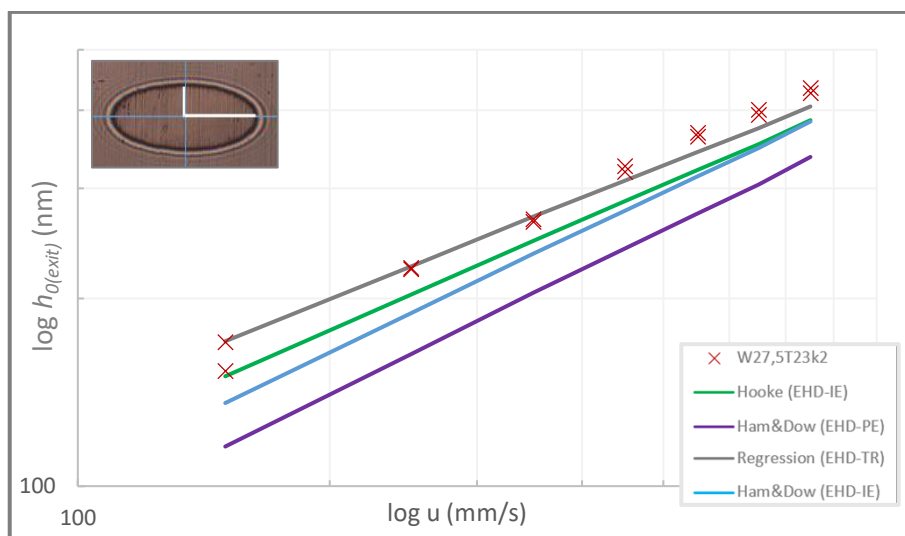
V poměrném srovnání s Hookovou predikcí pro IE lze pozorovat velmi dobrou shodu. Právě tato numerická predikce vykazuje i oproti naměřeným datům nejmenší průměrnou odchylku, viz Obr. 6-9. Hooke ve své studii zanedbává boční výtok pro elipticity mimo bodový kontakt. Vzhledem ke značné shodě lze faktor bočního výtoku na formování tloušťky $h_{0(exit)}$ prohlásit i u transientního režimu za minoritní.

Regrese
(EHD-TR)

$$h_{0(exit)} = 1,9\bar{U}^{0,55}\bar{W}^{-0,09}\bar{G}^0[1 - 1e^{-1,14k}]R'_x \quad (6-7)$$

Tab 6-3 Srovnání relativních chyby predikcí vůči měření obecného kontaktu – $h_{0(exit)}$

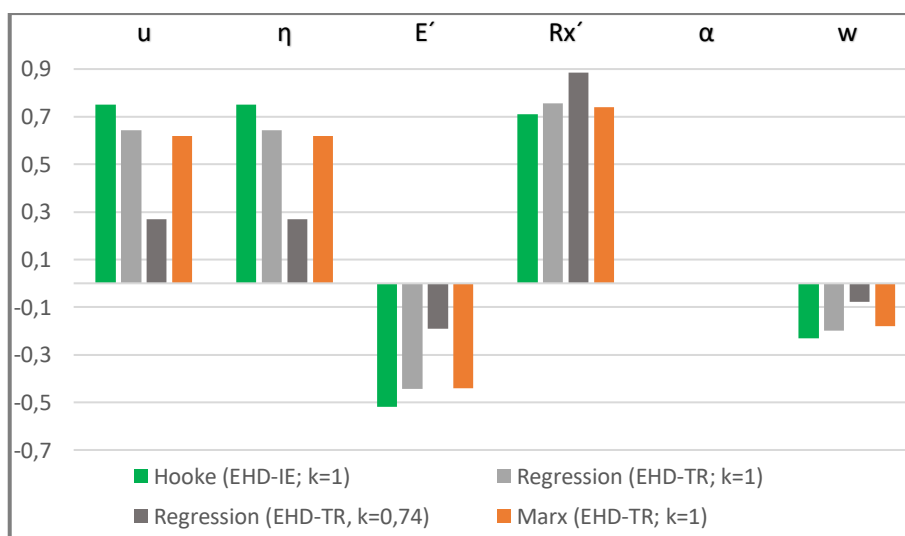
Predikce	Hamrock & Dowson	Regrese	Hooke	Hamrock & Dowson
Režim platnosti	EHD-PE	EHD-TR	EHD-EI	EHD-EI
Platnost pro elipticity k	$\langle 1;8 \rangle$	$\langle 0;3 \rangle$	$\langle 0;8 \rangle$	$\langle 1;8 \rangle$
Relativní chyba vůči měření (%)	31,9	9,9	11,8	12,7



Obr. 6-9 Centrální tloušťka $h_{0(exit)}$, zatížení 27,5 N; 23 °C; HC 32/130; $k=2$

6.3.2 Minimum – $h_{0(side)}$

Jediný dostupný vztah (Hook [20]) počítající s proměnnou elipticitou kontaktu pro predikci tloušťky po bocích konstrikce $h_{0(side)}$ nezohledňuje u elipticity mimo bodový kontakt vliv bočního výtoku. Ten velmi ovlivňuje právě chování minima u úzkého a bodového kontaktu. Vzhledem k tomu, že minimum $h_{0(side)}$ bylo pozorováno pouze u dvou elipticit, nelze vytvořit univerzálnější regresivní vztah, který by respektoval proměnlivou geometrii k .



Obr. 6-10 Srovnání významů vstupních parametrů, $k=1$; 0,74; minimální tloušťka $h_{0(side)}$

Graf na Obr. 6-10 zachycuje srovnání váhy vstupních parametrů u elipticity bodového ($k = 1$) a úzkého ($k = 0,74$) kontaktu. Bodový kontakt (rce. 6-9) vykazuje opět dobrou shodu s Marxovou regresní predikcí (rce 6-10)[1], regresní vztah lze považovat za správný.

Regrese, $k = 0,74$
(EHD-TR)

$$h_{0(side)} = 2,7 \bar{U}^{0,27} \bar{W}^{-0,076} R'_x \quad (6-8)$$

$$\begin{array}{l} \text{Regrese, } k = 1 \\ \text{(EHD-TR)} \end{array} \quad h_{0(side)} = 3\bar{U}^{0,64}\bar{W}^{-0,2} R'_x \quad (6-9)$$

$$\begin{array}{l} \text{Marx, } k = 1 \\ \text{(EHD-TR)} \end{array} \quad h_{0(side)} = 2,9\bar{U}^{0,62}\bar{W}^{-0,16} R'_x \quad (6-10)$$

Značný odklon nastává u úzkého kontaktu. S násobně menšími mocninnými koeficienty u bezrozměrných parametrů $\bar{U}$ a $\bar{W}$ vykazuje relativně nezávislé chování na změnách rychlosti, viskozity či zatížení. Vzhledem k nízkým hodnotám těchto parametrů pak nelze považovat vysoké mocniny u R'_x a E' za zcela korektní (doplňkový charakter bezrozměrných parametrů). Nízké velikosti těchto tloušťek umocňují relativní fluktuaci hodnot, kterou lze přisoudit drobnému čelnímu házení, tj. pulzaci síly zátěžné síly nebo nekorigovanému spinu (odlišné obvodové rychlosti na bocích laloků).

Z hlediska analogie ke kontaktu záběru zubů u přímého ozubení lze považovat oblast s nízkou elipticitou po bocích tohoto kontaktu za kritickou.

7. ZÁVĚR

Během vypracování této práce byla realizována řada měření s cílem popisu vlivu vstupních parametrů na utváření kapalného mazacího filmu v transienční oblasti či horní hranici izoviskózně elastického EHD režimu. Tloušťky těchto filmů byly studovány na kontaktu plastového disku s ocelovou kuličkou či soudečkem, metodou založenou na optické interferometrii. Výzkum bodových a eliptických kontaktů v transienčním režimu byl na tribologickém pracovišti ÚK použit vůbec poprvé.

Změnou vstupních podmínek, jako je rychlost, zatížení, viskozita, tlakově viskózní koeficient, teplota a elipticita kontaktu, bylo získáno dostatečné množství dat pro regresní analýzu vlivu jednotlivých parametrů. Předmětem zájmu bylo dále vytvoření vztahů pro určení centrální a minimální tloušťky mazacích filmů. Získané regresní vztahy respektující formu bezrozměrných parametrů $\bar{U}$, $\bar{W}$, $\bar{G}$ byly následně srovnány s predikčními vztahy tloušťek pro izoviskózní a piezoviskózní režim. Díky tomuto srovnání lze určit následné stěžejní rozdíly a nové poznatky:

- Fyzikální podstata mechanismu utvářejícího tloušťku filmů v transienčním režimu na přechodu IE a PE (dle mapy Esfahania a Hamrocka) je stále blízká izoviskózně elastickému mazání (IE).
- Vliv tlakově viskózního koeficientu α je zanedbatelný na formování tloušťek v transienčním režimu EHD (horní hranice IE).
- Tloušťka centrálního mazacího filmu u obecného eliptického kontaktu vykazuje sníženou citlivost na zatížení w .
- Elipticita k má výraznější vliv na formování filmu v transienčním režimu než v režimu piezoviskózním.
- U úzkých kontaktů ($k < 1$) s dochází při formování minimální tloušťky k výraznému snížení citlivosti na změnu vstupních parametrů (viskozita, rychlost, zatížení).
- S postupným navyšováním teploty polymerů dochází k pozitivnímu navýšení příspěvku modulu pružnosti na formování filmu.

V případě dalšího výzkumu v této oblasti by bylo vhodné zahrnout směr vektorů unášivé a skluzové rychlosti, jenž je charakteristický pro záběr u složitějších geometrií ozubených kol.

Poznatky vyplývající z regresivně získaných predikčních vztahů lze užít při návrhu kapalinově mazaných plastových převodů. Převážně pak pro optimalizaci návrhu čelních soukolí se šikmými zuby s kombinací záběrů ocelového kola s kolem s konstrukčních plastů.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

8

- [1] MARX, Nigel, Johan GUEGAN a Hugh A. SPIKES. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. *Tribology International* [online]. 2016, **99**, 267–277. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.03.020
- [2] MYANT, C., H. A. SPIKES a J. R. STOKES. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International* [online]. 2010, **43**(1–2), 55–63. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2009.04.034
- [3] Intech-plastic-gear-design. *motioncontroltips.com* [online]. [vid. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://3l4sbp4ao2771ln0f54chhvm.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2011/10/03-Intech-plastic-gear-design.jpg>
- [4] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [5] STACHOWIAK, G W a A W BATCHELOR. *Engineering Tribology* [online]. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2001. Referex Engineering. ISBN 9780750673044. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=YW640G7fhQgC>
- [6] CONTE, M. a A. IGARTUA. *Study of PTFE composites tribological behavior* [online]. 2012. ISBN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2012.08.015
- [7] HARTL, Ing Martin, D PH, Měření A STUDIUM, Velmi TENKÝCH a Mazacích FILMŮ. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta strojního inženýrství Ústav konstruování THE MEASUREMENT AND STUDY OF VERY THIN. 2002.
- [8] KŘUPKA, Ing Ivan, D PH a Studium Elastohydrodynamického mazání bodových kontaktů strojních SOUSTAV. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta strojního inženýrství Ústav konstruování THE MEASUREMENT AND STUDY OF VERY THIN. 2002.
- [9] MASJEDI, M. a M. KHONSARI. Mixed lubrication of soft contacts: An engineering look. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2016, **1996**(June), 263–273. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1177/1350650116652286
- [10] HAMROCK, B J a D DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part II—Ellipticity Parameter Results. *Journal of Lubrication Technology* [online]. 1976, **98**(3), 375–381. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3452861>
- [11] JOHNSON, K L. Regimes of Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 1970, **12**(1), 9–16. Dostupné z: doi:10.1243/JMES_JOUR_1970_012_004_02
- [12] ESFAHANIAN, M a B J HAMROCK. Fluid-Film Lubrication Regimes Revisited. *Tribology Transactions* [online]. 1991, **34**(4), 628–632. Dostupné z: doi:10.1080/10402009108982081

- [13] DEARN, K. D., T. J. HOSKINS, L. ANDREI a D. WALTON. Lubrication regimes in high-performance polymer spur gears. *Advances in Tribology* [online]. 2013, **2013**. ISSN 16875915. Dostupné z: doi:10.1155/2013/987251
- [14] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE, Richard G BUDYNAS a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 10. vyd. V Brně: VUTIUUM, 2010. ISBN 9788021426290.
- [15] PATIL, Santosh, Saravanan KARUPPANAN, Ivana ATANASOVSKA a Azmi A WAHAB. Frictional Tooth Contact Analysis along Line of Action of a Spur Gear using Finite Element Method. 2014, s. 1801–1809. *Procedia Materials Science*. ISSN 2211-8128. Dostupné z: doi:10.1016/j.mspro.2014.07.399
- [16] MENEGHETTI, G, A TERRIN a S GIACOMETTI. A twin disc test rig for contact fatigue characterization of gear materials. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, **2**, 3185–3193. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.397
- [17] SPIRAL BEVEL CORPORATION. TCA_software.48110322_large. *Spiralbevel.com: 3-D MATHEMATICAL MODELING OF GEARED MECHANICAL SYSTEMS*. [online]. 2016 [vid. 2018-02-23]. Dostupné z: http://spiralbevel.com/tca_software
- [18] LETZELTER, E, J P DE VAUJANY a M GUINGAND. Load-sharing model for polymer cylindrical gears. *Gear technology* [online]. 2011, **28**, 28. ISSN 0743-6858. Dostupné z: https://www.geartechnology.com/issues/1111x/letzelter.pdf
- [19] TSUKAMOTO, Naohisa. Argument on Plastic Gears for Power Transmission. *JSME international journal. Ser. C, Dynamics, control, robotics, design and manufacturing* [online]. 1995, **38**(1), 1–8. ISSN 1340-8062. Dostupné z: doi:10.1299/jsmec1993.38.1
- [20] HOOKE, C J. The Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Point Contacts Operating in the Isoviscous Region. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 1995, **209**(4), 225–234. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_PROC_1995_209_433_02
- [21] MYANT, Connor, Mark FOWELL, Hugh A SPIKES, Jason R STOKES a Liming CHANG. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions* [online]. 2010, **53**(January), 684–694. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402001003693109
- [22] DE VICENTE, J., J. R. STOKES a H. A. SPIKES. The frictional properties of Newtonian fluids in rolling - Sliding soft-EHL contact. *Tribology Letters* [online]. 2005, **20**(3–4), 273–286. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-005-9067-3
- [23] PUTIGNANO, Carmine a Daniele DINI. Soft Matter Lubrication: Does Solid Viscoelasticity Matter? *ACS Applied Materials & Interfaces* [online]. 2017, **9**(48), 42287–42295. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.7b09381

- [24] POLL, G a A GABELLI. Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II—A New Measuring Principle for Lubricant Film Thickness. *Journal of Tribology* [online]. 1992, **114**(2), 290–296. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2920886>
- [25] BOUMBIMBA, Rodrigue Matadi, Said AHZI, Nadia BAHLOULI, David RUCH a José GRACIO. Dynamic Mechanical Properties of PMMA/Organoclay Nanocomposite: Experiments and Modeling. *Journal of Engineering Materials and Technology* [online]. 2011, **133**(3), 30906–30908. ISSN 0094-4289. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4004052>
- [26] MYERS, T G, R W HALL, M D SAVAGE a P H GASKELL. The Transition Region of Elastohydrodynamic Lubrication. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 1991, **432**(1886), 467–479. ISSN 0962-8444. Dostupné z: [doi:10.1098/rspa.1991.0026](https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0026)
- [27] HAMROCK, Bernard J. *Fundamentals of fluid film lubrication*. New York: McGraw-Hill, nedatováno. ISBN 0070259569.
- [28] CHITTENDEN, R J, D DOWSON, J F DUNN a C M TAYLOR. A Theoretical Analysis of the Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Concentrated Contacts. I. Direction of Lubricant Entrainment Coincident with the Major Axis of the Hertzian Contact Ellipse. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1985, **397**(1813), 245–269. ISSN 00804630. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/2397859>
- [29] NIJENBANNING, G, C H VENNER a H MOES. Film thickness in elastohydrodynamically lubricated elliptic contacts. *Wear* [online]. 1994, **176**(2), 217–229. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90150-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90150-3)
- [30] FANG, Yanfei, Jun HE a Ping HUANG. Experimental and Numerical Analysis of Soft Elastohydrodynamic Lubrication in Line Contact. *Tribology Letters* [online]. 2017, **65**(2), 42. ISSN 1573-2711. Dostupné z: [doi:10.1007/s11249-017-0825-9](https://doi.org/10.1007/s11249-017-0825-9)

9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DMA	- Dynamicko-mechanická analýza
DP	- Diplomová práce
EHD	- Elastohydrodynamický
EHL	- Elastohydrodynamicky mazaný
FSI	- Fakulta strojního inženýrství
GLY	- Glycerol
HC 32/130	- Mogul HC 32/130
IE	- Izoviskózní elastický režim, soft-EHD
IR	- Izoviskózní režim tuhých těles
KTF1	- CVTFluid KTF-1
MTM	- Mini Traction Machine
PA	- Polyamid
PAO6	- SpectraSyn™ 6
PC	- Polykarbonát
PDSM	- Polydimethylsilikon
PE	- Polyethylen
PE	- Piezoviskózní elastický režim, hard-EHD
PEEK	- Polyetherketon
PMMA	- Polymethylmethakrylát
PS	- Polystyren
PTFE	- Polytetrafluorethylen
SFO	- Slunečnicový olej (Sunflower Oil)
SRR	- Poměr skluzu/valení
ÚK	- Ústav konstruování
VR	- Viskózní režim tuhých těles

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	m	- poloměr bodového kontaktu
E_1	MPa	- modul pružnosti kuličky
E_2	MPa	- modul pružnosti disku
E'	MPa	- redukovaný modul pružnosti
g_e		- parametr elasticity
g_v		- parametr viskozity
h	nm	- tloušťka mazacího filmu
H_0		- bezrozměrná minimální tloušťka filmu
h_0	nm	- centrální tloušťka mazacího filmu ve středu kontaktu
$h_{0(\text{exit})}$	nm	- minimální tloušťka po v centrální části výtoku
$h_{0(\text{side})}$	nm	- minimální tloušťka po bocích konstrikce
H_c		- bezrozměrná centrální tloušťka filmu
h_c	nm	- centrální tloušťka mazacího filmu
i		- převodový poměr
k		- elipticita; $1,03 \cdot (R_y/R_x)^{0,64}$
p	Pa	- kontaktní tlak
$r_{1;2}$	m	- poloměr roztečné kružnice
R'_x	m	- redukovaný poloměr ve směru osy x

R_{x1}	m	- poloměr křivosti kuličky ve směru osy x
R_{x2}	m	- poloměr křivosti disku ve směru osy x
R_x	m	- poloměr kontaktu v ose x
R_y	m	- poloměr kontaktu v ose y
Rqa	μm	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa a
Rqb	μm	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa b
R_{red}		- redukovaná drsnost
T_g	$^{\circ}\text{C}$	- teplota skelného přechodu
$U; u$	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	- střední rychlost
v_{slide}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	- skluzová rychlost
v_{roll}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	- valivá rychlost
$W; w$	N	- zatížení
$x_{1;2;3}$		- mocninný koeficient
$\bar{U}$		- bezrozměrný parametr rychlosti
$\bar{G}$		- bezrozměrný parametr materiálu
$\bar{W}$		- bezrozměrný parametr zatížení
$\hat{H}$		- Moesův parametr tloušťky filmu; $(h/R'_x)(E'R'_x/2\eta_0 u)^{1/2}$
M		- Moesův parametr zatížení; $(W/E'R_x^2)(E'R'_x/2\eta_0 u)^{3/4}$
α	Pa^{-1}	- tlakově-viskózní koeficient
$\psi; \gamma$	$^{\circ}$	- úhel záběrů
Λ		- parametr mazání
η	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	- dynamická viskozita maziva
η_0	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	- dynamická viskozita maziva při atmosférickém tlaku
η_{ef}		- efektivita soukolí
ν_1		- Poissonovo číslo materiálu kuličky
ν_2		- Poissonovo číslo materiálu disku
ω	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	- úhlová rychlost

10. SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Ozubené soukolí s plastovým kolem zalitým kovovým jádrem firmy Intech [3] ...	13
Obr. 2-1 Stribeckova křivka [7].....	15
Obr. 2-2 Rozložení tlaku v EHD kontaktu [8].....	16
Obr. 2-3 Režimy kapalinového mazání pro bodový kontakt [1].....	18
Obr. 2-4 Poměr valivé a skluzové rychlosti po délce záběru zubů [13].....	20
Obr. 2-5 Rozložení tlaku [15]	20
Obr. 2-6 Průběh kontaktního tlaku po boku zubu – planetová převodovka [16].....	20
Obr. 2-7 Srovnání geometrie kontaktu kuželového soukolí se zakřivenými zuby s eliptickým kontaktem z tribometru [17].....	21
Obr. 2-8 Časová relaxace polymerů [19]	21
Obr. 2-9 Viskoelastické vlastnosti PA66 [18]	22
Obr. 2-10 Rozdělený IE režim s vyznačenou oblastí měření Marxe [1]	23
Obr. 2-11 Srovnání experimentu s predikční tloušťkou, PMMA, SRR = 0, W = 10 N	24
Obr. 2-12 Profil tloušťky ve středním EI režimu	24
Obr. 2-13 Srovnání měření s predikcí De Vicenta	25
Obr. 2-14 Teoretická (vlevo) a experimentálně naměřená tloušťka filmu, PDMS, SRR=0; zatížení $w = 0,3 \text{ mN}$, rychlost $u = 660 \text{ mm s}^{-1}$	26
Obr. 2-15 PEEK/ocel, účinnost a odvozený koeficient tření, smíšený režim [13].....	26
Obr. 2-16 Kombinace PEEK/PEEK, účinnost a odvozený koeficient tření, kapalinový režim [13].....	27
Obr. 2-17 Mapa elastohydrodynamického vytvoření Johnsonem [11].....	27
Obr. 2-18 Rozložení deformace v závislosti na bezrozměrné rychlosti ξ	28
Obr. 2-19 Srovnání predikčního modelu Utignana	28
Obr. 2-20 Viskoelastický projev deformace	28
Obr. 4-1 Princip měření tloušťky mazací vrstvy metodou optické interferometrie [1]	31
Obr. 4-2 Lineární závislost $E = f(T)$ čistého PMMA dle Boumbimba [25] a naměřeného modulu E	32
Obr. 4-3 Transientní oblast EHD režimu [13]	33
Obr. 4-4 Diagram postupu práce.....	34
Obr. 5-1 Vlevo interferogram statického kontaktu s aplikací polopropustné chromatické vrstvy, vpravo interferogram bez vrstvy	35
Obr. 5-2 Mapa režimů kapalinového mazání pro	35
Obr. 5-3 Mapa režimů pro bodový kontakt	36
Obr. 5-4 Interferogramy kontaktu při zatíženích 5; 10; 15 a 20 N, rychlost $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minerální olej HC 32/130	36
Obr. 5-5 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($y/R = 0$), rychlost $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minerální olej HC 32/130.....	37
Obr. 5-6 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($x/R = 0$), rychlost $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minerální olej HC 32/130.....	37
Obr. 5-7 Definovaná centrální tloušťka h_c	38
Obr. 5-8 Závislost tloušťky filmu h na rychlosti, zatížení 10 N, teplota $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, minerální olej HC32/130.....	38
Obr. 5-9 Centrální tloušťka filmu h_c , zatížení 20 N, $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$	39
Obr. 5-10 Minimální tloušťka filmu $h_{(exit)}$ a $h_{(side)}$, zatížení 10 N, $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$	39
Obr. 5-11 Minimální tloušťka filmu h_0 , zatížení 20 N, $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$	40
Obr. 5-12 Centrální tloušťka filmu h_c , zatížení 10 N, teploty 23, 30 a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, HC 32/130....	41
Obr. 5-13 Experiment rozlišující vliv materiálové a viskózní složky na centrální film h_c , W = 10 N, HC 32/130.....	41
Obr. 5-14 Vliv teploty na změnu modulu pružnosti E a viskozitu maziva η	42

Obr. 5-15 Závislost tloušťky filmu h_c na zatížení ($y/R = 0$), rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota 23°C , PAO6, elipticita $k = 2$	43
Obr. 5-16 Závislost tloušťky filmu h na zatížení ($x/R = 0$); rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota 23°C ; PAO6, elipticita $k = 0,74$	43
Obr. 5-17 Závislost tloušťky centrální tloušťky h_c na rychlosti, zatížení $17,1 \text{ N}$; teplota 23°C , PAO6	44
Obr. 5-18 Závislost tloušťky centrální tloušťky h_c na rychlosti, zatížení $9,7$; $17,1$ a $22,2 \text{ N}$; teplota 23°C , HC 32/130, $k=2,92$	44
Obr. 5-19 Interferogramy, minimální tloušťky. Zleva: elipticita $k=0,74$; 1 a $1,9$	45
Obr. 5-20 Minimální tloušťka filmu h_0 , zatížení $17,1 \text{ N}$, 23°C , PAO6	45
Obr. 5-21 Profily tlouštěk filmů u širokého eliptického kontaktu ($k=2,92$), $w = 10 \text{ N}$, HC 32/130, $\text{SRR} = 0$, $k = 2,9$	46
Obr. 5-22 Rozdíl Couettových toků mezi různě nakloněnými profily	46
Obr. 5-23 Profily tlouštěk filmů u úzkého eliptického kontaktu ($k=0,74$), $w = 15 \text{ N}$, HC 32/130,	47
Obr. 5-24 Regresivně získaná mocninná složka U , W , G u tří maziv v závislosti na elipticitě k . Pozn. pro názornost četnosti jsou body nadefinovány s částečnou průhledností.	49
Obr. 5-25 Regresivně získaná funkce bez zahrnutí geometrické funkce.	49
Obr. 5-26 Regresivně získaná funkce včetně zahrnutí geometrické složky rce.	49
Obr. 5-27 Odchylka měření vůči Hamrock-Dowsova vztahu pro IE režim [27].....	50
Obr. 6-1 Srovnání významů vstupních parametrů mezi IE a TR režimem, bodový kontakt, centrální tloušťka h_c	51
Obr. 6-2 Centrální tloušťka h_c , 10 N , 24°C , PAO6, bodový kontakt ($k = 1$).....	52
Obr. 6-3 Oblast odvození predikcí Ham-Dow, oblast měření DP (bodový kontakt)	53
Obr. 6-4 Srovnání významů vstupních parametrů s proměnou elipticitou k , centrální tloušťka h_c	53
Obr. 6-5 Centrální tloušťka h_c , zatížení $22,2 \text{ N}$; teplota 23°C ; HC 32/130; $k=2$	54
Obr. 6-6 Příspěvek geometrické složky	55
Obr. 6-7 Schéma geometrie kontaktu, vlevo úzký kontakt R7,5 ($k=0,74$) vpravo kontakt široký R65 ($k=2,9$).....	56
Obr. 6-8 Srovnání významů vstupních parametrů s proměnou elipticitou k , minimální tloušťka $h_{o(\text{exit})}$	57
Obr. 6-9 Centrální tloušťka $h_{o(\text{exit})}$, zatížení $27,5 \text{ N}$; 23°C ; HC 32/130; $k=2$	58
Obr. 6-10 Srovnání významů vstupních parametrů, $k=1$; $0,74$; minimální tloušťka $h_{o(\text{side})}$...	58

11. SEZNAM TABULEK

SEZNAM TABULEK

Tab 2-1 Fyzikální vlastnosti technických polymerů [5]	14
Tab 2-2 Vlastnosti polymerních disků [1]	23
Tab 4-1 Vlastnosti maziv	33
Tab 5-1 Tabulka poměrů složek vůči teplotě maziva a materiálu 23	42
Tab 6-1 Srovnání relativních chyby predikcí vůči měření bodového kontaktu	52
Tab 6-2 Srovnání relativních chyb predikcí vůči měření bodového kontaktu	54
Tab 6-3 Srovnání relativních chyby predikcí vůči měření bodového kontaktu	57

12. SEZNAM PŘÍLOH**12**

Příloha č. 1

Článek: *Elastohydrodynamic film thickness of soft elliptical EHL contact*

Příloha č. 2

Souhrn grafů srovnávajících prediktivní a získané regresivní vztahy s naměřenými tloušťkami filmu napříč různými elipticitami k .

Příloha č. 3

Grafické vyjádření chyby regresních vztahů.