



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VÝVOJ TLOUŠŤKY FILMU A TŘENÍ V ELASTOHYDRODYNAMICKY MAZANÝCH PODDAJNÝCH KONTAKTECH

JIŘÍ KŘUPKA

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VÝVOJ TLOUŠŤKY FILMU A TŘENÍ V ELASTOHYDRODYNAMICKY MAZANÝCH PODDAJNÝCH KONTAKTECH

DEVELOPMENT OF FILM THICKNESS AND FRICTION IN
ELASTOHYDRODYNAMICALLY LUBRICATED COMPLIANT CONTACTS

Ing. Jiří Křupka

Autor práce
Author

prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
3.1	Studie zaměřené na formování mazacího filmu v soft EHL kontaktech	13
3.1.1	Numerické studie zaměřené na formování mazacího filmu	13
3.1.2	Experimentální studie zaměřené na formování mazacího filmu	28
3.1.3	Ostatní studie	38
3.2	Studie zaměřené na vývoj tření v soft EHL kontaktech	40
3.2.1	Experimentální studie zaměřené na vývoj tření	40
3.2.2	Vliv mechanických a tribologických vlastností na provoz plastového ozubení	48
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	54
4.1	Zhodnocení obecných poznatků plynoucích ze současného stavu poznání	54
4.2	Zhodnocení poznatků plynoucích ze studií věnovaných tloušťce filmu	55
4.2.1	Vliv unášivé a skluzové rychlosti na tloušťku mazacího filmu	55
4.2.2	Vliv zatížení na tloušťku mazacího filmu	56
4.2.3	Vliv teploty na tloušťku mazacího filmu	57
4.2.4	Vliv tlakově viskózního koeficientu na tloušťku mazacího filmu	58
4.2.5	Vliv drsnosti povrchu na tloušťku mazacího filmu	58
4.3	Zhodnocení poznatků plynoucích ze studií věnovaných vývoji součiniteli tření a vlastnostem polymerních materiálů	59
4.3.1	Vývoj součinitele tření v soft EHL kontaktu	59
4.3.2	Vliv mechanických a tribologických vlastností polymerních materiálů	61
4.4	Stěžejní závěry plynoucí z rešerše	62
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	66
5.1	Zaměření disertační práce	66
5.2	Cíl disertační práce	66
5.3	Přínos disertační práce	67

5.4	Návaznost na současný stav řešení	68
5.5	Způsob řešení a použité metody	70
5.5.1	Fáze přípravy	71
5.5.2	Experimentální část	72
5.5.3	Zpracování a analýza získaných dat	75
5.6	Plán publikací	77
6	SOUČASNÝ STAV	79
7	ZÁVĚR	89
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	90
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	96
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	101
11	SEZNAM TABULEK	106
12	PŘÍLOHA	107

1 ÚVOD

V druhé polovině 20. století spolu s rozvojem technologie výroby vstřikování plastů a výzkumu kompozitních materiálů pro strojírenské aplikace se začaly objevovat ozubená kola vyrobená dosud z netradičního materiálu – plastu, konkrétně termoplastu. Termoplast vykazuje v mnoha ohledech oproti oceli nižší hodnoty mechanických vlastností zejména modulu pružnosti, které jsou navíc výrazně závislé na teplotě. Avšak plastová ozubená kola jsou oproti ocelovým ekvivalentům levnější na výrobu (při použití technologie vstřikování plastů – *injection moulding*), mají nižší hmotnost, mají schopnost tlumit rázy, ale současně jsou poměrně odolná vůči opotřebení a mohou pracovat i bez přítomnosti maziva.

Použití plastových ozubených kol v širokém spektru výrobků strojírenského průmyslu ukázalo jejich důležitost a přínos pro společnost a rozsáhlé využití ve výrobcích, které jsou běžnou součástí našeho každodenního života. Plastové převody byly zpravidla používány jako nemazané – suché a v minulosti sloužily spíše pro přenos pohybu než zatížení za poměrně malých a středních rychlostí v aplikacích, kde je nežádoucí nebo není nutná přítomnost maziva. Za těchto podmínek může být součinitel tření u některých polymerů velmi vysoký, což vede ke vzniku tepla, jenž ovlivňuje vlastnosti materiálu.

Oproti tomu je v současnosti snaha o použití plastového ozubení v takových aplikacích, kde je mazání žádoucí kvůli vysokému zatížení a pracovním rychlostem. Navíc je zde potenciál kombinace materiálů v soukolí pro zajištění požadovaného chodu převodu, kdy jedno z kol ozubeného soukolí je z kovového a druhé z polymerního konstrukčního materiálu. Za těchto podmínek dochází v kontaktu mezi ocelovým a plastovým kolem k elastohydrodynamickému mazání (EHL), při kterém jsou kontaktní povrchy plně odděleny tloušťkou mazacího filmu.

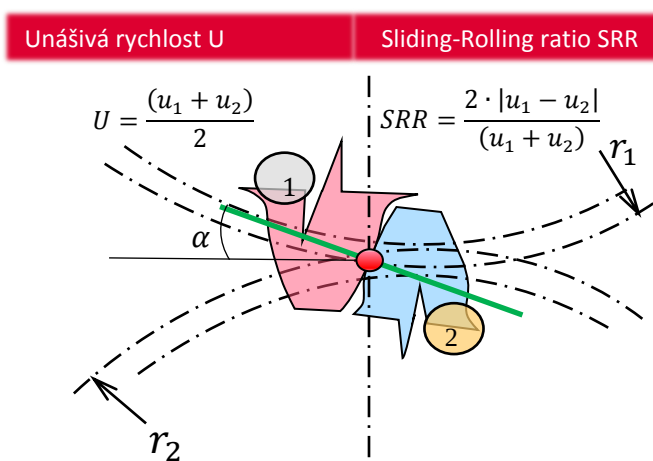
Z ekonomického hlediska je úspora finančních prostředků a strojního času na výrobu plastového ozubení oproti ocelovým ekvivalentům podstatným důvodem zájmu o danou problematiku v celosvětovém měřítku. Z inženýrského pohledu je dané téma aktuální z hlediska rozšíření použití kompozitních polymerních materiálů v oblastech strojírenského průmyslu, kde doposud převládaly ocelové materiály. Realizované experimenty rozšiřují povědomí o chování poddajných mazaných kontaktů a mohou tímto přispět ke zdokonalení konstrukčního návrhu zejména u ozubených kol z polymerních materiálů.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

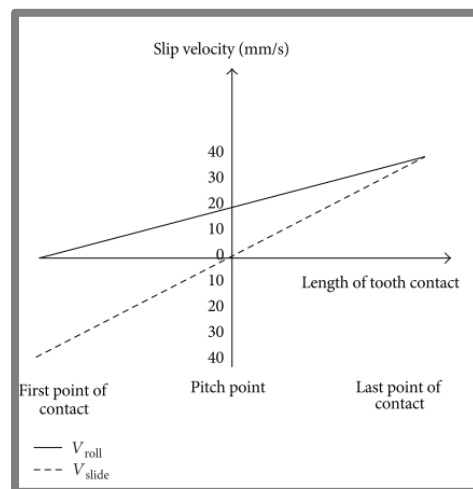
Posledních 20 let bylo možné pozorovat ve strojírenském průmyslu nejen zdokonalení procesu automatizace a logistiky, ale zejména snahu o maximalizaci efektivity a účinnosti strojních součástí či sestav. Příkladem může být v přítomný trend „downsizingu“ u spalovacích motorů v automobilovém průmyslu. Účinnost strojních součástí jako jsou např. ložiska, vačky nebo ozubená kola je mimo jiné závislá na podmínkách, ve kterých součásti pracují. Negativní vlivy jako je vysoká teplota, kontaminace maziva (nečistoty, prach ad.) nebo nedostatečné mazání, mohou zapříčinit poškození nebo trvalou destrukci součástí, respektive zařízení. V současnosti je díky možnostem optimalizace a simulací (FEM, CFD ad.) možné součásti jako jsou např. ozubená kola vystavovat zvýšeným provozním nárokům a maximálně tak využít jejich potenciál.

Se zvýšenými nároky na ozubení souvisejí rovněž podmínky jejich provozu, jako je mazání. Negativními následky nedostatečného mazání je zvýšení tření a teploty při dotyku zubů ozubených kol. Důsledkem těchto jevů je zvýšená míra opotřebení ozubení a tím i zkrácená doba technického života ozubeného kola. Proto se například na ocelová ozubená kola nanášejí povlaky, které mají tepelně-izolační, antikorozi, antioxidační vlastnosti a současně zvyšují hodnoty mechanických charakteristik ozubení.

Plastové ozubení představuje alternativu vůči konvenčnímu ocelovému ozubení s ohledem na dosažený vývoj v oblasti polymerních materiálů v posledních letech. Z hlediska procesu mazání mohou polymery pracovat jako mazané [1] i nemazané [2]. V případě mazaného kontaktu je úkolem maziva odvádět teplo vzniklé třením a udržovat stabilní tloušťku mazacího filmu h pro zajištění plného oddělení kontaktních povrchů. Přitom může být tloušťka filmu ovlivněna různými faktory, které se projevují při záběru reálného ozubení.



Obr. 1 Schéma záběru ozubení. 1 - kontaktní povrch (1), 2 - kontaktní povrch (2), záběrová přímka – zeleně, valivý bod – červeně



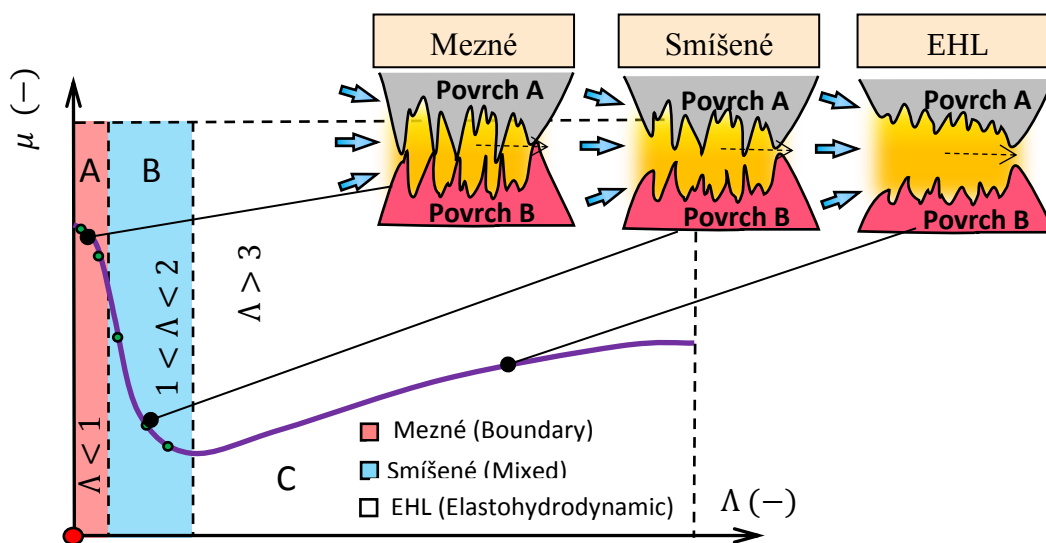
Obr. 2 Průběh rychlostí na dráze záběru ozubených kol. [1]

Při záběru zubů ozubených kol dochází z hlediska kinematických podmínek k valení se skluzem, kdy se poměr rychlostí valení/smýkání SRR mění v důsledku pohybu bodu dotyku po dráze záběru. Tato situace je schematicky ilustrována na Obr. 1. Změnu valivé a skluzové složky reprezentuje Obr. 2, kde jsou znázorněny rychlosti v průběhu záběrového cyklu při kontaktu ozubení, jak uvedl Dearn [1].

V případě rostoucí skluzové rychlosti se zvětšuje velikost smykových napětí v mazivu a tím dochází ke snížení tloušťky mazacího filmu [3], [4]. Kinematické podmínky přímo ovlivňují formování tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Rovněž při záběru ozubených kol vznikají silovým působením po velmi malé ploše vysoké kontaktní tlaky p s odkazem na teorii Hertzova kontaktu. To platí zejména pro ocelové ozubení, kde kontakt boku zubů lze považovat za teoreticky tuhý. Kontakt je v případě přímého ozubení liniový, popřípadě u šikmého ozubení široký eliptický.

Oproti tomu v případě plastového ozubení lze vlivem nízkých mechanických vlastností materiálu, zejména modulu pružnosti E je možné kontakt považovat za teoreticky poddajný, umožňující významné elastické deformace. Deformační charakteristiky polymerních materiálů jsou taktéž silně závislé na provozní teplotě a zatížení, což dokládají studie [6], [5], [7] [4], [8]. S rostoucím vlivem obou těchto parametrů dochází ke zvětšení kontaktní oblasti, jenž může vést k významné plastické deformaci, respektive až ke creepu materiálu. Proto je pro použití plastových ozubených kol ve výkonných aplikacích nezbytné zajistit jejich provoz v mazaném režimu.

Jednotlivé režimy mazání na Obr. 3 charakterizuje Stribekova křivka popisující závislost součinitele tření μ na základě parametru mazání Λ , který je závislý na drsnosti povrchu R_q a minimální tloušťce h_{min} . S hodnotami parametru mazání Λ jsou rovněž spojeny kinematické podmínky mezi kontaktními povrchy, jež jsou ve vzájemně interakci. Přechod mezi jednotlivými režimy mazání v poddajných kontaktech byl popsán v [9].

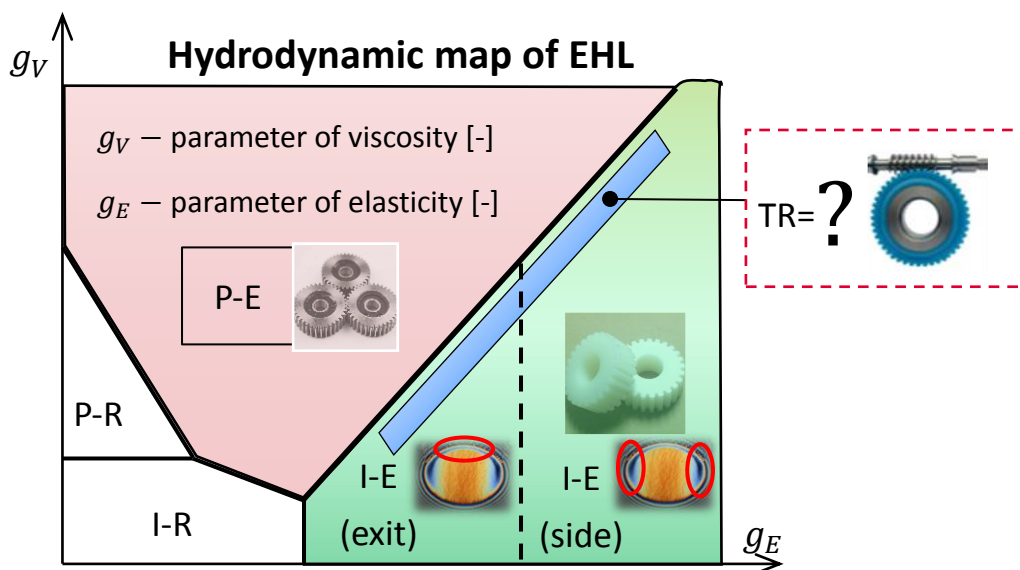


Obr. 3 Stribekova křivka-režimy mazání. A) mezné, B) smíšené, C) elastohydrodynamické

Dalším hlediskem je drsnost povrchů R_q , kdy v případě režimu mezního nebo smíšeného mazání je v kontaktu utvářen velmi tenký film, přičemž dochází ke vzájemnému úplnému nebo částečnému styku povrchových nerovností. Vývoj součinitele tření μ v jednotlivých režimech vyplývá ze změny poměru složek tření, které pochází z kontaktu mezi povrchovými nerovnostmi a hydrodynamického tření v kapalině.

Nicméně, u mazaných polymerů je snadou zajistit stav, kdy v kontaktu dochází k elastohydrodynamickému mazání (EHL), ve kterém jsou kontaktní povrchy vzájemně odděleny souvislou tloušťkou mazacího filmu [1], [11], [10]. Elastohydrodynamické mazání (EHL) je určitou formou hydrodynamického mazání, ve kterém má prioritní význam hydrodynamika kapaliny, elastické deformace kontaktních povrchů a změna dynamické viskozity η s tlakem p . Přitom je minimální tloušťka mazacího filmu h_{min} několikanásobně větší než průměrná výška povrchových nerovností R_q . Tento typ mazání je typický pro velmi zatížené nekonformní kontakty, kde se povrchy třecích (kontaktních) ploch dotýkají po velmi malé ploše, jako je tomu např. u ozubení, vaček nebo valivých elementů ložisek apod.

Výsledkem působení kontaktního tlaku je elastická deformace při současném zvýšení dynamické viskozity maziva v oblasti kontaktu. Obě tyto skutečnosti mají přímý vliv na tloušťku mazacího filmu h_{min} a h_{cent} , na tření μ a charakterizují režim EHL jako *piezoviscous-elastic (P-E)*, ten je označován také jako tzv. „hard“ EHL. Tento režim mazání EHL je častý u ocelových ložisek, vaček a ozubených kol [4].



Obr. 4 Hydrodynamická mapa režimů EHL. P-E piezoviscous elastic, I-E Isoviscous elastic, P-R piezoviscous rigid, I-R isoviscous rigid a přechodová oblast TR

Při elastohydrodynamickém mazání lze rozlišit 4 význačné režimy mazání podle závislosti na elastických deformacích a změny dynamické viskozity η s tlakem p . A to *isoviscous-rigid (I-R)*, *piezoviscous-rigid (P-R)*, *isoviscous-elastic (I-E)* a *piezoviscous-elastic (P-E)*. [11]

Režim *isoviscous-elastic* (*I-E*) neboli soft EHL nastává mezi nekonformními povrchy, když kontaktní tlak p je dostatečný pro vyvolání elastické deformace jednoho nebo obou povrchů, které jsou ve vzájemné interakci, ale přitom nízký a svou velikostí nedostatečný pro vyvolání změny dynamické viskozity η [12]. Tloušťka mazacího filmu h je proto méně závislá na viskozitě η a více závislá na elastických vlastnostech daných materiálů [12]. Elastické deformace jsou v tomto režimu EHL relativně velké vůči tloušťce mazacího filmu.

Pro účely této práce jsou podstatné pouze dva režimy a to *piezoviscous-elastic* (*P-E*) a *isoviscous-elastic* (*I-E*). Mezi těmito režimy leží přechodová oblast TR, která je předmětem zájmu v rámci řešení disertační práce. Hydrodynamická mapa EHL režimů pro kruhový kontakt je na Obr. 4. Na vodorovné a svislé ose jsou parametry elasticity g_E a viskozity g_V , které zavedl Johnson et. al [11]. Režimy EHL jsou funkcí geometrie, normálového zatížení, kluzné a valivé rychlosti [4].

Aktuální numerické a experimentální studie [13], [14], [4], [15], [16], [12], [17] jsou zaměřeny na mazaný kontakt ocelových a polymerních materiálů, který pracuje v oblasti isoviskozního režimu, respektive v přechodové oblasti isoviskozního a piezoviskozního režimu elastohydrodynamického mazání EHL. Přechodová oblast TR je podle výsledků, které byly získány dle [18] a [19] pracovním prostředem polymerů mazaných minerálním olejem. Tloušťka mazacího filmu byla v závislosti na kinematických podmínkách predikována ve studiích [3] a [20]. V případě experimentálních studií se často k vyhodnocení tloušťky mazacího filmu používá metoda fluorescence [12] a optické interferometrie [4], [21]. V experimentálních studiích [22], [13], [15], [16], [17], zabývajících se měřením součinitele tření bylo několikrát použito zařízení MTM (*Mini-traction machine*), které umožňuje díky své konstrukci zajištění požadovaného skluzu *SRR*, ke kterému běžně dochází při interakci součástí v reálných aplikacích. V případě tření donedávna neexistovaly analogické predikční vztahy jako v případě tloušťky filmu závislé na stejných parametrech než de Vicente [13] na základě porovnání experimentálních dat a numerického modelu tyto závislosti získal. Díky tomu bylo možné určit jednotlivé složky součinitele tření, které jsou v režimu EHL zastoupeny.

Marx et. al [4] ve svém článku (2016) uvádí, že dosud známé teorie soft EHL pro stanovení tloušťky mazacího filmu, byť existují, tak nebyly dosud důkladně experimentálně ověřeny. Přestože byla tloušťka mazacího filmu predikována ve studiích [20] a [23] nedostatek experimentálních výsledků [4], [15], [12] vede k potřebě analyzovat projevy chování soft kontaktu pracujícího za různých poměrů *SRR*, rychlosti, zatížení a teplot.

Stanovení předběžného cíle práce

Problematika soft EHL kontaktů stála v minulosti vedle hlavního proudu zabývajících se hard EHL kontakty. V současnosti existuje velmi nízký počet publikací, které by pojednávaly o formování tloušťky mazacího filmu a vývoji tření použitím experimentálních

metod v soft EHL kontaktech. Převážná část studií je zaměřena na numerické modely pro predikci tloušťky filmu a součinitele tření, které však dosud nebyly dostatečně experimentálně validovány. Jedním ze zásadních nedostatků současných experimentálních studií je použití mnohdy neadekvátních kombinací materiálů, které často nereprezentují vlastnosti materiálů plastových ozubených kol, byť reprezentují podmínky soft EHL kontaktu. Dalším nedostatkem mohou být podmínky experimentů, jenž jsou častokrát velmi vzdálené podmínkám, za nichž pracují ozubená kola. Navíc většina studií zabývajících se třením např. v závislosti na teplotě byla mnohdy realizována při absenci maziva, což na druhou stranu poskytuje určitý prostor pro budoucí srovnání. Uskutečněním experimentů za rozličných pracovních podmínek bude možné realizovat porovnání získaných dat s existujícími numerickými modely, které v problematice soft EHL kontaktů významně chybí. Na základě vlastních výsledků může být sestaven regresní model pro získání predikčních vztahů respektujících závislosti na pracovních podmínkách. Realizované experimenty rozšiřují povědomí o chování poddajných mazaných kontaktů a mohou tímto přispět ke zdokonalení konstrukčního návrhu zejména u ozubených kol z polymerních materiálů. Předběžným cílem práce je proto experimentální studium formování tloušťky mazacího a vývoje součinitele tření v soft EHL kontaktu za podmínek, které pomohou objasnit tribologické chování polymerních materiálů u ozubených soukolí.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Aktuální kapitola pojednává o přehledu současného stavu poznání v problematice mazání poddajných kontaktů. Jedním z ukazatelů, které charakterizují poddajný kontakt jsou nízké hodnoty mechanických vlastností materiálů především modulu pružnosti dvojice povrchů, mezi nimiž dochází ke vzájemné interakci. Následkem vzájemného kontaktu dochází k elastické deformaci kontaktních povrchů a ke změnám rozložení tloušťky mazacího filmu.

V důsledku toho je rovněž ovlivněn vývoj součinitele tření při průchodu maziva kontaktem. Obě veličiny jsou zpravidla ovlivněny použitými materiály, geometrií kontaktních povrchů, zatížením, unášivou a skluzovou rychlostí a viskozitou přítomného maziva. Rozbor uvedených studií popisuje dosud nedostatečně prozkoumanou oblast mazání poddajných (soft) kontaktů s odkazem jejich použití zejména ve strojírenských aplikacích jako jsou ložiska, vačky nebo ozubená kola.

3.1 Studie zaměřené na formování mazacího filmu v soft EHL kontaktech

Kapitola pojednává o současném stavu poznání v oblasti soft EHL mazání s uvedením numerických a experimentálních studií. Závislost tloušťky mazacího filmu na různých parametrech jako je zatížení, unášivá rychlost nebo skluz je popsána numerickými modely a experimentálními daty. Veškeré studie byly vybrány s ohledem na zaměření disertační práce a jsou uvedeny dle historického vývoje problematiky soft EHL kontaktů.

3.1.1 Numerické studie zaměřené na formování mazacího filmu

Numerické studie představují převážnou část současného stavu poznání v oblasti soft EHL, která byla oproti hard EHL kontaktům v minulosti často opomíjena. Tato skutečnost souvisí s vývojem polymerních materiálů a možností jejich uplatnění v reálných strojírenských aplikacích v posledních 50 letech. Výchozím pokladem numerických studií jsou zpravidla Reynoldsovy rovnice, rovnice elasticity a modely autorů sahajících historicky až do poloviny 20. století, díky kterým je možné predikovat rozložení mazacího filmu při průtoku maziva kontaktem

[11] **JOHNSON, K.** *Regimes of elastohydrodynamic lubrication*. Journal of Mechanical Engineering Science, 1970.

Předmětem studie (1970) je rozšíření dosavadních poznatků (1970) v oblasti elastohydrodynamického mazání u poddajných kontaktů. Johnson svou prací navazuje na publikace Greenwooda [18] a Archarda [24], jejichž numerické studie byly zaměřeny na stanovení parametrů popisujících jednotlivé EHL režimy. Dva vlivy jsou u elastohydrodynamicky mazaných kontaktech dominantní: nárůst viskozity s tlakem a

elastická deformace kontaktních povrchů. Oba jevy jsou typické zejména pro ocelové (*hard*) EHL kontakty, které běžně pracují v režimu *piezoviscous elastic*.

Cílem autora popis individuálních EHL režimů na základě parametrů, které separátně popisují vliv viskozity a vliv elastických deformací na tloušťku mazacího filmu h v těchto kontaktech. Autor se ve studii [11] dále zaměřuje na modelování tlakového průběhu v mazivu, zejména ve výstupní oblasti, kde u hard kontaktů dochází k typickému tlakovému hrotu v důsledku nárůstu viskozity maziva. Přínosem studie je vytvoření hydrodynamických map, které pomocí definovaných parametrů [18], [24], [26], [27], [25] vymezují hranice mezi jednotlivými EHL režimy a popisují jejich chování v přechodových stavech.

Výsledky:

Výsledkem numerické studie je zjištění závislosti tloušťky mazacího filmu na změně viskozity maziva a vlivu elastické deformace kontaktních povrchů. V práci byly porovnány vztahy, které byly predikovány ve studiích [18], [24], [26], [27], [25]. S ohledem na separaci obou vlivů, byl použit model, který navrhl Theyse [27] definicí parametru viskozity g_1 (taktéž označováno g_V) a parametru elasticity g_3 (taktéž označováno g_E).

Výpočetní vztahy jsou uvedeny v rovnicích (2-1) a (2-2) níže. Na základě parametrů g_1 a g_3 byla sestavena mapa EHL, která vymezuje hranice mezi jednotlivými režimy. Johnson uvádí, že v případě nízkých hodnot obou parametrů je vliv viskozity maziva a elasticity materiálu zanedbatelný [11].

Parametr viskozity g_1 :

$$g_V = g_1 = \frac{\bar{G} \cdot \bar{W}^3}{\bar{U}^2} = \left(\frac{\alpha^2 \cdot W^3}{\eta_0 \cdot U \cdot R'^2} \right)^{1/2} \quad (2-1)$$

Parametr elasticity g_3 :

$$g_E = g_3 = \frac{\bar{W}^{8/3}}{\bar{U}^2} = \left(\frac{W^2}{\eta_0 \cdot U \cdot E' \cdot R'} \right)^{1/2} \quad (2-2)$$

Archardův parametr (parametr prostředí) g_4 :

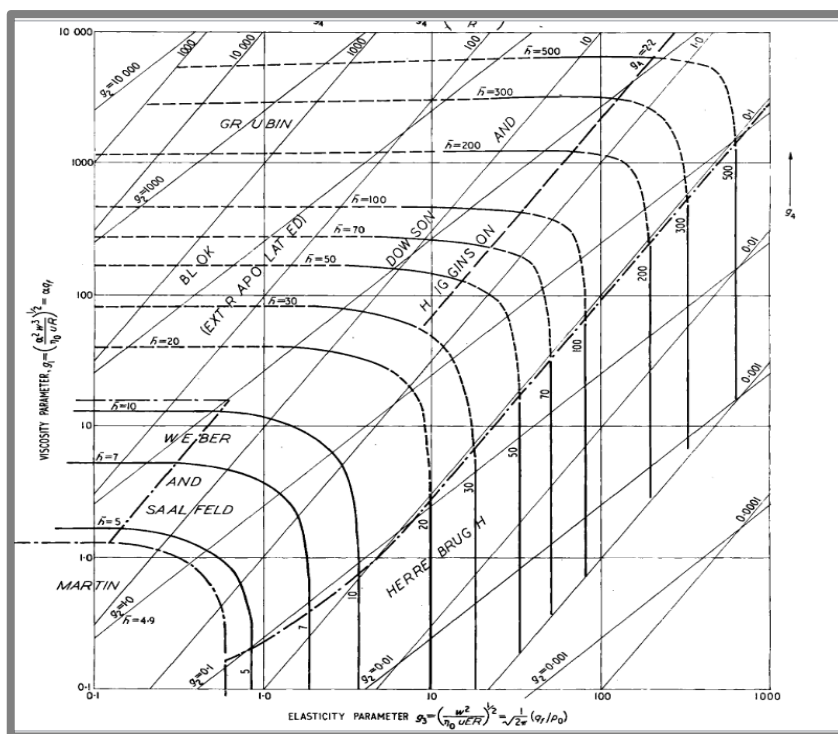
$$g_4 = \left(\frac{\alpha^4 \cdot U \cdot \eta_0 \cdot E'^3}{R'} \right)^{1/4} \quad (2-3)$$

Kde:	α – tlakově vizkozí koeficient	(1/GPa)
	W – zatížení	(N)
	η_0 – dynamická viskozita maziva	(Pa · s)
	U – unášivá rychlost	(m/s)
	R' – redukovaný poloměr	(mm)
	E' – redukovaný modul pružnosti	(mm)

V EHL mapě byl rovněž použit parametr g_4 dle rovnice (2-3), jež charakterizuje pracovní pásmo provozu kontaktu, jak navrhl Archard [24]. Johnson uvádí, že zejména při vysokých hodnotách g_1 a g_3 odpovídá režim výsledkům Grubina ($g_1 > 100$), potom je

aplikován systému výpočtu, který navrhl Greenwood [18]. Pro režim *isoviscous elastic* Johnson uvádí interval $0,1 < g_4 < 2,2$, který respektuje modely řešení publikované Herreburgem [28] a Dowson & Higginson [29]. Zároveň se jedná oblast aplikovatelnou na polymery mazané minerálním olejem [11].

Změna bezrozměrné tloušťky filmu je v uvedeném intervalu dobře patrná z Obr. 5, kde je za nízkých hodnot $g_4 \sim 0,1$ majoritní závislost pouze na parametru elasticity g_3 . S rostoucí hodnotou g_4 naopak dochází dle Obr. 5 pouze k závislosti na parametru viskozity g_1 . Pro hodnoty $g_4 > 2,2$ dochází v kontaktu k nárustu viskozity doprovázené náhlou tlakovou změnou (tlakovým hrotem) při výstupu maziva z kontaktu [11]. Johnson dále uvádí, že k výskytu tlakového hrotu dochází až tehdy, kdy není tloušťka filmu výrazně závislá na elasticitě obou kontaktních těles [11].



Obr. 5 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu isoviscous-elastic na základě rovnic režimů. [11]

[20] **HAMROCK, B. J., D. DOWSON.** *Minimum film thickness in elliptical contacts for different regimes of fluid-film lubrication.* NASA technical paper, 1978

Uvedená studie (1978) představuje jeden z hlavních stavebních kamenů současného stavu poznání v oblasti soft EHL mazání, přitom je sama založena na prvních poznatcích EHL dle [28], [1], [30], [26]. Dvojice autorů publikovala nespočet článků experimentálně a numericky popisující formování tloušťky mazacího filmu nejdříve v hard [31], [32], a později v soft [20], [33] EHL kontaktech. Autoři se ve studii zabývají distribucí maziva za izotermních podmínek v eliptických a bodových kontaktech s ohledem na pracovní podmínky jako jsou unášivá rychlost U , zatížení W , elipticita kontaktu k a projevy tlakově-viskózního koeficientu α .

Tlakově vizkozni koeficient α má zejména v oblasti hard EHL (piezo-vizkozni režim) dominantní vliv, tím že ovlivňuje formování tloušťky filmu, v důsledku působícího zatížení, respektive kontaktního tlaku na malé kontaktní ploše vzniklé následkem elastické deformace kontaktu. Jelikož je viskozita maziva kromě teploty závislá také na působícím tlaku dochází tak v mazivu zvýšení viskozity a tím i tloušťky filmu v kontaktu. V oblasti soft EHL kontaktu (iso-viskozni režim) by neměl mít α výrazný vliv na změnu distribuce maziva [11] s odkazem na velikost kontaktní oblasti oproti hard EHL. Závislost na pracovních podmínkách je popsána mocninnými exponenty bezrozměrných parametrů $\bar{U}, \bar{W}, \bar{G}$, které dle EHL teorie udávají rozložení centrální a minimální tloušťky mazacího filmu v kontaktu $h = f(k, \bar{U}, \bar{W}, \bar{G})$.

Tab. 1 Bezrozměrné parametry $\bar{U}, \bar{W}, \bar{G}$

Bezrozměrný parametr rychlosti	$\bar{U} = \frac{U \cdot \eta}{E' \cdot R'}$	(2-4)
Bezrozměrný parametr zatížení	$\bar{W} = \frac{W}{E' \cdot R'^2}$	(2-5)
Bezrozměrný parametr materiálu	$\bar{G} = E' \cdot \alpha$	(2-6)

Výsledky:

Výsledkem numerických experimentů je zjištění vlivu pracovních podmínek na mazací proces v soft kontaktu na základě dosavadních poznatků v problematice EHL [28], [24], [30], [26]. Prvním z výsledků studie je stanovení závislosti tloušťky filmu h na parametru unášivé rychlosti $\bar{U}$ pomocí metody nejmenších čtverců. Bylo zjištěno za vyšších rychlostí dochází na vstupu do kontaktu k vyššímu tlaku, než je to mu v případě nízkých rychlostí. Navíc oproti hard EHL nedošlo k vytvoření tlakového hrotu na výstupu z kontaktu a nedochází tak k tlakově-viskóznímu efektu v kapalině, který v rovnicích zastupuje tlakově-viskozni koeficient α . Proto byl bezrozměrný parametr materiálu $\bar{G}$ v rovnici pro predikce tloušťky vynechán, což odpovídá charakteru isoviskózního režimu (soft) EHL.

Uvedené jevy jsou spojeny nízkými hodnotami mechanických vlastností polymerních materiálů, zejména modulu pružnosti v tahu E . Vliv parametru $\bar{U}$ byl stanoven dle studie jako dominantní především v případě minimální tloušťky filmu, podobně jako u hard EHL kontaktů. Druhým z výsledků studie je stanovení závislosti tloušťky filmu h na parametru zatížení $\bar{W}$. Hodnoty parametru $\bar{W}$ se lišily až o jeden řád, přitom byla zaznamenaná výrazná změna v tlakovém profilu a nevýrazná změna profilu tloušťky filmu. Dle získaných výsledků je popsán vliv parametru elipticity k na minimální a centrální tloušťku. Zde dochází s rostoucí hodnotou k v obou případech ke zvýšení tloušťky filmu, avšak výsledky numerického řešení se odlišují od tehdejší EHL teorie [28], [24], [30], [26].

Minimální tloušťka pro soft EHL:

$$h_{min} = 7,43 \cdot (1 - e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,21} \cdot R' \quad (2-7)$$

Centrální tloušťka pro soft EHL:

$$h_{cent} = 7,32 \cdot (1 - e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R' \quad (2-8)$$

Minimální tloušťka pro hard EHL:

$$h_{min} = 3,63 \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,68} \cdot \bar{W}^{-0,073} \cdot \bar{G}^{0,49} \cdot R' \quad (2-9)$$

Centrální tloušťka pro hard EHL:

$$h_{cent} = 2,69 \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,67} \cdot \bar{W}^{-0,067} \cdot \bar{G}^{0,53} \cdot R' \quad (2-10)$$

Predikční vztahy pro určení minimální a centrální tloušťky filmu v soft EHL kontaktu jsou uvedeny v rovnici (2-7) a (2-8), kde lze pozorovat velmi blízké závislosti exponentů $k, \bar{U}, \bar{W}$. Pro porovnání jsou uvedeny rovnice (2-9) a (2-10) pro hard EHL kontakty, které publikoval Hamrock & Dowson ve studii [32].

[3] **HOOKE, C J and J P O'DONOGHUE.** *Elastohydrodynamic lubrication of soft highly deformed contacts.* Journal of Mechanical Engineering Science, 1972.

[34] **HOOKE, C J.** *Calculation of Clearances in soft point contacts.* Journal of Tribology, 1988.

[23] **HOOKE, C. J.** *The Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Point Contacts Operating in the Isoviscous Region.* Journal of Engineering Tribology, 1995.

Velký podíl pro současný stav poznání na poli soft EHL kontaktů se zasloužil Hooke, který se již na začátku 70. let zabýval chováním a numerickým modelováním mazaných soft kontaktů. Navázal tak na teorii a dosavadní numerické studie, které publikoval Blok [35], Herrebugh [28], Dowson & Higginson [29] a další [10]. V první uvedené studii [3] Hooke sumarizuje dosavadní výsledky v oblasti soft EHL, následně je numerickým přístupem popsáno modelování distribuce tlaku a tloušťky mazacího filmu v těchto kontaktech.

V druhé [34] a třetí [23] studii jsou na základě známých poznatků [11], [18], [28], [1] a numerického modelu vytvořeny predikční vztahy pro výpočet minimální a centrální tloušťky filmu. V numerickém modelu jsou zohledněny pracovní podmínky prostředí na základě závislosti na parametrech tlaku P a rychlosti S , které zavedl Greenwood [18] a dále pak na bezrozměrných parametrech $k, \bar{U}, \bar{W}$ popisujících vliv elipticity kontaktu, unášivé rychlosti, zatížení a viskozity maziva.

V třetí studii [23] Hooke blíže popisuje přechody mezi jednotlivými EHL režimy, zvláště mezi *isoviscous-rigid* a *isoviscous-elastic*. V obou režimech nedochází k piezoviskóznímu efektu v důsledku změn tlaku na vstupu a výstupu maziva z kontaktu, jako je tomu v režimech *piezo-viscous elastic* a *piezo-viscous rigid*. Ve studii je rovněž popsána relokace minimální tloušťky filmu mezi výstupní oblastí a bočními laloky na stranách kontaktu v závislosti na pracovních podmínkách a na změně mezi jednotlivými režimy.

Výsledky:

Uvedené studie shrnují dosavadní poznatky o formování tloušťky filmu v soft EHL kontaktech. Za tímto účelem byly pomocí numerického modelu určeny závislosti na pracovních podmínkách a tvaru kontaktu podobně jako provedl Hamrock&Downson [20]. Výsledkem je určení predikčních vztahů pro výpočet centrální a minimální tloušťky filmu v soft EHL kontaktech [34], [23].

V případě rozložení tlaku byl ve výstupní oblasti kontaktu pozorován parabolický průběh stejně jako v případě Hertzova suchého kontaktu. Na základě numerického řešení rozložení tlaku je možné určit distribuci mazacího filmu v různých typech kontaktu. Získané konstanty, které určují rozložení tlaku jsou uvedeny v [3].

Minimální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Hooka:

$$h_{min} = 2,83 \cdot \bar{U}^{0,6} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R' \quad (2-11)$$

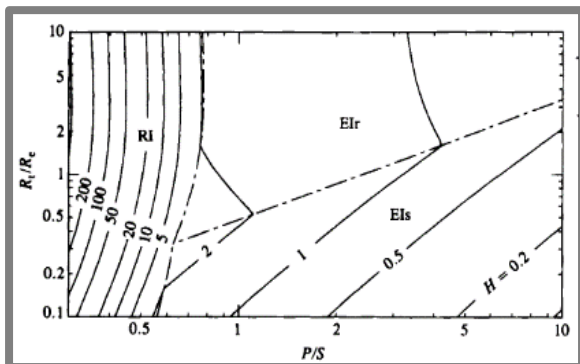
Centrální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Hooka:

$$h_{cent} = 3,56 \cdot \bar{U}^{0,6} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R' \quad (2-12)$$

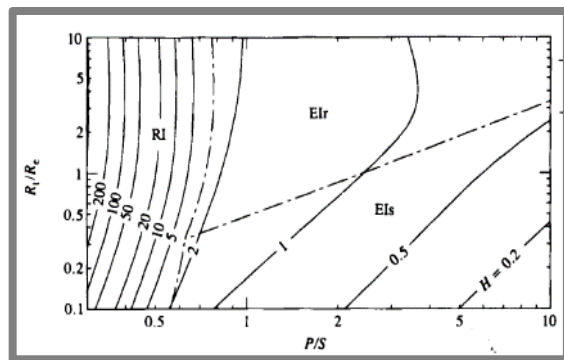
Predikční vztahy pro určení tloušťky filmu v kruhovém kontaktu jsou uvedeny v rovnici (2-11) a (2-12), avšak v porovnání s vztahy, které publikoval Hamrock&Downson [20] se liší. Dle predikce Hooka je závislost exponentu unášivé rychlosti $\bar{U}$ rovna hodnotě 0,6 v porovnání s hodnotou 0,65 dle Hamrock&Downson [20]. Z toho vyplývá skutečnost i vyšší predikované tloušťky filmu v případě modelu, který publikoval Hooke [34]. Velikost exponentu parametru zatížení $\bar{W}$ je v rovnici pro výpočet centrální h_c i minimální tloušťky h_{min} nižší, než je tomu v případě [20]. Vliv bezrozměrného parametru materiálu $\bar{G}$ není v rovnicích pro výpočet tloušťky dle Hooka [34] rovněž zohledněn.

Na základě numerické studie [23] byly určeny vztahy mezi hranicemi režimů *isoviscous rigid* a *isoviscous elastic*. Dále byl popsán vliv parametru elipticity k na distribuci maziva v úzkém eliptickém ($k < 1$), širokém eliptickém ($k > 1$) a kruhovém kontaktu ($k = 1$). Přechod z režimu *isoviscous-rigid* do *isoviscous elastic* byl zaznamenán za nízkých hodnot parametru rychlosti S .

V režimu *isoviscous elastic* je v důsledku nízkých hodnot parametru P a S oblast minimální tloušťky filmu lokalizována na výstupu z kontaktu, zatímco s rostoucí hodnotou P a S dochází k přesunu do oblasti bočních laloků na stranách kontaktu. Tento přechod byl pozorován v experimentální studii Marxe [4] při rostoucí hodnotě zatížení W .



Obr. 7 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu *isoviscous-elastic* na základě rovnic režimů. [11]



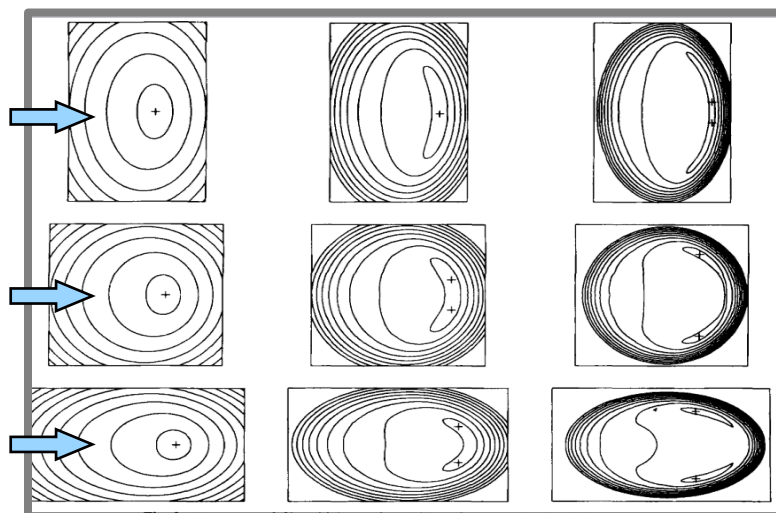
Obr. 6 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu *isoviscous-elastic* na základě výsledků Hooka. [23]

Druhou hranicí je oblast mezi režimy *isoviscous elastic* a *piezoviscous elastic*, která primárně závisí na parametru rychlosti S , protože se tloušťka utváří již na vstupu do kontaktu, a proto nezávisí na Hertzově maximálním tlaku. V případě *úzkých eliptických kontaktů* nedochází k přechodu mezi *piezoviscous elastic rear* a *isoviscous elastic rear*, ale rovnou k přechodu *isoviscous elastic side*, respektive *piezoviscous elastic rear*.

Jednotlivé režimy lze díky parametru elasticity P/S , kdy za nízkých hodnot kontakt pracuje v režimu *isoviscous rigid* viz Obr. 7, kde je minimální tloušťka silně závislá na změně zatížení W . Naopak za vyšších hodnot P/S je v režimech *elastic* patrná nezávislost na změně zatížení. Za nízkých hodnot parametru elipticity k dochází k přechodu do režimu *elastic* s minimální tloušťkou v bočních lalocích. S rostoucí hodnotou elipticity k je popsán přechod oblasti minimální tloušťky h_{min} na výstup kontaktu.

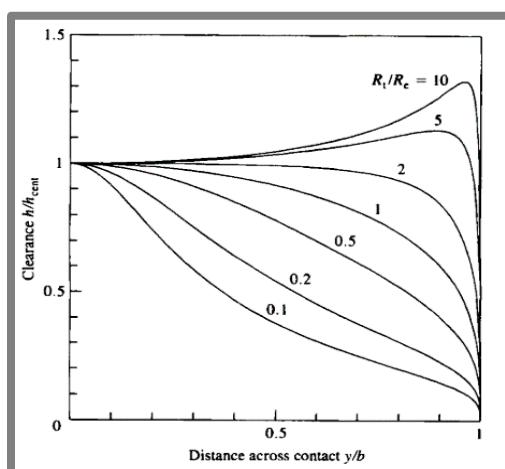
Na Obr. 8 jsou zobrazeny kontury znázorňující formování tloušťky filmu pro eliptické a kruhové kontakty při různých poměrech P/S . Již při nejnižší hodnotě poměru dochází k posunu oblasti minimální tloušťky h_{min} k výstupu kontaktu. Rovněž je dle Obr. 8 patrné, že s rostoucím poměrem ($P/S = 1,14$) dochází k vytvoření podkovitého tvaru filmu a minimální tloušťka je lokalizována v podkovitém tvaru ve výstupní části při elipticitě $k = 2$. V případě kruhového ($k = 1$) a úzkého eliptického kontaktu ($k = 0,5$) je minimální tloušťka lokalizována v bočních lalocích.

V obou případech je tento trend patrný při dalším zvýšení poměru P/S . Navíc v případě elipticity $k = 0,5$ je zřejmý posun oblasti směrem ke středu kontaktu a zároveň stav, kdy s rostoucí hodnotou P/S dochází k částečnému zániku podkovitého tvaru pouze s přítomností segmentů bočních laloků. Toto chování je typické pro vysoce zatížené kontakty při působení unášivé rychlosti podél hlavní osy [23]. Hooke uvádí, že pro hodnoty $P/S \geq 1$ nastává minimální tloušťka na bočních lalocích v kontaktech, kde elipticita $k \leq 1$.



Obr. 8 Kontury tloušťky filmu pro $k = 2; 1$ a $0,5$ a $P/S = 0,78; 1,14$ a $1,67$. Mazivo vstupuje do kontaktu z levé části snímku (viz šipka). [23]

V poslední části studie je popsána závislost změny na bezrozměrné tloušťce H na parametru elipticity k při průchodu maziva kontaktem u vysoce zatížených bodových kontaktů, což popisuje Obr. 9. Pro elipticitu $k \leq 2$ je dle Obr. 9 patrný trvalý pokles tloušťky směrem od středu kontaktu k bočním lalokům. Pro hodnoty $k > 2$ byl zaznamenán krátkodobý nárůst tloušťky před dosažením oblasti bočních laloků, což je pozorovatelné na Obr. 9.



Obr. 9 Změny tloušťky filmu ve vysoce zatížených isoviskozních bodových kontaktech. [23]

Dle porovnání hydrodynamické mapy dle [11] na Obr. 7 a mapy získané Hookem na Obr. 6 je možné pozorovat absenci ostrých hranic na přechodů režimů. Současně je z Obr. 6 pozorovatelný posun hranic mezi *isoviscous-elastic* a *piezoviscous elastic* do vyšších hodnot k při nižších hodnotách poměru P/S .

Na základě uvedených výsledků je možné stanovit tloušťku filmu v eliptických a kruhových soft EHL kontaktech pomocí převodu parametrů P a S na parametry $\bar{U}$ a $\bar{W}$. Stanovení tloušťky filmu je provedeno podobně jako v kruhových kontaktech, které popisují rovnice (2-11) a (2-12). Uvedené poznatky rozšiřují povědomí o formování tloušťky filmu v různých typech poddajných kontaktů a vytváří tak podobně jako Hamrock & Dowson [20] možnost pro porovnání numerického modelu s experimentálně získanými výsledky.

[36] ESFAHANIAN, M. AND B. J. HAMROCK. *Fluid-film lubrication regimes revisited*. Tribology transactions, 1991.

Uvedená numerická studie (1991) se zabývá chováním kontaktu v jednotlivých EHL režimech. Za tímto účelem je pro každý z režimů stanovena rovnice pro výpočet minimální tloušťky filmu h_{min} . Práce svým zaměřením rozšiřuje poznatky o soft a hard EHL režimech, které publikoval Johnson [11], Hamrock&Dowson [33], Bergner [37] a další.

Esfahanian za začátku studie uvádí vztahy používané při výpočtech tloušťky filmu $h = f(H, k, \bar{U}, \bar{W}, \bar{G})$ jenž vyjadřují závislosti na pracovních podmínkách v EHL kontaktu. Kvůli separaci dvojice hlavních vlivů podílejících se formování tloušťky filmu v EHL kontaktech: vlivu změny dynamické viskozity a vlivu elastické deformace byly namísto výše uvedených závislostí použity parametry viskozity g_V a elasticity g_E , podobně jako v publikaci Johnsona [11]. Tím došlo k redukci parametrů na $h = f(\hat{H}, k, g_V, g_E)$. Dále jsou závislosti popsány rovnicemi (2-13), (2-14) a (2-15).

Bezrozměrné tloušťka filmu H :

$$\bar{H} = \frac{h}{R_x} \quad (2-13)$$

Parametr bezrozměrné tloušťky filmu $\hat{H}$:

$$\hat{H} = H \cdot \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right)^2 \quad (2-14)$$

Parametr elipticity k :

$$k = \frac{R_y}{R_x} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{2/\pi} \quad (2-15)$$

Výsledky:

Studie rozšiřuje dosavadní poznatky v oblasti mazání EHL o popis zvilosti na parametrech viskozity g_V a elasticity g_E . Na základě uvedených parametrů jsou sestaveny hydrodynamické mapy pro kruhové a eliptické kontakty, které graficky znázorňují jednotlivé režimy EHL spolu s vyznačením jejich přechodových oblastí, podobně jako provedl Johnson [11]. Výsledky umožní predikovat pracovní režim EHL na základě vstupních podmínek, ve kterých je kontakt provozován.

V práci jsou popsány charakteristické projevy chování a odlišnosti ve všech režimech EHL. Takovéto vlivy se podílejí na utváření mazacího filmu. Tato skutečnost je sumarizována rovnicí tloušťky filmu, která je v každém z režimů odlišná v závislosti na $h = f(\hat{H}, k, g_V, g_E)$. Pro řešení disertační práce jsou podstatné zejména *isoviscous elastic* a *piezoviscous elastic* s ohledem na podíl vlivu elastických deformací kontaktu na formování mazacího filmu. Závislosti na režimech jsou popsány rovnicemi (2-16) a (2-17) níže.

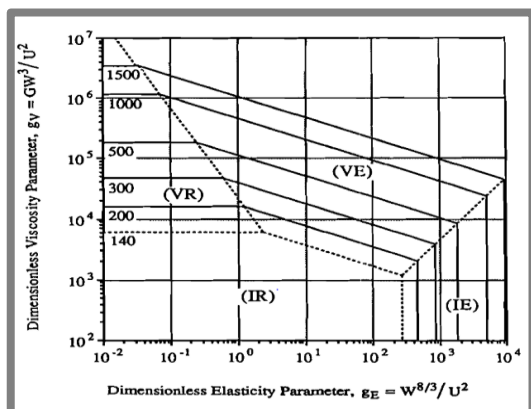
V *isoviscous elastic* režimu (soft EHL) dochází k výrazným elastickým deformacím kontaktních povrchů díky kterým je tloušťka filmu h významně ovlivněna. Přesto nedochází k viskóznímu efektu při zvýšení kontaktního tlaku p . Tlak v kontaktu je sice dostatečný na vyvolání elastické deformace, ale svou velikostí nedostatečný pro vyvolání změny dynamické viskozity maziva η . S tím je spojen i poloměr kontaktní oblasti a respektive velikost kontaktní oblasti, která je v případě *isoviscous elastic* násobně větší než v režimu *piezoviscous elastic*. Tato skutečnost reflektuje výrazně nižší hodnoty mechanických vlastností, zejména modulu pružnosti E kontaktních povrchů s ohledem na charakter režimu *isoviscous elastic*.

Isoviscous elastic:

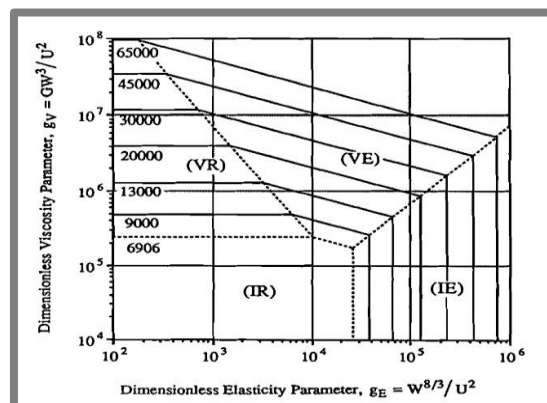
$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 8,7 \cdot (g_E)^{0,67} \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \quad (2-16)$$

Piezoviscous elastic:

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 3,42 \cdot g_E^{0,17} \cdot g_V^{0,49} \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,684 \cdot k}) \quad (2-17)$$



Obr. 11 Hydrodynamická mapa pro kruhový kontakt. $k = 1$. [36]



Obr. 10 Hydrodynamická mapa pro široký eliptický kontakt. $k = 6$. [36]

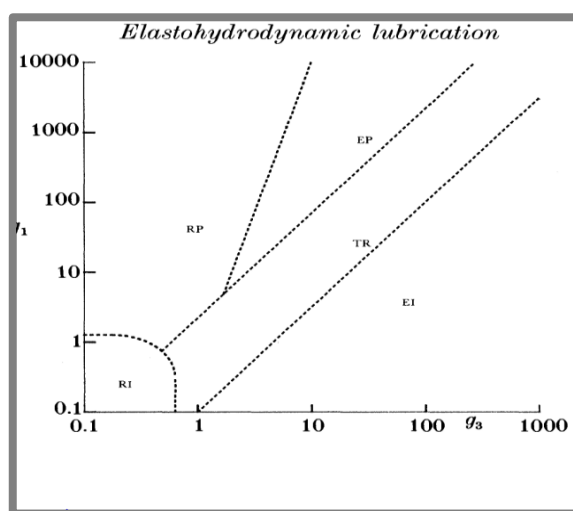
Režim *piezoviscous elastic* je charakteristický pro provoz hard EHL kontaktů. V důsledku kontaktního tlaku dochází k elastické deformaci kontaktu, která ovlivňuje formování tloušťky filmu. Oproti režimu *isoviscous elastic* je kontaktní tlak p dostatečný na vyvolání změny dynamické viskozity maziva η .

V práci byl dále stanoven přechod mezi režimy *piezoviscous rigid* a *piezoviscous elastic* v závislosti na rostoucím zvýšení zatížení, které způsobuje nárůst elastické deformace, kterou v režimu *piezoviscous elastic* není možné zanedbat. Ve starších hydrodynamických mapách nebyl tento přechod zaznamenán. V případě kruhového kontaktu lze v mapě na Obr. 11 pozorovat posunutí hranice režimu *isoviscous elastic* s rostoucí hodnotou parametru g_E oproti úzkému eliptickému kontaktu. V širokém eliptickém kontaktu je tato hranice dále posunuta doprava, jak ukazuje Obr. 10. Trend vývoje parametru g_V je podobný jako u g_E , kdy dochází k jeho zvýšení následkem rostoucího parametru elipticity k .

[38] MYERS, T. G., R. W. HALL, M. D. SAVAGE AND P. H. GASKELL. *The transition region of elastohydrodynamic lubrication*. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1991.

Numerická studie (1991) se zabývá rozložením tloušťky mazacího filmu a tlaku v přechodové oblasti (TR) mezi režimy *isoviscous elastic* a *piezoviscous elastic* v liniovém kontaktu. Práce svým zaměřením rozšiřuje dosavadní poznatky, které publikoval Herrebrugh [28], Johnson [11], Hooke [3], [19] a Hall [39]. Pro určení tloušťky filmu a tlaku je použita Chelbyslev metoda, která umožňuje přesnou reprezentaci průběhu obou veličin při průchodu maziva kontaktem.

Průběh tlaku v kontaktní oblasti je porovnán se suchým kontaktem dle Hertzova modelu. To umožňuje validovat výsledky numerického modelu a popsat jeho chování v kontrastu se známou teorií v souladu s předpokladem Hertzova rozložení tlaku, který uvedl Hooke [3]. Přechodová oblast (TR) $g_4 \in \langle 0,1; 2,2 \rangle$ představuje pracovní prostor polymerů mazaných minerálními oleji, jak uvedl Johnson [11]. Přitom v TR oblasti dochází k vytvoření tlakového hrotu na výstupu kontaktu, který je charakteristický zejména pro hard EHL kontakty. Experimentálně však nebyla dosud TR oblast dostatečně popsána s odkazem na experimentální studii publikovanou Marxem [4].

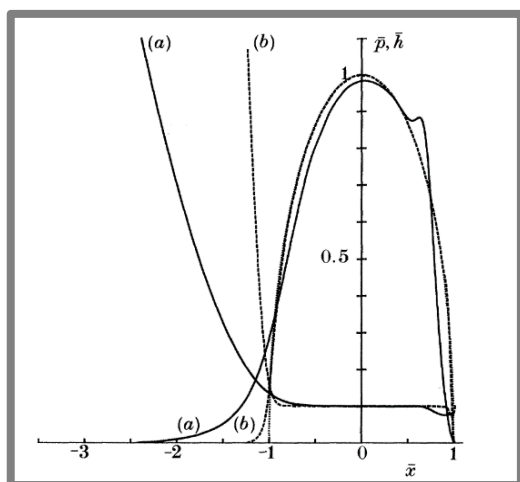


Obr. 12 Hydrodynamická mapa pro kruhový kontakt.
 $k = 1$. [38]

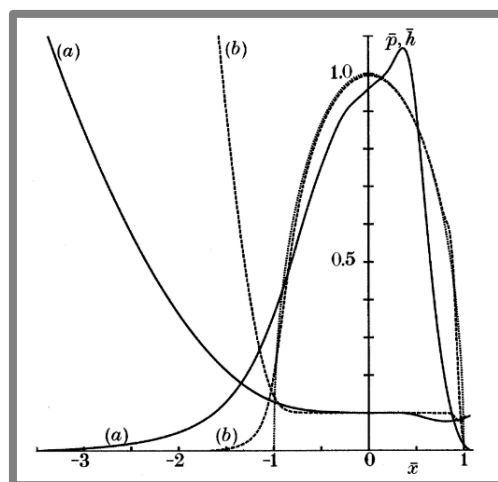
Výsledky:

Výstupem studie je numerický model popisující vývoj tloušťky filmu H_{min} a tlaku p v liniovém kontaktu pracujícího v přechodové oblasti TR mezi režimem *isoviscous elastic* a *piezoviscous elastic*. Průběh tloušťky filmu a tlaku je zobrazen na Obr. 13 a Obr. 14 v závislosti na změně parametru elasticity g_3 a Archardově parametru g_4 .

Z vývoje tloušťky filmu a tlaku je patrné, že s rostoucí hodnotou g_3 dochází k narovnání profilu tloušťky filmu ve výstupní oblasti a současněmu posunutí oblasti minimální tloušťky blíže k výstupní oblasti kontaktu. Z hlediska rozložení tlaku je možné pozorovat ve všech případech odchylky průběhu tlaku zejména ve vstupní oblasti. S rostoucí hodnotou g_3 průběh tlaků blíže koresponduje s Hertzovým profilem. Současně dochází k redukci šířky tlakové hrotu při průchodu maziva kontaktem, jak již predikoval Archard [24]. Avšak při kontaktní hodnotě g_3 dochází k nárůstu výšky tlakového hrotu v závislosti na rostoucím parametru g_4 .



Obr. 14 Rozložení tloušťky filmu a tlaku v kontaktu. a) $g_3 = 10,1, g_4 = 3,2$; b) $g_3 = 70,0, g_4 = 1,7$. [38]



Obr. 13 Rozložení tloušťky filmu a tlaku v kontaktu. a) $g_3 = 5,0, g_4 = 4,0$; b) $g_3 = 30,0, g_4 = 2,3$. [38]

Myers uvádí výsledky numerického přístupu v Obr. 15, kde je přechodová oblast TR vymezena intervalem g_4 v závislosti na parametru viskozity g_1 a parametru elasticity g_3 . Autor zároveň uvádí, že bezrozměrná tloušťka filmu H_{min} neklesla pod hodnotu 4,9, což odpovídá výsledkům, které uvedl Martin pro režim *isoviscous rigid*.

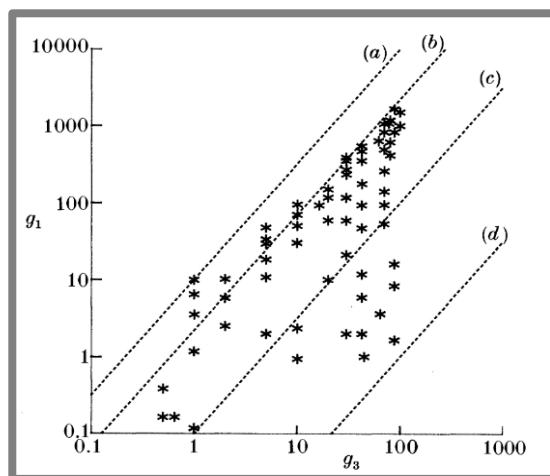
Na základě numerické simulace vznikly vztahy (2-17) a (2-18) pro výpočet bezrozměrné tloušťky H_{min} filmu pro rozsah hodnot $g_3 \in \langle 1; 100 \rangle$. V porovnání s výsledky, které publikoval Hooke a O'Donogue [3] a současné studie dochází ke shodě v intervalu $20 < g_3 < 100$. Současně byla dle numerického řešení získána lineární závislost parametru g_3 , a H_{min} na parametru g_4 . Výsledky získané Myersem pro režim EI jsou s rostoucí hodnotou g_4 blízké výsledkům, které získal Blok [35] a Greenwood [18] pro režim RI.

Bezrozměrná tloušťka filmu $H_{min} \in (1 < g_3 \leq 15)$:

$$H_{min} = 0,383 \cdot g_1 \cdot g_3^{-0,370} + 4,465 \cdot g_3^{-0,667} \quad (2-18)$$

Bezrozměrná tloušťka filmu $H_{min} \in (15 < g_3 \leq 100)$:

$$H_{min} = 0,853 \cdot g_1 \cdot g_3^{-0,664} + 3,410 \cdot g_3^{-0,770} \quad (2-19)$$



Obr. 15 Výsledky numerické řešení dle Myerse. a) $g_4 = 10$; b) $g_4 = 2,2$; c) $g_4 = 0,1$; d) $g_4 = 0,001$; [38]

[40] HOOKE, C. J. AND P. HUANG *Elastohydrodynamic lubrication of soft viscoelastic materials in line contact*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology, 1997,

Numerická studie (1997) rozšiřuje problematiku soft EHL mazání o zahrnutí vlivu viskoelastivity materiálu. Hooke v práci vychází z publikací a poznatků (parametrů g_E ; g_V) Johnsona [11] a dalších autorů [41], [3] v oblasti soft EHL mazání a viskoelastického chování materiálů. Vyšetřením projevů viskoelastického chování u poddajných materiálů bylo možné získat závislosti na kontaktním tlaku p a tloušťce mazacího filmu h .

Autoři popsali závislosti poddajných materiálů, kterými mohou být např. polymery, u nichž může docházet k časovému zpoždění (prodlevě) při deformaci kontaktní oblasti při působícím zatížení, respektive kontaktním tlaku. Z tohoto pohledu lze vliv viskoelastivity považovat za podstatný. Vliv viskoelastivity, jenž ovlivňuje tloušťku mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktu, nebyl však dosud nedostatečně experimentálně ověřen. Numerický model je zaměřen na objasnění uvedených parametrů v liniovém soft EHL kontaktu.

Výsledky:

Výsledkem studie je zahrnutí vlivu viskoelastivity materiálu do numerického modelu soft EHL kontaktu a objasnění změn kontaktního tlaku p a tloušťky mazacího filmu h v závislosti na Debořině čísle. Debořino číslo charakterizuje míru projevu viskoelastického chování materiálu při formování tloušťky filmu a tlaku. Pro hodnotu $DEB = 0$ průběh odpovídá elastickému modelu.

Deborah number:

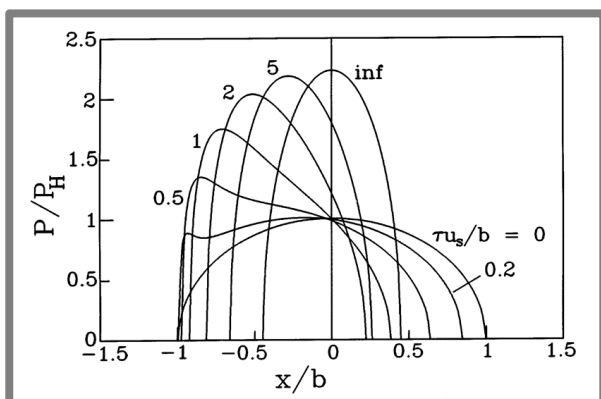
$$DEB = \frac{\tau \cdot u_s}{b} \quad (2-20)$$

Kde: τ (–) - časová konstanta viskoelastického materiálu

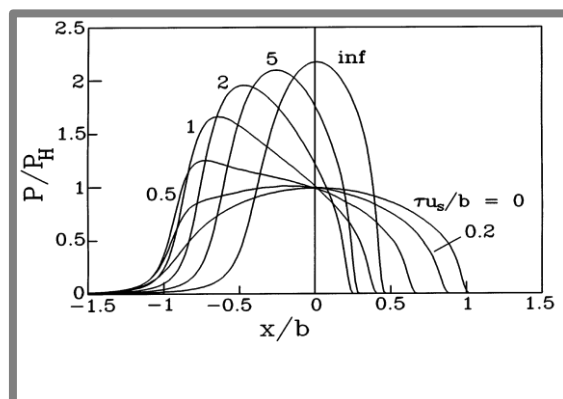
u_s (mm/s) - rychlost viskoelastických povrchů

b (mm) - polovina šířky Hertzovy kontaktu

Křivky na Obr. 16 a Obr. 17 vykazují očekávaný nárůst kontaktního tlaku p a zmenšení kontaktní šířky b při zvětšení Debořina čísla. Z Obr. 17 pro nemazaný kontakt je patrný prudký nárůst tlaku na vstupu do kontaktu až na případ $DEB = 0$, kdy se jedná o elastický model. Rozložení tlaku na je pro nízké hodnoty Debořina čísla blízké průběhu Hertzova tlaku s výjimkou na vstupu a výstupu z kontaktu. Na výstupu z kontaktu dochází k vytvoření konstrikce Obr. 16, která běžně nastává u hard EHL kontaktů. V případě mazaného kontaktu je v intervalu $DEB \in \langle 0,5; 2 \rangle$ možné dle Obr. 16 pozorovat náklon tlakového profilu směrem ke vstupní oblasti kontaktu, který se s rostoucí hodnotou DEB zmenšuje.



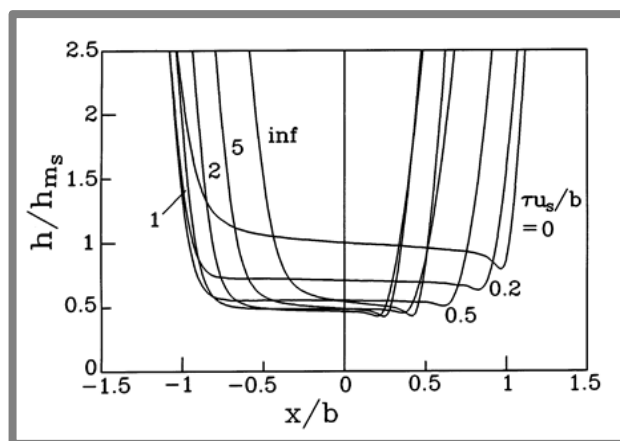
Obr. 17 Změna tlaku v nemazaném kontaktu pro různé debořina čísla. [40]



Obr. 16 Změna tlaku v mazaném kontaktu pro různé debořina čísla. [40] Vstup maziva nalevo.

Tloušťky filmu pro různá debořina čísla dle Obr. 18 vykazují téměř konstantní rozložení mazacího filmu po celé centrální oblasti kontaktu s výjimkou konstrikce na výstupu. Jakmile se hodnota $DEB > 0$ dochází k zjevnému poklesu mazacího filmu v kontaktní oblasti viz Obr. 18.

Pro hodnoty $DEB = 0,5 - 2$ se stává průběh tloušťky filmu téměř konstantní s konstrikcí na výstupu, která se s rostoucí hodnotou DEB zmenšuje z hlediska šířky i minimální tloušťky v kontaktu. Přesto je průběh tloušťky velmi podobný průběhu v oblasti hard EHL. S rostoucí hodnotou g_E rovněž dochází k poklesu tloušťky filmu a délky vstupní a výstupní oblasti, přitom minimální tloušťka h_{min} nastává na výstupu z kontaktu.



Obr. 18 Změna tloušťky filmu v mazaném kontaktu pro různé debořina čísla [40]. Vstup maziva nalevo. $g_E = 30$

Vysoké hodnoty *DEB* čísla jsou spojeny s podobností rozložení kontaktního tlaku s Hertzovým modelem při rychlém zatěžování. Zároveň dochází při vyšších hodnotách parametru elasticity g_E ke změně, z elastického na viskoelastické chování, což rovněž probíhá za nízkých hodnot *DEB*. Při vysokých hodnotách *DEB*, klesá tloušťka mazacího filmu a roste vliv viskoelasticity materiálu. Přitom průběh tlaku při nízkých hodnotách *DEB* na vstupu má strmý rostoucí průběh oproti výstupu z kontaktu. Tento vliv se projevuje na průběhu tloušťky, kdy při nízkých hodnotách *DEB* dochází k horizontálnímu narovnání profilu v centrální oblasti. Viskoelastická má významný účinek na proces mazání. Rozhodujícím kritériem, zda kontakt je elastický nebo viskoelastický je Debořino číslo, přitom k přechodu dochází pro $DEB \sim 1$.

3.1.2 Experimentální studie zaměřené na formování mazacího filmu

V posledních letech se objevilo pouze několik experimentálních studií, které svými výsledky rozšiřují povědomí o formování tloušťky filmu v soft EHL kontaktu. Nicméně problematika soft EHL kontaktů nebyla dosud dostatečně experimentálně prozkoumána. To odráží i fakt, limitních možností použití některých experimentálních metod, zejména optických metod s ohledem na optickou nepropustnost světla používaných plastových a pryžových strojírenských materiálů. Pro zjištění distribuce maziva v kontaktu autoři použili metodu *Fluorescence*, *Ultrasonic reflection* nebo *Optical interferometry*. Experimentální výsledky jsou zpravidla porovnány se známými numerickými modely [20], [23] a teorií EHL, popřípadě jsou na základě zjištěných závislostí stanoveny regresní vztahy.

[12] **MYANT, C., M. FOWELL, H. A. SPIKES AND J. R. STOKES.** *An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts*. Tribology Transactions, 2010.

Uvedená studie (2010) je zaměřena na formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktech (*isoviscous-elastic*) za vysokých skluzů *SRR* aplikací experimentálního přístupu. Přítomnost vysokých skluzů v kontaktu se může projevit nárůstem součinitele tření a snížením tloušťky mazacího filmu. Na základě pracovních podmínek jako je unášivá rychlost U , zatížení W a viskozita maziva η je popsána závislost na utváření mazacího filmu. Tím bylo možné zpětně určit distribuci tlaku p v kontaktu využitím numerického přístupu, který uvedl De Vicente [13]. Ve studii jsou zároveň uvedeny numerické a experimentální přístupy ostatních autorů v této problematice [22], [20], [44], [43], [42].

Pro získání informací o rozložení tloušťky filmu byla použita metoda optické (monochromatické) interferometrie [42], [45], [21]. Metoda optické interferometrie byla v minulosti použita zejména u hard EHL kontaktů, přičemž nutnou podmínkou aplikací metody je použití alespoň jednoho transparentního materiálu kvůli zajištění prostupu světla do kontaktu. Díky fázovému posunu mezi jednotlivými interferenčními vlnami paprsků světla je možné určit rozložení mazacího filmu přiřazením světelných intenzit barevnému spektru.

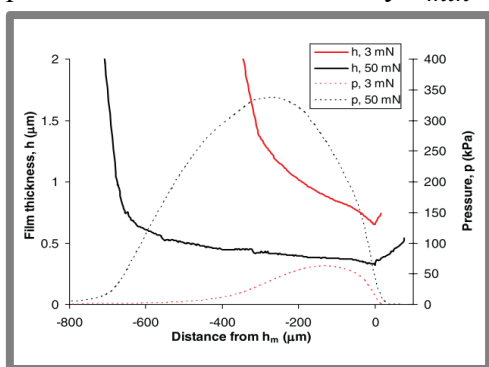
Mazací film se utváří mezi skleněným BK7 diskem a ocelovou kuličkou s tlustou vrstvou naneseného elastomeru PDMS s modelem pružnosti $E = 65 \text{ MPa}$, který reprezentuje soft EHL kontakt. Na základě uvedených skutečností jsou experimentální výsledky porovnány s publikovanými studiemi [20], [13] a jsou stanoveny výpočetní vztahy pro určení centrální h_{cent} a minimální h_{min} tloušťky mazacího filmu.

Výsledky:

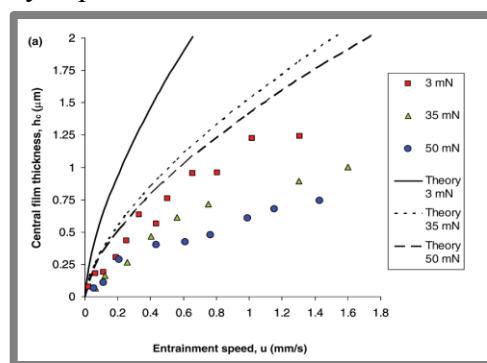
Na základě výsledků experimentální studie je určeno rozložení tloušťky filmu a tlaku v kruhovém kontaktu pro různá zatížení W , unášivé rychlosti U a maziva o odlišné viskozitě η . Získáním monochromatických interferogramů a profilů tloušťky v ose X a Y bylo možné distribuci maziva blíže analyzovat.

V případě profilu Y rovnoběžného se směrem vtoku maziva do kontaktu bylo při působení rostoucího zatížení W pozorováno očekávané zvětšení kontaktní oblasti za současného poklesu tloušťky filmu h a to v celém kontaktu. Ve výstupní oblasti kontaktu došlo k vytvoření konstrikce s hydrodynamickým klínem, kde je lokalizována minimální tloušťka filmu h_{min} . Zároveň bylo pozorováno zvětšení náklonu profilu v ose Y a konstrikce v důsledku klesajícího zatížení W . Tlakové profily byly získány dle poznatků Camerona [46] a De Vicente [13] a ukazují na Obr. 20 závislost na působícím zatížení.

Z Obr. 20 je patrná podobnost tlakového průběhu s Hertzovým modelem při rostoucí velikosti zatížení, jak predikoval Hamrock & Dowson [20]. Oproti tomu při nízkém zatížení W je tlakové maximum p_{max} posunuto na výstup z kontaktu, avšak tloušťka filmu v obou případech výrazně ovlivněna není. Myant uvádí u všech provedených experimentů byla přítomnost minimální tloušťky h_{min} lokalizována ve výstupní oblasti kontaktu.

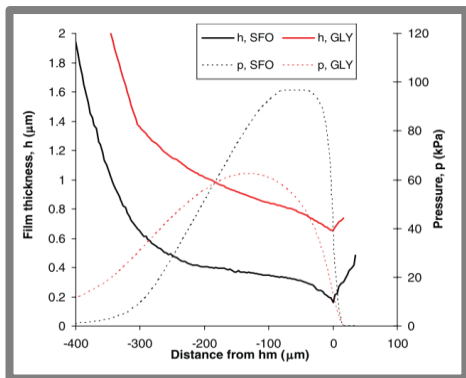


Obr. 20 Průběh tloušťky filmu a tlaku v kontaktu $W=3$ a 50 mN; $U=0,65$ a $0,61$ mm/s. Mazivo GLY. [12]

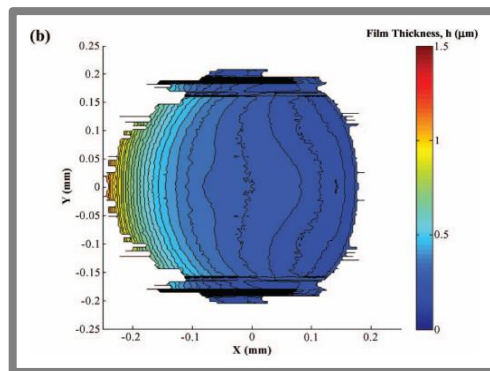


Obr. 19 Porovnání centrální tloušťky maziva s predikcí Hamrocka & Dowsona. $W=3, 35, 50$ mN; $U=0-1,8$ mm/s. Mazivo GLY. [12]

Při porovnání experimentálních výsledků s teorií EHL je dle Obr. 19 patrný výrazný rozdíl, kdy byla pro uvedený rozsah zatížení predikována vyšší tloušťka h . Vlivem rostoucí unášivé rychlosti U došlo ke zvětšení náklonu profilu tloušťky a současně došlo ke zvýšení tloušťky maziva mezi kontakty. Z výsledků na Obr. 20 je možné pozorovat podobnost rozložení tlaku s Hertzovou teorií za nižších unášivých rychlostí, kdy je tloušťka filmu také nižší.



Obr. 22 Průběh tloušťky filmu a tlaku v kontaktu $W=3$ mN; $U=0,66$ mm/s. Mazivo SFO a GLY. $\eta_{SFO} < \eta_{GLY}$. [12]



Obr. 21 Rozložení tloušťky filmu v kontaktu. $W=3$ mN; $U=0,66$ mm/s. Mazivo GLY. [12]

Vliv viskozity maziva reprezentuje profily tloušťky filmu a tlaku na Obr. 22. Při použití maziva o vyšší viskozitě η_{GLY} dochází ke snížení tlaku p v kontaktu a posunutí tlakového maxima p_{max} do blízkosti středu Hertzova kontaktu. Vytvoření tlakového hrotu v profilu podobně jako v režimu hard EHL nebylo v experimentech pozorováno.

Minimální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Myanta:

$$h_{min} = 2,83 \cdot \bar{U}^{0,68} \cdot \bar{W}^{-0,20} \cdot R' \quad (2-21)$$

Centrální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Myanta:

$$h_{cent} = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,63} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R' \quad (2-22)$$

Výsledky studie byly dále porovnány numerickým modelem, který publikoval de Vicente [13], kde byla nalezena dobrá shoda v průběhu profilu tloušťky filmu. Avšak velikost minimální tloušťky h_{min} si liší až o 200 nm. Dle výsledků experimentu byl podkovitý tvar konstrikce přítomný ve výstupní části kontaktu s malou inklinací přechodu bočních laloků směrem ke vstupní části kontaktu. Myant stanovil za základě experimentálních dat regresní vztahy pro výpočet centrální h_{cent} a minimální tloušťky h_{min} , které jsou uvedeny v (2-21) a (2-22).

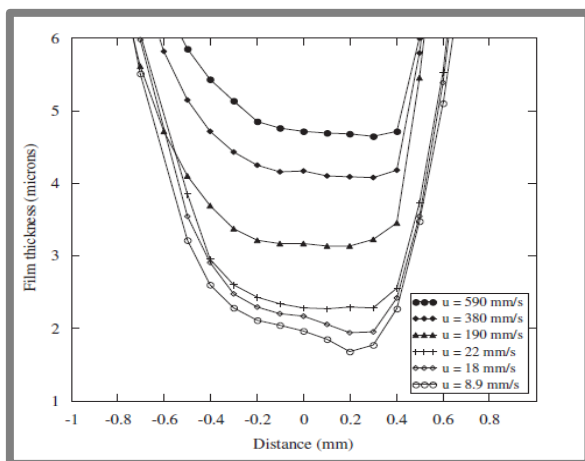
[14] GASNI, D., M. K. W. IBRAHIM AND R. S. DWYER-JOYCE. *Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime.* Tribology International, 2011.

Experimentální studie (2011) popisuje formování tloušťky mazacího filmu v režimu isoviscous elastic EHL při působení zatížení a skluzu v kruhovém kontaktu. Kruhový kontakt tvoří polymerní kulička a skleněný disk Perspex. Pro získání informací o tloušťce filmu byla použita metoda „ultrasonic reflection technique“, založená na vysílání nadzvukových pulzů mezi zkušební vzorky. Na základě odrazu jednotlivých vln lze určit akustický odpor materiálů vzhledem ke známé hustotě a rychlosti pohybu a dále tloušťku mazacího filmu prostupem pulzu do maziva. Podrobný popis je uveden v [14]. Autor získané výsledky v práci porovnává s numerickými modely [20] a experimenty v oblasti soft EHL [15], [16].

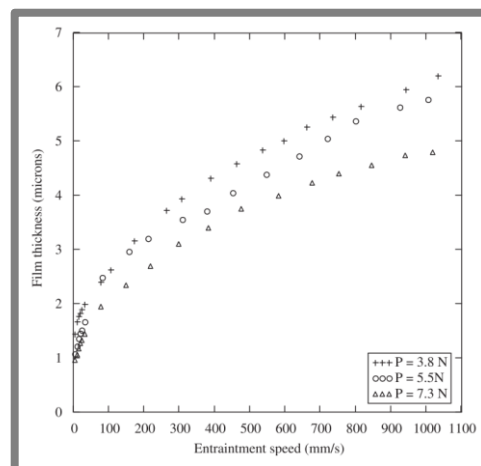
Experimenty byly provedeny v rozsahu zatížení $W \in \langle 3,8; 7,3 \rangle$ N, kdy kulička byla zatěžována ve vertikálním směru. Materiálem kuličky je nitrine s modulem pružnosti v tahu $E = ?$. Rotační pohyb je vyvozen elektromotorem a koná jej kulička při otáčkách $n \in \langle 5; 1500 \rangle \text{ min}^{-1}$. Kontakt je simulován při statické poloze disku, což dle EHL teorie odpovídá vysokým skluzům, kdy $SRR = 2$.

Výsledky:

Gasni porovnal tloušťky filmu s predikcí Hamrocka&Dowson [20] a experimentem Myanta. et. al. [12], [16], který použil metodu optické interferometrie a *laser induced fluorescence* (LIF). Získané velikosti tloušťky vychází v porovnání s predikcí Hamrocka a Dowsona [20] podstatně menší, přitom s predikcí jsou ve shodě pouze tloušťky získané za nízkých unášivých rychlostí U .



Obr. 24. Průběh tloušťky mazacího filmu v kontaktu [14]. Zatížení $W=3,8\text{N}$ (odpovídá kontaktnímu tlaku $1,04\text{MPa}$). Směr vtoku maziva zleva.



Obr. 23. Porovnání tloušťky filmu v závislosti na rychlosti U a zatížení W . [14]

Klínový tvar profilu je patrný z Obr. 24 na vstupu do kontaktu a konstrikce na výstupu z kontaktu zejména za nižších tlouštěk mazacího filmu h , jak rovněž uvedl Myant et al [16], Tabor. Elastické deformace jsou větší než tloušťka filmu, lze tedy předpokládat, že pro suchý kontakt bude rozložení tlaku blízké Hertzovu rozložení. Z výsledků, které publikoval Gasni vyplývá, že s rostoucím zatížením klesá tloušťka filmu, což je patrné z Obr. 23. Navíc je za vyšších rychlostí pravděpodobnější vznik kavitací v mazivu. Dokonce i pro nízké rychlosti U byl patrný značný přírůstek tlaku p , jak predikoval de Vicente et. al [13]. Použitím parametrů elasticity g_E a viskozity g_V , které zavedl Johnson [11] bylo možné z experimentálních dat stanovit pracovní režim jenž odpovídá režimu *isoviscous elastic* EHL, a to ve všech provedených experimentech.

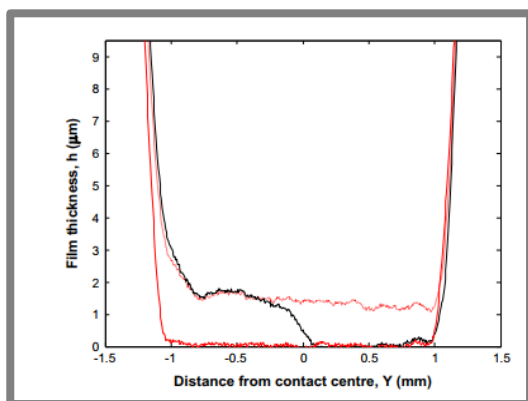
[16] MYANT, C., M. FOWELL AND P. CANN. *The effect of transient motion on Isoviscous-EHL films in compliant, point, contacts*. Tribology International, 2014.

Experimentální studie (2014), kterou publikoval Myant rozšiřuje současný stav poznání o formování mazacího filmu za různých kinematických podmínek. Autor použil metodu *laser induced fluorescence* (LIF), kdy se zaměřil změnu tloušťky filmu h v přechodných podmínkách pohybu: startu a náhlého zastavení. Experiment byl proveden pro dvě hodnoty zrychlení $a = (5; 1000) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ za podmínek čistého smýkání pro statickou PDMS kuličku a rotující skleněný disk BK7. Při experimentech byl kontakt zatěžován přes statickou kuličku za podmínek skluzu, kdy $SRR = 2$.

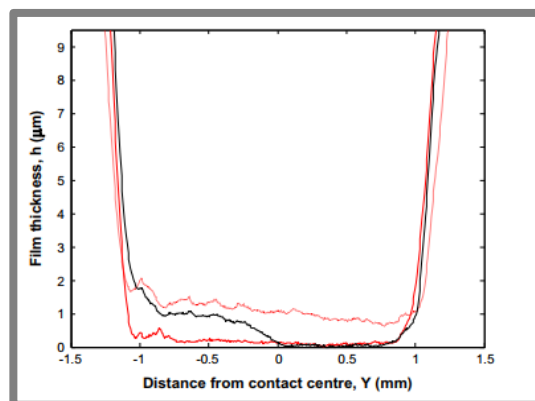
Zatížení je vyvozeno silou, kterou je kulička vertikálně přitlačena k povrchu skleněného disku. Měření byly provedeny za izotermních podmínek při ambientní teplotě $T = 22 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledkem experimentů je získání obrazových snímků kontaktu popisujících distribuci maziva. Z těchto snímků jsou vyhodnoceny profily tloušťky filmu ve směru vtoku, respektive výtoku maziva z kontaktu.

Výsledky:

Výsledkem studie je zjištění závislosti tloušťky mazacího při náhlé změně kinematických podmínek v režimu soft EHL. Při vtoku maziva do kontaktu jsou patrné 4 fáze formování mazacího filmu: počáteční kontaktní deformace, oddělení povrchů, formování plného filmu a ustálený mazací film. Ve chvíli, kdy se mazivo teprve dostává do kontaktu ($t = 0 \text{ s}$) odpovídá kontaktní profil tvaru Hertzova kontaktu. V případě většího z obou zrychlení je změna průběhu tloušťky h výraznější, zatímco u menšího zrychlení je tato skutečnost méně výrazná a průběh více odpovídá ustálenému profilu filmu, jak ukazuje Obr. 25 a Obr. 26.



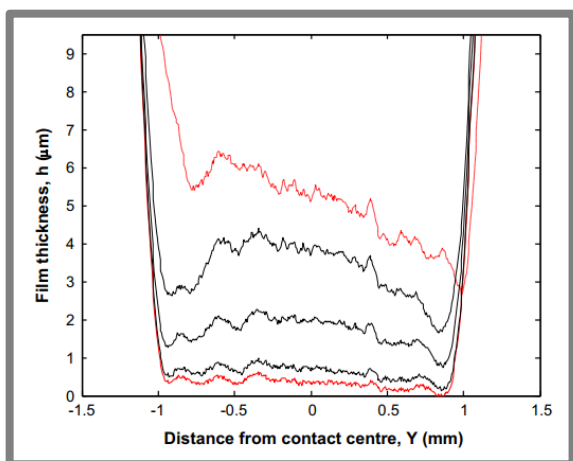
Obr. 25. Průběh formování tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $a = 1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Statický kontakt červeně, stabilizovaný mazací film-čárkovaně červeně, průběh tloušťky ve středu kontaktu-černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]



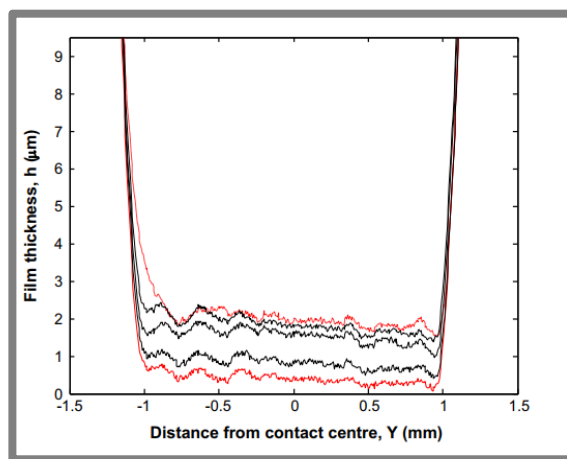
Obr. 26. Průběh formování tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $a = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$. Statický kontakt červeně, stabilizovaný mazací film-čárkovaně červeně, průběh tloušťky ve středu kontaktu-černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]

Druhým případem je náhlé zastavení po intervalu, kdy se vytvořil stabilní mazací film. Z experimentu je patrné vytvoření podkovitého tvaru s minimální tloušťkou filmu h_{min} na výstupu z kontaktu. Tloušťka filmu h má nejmenší velikost na okrajích kontaktu, která postupuje směrem do středu kontaktu přibývajícím časem po náhlém zastavení. Avšak i po několika sekundách může existovat stále významná tloušťka filmu h .

Průběh poklesu tloušťky mazacího filmu zachycuje Obr. 27 a Obr. 28 pro jednotlivé časy t . Je patrné, že za vyšších rychlostí dochází v průběhu času k značným změnám tlouštěk filmu a oproti nižším unášivým rychlostem, kdy je změna tloušťky v čase méně výrazná.



Obr. 28 Průběh poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $U = 75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Mazací film pro $t = 5 \text{ [s]}$ – červeně, stabilizovaný mazací film před náhlým zastavením – čárkovaně červeně, průběh tloušťky pro jednotlivé časy t – černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]



Obr. 27 Průběh poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $U = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Mazací film pro $t = 5 \text{ [s]}$ – červeně, stabilizovaný mazací film před náhlým zastavením – čárkovaně červeně, průběh tloušťky pro jednotlivé časy t – černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]

Zejména při nižším zrychlení je pozorována postupná tvorba tloušťky filmu. Myant uvádí, že rychlost formování mazacího filmu je silně závislá na počátečním zrychlení. Při nízkých zrychleních dochází ke změně tloušťky filmu za středem kontaktu. V režimu soft EHL nebyly pozorovány oscilace (změny) tloušťky mazacího filmu, což lze pravděpodobně přisoudit povaze soft EHL kontaktu, kdy jsou tyto změny méně výrazné v porovnání s hard EHL.

[1] DEARN, K. D., T. J. HOSKINS, L. ANDREI a D. WALTON. *Lubrication regimes in high-performance polymer spur gears*. Advances in Tribology, 2013.

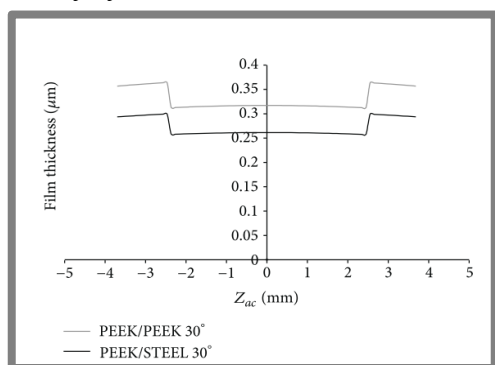
Experimentální studie (2013) popisuje formování tloušťky mazacího filmu, vývoj pracovní účinnosti a součinitele tření u reálných konvenčních a hybridních ozubených soukolí. V případě hybridních soukolí se jedná o použití ozubených kol s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi, přičemž je častá kombinace ocelového pastorku a polymerního ozubeného kola. Autor v práci určuje pracovní účinnost dvojic ozubených soukolí na základě geometrie – úhlu záběru α , zatížení W , otáček n a redukovaném modulu pružnosti E materiálové kombinace kol. Z účinností byl následně reverzně určen součinitel tření μ pro jednotlivé případy.

Při určování tloušťky filmu se autor odkazuje na poznatky hydrodynamických map Johnsona [11] a výpočetní vztahy bezrozměrné tloušťky filmu dle Myerse [38] pro přechodový režim TR EHL. Pro aplikaci poznatků EHL autor zjednodušuje složitý záběr ozubení aproximací simulace kontaktu dvojicí rotujících válců o stejné geometrii, čímž vzniká liniový kontakt. Měření byly provedeny s motorovým olejem dle vizkozitní třídy SAE 15W30.

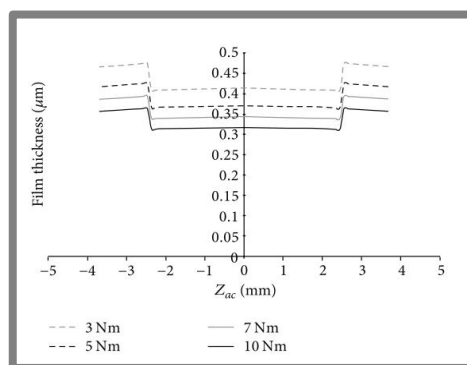
Při měření účinnosti byly použita čelní ozubená kola s přímým ozubením z polymeru PEEK o shodné geometrii, kromě variace úhlu záběru $\alpha = 20^\circ$ a $\alpha = 30^\circ$. Pozornost je rovněž věnována změnám unášivé a skluzové rychlosti, která je spojena se závislostí na úhlu záběru α . Experimentální zařízení pro měření účinnosti umožňuje aplikovat zatížení až do $W_m = 10 \text{ Nm}$ a otáčky do $n = 3000 \text{ min}^{-1}$. Vzhledem ke snímání vstupních a výstupních točivých momentů bylo možné získat pracovní účinnost převodu. Autor získané výsledky účinnosti dále porovnává s chováním nemazaných polymerních kontaktů.

Výsledky:

Na základě provedených experimentů byl určen vliv podmínek mazání na pracovní účinnost u výkonných polymerních ozubených soukolí, což umožnilo zpětné určení součinitele tření v kontaktu. V případě použití soukolí PEEK/PEEK byla zjištěna závislost na záběrovém úhlu α , s jehož rostoucí hodnotou dochází ke zvětšení kontaktní oblasti a tloušťky mazacího filmu. Rovněž došlo k nárůstu složky unášivé rychlosti při současném poklesu skluzové složky rychlosti.

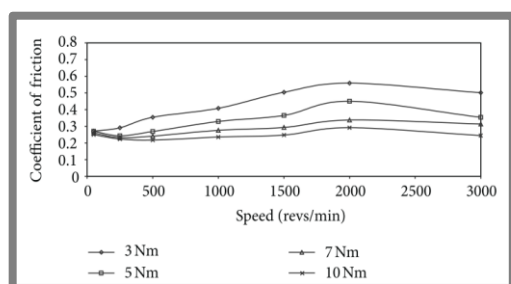


Obr. 29 Porovnání tloušťky filmu pro kombinaci: PEEK/STEEL a PEEK/PEEK. [1]

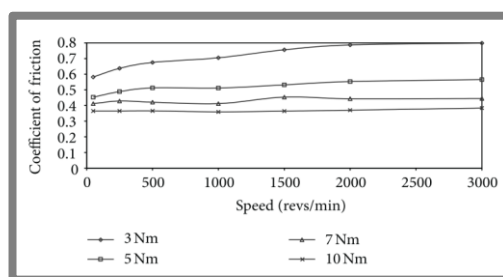


Obr. 30 Porovnání tloušťky filmu v závislosti na zatížení pro kombinaci: PEEK/PEEK. [1]

Dále byla vyhodnocena tloušťka mazacího filmu pro různé materiálové kombinace ozubených kol. Z výsledků na Obr. 29 vyplývá, že pro PEEK/PEEK je tloušťka filmu znatelně vyšší oproti hybridnímu případu PEEK/STEEL, což je patrně ovlivněno elastickou deformací s rovnoměrným sdílením zatížení pro první materiálovou kombinaci. To odpovídá výsledkům, které publikoval Song [47]. Vliv zatížení prezentuje Obr. 30, ze kterého je patrné očekávané snížení tloušťky mazacího filmu h s rostoucí hodnotou zatížení W . Výrazný nárůst tloušťky filmu h byl naopak pozorován s rostoucí hodnotou rychlosti.



Obr. 32 Závislost součinitele tření f na úhlové rychlosti ω pro PEEK/PEEK. [1]



Obr. 31 Závislost součinitele tření μ na úhlové rychlosti ω pro PEEK/STEEL. [1]

Z výsledků měření účinnosti vyplývá podobnost mezi suchými (nemazanými) a mazanými kontakty, kdy dochází k nárůstu účinnosti při rostoucím zatížení W [48]. Přitom dochází k elastické deformaci boku zubů, která vede k vyhlazení nerovností na povrchu a tím i redukcí součinitele tření μ . Na základě účinností byl dle [48] určen součinitel tření μ , který vykazuje závislost na zatížení W , zatímco vliv rychlosti ω je minoritní.

Výrazná změna účinnosti, respektive součinitele tření μ v závislosti na α rovněž nebyla pozorována. Naopak při porovnání účinnosti je pro kombinaci PEEK/PEEK dle Obr. 32 patrný nárůst oproti PEEK/STEEL dle Obr. 31. Zvýšení účinnosti je tak spojeno s redukcí součinitele tření. Autor tuto skutečnost připisuje větší míře elastické deformaci povrchu polymerního ozubeného kola, než je tomu v kombinaci PEEK/STEEL.

[4] **MARX, Nigel, GUEGAN, Johan and SPIKES, Hugh A.** *Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry*. Tribology International, 2016.

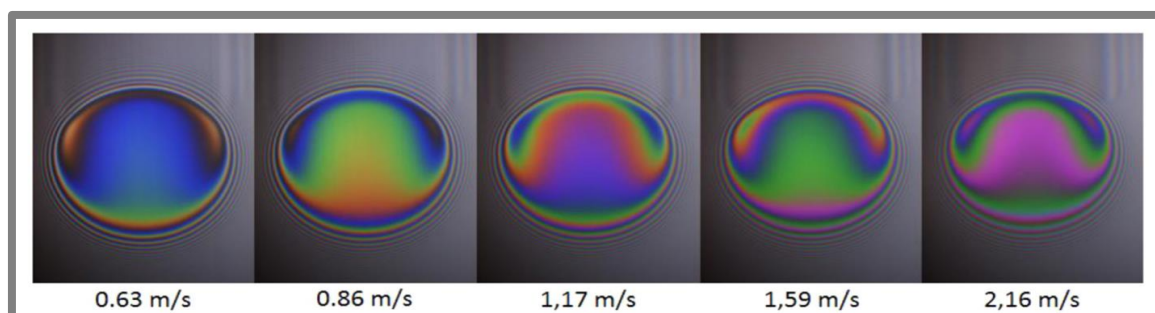
Experimentální studie (2016) popisuje formování tloušťky mazacího filmu v bodovém soft kontaktu mezi ocelovou kuličkou a plastovým diskem z PMMA a PU. V této studii byla vůbec poprvé použita metoda optické (kolorimetrické) interferometrie pro získání rozložení tloušťky mazacího filmu v soft kontaktu. To bylo možné zejména vzhledem k použití průhledného amorfního polymeru PMMA, na jehož povrchu byl nanesen polo-odrazivý chromový povlak. Díky nanesenému chromovému povlaku bylo možné získat kvalitní interferenční snímky popisující rozložení mazacího filmu v kontaktu.

Marx se ve studii zaměřil na vliv pracovních kinematických podmínek (unášivé rychlosti, poměru SRR), zatížení, a viskozity maziva na mazací proces za izotermních podmínek. Získané experimentální výsledky jsou následně porovnány s již publikovanými predikcemi pro soft EHL kontakty [23], [20], [36] a následně byl vytvořen vlastní regresní model. Řešením regresního modelu je získání rovnic popisující centrální h_{cent} a minimální tloušťku h_{min} s určením závislosti na pracovních podmínkách.

Výsledky:

Výsledkem experimentů provedených Marxem je získání interferenčních snímků, které charakterizují formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktu za různých pracovních podmínek. V průběhu zvyšování unášivé rychlosti U za podmínky $SRR = 0$ dochází k vytvoření podkovitého tvaru kontaktu na bocích a na výstupu z kontaktu, kde je lokalizována oblast s minimální tloušťkou filmu h_{min} . Ve všech případech byla minimální tloušťka pozorována v oblasti bočních laloků viz. Obr. 33.

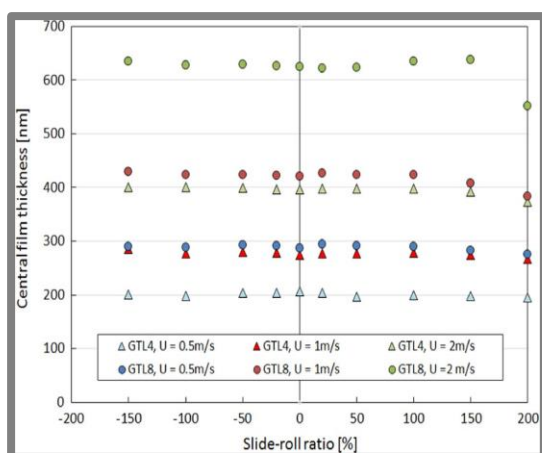
Z hlediska průběhu profilu tloušťky je patrné, že v centrální oblasti je profil téměř horizontální, což je typické zejména pro chování hard EHL kontaktů [32]. Na výstupu maziva z kontaktu dochází k náhlému poklesu v profilu tloušťky zaklíněním mazacího filmu následkem snížení působení kontaktního tlaku p . Podobný průběh byl pozorován Myantem [12], jehož studie je zaměřena na určení tloušťky filmu za podmínky čistého valení. Přesto byla velikost tloušťky filmu získaná Myantem [12] poloviční oproti predikcím Hamrocka & Dowsona [20].



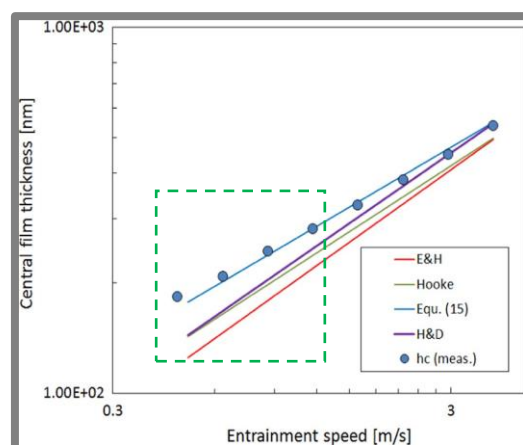
Obr. 33 Vliv unášivé rychlosti na centrální profil tloušťky filmu. Mazivo: GTL8; $W=10$ N; $SRR=0$. [4]

Další sada experimentů byla zaměřena na objasnění vlivu SRR na utváření tloušťky filmu při konstantní unášivé rychlosti viz. Obr. 34. Kromě případu čistého skluzu, kdy $SRR = 2$, byla pozorována pouze minoritní změna tloušťky filmu v celém rozsahu $SRR \in (-2; 2)$.

To je zajímavé s ohledem na hard EHL kontakty, kde je tato změna pozorována [49] již za hodnot $SRR \geq 0,5$. V důsledku vysokých skluzů dochází v kontaktu ke zvýšení teploty T , což má za následek snížení viskozity maziva η a tím i tloušťky mazacího filmu h . Vedlejším účinkem působení SRR může být poškození chromového povlaku na povrchu disku, které však v tomto případě nebylo prokázáno.

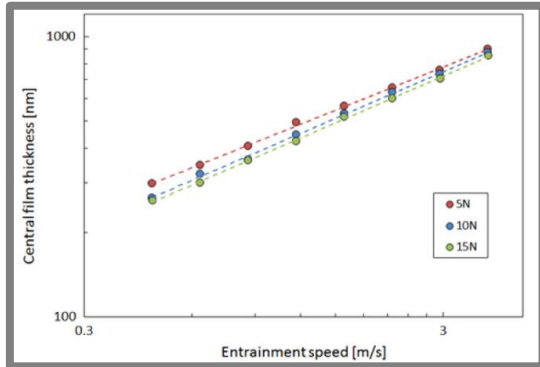


Obr. 34 Vliv SRR na centrální tloušťku mazacího filmu h_{cent} . Kontakt: ocel/PMMA; $W=10$ N. [4]

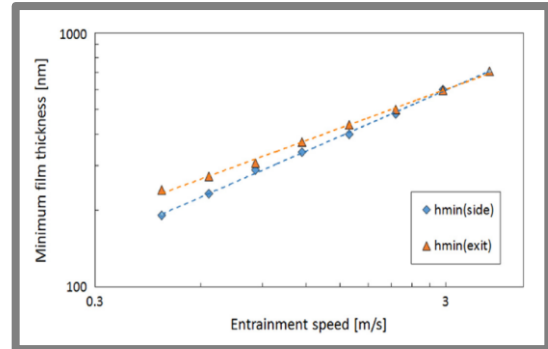


Obr. 35 Porovnání publikovaných a experimentálních výsledků pro h_{cent} . $SRR=0$. [4]

Vliv působící zatížení $W \in \langle 5; 15 \rangle$ z hlediska ovlivnění centrální tloušťky filmu se ukázal být jako nevýrazný viz. Obr. 36 Vliv zatížení W na centrální tloušťku mazacího filmu h_{cent} . Kontakt: ocel/PMMA; SRR=0. [4]. Oproti tomu u minimální tloušťky Obr. 37, lze pozorovat přesunutí oblasti h_{min} z výstupu kontaktu do oblasti bočních laloků při rostoucím zatížení W . S rostoucím zatížením došlo taktéž k výraznému zvětšení kontaktní oblasti v důsledku iniciace elastické deformace povrchů.



Obr. 36 Vliv zatížení W na centrální tloušťku mazacího filmu h_{cent} . Kontakt: ocel/PMMA; SRR=0. [4]



Obr. 37 Vývoj minimální tloušťky mazacího filmu h_{cent} . Kontakt: ocel/PMMA; SRR=0, $W=5$ N. [4]

Na základě experimentálně získaných dat, Marx vytvořil regresní rovnice pro výpočet centrální a minimální tloušťky, kde udává mocninou závislost exponentu unášivé rychlosti $x \in 0,52 - 0,55$. Tyto výsledky jsou odlišné oproti publikovaným predikčním modelům, které publikoval Hamrock&Dowson [20], Hooke [23], Esfahanian [36], kde se hodnota exponentu pohybovala v rozsahu $x \in 0,6 - 0,66$.

Minimální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Marx:

$$h_{min} = 2,8 \cdot \bar{U}^{0,52} \cdot \bar{W}^{-0,16} \cdot R' \quad (2-23)$$

Centrální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle Marx:

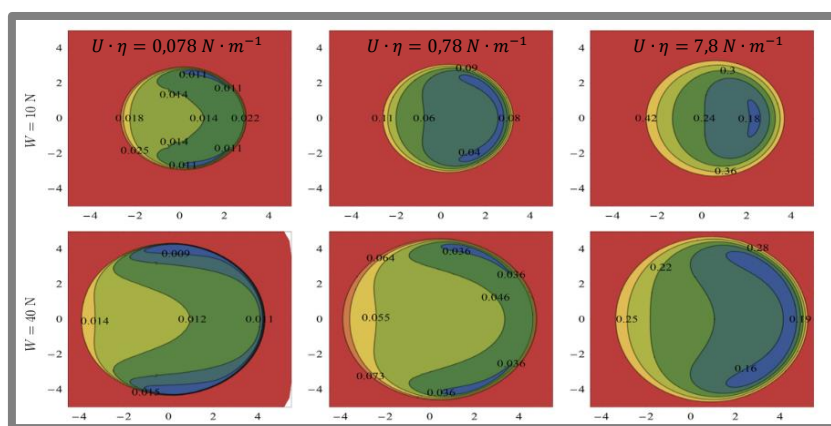
$$h_{cent} = 2,6 \cdot \bar{U}^{0,55} \cdot \bar{W}^{-0,07} \cdot R' \quad (2-24)$$

V důsledku této závislosti všichni autoři [36], [20] a [23] predikovaly tenčí tloušťku mazacího filmu zejména za nízkých unášivých rychlostí U , což je v rozporu s výsledky, které uvedl Marx. Závislosti regresních vztahů vytvořených Marxem a predikcí ostatních autorů [36], [20], [23] jsou rovněž vyjádřeny pomocí parametru elasticity g_E dle Johnsona [11]. To je užitečné zejména kvůli znázornění výsledků v hydrodynamické mapě [11], které vymezuje jednotlivé režimy EHL. Výsledné vztahy jsou sumarizovány v (2-23) a (2-24).

3.1.3 Ostatní studie

Stupkiewicz et. al. [50] uvedl numerickou studii zaměřenou na určení rozložení tloušťky filmu a tlaku v oblasti I-EHL mezi polymerní kuličkou NBR a diskem z nízkouhlíkové oceli. Pro konkrétní zatížení W a unášivé rychlosti $U \cdot \eta$ byly získány průběhy tloušťky mazacího filmu h . Z výsledků Stupkiewicz et. al. [50] je patrné vytvoření charakteristického „hřbetu“ na odtokové hraně kontaktu.

V závislosti na podmínkách, minimální tloušťka filmu h_{min} nastává na výstupu z kontaktu nebo na bočních lalocích viz Obr. 38. K druhému případě dochází při působení rostoucího zatížení W za nižších unášivých rychlostí U v souladu s výsledky, které publikoval Hooke et. al. [23]. V případě vyššího zatížení dochází současně ke zvětšení kontaktní oblasti. [50]

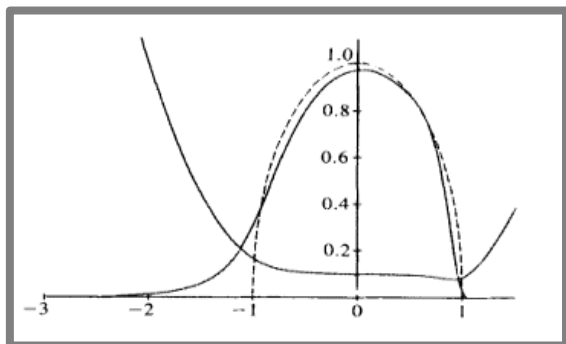


Obr. 38 Rozložení tloušťky mazacího filmu h pro různé kinematické podmínky a zatížení (vstup maziva zleva). [50]

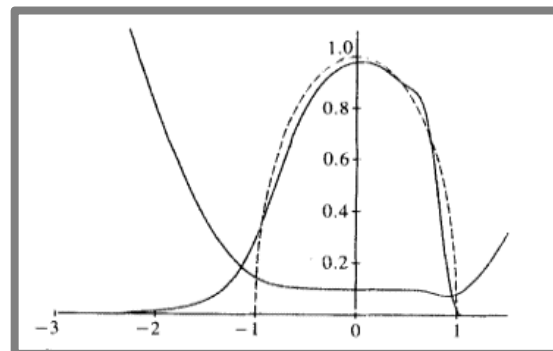
Podstatný vliv na tloušťku mazacího filmu má obecně teplota T . Při záběrovém cyklu mají na produkci tepla vliv hysterezní ztráty (viskoelastické chování) a teplo vzniklé třením. V druhém případě je tento vliv významný, jak publikoval Dearn et.al [51]. V minulosti byly polymerní ozubená kola provozována běžně jako nemazaná, případně s použitím plastických maziv. V současnosti je snaha o rozšíření použití kapalných maziv pro mazání polymerních nebo hybridních ozubených soukolí.

Tato problematika je však zatím nedostatečně objasněna, protože existuje převaha publikací s numerickými modely a experimenty, kde není použito mazivo [6], [52], [51], [54]. S rostoucí teplotou je v případě mazaného kontaktu očekáván pokles viskozity maziva η , jehož důsledkem dojde ke snížení tloušťky mazacího filmu h . Přesto je pro porovnání rozdílů za různých mazacích podmínek nezbytná znalost chování nemazaných kontaktů. Nicméně výsledky, které získal Mao et. al [52] jsou blízké výsledkům jež publikoval Tobe a Kato et. al [55] pro ocelové ozubení.

Predikci tloušťky filmu v přechodové oblasti I-EHL a E-EHL pro liniový kontakt provedl Jaffar et. al. [56]. Porovnání s modely, které publikoval Dowson [25] a Hamrock&Dowson [53] je pro $2 \leq g_4 \leq 3$ znázorněno na Obr. 40, ze kterého je patrná dobrá shoda výsledků studie Jaffara et. al [56] s výše uvedenými modely. Z Obr. 39 a Obr. 40 je vidět, že tlak maziva přesahuje Hertzův tlak těsně před výstupem z kontaktu, kde se vytváří tlakový hrot. Navíc pro vyšší hodnoty g_4 jsou tvary mazacího filmu více ploché. [56]



Obr. 39 Průběh minulání tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty $g_4 = 1,0$. [56]



Obr. 40 Průběh minulání tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty $g_4 = 2,3$. [56]

Změnu teploty v hybridním kontaktu ocelového a polymerního kola pozoroval Sukumaran et.al [17]. Z experimentu vyplývá nevýrazná změna teploty v průběhu tříhodinového měření, přibližně do 7°C, která nezpůsobuje významné ovlivnění mechanických a tribologických vlastností. Teplo z kontaktu odvádí proudící tok maziva a rovněž teplo přechází díky tepelné vodivosti λ do ocelového ozubeného kola, jak uvedl Sukumaran et.al [17]

Mao. et. al [6] se zabýval chováním polymerního kompozitního ozubení za různých okolních teplot a za použití odlišné geometrie ozubení s cílem objasnit vliv těchto parametrů. Výsledky numerického řešení, které publikoval Mao. et. al [6] jsou v dobré shodě s experimentálním měřením, které provedl na nylonu PA6 plněném skelnými vlákny a s obsahem interního maziva PTFE. Veškerá měření provedl bez použití maziva.

Pro měření teploty povrchu ozubení Mao et.al [6], [52] použil infra –červenou kameru, kdy pro klíčové body (bod dotyku zubů, bod na nekontaktních zubech pro hnací a hnané kolo, bod za bodem dotyku pro hnací a hnané kolo) stanovil teplotu v místě jejich lokace. Z výsledků vyplývá, že rozdíl teploty mezi bodem v místě kontaktu zubů a bodem na nekontaktním zubu se blíží 20 °C. Tento rozdíl nabývá vyšší hodnoty s rostoucí velikostí rychlosti otáčení ω .

3.2 Studie zaměřené na vývoj tření v soft EHL kontaktech

Kapitola pojednává o současném stavu poznání v oblasti tření soft kontaktů formou rozboru experimentálních studií. Závislost vývoje součinitele tření je spojena se změnami tloušťky mazacího filmu za různých pracovních podmínkách jako je zatížení, unášivá rychlost, skluz teplota, respektive viskozita maziva, jež jsou popsány numerickými modely a experimentálními daty. Kapitola dále obsahuje poznatky o vlastnostech polymerních materiálů. Veškeré studie byly vybrány s ohledem na zaměření disertační práce a jsou uvedeny dle historického vývoje problematiky soft EHL kontaktů.

3.2.1 Experimentální studie zaměřené na vývoj tření

Přehled problematiky vývoje tření v soft EHL kontaktech je v současné kapitole popsán z experimentálního pohledu [13], [17], [22], [16]. S ohledem na zaměření disertační práce je vývoj součinitele tření u polymerních materiálů při mazání kapalnými mazivy dosud nedostatečně prozkoumanou oblastí. To se odráží také v počtu dostupných publikací, které by popisovaly vývoj tření u strojírenských polymerů vhodných pro výrobu ozubení jako je např. PA 66, POM nebo PEEK. Nicméně uvedené studie, alespoň částečně rozšiřují povědomí o vývoji součinitele tření v soft EHL kontaktech.

[13] DE VICENTE, J., J. R. STOKES AND H. A. SPIKES. *The frictional properties of Newtonian fluids in rolling-sliding soft-EHL contact.* Tribology Letters, 2005.

Studie, jenž kombinuje numerický a experimentální přístup, se věnuje vývoji součinitele tření za podmínek nenulového skluzu v soft EHL kontaktech. V případě experimentální studie je simulován kontakt mezi ocelovou kuličkou (AISI 440) a diskem ze silikonového elastomeru NDA pomocí zařízení MTM (*Mini-traction machine*). Při jednotlivých experimentech byly použity postupně dva disky o různé drsnosti povrchu ($R_q = 70; 800 \text{ nm}$) a jediné drsnosti kuličky ($R_q = 10 \text{ nm}$). Zařízení zajišťuje separátně nezávislý pohon kuličky a disku čímž lze dosáhnout různých skluzových poměrů SRR . Experimenty byly provedeny za izotermních podmínek ($T = 35^\circ\text{C}$) za konstantní hodnoty skluzu $SRR = 0,5$ pro kapalná maziva, kterými byly v tomto případě destilovaná voda a kukuřičný sirup o odlišných koncentracích. Pracovní podmínky realizovaných experimentů jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2 Pracovní podmínky MTM experimentů

Unášivá rychlost	$U \in (0,004; 1,2) \text{ m/s}$
Zatížení	$W = 3 \text{ N}$
Sliding-rolling ratio	$SRR = 0,5$
Dynamická viskozita	$\eta \in (0,0007; 3,12) \text{ Pa s}$

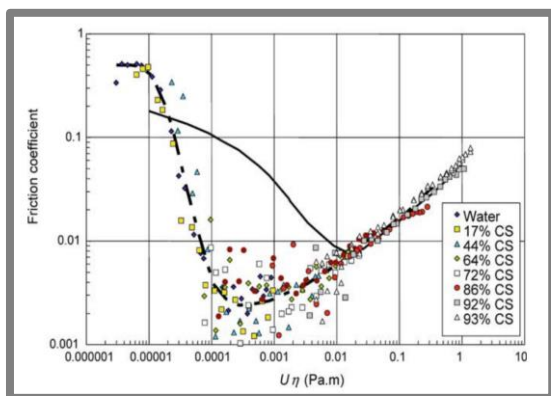
Autor při aplikaci numerického přístupu vychází z poznatků v oblasti soft EHL mazání, které publikoval Johnson [11], Hamrock & Dowson [20] a další [23]. Díky použití parametrů viskozity g_V a elasticity g_E byly hydrodynamických mapě vyznačeny získané výsledky jenž klasifikují pracovní režim EHL mazání. Řešením Reynoldsových rovnic a numerického modelu byly získány predikční vztahy pro určení jednotlivých složek součinitele tření μ . Tím byly vytvořeny analogické vztahy jako při predikci tloušťky mazacího filmu h , které dosud v této problematice neexistovaly. Tato skutečnost souvisí s minoritním podílem publikovaných studií zabývajících se třením v oblasti soft EHL kontaktů [57], [58], [59] například oproti publikacím zaměřeným na smíšený režim mazání.

Výsledky:

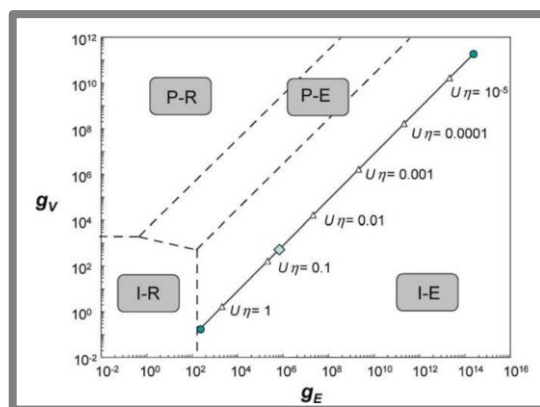
Výsledkem studie je zjištění vývoje součinitele tření v závislosti na pracovních podmínkách v soft EHL kontaktu. Ze závislosti součinitele tření μ na unášivé rychlosti U pro hrubší z disků vyplývá, že každému použitému mazivu přísluší jedinečný průběh se vzájemně nízkou mírou korelace. Zatímco při závislosti na součinu $U\eta$ dochází k vytvoření „jediné“ Stribeckovy křivky, což je patrné z Obr. 41. Přechodová hranice smíšeného a EHL režimu byla dle Obr. 41 určena pro hodnotu $U\eta = 0,02 \text{ Pa m}$.

Na základě známých drsností povrchu R_q a predikce tloušťky mazacího filmu h byl určen parametr mazání λ definující jednotlivé režimy na Stribeckově křivce. Pro uvedený součin $U\eta = 0,02 \text{ Pa m}$ je parametr mazání $\lambda \approx 7,1$, kdy je tloušťka filmu vyšší než průměrná výška povrchových nerovností R_q a kontakt tak pracuje v režimu EHL. Na Obr. 41 jsou porovnány experimentální data pro oba použité disky ($R_{q1} = 70$; $R_{q2} = 800 \text{ nm}$).

Z obrázku je patrný přesun minima (hranice mezi smíšeným a EHL mazáním – souvislá černá čára v Obr. 41) ve Stribeckově křivce s klesajícím R_q za současného poklesu součinitele tření μ do nižších hodnot $U\eta$. Přesto je z obrázku patrná shoda vývoje tření pro oba případy ve vyšších hodnotách $U\eta$, kdy kontakt pracuje v režimu plného mazání, ve kterém nemá vliv drsnosti povrchu R_q zásadní vliv. De Vicente ze získaných výsledků stanovil interval přechodu obou režimů $\lambda \in \langle 7; 7,5 \rangle$. Pro plný mazací režim byly získané výsledky zpracovány do hydrodynamické mapy dle Obr. 42, čímž došlo k vymezení pracovního režimu EHL v jednotlivých experimentech.



Obr. 41 Stribeckova křivka – změna součinitele tření v mazaném kontaktu pro různé viskozity maziv. Kontakt STEEL/NDA. [13]



Obr. 42 Hydrodynamická mapa – pracovní oblast experimentu. Kontakt STEEL/NDA. [13]

Na základě experimentů a numerického řešení byly získány predikční vztahy pro výpočet centrální h_{cent} a minimální h_{min} tloušťky filmu. V porovnání vztahů s predikcí Hamrock&Dowson [20] je dobrá shoda pro minimální tloušťku filmu. Avšak pro centrální tloušťku filmu byla zjištěna nižší závislost na unášivé rychlosti a zatížení popsaných parametry $\bar{U}$ a $\bar{W}$.

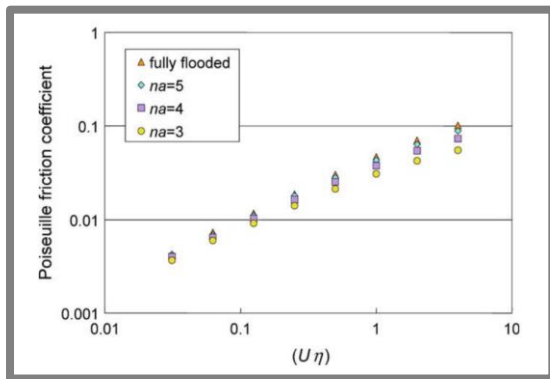
Minimální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle de Vicente:

$$h_{min} = 2,8 \cdot \bar{U}^{0,66} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R' \quad (2-25)$$

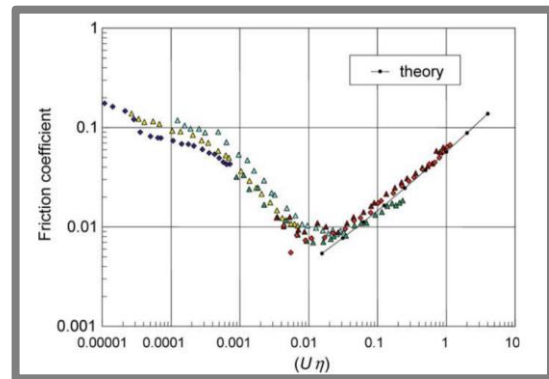
Centrální tloušťka v kruhovém soft EHL kontaktu dle de Vicente:

$$h_{cent} = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,60} \cdot \bar{W}^{-0,14} \cdot R' \quad (2-26)$$

De Vicente v numerickém modelu separoval jednotlivé složky součinitele tření μ na Couette složku $\mu_{Couette}$ a Poiseuille složku $\mu_{Poiseuille}$. Poiseuille složka reprezentuje valivé tření a složka Couette tření kluzné. Autor uvádí, že i při podmínkách čistého skluzu, kdy $SRR = 2$ existuje přítomnost $\mu_{Poiseuille}$. Vývoj obou složek v závislosti na třecí síly je pro $SRR = 0,5$ patrný, kdy data vykazují lineární růst s převládající velikostí $\mu_{Couette}$.



Obr. 44 Závislost vzdálenosti od vstupu maziva do kontaktu na vývoji koeficientu tření. Kontakt OCEL/NDA. [13]



Obr. 43 Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé R_q . Kontakt STEEL/NDA. [13]

Při porovnání obou složek v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu je pozorovatelná minoritní změna složky $\mu_{Couette}$ při klesající vzdálenosti od středu kontaktu. Naopak pro složku $\mu_{Poiseuille}$ je dle **Obr. 44** tato více výrazná, kdy s klesající vzdáleností od středu a při vyšších hodnotách $U\eta$ dochází k poklesu tření μ v kontaktu, což lze přisoudit vzniku vyšších smykových napětí v mazivu. Dle získaných závislostí byly stanoveny regresní vztahy (2-27 a 2-28) pro výpočet obou složek součinitele tření μ .

Složka součinitele tření $\mu_{Poiseuille}$:

$$\mu_{Poiseuille} = 1,46 \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,70} \quad (2-27)$$

Složka součinitele tření $\mu_{Couette}$:

$$\mu_{Couette} = SRR \cdot (3,8 \cdot \bar{U}^{0,71} \cdot \bar{W}^{-0,76} + 0,96 \cdot \bar{U}^{0,36} \cdot \bar{W}^{-0,11}) \quad (2-28)$$

Součinitel tření μ :

$$\mu = \mu_{Poiseuille} + \mu_{Couette} \quad (2-29)$$

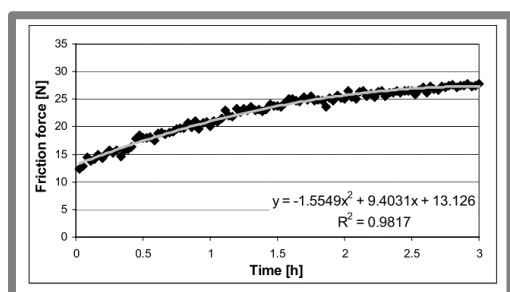
Na závěr jsou získané experimentální výsledky porovnány s vypočtenými hodnotami dle predikčních vztahů (2-27) a (2-28). Rovnice (2-29) reprezentuje celkový součinitel tření součtem obou složek. Porovnání numerického modelu a experimentů zachycuje **Obr. 43**, ze kterého je patrná velice dobrá vzájemná shoda.

[17] SUKUMARAN, Jacob, Mátyás ANDÓ, Vanessa RODRIGUEZ, Patrick D E BAETS and Patrick Daniel NEIS. Friction torque, temperature and roughness in roll-slip phenomenon for polymer – steel contacts, 2006.

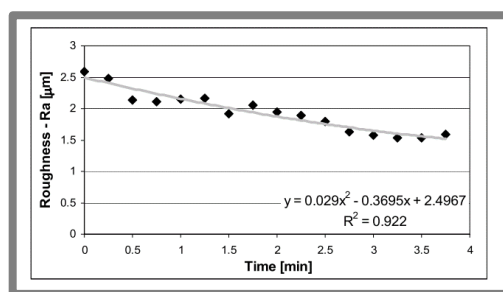
Experimentální studie je zaměřena na objasnění vývoje součinitele tření a změn topografie povrchu v hybridním nemazaném kontaktu za podmínky nenulového poměru SRR . To bylo možné díky použití aparatury „twin disc“, která je reprezentována dvojicí disku z polymerních nebo ocelových materiálů poháněných stejnými otáčkami. Skluz je vyvozen odlišným průměrem obou poháněných disků. Kontakt byl simulován mezi ocelovým (S355J2) diskem a polymerním (PA6) diskem, které tvoří hybridní kontakt. Aparatura je vybavena snímačem točivého momentu, ze kterého lze zpětně získat hodnoty součinitele tření.

Výsledky:

Autor v rámci studie provedl časový – 3hodinový test zaměřený na objasnění změn součinitele tření μ , respektive třecí síly F_t na čase. Přičemž vždy po 15minutovém intervalu byl test pozastaven a byla určena jednak velikost třecí síly ale také změny topografie povrchu R_a . Experiment byl proveden při poměru $SRR = 0,2$, který blíže odpovídá skluzovým poměrům v reálných aplikacích. Experiment byl realizován při konstantních otáčkách 200 min^{-1} , normálovém zatížení 130 N a pokojové teplotě $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 46 Vývoj třecí síly v průběhu časového testu pro nemazaný kontakt. [17]



Obr. 45 Vývoj drsnosti povrchu v průběhu časového testu pro nemazaný kontakt. [17]

Vývoj třecí síly v čase reprezentuje Obr. 46, kde je patrný nárůst třecí síly v průběhu časového testu, který vykazuje parabolický průběh. Rovněž byla určena změna teploty v okolí kontaktu v průběhu časového testu, která má lineární rostoucí charakter. Rozdíl teplot na počátku a na konci testu lze pokládat za méně výrazný $\Delta T < 7^\circ\text{C}$. Podíl na nevýrazné změně teploty může mít materiálová kombinace dvojice disků, kdy v průběhu časového testu dochází přestupu vzniklého tepla v kontaktu ocelovému disku.

V případě změn topografie povrchu je patrné, že drsnost povrchu R_a je funkcí času, kdy s rostoucí časovou jednotkou drsnost povrchu klesá. Při snížení drsnosti povrchu dochází k vyhlazení výrobních povrchových nerovností polymerního disku, přičemž rozdíl počátečního a koncového stavu dosahuje až $1\text{ }\mu\text{m}$. Procentuálně se jedná přibližně o 38% pokles R_a . Drsnost povrchu se v průběhu časového testu snižovala, viz. Obr. 45, přičemž bylo pozorováno vyhlazení povrchových nerovností v počáteční fázi časového testu.

[22] **BONGAERTS, J. H. H., K. FOURTOUNI AND J. R. STOKES.** *Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact*. Tribology International, 2007.

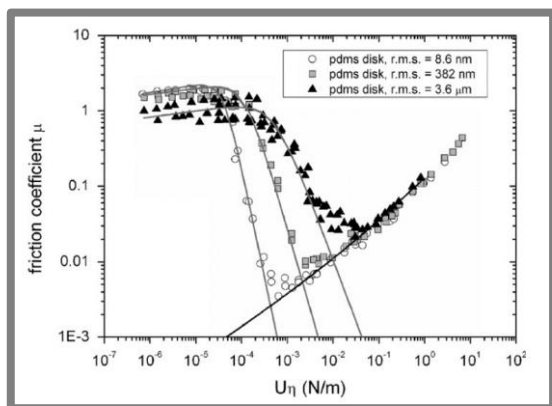
Předmětem experimentální studie (2007) je vývoj součinitele tření v poddajných kontaktech. Ve studii autor vychází z předchozích publikací [13] v této problematice a hlavní pozornost je věnována zejména vlivu drsnosti povrchu R_q na změny součinitele tření μ . Za tímto účelem je simulován mazaný kontakt pomocí zařízení MTM (*Mini-traction machine*), kde dochází k vzájemnému pohybu kuličky a disku při daných rychlostech, respektive skluzech SRR. Použitý materiál PDMS ($E = 2,4\text{ MPa}$) pro kuličku i disk reflektuje svými vlastnostmi poddajné kontakty. Vliv drsnosti povrchu bylo možné určit použitím disků o různé drsnosti povrchu R_q (8,6 ; 1382; 3600) nm. Pro mazání kontaktu byly použity maziva v rozsahu viskozity $\eta \in \langle 0,725; 2750 \rangle\text{ mPa}$, jejichž aplikací lze vyhodnotit příspěvek viskozity maziva na vývoj součinitele tření μ a minimální tloušťky mazacího filmu h_{min} .

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{qball}^2 + R_{qdisk}^2}} \quad (2-30)$$

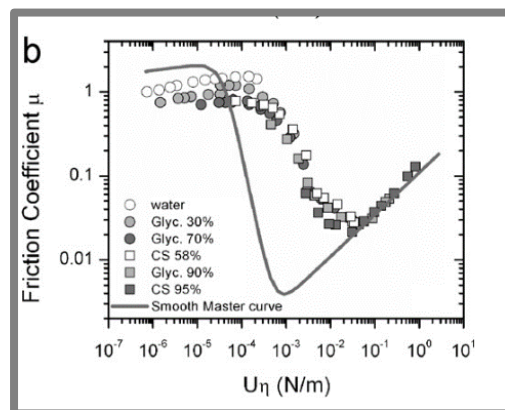
Výstupem práce je určení výše uvedených vlivů na změny součinitele tření, z jehož hodnot je reverzně možné určit minimální tloušťku mazacího filmu podobně s ohledem na parametr mazání Λ viz (2-30) jako uvedl de Vicente [13]. Z experimentálních výsledků byly vyneseny Stribeckovy křivky, které popisují vývoj součinitele tření μ na součinu $U\eta$, respektive parametru Λ .

Výsledky:

Bongaerts ve svém experimentu zaměřil na zjištění vlivu drsnosti povrchu R_q na minimální tloušťku mazacího filmu h_{min} pro konfiguraci kulička/disk v poddajném kontaktu PDMS/PDMS. Z experimentu vyplývá, že tlustý mazací film byl pozorován pro hodnotu $U\eta > 10^{-3} [N \cdot m^{-1}]$, kdy se kontakt nachází v režimu soft EHL. Zvýšení unášivé rychlosti U a viskozity η vede k nárůstu viskózního odporu, jehož následkem je zvýšení součinitele tření μ . Závislost součinitele tření na viskozitě maziva je patrná z Obr. 48, kde veškerá použitá maziva vykazují velmi blízký průběh (zejména v oblasti EHL) s viditelnou diferencí.



Obr. 47 Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé R_q . Kontakt PDMS/PDMS. [22]



Obr. 48. Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé η . Kontakt PDMS/PDMS. [22]

Jak však uvádí Bongaerts soft EHL režimu nemá drsnost povrchu žádný vliv na součinitel tření. Přesto platí, že minimum je na Stribeckově křivce je s rostoucí hodnotou drsnosti povrchu disku R_q posunuto směrem doprava, kde součin $U\eta$ nabývá vyšších hodnot. Tato skutečnost je znázorněna v Obr. 47. Minimum ve Stribeckově křivce představuje přechod ze smíšeného mazání do mazání elastohydrodynamického, přičemž k tomuto přechodu nedochází dle experimentálních výsledků za konstantní hodnoty $U\eta$, respektive Λ . Hodnoty Λ mají v závislosti na rostoucí drsnosti povrchu použitého disku klesající charakter.

- [15] **MYANT, C., H. A. SPIKES AND J. R. STOKES.** *Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts.* Tribology International, 2010.

Experimentální studie navazuje na publikaci Myanta [12] a rozšiřuje ji o poznatky vývoje tření a mazání kruhových soft EHL kontaktů. Autor se zaměřuje na identifikaci složek součinitele tření, které vyplývají z nestejné rychlosti vzájemně pohybujících se kontaktních povrchů, tření v kapalině a vzájemné interakce mezi povrchovými nerovnostmi kontaktních povrchů. V práci je popsán vliv zatížení W , elastických vlastností materiálů E a viskozity maziva η na vývoj součinitele tření μ formou, který reprezentují Stribeckovy křivky udávající jednotlivé režimy mazání.

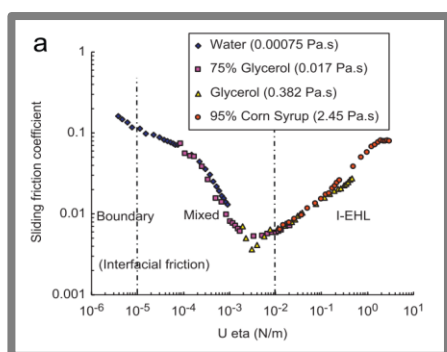
V případě EHL režimu jsou experimentální data zobrazena v hydrodynamické mapě EHL [11] vymezující blíže jednotlivé režimy EHL. Získané výsledky autor konfrontuje se ostatními autory [22], [13] a teorií soft EHL kontaktů [20].

V předchozích studiích Hamrock&Dowson [20] stanovili vztahy pro výpočet centrální h_{cent} a minimální h_{min} tloušťky filmu v soft EHL kontaktu. Později de Vicente [13] řešením Reynoldsových rovnic a vztahů pro velikosti elastické deformace sestavil numerický model, kde jsou valivá $\mu_{Poiseuille}$ a skluzová $\mu_{Couette}$ složka součinitele tření vzájemně separovány. Kvůli separaci jednotlivých složek byla použita experimentální aparatura *Mini traction machine* MTM umožňující simulovat kruhový kontakt v podmínkách mezního (boundary), smíšeného (mixed) a elastohydrodynamického (EHL) mazání za podmínek nenulového poměru SRR .

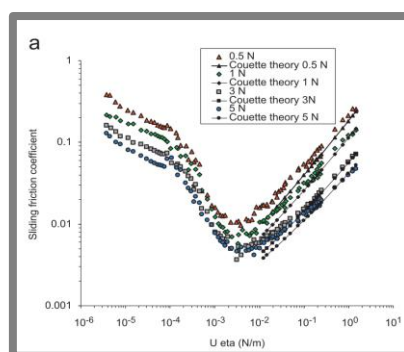
Kontakt je utvářen mezi ocelovou kuličkou a diskem, které jsou nezávisle poháněny servomotory. Materiály disků jsou polymery: *PDMS* ($E = 0,005 \text{ GPa}$), *LDPE* ($E = 0,227 \text{ GPa}$) a *PC* ($E = 2,38 \text{ GPa}$), jejichž použití umožňuje získání závislosti součinitele tření na modulu pružnosti E a tím příspěvku modulu pružnosti na mazací proces. Změny mazacího procesu a vývoje součinitele tření jsou v práci popsány s přihlédnutím k vlivu působícího zatížení v kontaktu a elastickým vlastnostem materiálu.

Výsledky:

Změny kluzného a valivého tření dokládají Stribeckovy křivky popisující vývoj součinitele tření μ při působení skluzu v závislosti na unášivé rychlosti U . Experimenty byly provedeny pro maziva v rozsahu viskozity maziva $\eta \in (0,0007 - 2,5) \text{ Pa} \cdot \text{s}$, kde u maziv s nízkou viskozitou dochází k strmému poklesu kluzné složky součinitele tření s rostoucí unášivou rychlostí U .



Obr. 50 Vývoj součinitele tření μ v režimech mazání s použitím maziv o různé viskozitě η . [15]

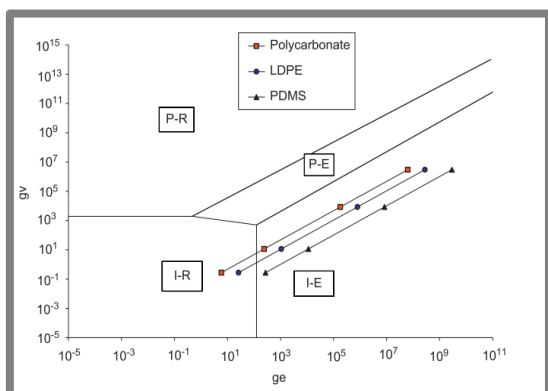


Obr. 49 Vývoj součinitele tření μ v režimech mazání pro různé zatížení W . [15]

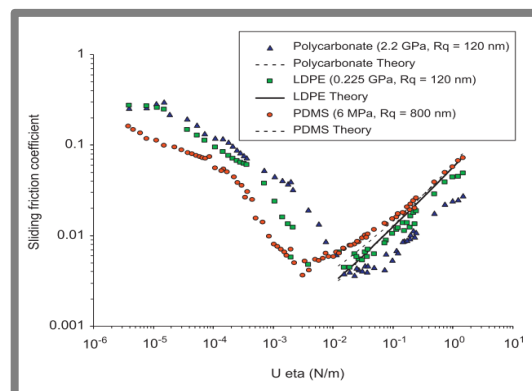
V případě viskózních maziv dochází k opačné situaci a součinitel tření μ v kontaktu roste. Valivá složka součinitele tření má rostoucí trend v závislosti na unášivé rychlosti U a není výrazně ovlivněna viskozitou maziva η v důsledku na nízkých kontaktních tlaků p .

Na Obr. 50 je znázorněn vývoj skluzové složky součinitele tření na součinu $U\eta$, ze kterého je patrné sjednocení získaných výsledků pro různá maziva v jedinou Stribeckovu křivku. To je odlišné od stavu, kdy je součinitel tření vyjádřen závislostí pouze na unášivé rychlosti U .

Závislost skluzové složky součinitele tření na zatížení W je patrná z Obr. 49, kde jsou experimentální data porovnána s predikcemi [22], [13] pro režim *isoviscous elastic*. Z porovnání vyplývá dobrá shoda experimentálních data a numerického modelu [13], kdy byla stanovena přibližná závislost na zatížení $\sim W^{0,5}$.



Obr. 52 Pracovní oblast použitých polymerů v hydrodynamické mapě režimů EHL. [15]



Obr. 51 Porovnání vývoje součinitele tření μ s teorií EHL s použitím různých materiálů. [15]

Dále byl vyhodnocen vliv modulu pružnosti E na kluzné tření použitím uvedených polymerních materiálů při konstantním zatížení W . Výsledky jsou znázorněny na v hydrodynamické mapě EHL Obr. 52 v závislosti na parametrech viskozity g_v a elasticity g_E . Kromě režimu *isoviscous elastic* je pracovní oblast polymerů zejména za nízkých hodnot součinu $U\eta$ v režimu *isoviscous rigid*, což je vidět na Obr. 52.

Porovnání součinitele tření polymerů získaných z experimentů a teorie pro režim *isoviscous elastic* je na Obr. 51. Z obrázku vyplývá zvýšení hydrodynamického tření v kontaktu v důsledku klesající hodnoty modulu pružnosti E . Současně dochází k posunutí minima ve Stribeckově křivce se zvyšující se hodnotou modulu pružnosti směrem doprava, do vyšších hodnot $U\eta$. Experimentálně zjištěné skutečnosti rozšiřují dosavadní poznatky v problematice mazaných soft EHL kontaktů o popis jejich chování v závislosti na zatížení W , modulu pružnosti E , viskozity maziva η a unášivé rychlosti U .

3.2.2 Vliv mechanických a tribologických vlastností na provoz plastového ozubení

Vývoj polymerních materiálů se v posledních 30 letech významně zvýšil. Mezi běžně používané polymery pro strojní aplikace patří např. nylony, polyacetal, polyamidy, polyuretany a další. Polymery se mohou vyskytovat v čisté nebo modifikované formě. Většina polymerů je však před použitím ve strojírenských aplikacích smíchána s jinými polymery a aditivy pro získání příslušných požadovaných vlastností. To například dokládá i široké využití polymerů obsahující skelná vlákna, která slouží pro zlepšení mechanických a materiálových charakteristik polymeru. Na druhou stranu podíl skelných vláken zhoršuje tribologické vlastnosti, zejména míru opotřebení [51], [2]. Tribologické vlastnosti vybraných polymerů jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Základní tribologické vlastnosti vybraných polymerů

Polymer	Tribologické vlastnosti
Polyamide (PA) $[-OC-(CH_2)_4-CO-NH-(CH_2)_6-NH-]$	Semi-krystalický termoplast poskytující vysokou odolnost proti opotřebení a abrazi. Současně má samomazné vlastnosti a je vhodný i v aplikacích pracujících za zvýšených teplot. Nízký součinitel tření a nízká míra opotřebení. Použití např. jako středně odolný materiál pro výrobu ložisek. Vhodné i pro vysoké kontaktní tlaky a odolný proti olejům. $T = 23^\circ C \rightarrow \mu_{DRY} = 0,25$ Aplikací jsou ložiska nebo ozubená kola.
Polyetheretherketone (PEEK) $[-OC-6H_4OC_6H_4COC_6H_4-]_n$	Semi-krystalický termoplast s vysokou mechanickou a rozměrovou stabilitou. Výborná odolnost proti opotřebení, abrazi a vysokým teplotám. Vysoký provozní teplotní limit. Odolnost vůči chemickému působení. Vhodný pro vysoké kontaktní tlaky. Nevýhodou je výrazné snížení tepelné odolnosti s rostoucím zatížením. $T = 23^\circ C \rightarrow \mu_{DRY} = 0,29$. Aplikací jsou např. speciální ložiska nebo ventily.
Polymethylmethacrylate (PMMA) $(C_5O_2H_8)_n$	Amorfní termoplast poskytuje dobrou tvrdost a světelnou propustnost. Dále vyniká dobrou odolností proti abrazivnímu opotřebení. Nevýhodou jsou nízké hodnoty mechanických vlastností. $T = 23^\circ C \rightarrow \mu_{DRY} = 0,45$
Polyoxymethylene (POM) $(\sim CH_2OH)$	Vlastnosti podobné nylonům. Vykazují vysokou odolnost proti opotřebení. $T = 23^\circ C \rightarrow \mu_{DRY} = 0,28$. Aplikací jsou např. ložiska, ventily a ozubená kola.
Polytetrafluorethylene (PTFE) $(CF_2-CF_2)_n$	Semikrystalický termoplast, který snáší vysoké teploty a vykazuje nízký součinitel tření. Současně je materiál samomazný. Nevýhodou jsou nízká mechanická vlastnosti a nízká odolnost vůči opotřebení. Obvykle smíchán s ostatními polymery. $T = 23^\circ C \rightarrow \mu_{DRY} = 0,12$. Aplikací jsou např. ložiska, ventily nebo také nástroje používané v lékařství

Výroba plastového ozubení použitím technologie vstřikování je oproti technologii obrábění u ocelového ozubení značně ekonomicky i energeticky úspornější a z hlediska sériové výroby jednodušší. Proto má v dnešní době celosvětový význam rozvoj výzkumu polymerních materiálů, které by nabídly požadované mechanické, materiálové a tribologické vlastnosti a tím by současně získaly uplatnění v aplikacích, které jsou dosud doménou tradičního ocelového ozubení. Na druhou stranu celosvětové rozšíření aplikací polymerů sebou nese zvýšenou ekologickou zátěž, přestože je recyklace termoplastů jednodušší než u např. reaktoplastů [51], [1].

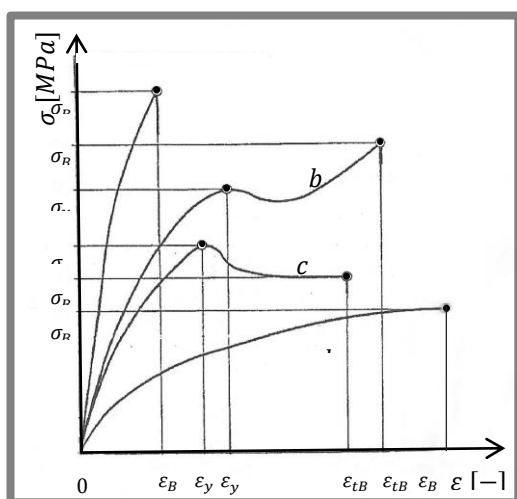
Součástí polymerních materiálů mohou být také tzv. „vnitřní tuhá maziva“, jako je např. samomazný povlak PTFE viz Tab. 4. Tento kompozitní materiál snižuje teplotu a tření, bohužel však také snižuje hodnoty mechanických vlastností ozubení a zvyšuje míru opotřebení. Proto je vhodný zejména pro samomazná kluzná ložiska a pro plastové ozubení bez externího mazání. Mezi další samomazné povlaky patří dále např. CB , MoS_2 a další [51], [1].

Tab. 4 Fyzikální vlastnosti vybraných polymerů pro aplikaci u ozubení

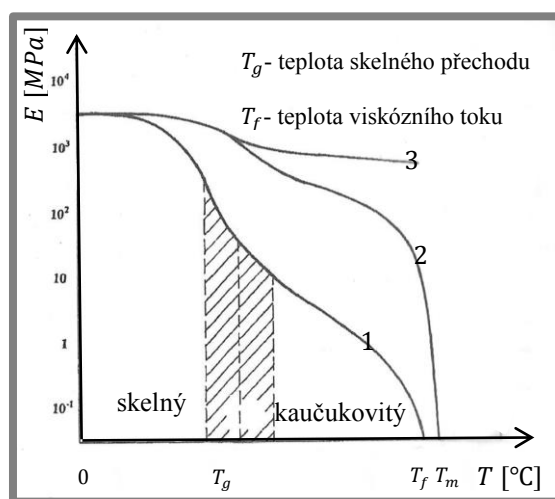
Polymer	Nejvyšší provozní teplota	Teplota skelného přechodu	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Modul pružnosti v tahu	Mez kluzu v tahu	Poissonov o číslo
	T_{max}	T_g	λ	β	E	R_e	ν
-	[°C]	[°C]	[W/m · °C]	[1/10 ⁶ · °C]	[GPa]	[MPa]	[–]
PA 66	80	47	0,25	87,5	2,50	86–103	0,41
PEEK	250	143	0,28	55	3,75	120–150	0,4
PTFE	250	–100	0,23	145	0,67	7 – 30	0,46
PMMA	90	105	0,18	68	3,3	80 – 120	0,37
PU	80	–60	0,03	150	1,85	70 – 140	0,48
POM	85	–40	0,27	93	2,80	30–120	0,35
PMDS	180	–125	0,17	230	0,007	8 – 12	0,5
Ocel 100Cr6	–	–	46,6	12	210	700	0,3

Nemazané ozubené převody jsou zpravidla používány pro malé a střední zatížení a při nízkých a středních rychlostech. Protože při vyšších rychlostech a zatíženích dochází ke zvýšení třecích sil, což následně vede k značnému tepelnému ovlivnění především povrchu ozubeného kola. Důsledkem těchto jevů je zvýšené opotřebení, které může v extrémním případě přejít až do stavu tavení materiálu ozubeného kola. Při tavení polymeru jsou charakteristiky tření a opotřebení značně odlišné a převládající mechanismus opotřebení může být klasifikován jako tzv. opotřebení tavením (*melting wear*). Vysoká provozní teplota u mazaných polymerů přesahuje hodnotu 150°C a je tak výrazně vyšší než provozní teplota u externě nemazaných polymerů. Fyzikální vlastnosti vybraných polymerů jsou uvedeny v Tab. 4.

Externě mazané polymery dovolují působení vyššího zatížení a rychlosti. Olej působí také jako chladivo, protože odvádí disipované teplo z kontaktu zubů. Situace je však ztížena změnou polohy kontaktní oblasti v průběhu záběrového cyklu ozubených kol. V kontaktu zubů ozubených kol dochází k elastohydrodynamickému mazání EHL, které je charakteristické plným oddělením kontaktních povrchů dostatečnou tloušťkou mazacího filmu tak, že se povrchy ani v místech největších nerovností nedotýkají [1]. [60]



Obr. 53 Tahová zkouška polymerů.



Obr. 54 Schématické průběhy závislosti modulu pružnosti E polymeru na teplotě T .

1. amorfní; 2. semikrystalické; 3. síťované (reaktoplasty)

- křehké materiály
- houževnaté materiály s napětím na mezi kluzu σ_y nižším než napětí při přetržení σ_B
- houževnaté materiály s napětím na mezi kluzu σ_y vyšším než napětí při přetržení σ_B
- houževnaté materiály bez meze kluzu

Nevýhodou polymerních materiálů jsou většinou nízké hodnoty mechanických charakteristik (viz Tab. 4), jako je např. modul pružnosti E , mez kluzu R_e a s nimi spojená silná závislost na teplotě T . Vlivem nízké hodnoty modulu pružnosti se polymery chovají

při kontaktu zubů pružně (elasticky). Výsledkem je elastická deformace, která má za následek změnu zakřivení boční křivky zubu a tím zvětšení kontaktní oblasti při dotyku zubů.

V průběhu záběru zubů se bod dotyku posouvá po dráze záběru, a přitom dochází ke změně charakteru mezi valivým a kluzným pohybem. S výjimkou valivého bodu, kde dochází teoreticky k čistému valení, se zpravidla jedná o poměr SRR mezi kluznou a valivou rychlostí dvojice povrchů – boku zubů. Při kontaktu zubů ozubených kol se jedná o styk dvou nekonformních povrchů. Ty se zpravidla dotýkají po velmi malé ploše a tím způsobují vysoké kontaktní Hertzovy tlaky.[60] To platí pro ocelové ozubení, které lze považovat za teoreticky tuhý kontakt.

Oproti tomu v případě plastového ozubení vlivem vlastností materiálu lze považovat kontakt za teoreticky poddajný. Z toho vyplývá, že kontaktní Hertzovy tlaky budou oproti oceli u polymerů podstatně nižší v důsledku větší deformace povrchu. [1] Vliv modulu pružnosti E , napětí σ a teploty T je patrný z Obr. 54 a Obr. 53. [5]

Nejdůležitějším parametrem u polymerů je teplota skelného přechodu T_g , která rozhoduje o teplotním rozsahu konstrukčního plastu. Po překročení této teploty dochází v struktuře polymeru ke změně rozložení vazeb mezi jednotlivými molekulami. S rostoucí hodnotou teploty nad T_g dochází k poklesu modulu pružnosti v tahu E , který je u polymerů výrazně závislý na teplotě. To ve výsledku vede ke snížení mechanických vlastností a zvýšení míry deformací. [5]

U polymerů se projevuje viskoelastické chování [40], které je spojeno s tím, že makromolekuly mohou obecně zaujímat různé konformace v závislosti na působícím napětí σ , teplotě T a čase t . Časově závislé konformační změny jsou příčinou viskoelastického deformačního chování polymerů. V kaučukovitém stavu polymerů je možné vyvozením malých sil docílit velkých deformací. [5]

Z hlediska materiálových a mechanických vlastností uvedených v Tab. 4 lze pokládat polymer *Polyetheretherketone* (PEEK) jedním nejvhodnějších pro aplikaci u ozubení. A to především kvůli vysoké provozní teplotě T_{max} , nízké tepelné roztažnosti β a vysokému modulu pružnosti E . Nevýhodou je však jeho cena, která je několikanásobně vyšší než např. pro polyamid (PA). Z hlediska tribologických vlastností, zejména míry opotřebení δ platí vztah $\delta_{POM} < \delta_{PA} < \delta_{PEEK}$, jak uvádí Harass et.al. [2].

Mezi polymery, které jsou provozovány v aplikacích, u nichž převládá valivý pohyb patří PA, POM a PBT [2]. Příkladem může být kulička, která se odvaluje po rovné podložce (disku). Hlavními působícími vlivy je elastické nebo viskoelastické chování polymerů, které vedle účinku drsnosti povrchu, rychlosti valení, velikostí normálových a tečných sil nejvíce ovlivňuje valivý pohyb [2]. Přesto má přítomnost nerovností povrchu v kontaktu podstatný vliv ve smíšeném režimu mazání, jak ukázal např. Masjedi et. al [8], který zabýval mazáním poddajných liniových kontaktů s vlivem nerovností povrchu.

Odpor vůči valení (valivé tření) vytváří hysterezní ztráty kvůli neelastické deformaci visko-elastických polymerů. Oblast podložky, před odvalující se kuličkou se stlačuje, zatímco oblast za kuličkou se následkem snížení zatížení se snaží vrátit do výchozího stavu a expanduje v závislosti na relaxačním času [2]. V reálných aplikacích se však zpravidla nejedná o čisté valení, ale o superpozici valivého a kluzného pohybu. Typickým příkladem je záběr zubů ozubených kol. Výzkum v oblasti polymerních kompozitních materiálů přinesl poznatky o využití termoplastů plněných skleněnými vlákny pro aplikaci u ozubení.

Nejčastějšími typy poškození v případě ocelových ozubených kol bývá poškození povrchů zubů a poškození lomem zubů. Poškození povrchů zubů zahrnuje opotřebení, zadírávání, trvalou deformaci, povrchovou únavu a iniciaci trhlin a prasklin v důsledku zatěžování. Poškození lomem zubů se dělí na lom v důsledku přetížení, odstřihnutí zubu, lom v důsledku plastické deformace a únavový lom [5]. Mezi časté typy poškození plastového ozubení patří zejména únavové opotřebení, opotřebení tavením, plastická deformace, creep a pitting. Na Obr. 55 je vidět opotřebení plastového ozubeného kola, jak publikoval Dearn et.al [1]. Topografie polymeru je při záběru vedena k elastickému vyhlazení nerovností v kontaktní oblasti a tím redukcí kluzného odporu. Vyhlazení nerovností ve výsledku způsobuje snížení drsnosti povrchu, která má vliv na tvorbu mazacího filmu mezi boky zubů [1].

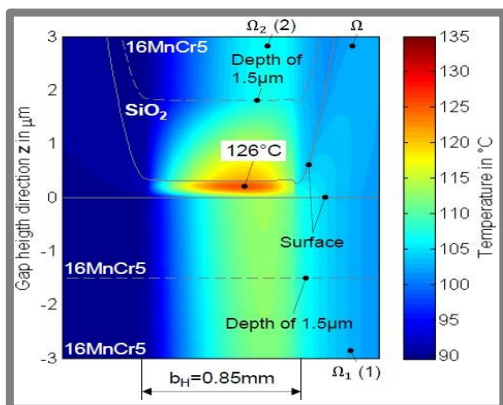
Projev opotřebení-pitting zaznamenal Dearn et. al [1] u polymerního soukolí PEEK/PEEK při vysokých zatíženích a rychlostech. To je rozdíl především vůči nemazaným polymerům, jejichž obvyklé typy opotřebení jsou projevem nejčastěji „rough“ opotřebení nebo únavy, přitom pitting se u nich neprojevuje. Pitting se v tomto případě objevil na celém boku zubu, ne lokálně v oblasti valivé kružnice jako u soukolí OCEL/OCEL, přitom velikost důlků se u polymerů snižuje s rostoucí vzdáleností od valivé kružnice [1].

Jak uvádí Dearn et. al [1] polymer PEEK byl při měření vystaven vysokému zatížení $W = 40 [N \cdot m]$ a otáčkám $n = 4500 [min^{-1}]$. Měření bylo provedeno pro hodnoty úhlu záběru ozubení $\alpha = 20^\circ$ a $\alpha = 30^\circ$.

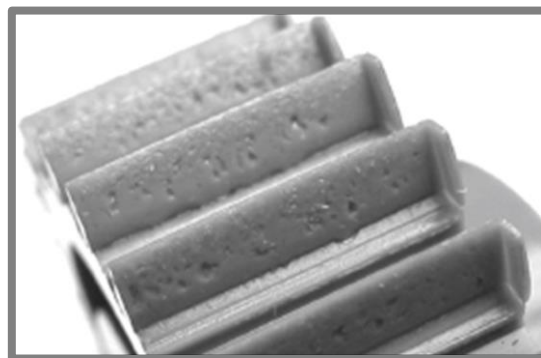
Výsledkem měření je zjištění, že u ozubení pro $\alpha = 20^\circ$ nastalo extrémní opotřebení pittingem. Oproti tomu pro hodnoty $\alpha = 30^\circ$ bylo pozorováno malé opotřebení a téměř žádný pitting. Z toho vyplývá, že polymerní ozubení (PEEK) má díky vyšší hodnotě úhlu záběru α potenciál pro použití v aplikacích, kde se projevuje vysoké zatížení [1].

Opotřebení je projevem silového a tepelného působení. S opotřebením je spojeno tření a tvorba tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Pro rozšíření oblasti použití plastových ozubených převodů např. u výkonných převodovek, kde mazání musí být zajištěno, je však podstatné experimentálně analyzovat tribologické jevy, které popisují chování plastového ozubení v závislosti na určitém zatížení, kinematických podmínkách, teplotě, použitém mazivu, okolních podmínkách a dalších parametrech.

Pro zlepšení mechanických a tribologických vlastností lze na ocelové ozubení nanést různé typy povlaků. Účelem aplikace povlaku může být snaha zvýšit tvrdost povrchu, zabránit oxidaci základního materiálu, zabránit nadměrnému opotřebení povrchu, snížit součinitel tření nebo tepelně izolovat základní materiál. Na rozložení teploty v EHL kontaktu má značný vliv tepelná vodivost λ aplikovaných povlaků, jak uvádí Lohner et. al [61].



Obr. 56 Vliv izolačního povlaku SiO_2 na teplotu v kontaktu pro ocel/ocel [61].



Obr. 55 Opotřebení plastového ozubení [1].
 $\alpha = 20^\circ$, $W_m = 17 \text{ N} \cdot \text{m}$

Nanesením povlaků s termo-izolačními vlastnostmi lze významně omezit přechod tepla z kontaktní oblasti do základního materiálu, jak je vidět z Obr. 56, který publikoval Lohner et.al [61] pro kontakt ocelového ozubení. V důsledku těchto skutečností nanesený povlak snižuje opotřebení povrchu ozubení. Tvrdé povlaky, jak poznamenal Holmberg et.al [63] a Dearn et.al [1] mohou značně snižovat tření a opotřebení. Změna drsnosti povrchu má vliv na třecí sílu, nikoliv však na tření. Tvrzení, že u polymerů, jsou mechanické vlastnosti silně závislé na teplotě T již bylo zmíněno, avšak dosud nebyl vědeckou komunitou dostatečně experimentálně ověřen pozitivní vliv chování povlaků na tribologii plastového ozubení s ohledem na změny teplot, jak uvedl Marx et. al [4].

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Kapitola je zaměřena analýzu a zhodnocení poznatků na základě současného stavu poznání, jenž je v práci popsán formou experimentálních a numerických studií. Závěry plynoucí z jednotlivých studií jsou zde interpretovány a pozorované skutečnosti jsou zhodnoceny. Výsledkem analýzy, interpretace a zhodnocení poznatků je nepřímé vymezení cílů disertační práce.

4.1 Zhodnocení obecných poznatků plynoucích ze současného stavu poznání

Rešerše uvedená v předchozí kapitole poskytuje přehled o problematice mazaných plastových kontaktů, jenž je úzce spjata s provozem ozubených soukolí z polymerních materiálů. Polymerní materiály ozubených kol byly vybrány na základě jejich chování při mazacím procesu a mechanických vlastností, které tento mazací proces přímo či nepřímo ovlivňují. Rešerše je specificky zaměřena na studie, které se zabývají mazáním plastových, respektive hybridních kontaktů.

V těchto publikacích je řešen vývoj problematiky tloušťky mazacího filmu h a součinitele tření μ v kontaktu, kde alespoň jedno z těles, je vyrobeno z polymerního materiálu. Rovněž jsou popsány určité odlišnosti, kterými se uvedený případ liší oproti interakci ocelového ozubení. V obou případech jsou ozubená kola z hlediska mazání provozována v oblasti elastohydrodynamického mazání (EHL), kde jsou kontaktní povrchy vzájemně odděleny souvislou tloušťkou mazacího filmu [31], [20], [11], [28], [1], [10], [29].

Konvenční ocelové ozubení je běžně provozováno v piezo-vizkozním režimu (P-E) EHL. Při této konfiguraci dochází ke styku nekonformních povrchů, které se dotýkají po relativně malé ploše, což ve výsledku způsobuje vysoké kontaktní tlaky působící na povrch materiálu [33]. V tomto režimu je podstatná závislost změny dynamické viskozity maziva η s kontaktním tlakem p , kterou charakterizuje tlakově-viskózní koeficient α . Přitom běžné kontaktní tlaky jsou u tohoto materiálu pozorovány v řádech jednotek GPa [1], [4], [20], [11], [56].

Oproti tomu externě mazané polymerní ozubení pracuje v isovizkozním režimu mazání (I-E), respektive v přechodové oblasti TR (oblasti mezi I-E a P-E EHL režimem). Přechodová oblast TR je podle výsledků, které byly získány dle [18] a [19] pracovním prostorem polymerů mazaných minerálním olejem s ohledem na mechanické vlastnosti polymerů, zejména modul pružnosti v tahu E . V oblasti I-E EHL se kontaktní povrchy dotýkají po relativně velké ploše, v důsledku elastických deformací při působení kontaktního tlaku. V této oblasti se hodnoty kontaktních tlaků pohybují v řádech jednotek až desítek MPa

[4], [38], [56]. Kvůli velké kontaktní ploše není v tomto režimu významná změna dynamické viskozity maziva η s kontaktním tlakem p . [36] V přechodové oblasti TR již však není změna dynamické viskozity s kontaktním tlakem při průchodu kontaktem zanedbatelná a je nutné tuto skutečnost zohlednit [1], [15], [4], [8], [3], [13], [38], [22], [56], [14].

Výzkum zaměřený na objasnění procesu elastohydrodynamického mazání u polymerních materiálů je v současné době aktuální téma [1], [4], [8], [50]. A to s ohledem na dosud nedostatečně experimentálně prozkoumanou přechodovou oblast (TR) pro vysoce zatěžované mazané polymery, které mají potenciál v budoucnu nahradit konvenční ocelové materiály. V současnosti existuje velmi nízký počet publikací, které by pojednávaly o formování tloušťky mazacího filmu a vývoji tření použitím experimentálních metod v soft EHL kontaktech.

4.2 Zhodnocení poznatků plynoucích ze studií věnovaných tloušťce filmu

Kapitola obsahuje výčet hlavních parametrů, které se podílí na ovlivnění tloušťky mazacího filmu u polymerních materiálů, dle již publikovaných studií. Seznam hlavních parametrů byl vytvořen na základě rešerše uvedené v 5. kapitole.

4.2.1 Vliv unášivé a skluzové rychlosti na tloušťku mazacího filmu

Vliv unášivé rychlosti dokládají experimenty [1], [4], [12], [50], [14], [16] ze kterých vyplývá, že trend rostoucí unášivé rychlosti U vede na vyšší tloušťky mazacího filmu. Oproti tomu za nižších unášivých rychlostí má průběh tvaru mazacího filmu více rovnoměrný charakter v téměř celém kontaktu, kromě oblasti vstupu a výstupu maziva [16]. Rovněž je za vyšších unášivých rychlostí dle [12] pozorován vyšší nárůst tlaku p v kontaktní oblasti.

Na výstupu maziva z kontaktu se za nízkých rychlostí objevuje konstrikce [14]. Toto tvrzení je však rozporu s výsledky [4] a [12], kdy se konstrikce objevuje za vyšších rychlostí, podobně jako u hard EHL. Přitom dle [50] a [23] se minimální tloušťka mazacího filmu za nižších rychlostí a vyšších zatížení nachází zpravidla na bočních stranách (lalocích) kontaktu, zatímco za vyšších rychlostí se minimální tloušťka filmu nachází na výstupu z kontaktu. Dle [4] však byla minimální tloušťka při různých rychlostech vždy pozorována v oblasti bočních laloků.

V případě rostoucí skluzové rychlosti se zvětšuje velikost smykových napětí v mazivu a tím dochází ke snížení tloušťky mazacího filmu [15], [4]. Poměr skluzové a unášivé rychlosti je označen jako *slide-to-roll ratio* (SRR). Tento poměr charakterizuje kinematické podmínky v mazaném kontaktu. Vzhledem k tomu, že při záběru reálného ozubení dochází ke kombinaci obou složek rychlostí je podstatné jejich vliv analyzovat. Za určitým limitem

navyšování skluzových rychlostí dojde ke zvýšení teploty v kontaktu. Účinkem teploty se snižuje tření v mazivu a současně se snižuje i viskozita maziva. I když z dostupných zdrojů není zřejmé, zda vysoká teplota uvnitř kontaktu vede na snížení tření v mazivu bez ovlivnění tloušťky mazacího filmu podobně jako u hard EHL. Avšak rostoucí teplota způsobí snížení redukovaného modulu pružnosti E' polymeru, čímž ve výsledku dojde ke zvýšení tloušťky mazacího filmu.

4.2.2 Vliv zatížení na tloušťku mazacího filmu

Účinek zatížení má podle provedených experimentů pro mazané i nemazané polymerní materiály negativní vliv na mechanické vlastnosti a opotřebení [2], [1], [17]. Po překročení kritického zatížení dochází k intenzivnímu režimu opotřebení materiálu v důsledku značných deformací a tepelného ovlivnění povrchu. Přitom nastává změna mechanických vlastností v závislosti na rostoucí teplotě povrchu, která je způsobena třením mezi povrchy. Kromě pittingu je tzv. „*melting wear*“ jedním z nejčastějších typů opotřebení [2], [1]. Bylo však dokázáno, že na projev opotřebení pittingem má výrazný vliv geometrie ozubení, respektive úhel záběru zubů [1], [62]. Zvýšená teplota je následkem tření v kontaktu, přičemž podstatně zkracuje dobu do porušení z hlediska únavy a je současně hlavním faktorem ovlivňující opotřebení u polymerního ozubení [7], [17], [7].

Tloušťka mazacího filmu je v EHL režimech nepřímo úměrná zatížení, s jehož rostoucí velikostí se postupně snižuje [1], [4], [12]. V režimu soft a hard EHL se spolu s rostoucím zatížením zvětšuje kontaktní oblast, byť minimální h_{min} i centrální h_{cent} tloušťka filmu se mění jen nevýrazně [4]. V režimu soft EHL má účinek rostoucího zatížení výraznější vliv než u hard EHL z důvodu nízké hodnoty redukovaného modulu pružnosti E' . To je dáno především velikostí exponentu bezrozměrného parametru zatížení $\bar{W}$ v rovnici pro výpočet tloušťky filmu.

V hard EHL má exponent hodnotu $-0,067$, zatímco pro soft EHL je jeho hodnota $-0,21$. Proto má zatížení v soft EHL kontaktu zvýšený účinek na pokles tloušťky mazacího filmu. Tloušťka mazacího filmu pro kontakt ocel/polymer je dle [1] menší oproti kontaktu polymer/polymer, což je patrně důsledkem vyššího redukovaného modulu pružnosti materiálu E' . Výsledky dle [47] tyto závěry potvrzují. V publikovaných studiích však chybí stanovení exponentu bezrozměrného parametru zatížení $\bar{W}$ pro přechodovou oblast TR EHL. Průběh tlaku vykazuje sekundární tlakové maximum na výstupu z kontaktu. Z důvodu změny viskozity maziva s tlakem se na výstupu vytváří tlaková špička [12], jak bylo předpokládáno dle [20]. Tento účinek je patrný zejména při vyšších zatíženích. Současně při vyšších zatíženích, respektive se snižující se tloušťkou filmu vzniká podobnost průběhu tlaku s Hertzovým profilem [8].

4.2.3 Vliv teploty na tloušťku mazacího filmu

Rostoucí teplota v kontaktu má u nemazaného polymerního ozubení vliv na zvýšení součinitele tření, čímž se zvyšuje míra opotřebení, která má přímý dopad na technický život ozubeného kola [1], [2]. Tento fakt je ještě více umocněn při použití materiálově smíšeného soukolí (např. ocel/polymer), kdy dochází u polymerního kola ke značným plastickým deformacím, které jsou zapříčiněny nízkými mechanickými charakteristikami zejména modulem pružnosti v tahu E [1]. Silná závislost mechanických vlastností polymerů na teplotě je zde patrná. Teplota byla studována především v případech, kdy se jedná o nemazané kontakty [6], [52], [1], [7], respektive u polymerů, které jsou mazány vnitřními tuhými mazivy [54].

Liší se tak od případu externě mazaných polymerů [4], [12], [17] u kterých chybí dostatek experimentálních výsledků, jež by pomohli teplotní účinek lépe analyzovat. Přesto lze očekávat, že při zvýšení teploty dojde u mazaných polymerů v režimu EHL ke snížení viskozity maziva na vtoku, což v důsledku povede ke snížení tloušťky mazacího filmu. U ozubeného kola narůstá při provozu celková teplota, a to vystavuje materiál zvyšujícím se teplotám, které se projeví snížením mechanických vlastností materiálu.

Pro kombinaci materiálů polymer/polymer v EHL režimu je však kontakt větší a tím bude větší i elastická deformace vlivem působení hydrodynamického tlaku maziva. Zvýšená teplota v kontaktu mazaného ocelového a polymerního kola byla patrná dle [17], avšak nedostatečná pro výraznou změnu mechanických vlastností materiálu a procesu mazání. Tloušťka filmu h je v případě kontaktu polymer/polymer ovlivněna nízkou tepelnou vodivostí plastů λ a dochází tak k vyšším teplotním nárůstům v kontaktu. Tím dojde ke snížení tloušťky mazacího filmu. Jako možné řešení se kvůli této skutečnosti nabízí použití povrstvených polymerů, kdy by nanosený povlak měl díky své tepelné vodivosti zabránit průchodu tepla do základního materiálu podobně jako u ocelového ozubení a tím snížit hodnoty celkových teplot základního materiálu [61], [63], [1], [55].

Teplota v kontaktní oblasti zubů se jednak zvyšuje samotným třením v kontaktu spoluzabírajících zubů a současně také vlivem celkového ohřívání obou kol při provozu, což se negativně projevuje snížením tloušťky mazacího filmu. Rovněž dochází ke snížení únosnosti z hlediska ohybových napětí působících v patě zubu. Účelem použití povlaku je izolace kola uvnitř kontaktu, jehož důsledkem dochází k ohřátí mazacího filmu a snížení kapalinového tření v mazivu. Tloušťka filmu potom není výrazně dotčena. Teplota má podstatný vliv na mechanické, tribologické vlastnosti a proces mazání [5], [6], [52], [7], [54]. Z publikovaných závěrů uvedených autorů v rešerši je patrný konsensus, že účinek teploty se projevuje zvýšením tření v kontaktu, což v důsledku způsobí snížení tloušťky mazacího filmu.

4.2.4 Vliv tlakově viskózního koeficientu na tloušťku mazacího filmu

Viskozita maziva η ovlivňuje tloušťku filmu, jak je patrné z experimentů dle [4], [12]. Z výsledků vyplývá, že při použití maziva o vyšší viskozitě je tloušťka centrálního mazacího filmu větší oproti mazivu s nižší viskozitou. Vliv růstu viskozity maziva s tlakem je v EHL vyjádřen v rovnicích popisující minimální h_{min} a centrální h_{cent} tloušťku mazacího filmu tlakově viskózním koeficientem α . Pro režim hard EHL je koeficient α považován za nenulový ($\alpha = 0,53$). Tím jsou zohledněny především změny viskozity s působícím tlakem, který v hard EHL nabývá hodnot $3 - 4 \text{ GPa}$ a současně způsobuje elastické deformace kontaktních těles. Oproti tomu v soft EHL, respektive v isoviskózním režimu (I-E) EHL je považován tlakově viskózní koeficient α za nulový. I přes nízké hodnoty do $0,5 \text{ GPa}$ je tlak p dostatečný na vyvolání elastické deformace kontaktních těles, ale nedostatečný na zvýšení dynamické viskozity maziva. Díky tomu není tloušťka mazacího filmu tolik ovlivněna jako u hard EHL kontaktů. V přechodové oblasti TR EHL, která leží mezi soft a hard EHL lze tedy hodnotu α očekávat v intervalu $(0; 0,53)$. Z publikovaných článků věnujících se soft EHL však není známa konkrétní hodnota tlakově viskózního koeficientu pro přechodovou oblast TR EHL. Rovněž nebyl dosud studován vliv závislosti tlakově viskózního koeficientu α na mazací proces. Na základě hodnot α pro jednotlivé režimy EHL, je patrná silná závislost ovlivňující tloušťku filmu h , která nebyla v teorii soft EHL dosud uvažována.

4.2.5 Vliv drsnosti povrchu na tloušťku mazacího filmu

Účinek drsnosti povrchu RMS (R_q) se u polymerů projevuje odlišným způsobem oproti ocelovým materiálům. Z důvodu nízkých hodnot mechanických vlastností polymerů dochází při vysokém zatížení W k procesu opotřebení „vyhlazením“ povrchových nerovností tlakem maziva. Následkem je zmenšení drsnosti povrchu, což způsobí zvýšení minimální tloušťky mazacího filmu [1]. Naopak s rostoucí drsností R_q kontaktních povrchů lze očekávat snížení minimální tloušťky mazacího filmu h_{min} .

Drsnost povrchu těles omezuje použití konkrétních experimentálních metod. Metoda fluorescence (LIF) byla použita [15] na soft EHL kontakt polymerů. Vliv drsnosti povrchu negativně ovlivňuje kvalitu získaných snímků. Rovněž má LIF omezení z hlediska rozlišitelnosti a intervalu měřitelné tloušťky filmu h . Oproti tomu optická interference je přesnější metoda, která umožňuje měření tloušťky filmu v řádech až jednotek nm . Podmínkou použití optické interference je nízká drsnost povrchu, respektive hladký povrch kontaktních těles, který zajistí dostatečný odraz světla od kontaktního povrchu. Při hrubé drsnosti difuzního povrchu, by se odraz světla šířil v náhodných směrech dle profilu nerovností. Hladký povrch a zbavení přítomnosti nečistot zabezpečí podmínky pro získání kvalitních interferogramů metodou optické interferometrie, které popisují rozložení a tvar tloušťky mazacího filmu.

4.3 Zhodnocení poznatků plynoucích ze studií věnovaných vývoji součinitele tření a vlastnostem polymerních materiálů

Kapitola pojednává o zhodnocení hlavních účinků, které se podílí na ovlivnění součinitele tření u polymerních materiálů pracujících v soft EHL režimu. Dále jsou porovnány mechanické a tribologické vlastnosti polymerních materiálů na základě již publikovaných studií. Výsledky a závěry numerických a experimentálních studií jsou v kapitole zhodnoceny a diskutovány.

4.3.1 Vývoj součinitele tření v soft EHL kontaktu

Vývoj součinitele tření byl pozorován ve studiích [22], [13], [15], [17], kde autoři popisují podobně jako v případě tloušťky mazacího filmu závislosti na pracovních podmínkách zatížení W , unášivé rychlosti U , teploty T , modulu pružnosti E , skluzu SRR a viskozity maziva η , za kterých soft EHL kontakty pracují. V případě EHL mazání se s rostoucí unášivou rychlostí U , respektive parametrem mazání Λ zvětšuje velikost vnitřního tření v kapalině, jenž reprezentuje viskozita maziva η . S rostoucí viskozitou maziva rovněž dochází k nárůstu tloušťky mazacího filmu h , která odděluje kontaktní povrchy.

Drsnost povrchu R_q by neměla mít v režimu EHL zásadní vliv, přesto byl ve studii [13] pozorován pokles součinitele tření μ s klesající hodnotou R_q . Současně také došlo k posunutí Stribeckovy křivky do nižších hodnot součinu $U\eta$, respektive parametru λ . Rovněž byl dle [13] stanoven přechod režimů smíšeného a elastohydrodynamického mazání u soft kontaktu, který náleží intervalu $\lambda \in \langle 7; 7,5 \rangle$.

Po přechodu do režimu EHL byl ve studii [13] pozorován jednotný vývoj součinitele tření μ tvořící jedinou Stribeckovu křivku při použití maziv o různé viskozitě η . Na základě experimentálně získaného součinitele tření [13] byla určena centrální h_{cent} a minimální h_{min} tloušťka filmu jenž v porovnání s predikcí [31] odpovídá pouze v případě minimální tloušťky h_{min} . Avšak pro centrální tloušťku filmu h_{cent} byla zjištěna nižší závislost na unášivé rychlosti a zatížení popsanych parametry $\bar{U}$ a $\bar{W}$.

Za významnou numerickou studii lze považovat [13], kde byly za podmínky čistého skluzu separovány jednotlivé složky součinitele tření μ , které se rovněž podílejí na utváření mazacího filmu. Jedná se o složku kluzného $\mu_{Couette}$ a valivého tření $\mu_{Poiseuille}$, přičemž i v případě kontaktu pracujícího za čistého skluzu, kdy $SRR = 2$ se obě složky podílejí na vývoji součinitele tření. Při porovnání obou složek v závislosti na vzdálenosti od středu kontaktu byla zjištěna minoritní změna složky $\mu_{Couette}$ při klesající vzdálenosti od středu kontaktu. Naopak pro složku $\mu_{Poiseuille}$, která reprezentuje valivou složku tření je tato změna

více výrazná, kdy s klesající vzdáleností od středu a při vyšších hodnotách $U\eta$ dochází k poklesu tření μ v kontaktu, což lze přisoudit vzniku vyšších smykových napětí v mazivu. Studie [13] významně přispěla v problematice soft EHL kontaktů vytvořením predikčních vztahů výše uvedených složek součinitele tření μ závislých na identických parametrech jako v případě predikce tloušťky filmu. Ve studii [13] byla pozorována velmi dobrá shoda experimentu a numerického modelu.

Pro určení vývoje součinitele tření byly ve studii [17] realizovány časové testy, ve kterých je simulován kontakt mezi ocelovým a polymerním diskem (PA6) při absenci maziva v kontaktu. Z výsledků vyplývá s rostoucím časem klesá drsnost povrchu R_q , kdy dochází v důsledku vysokého zatížení ($W = 130 \text{ N}$) k vyhlazení povrchových nerovností. Tento jev byl patrný zejména v počáteční fázi časového testu. Rovněž došlo v průběhu času ke zvětšení třecí síly, a to o více než 40 %.

Z experimentu vyplývá dle [22], že tlustý mazací film byl pozorován pro hodnotu $U\eta > 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$, kdy se kontakt nachází v režimu soft EHL. Zvýšení unášivé rychlosti U a viskozity η vede k nárůstu viskózního odporu, jehož následkem je zvýšení součinitele tření μ . Avšak závislost drsnosti povrchu R_q na součiniteli tření μ se projevila na Stribeckově křivce v oblasti soft EHL velmi nevýrazně [22]. To inklinuje přítomnost souvislé tloušťky mazacího filmu h , kterou jsou kontaktní povrchy plně odděleny.

Ze studií, které publikoval Bongaerts [22] a de Vicente [13] vyplývá, že zvýšení unášivé rychlosti U a viskozity η vede k nárůstu viskózního odporu, jehož následkem je zvýšení součinitele tření μ . Současně platí, že minimum je na Stribeckově křivce s rostoucí hodnotou drsnosti povrchu disku R_q posunuto směrem doprava, kde součin $U\eta$ nabývá vyšších hodnot [22], [13]. Minimum ve Stribeckově křivce představuje přechod ze smíšeného (mixed) do mazání elastohydrodynamického (EHL), přičemž k tomuto přechodu nedochází dle experimentálních výsledků za konstantní hodnoty $U\eta$, respektive Λ , ale v určitém intervalu [22], [13].

Vývoj tření v kruhovém soft EHL kontaktu byl popsán [15] u maziv s nízkou viskozitou η , kdy dochází k strmému poklesu kluzné složky μ_{Couette} součinitele tření s rostoucí unášivou rychlostí U . V případě viskózních maziv dochází k opačné situaci a součinitel tření μ v kontaktu roste [15]. Valivá složka součinitele tření $\mu_{\text{Poiseuille}}$ má rostoucí trend v závislosti na unášivé rychlosti U a není výrazně ovlivněna viskozitou maziva η v důsledku na nízkých kontaktních tlaků p . Rovněž ze studie [15] vyplývá, že hodnoty parametru mazání Λ mají klesající charakter v závislosti na rostoucí drsnosti povrchu R_q .

Z porovnání experimentálních dat [15] a numerického modelu [13], vyplývá dobrá shoda, kdy byla stanovena přibližná závislost na zatížení $\sim W^{0.5}$. Při znázornění experimentálních výsledků v hydrodynamické mapě je patrné, že materiály PC, LDPE, PDMS dle [15] jsou provozovány v oblasti režimu *isoviscous elastic* s výjimkou nízkých unášivých rychlostí U , kde byl kontakt provozován v režimu *isoviscous rigid*. Dále bylo

zjištěno, že s rostoucím modulem pružnosti E dochází k posunutí pracovního pásma kontaktu blíže k přechodové oblasti TR mezi režimy I-E a P-E. Z porovnání součinitelů tření polymerů PC, LDPE, PDMS získaných z experimentů a teorie pro režim *isoviscous elastic* vyplývá zvýšení hydrodynamického tření v kontaktu v důsledku klesající hodnoty modulu pružnosti E [15]. Současně dochází k posunutí minima ve Stribeckově křivce se zvyšující se hodnotou modulu pružnosti směrem doprava, do vyšších hodnot $U\eta$ [15].

4.3.2 Vliv mechanických a tribologických vlastností polymerních materiálů

Mezi použité materiály v experimentech [1], [2], [1], [15], [4], [12], [51] patří zejména PEEK, PA, POM, PMMA, PDMS a PU. Z hlediska mechanických vlastností vykazují obecně polymery silnou závislost na teplotě oproti ocelovým materiálům. Navíc hodnoty modulu pružnosti E se u polymerů pohybují maximálně v jednotkách GPa , zatímco u ocelí se běžně udává $E \approx 210 GPa$. U polymerů tedy hodnota redukovaného modulu pružnosti E' vychází podstatně menší. To se projeví na parametrech viskozity g_V a elasticity g_E , které definují jednotlivé režimy EHL. Pomocí obou parametrů lze rovněž vymezit přechodovou oblast TR. Při nízkých hodnotách redukovaného modulu pružnosti se nachází kontakt v oblasti soft EHL, respektive isoviskózním režimu I-E EHL. Právě na zvýšení parametru elasticity g_E se výrazně projeví nízká hodnota E' a posune se tak oblast kontaktu do režimu soft EHL. Hodnota parametru viskozity g_V je kromě zatížení W a dalších parametrů závislá na tlakově viskózním koeficientu α . V režimu I-E EHL je považován za zanedbatelný, naopak v režimu P-E EHL je vliv α zohledněn. Protože TR EHL je přechodová oblast soft a hard EHL lze v této oblasti očekávat vliv koeficientu α , zejména na těsném pomezí přechodu režimů. Polymery mají nízkou tepelnou vodivost λ , která snižuje „bulk“ teplotu tělesa a vzniklé teplo tak přechází do maziva, jež teplo odvádí a tím se mazivo ohřívá. Následkem zvýšení teploty maziva dochází ke snížení dynamické viskozity maziva η a v důsledku toho dojde k poklesu tloušťky mazacího filmu h .

Z porovnání tribologických vlastností polymerů vyplývá, že materiál PEEK vykazoval, že nejlepší vlastnosti z hlediska tření a opotřebení. Z hlediska mazacího procesu, respektive tloušťky filmu dosahoval XXX při provedení experimentů v oblasti soft EHL za stejných podmínek nejlepších výsledků [zdroje]. Nevýhodou je neprůhlednost materiálu, která znemožňuje analyzování rozložení tloušťky filmu metodou optické interferometrie [21], jak navrhl Hartl et. al. Přestože některé polymery, které byly použity v experimentech [1], [2], [1], [15], [4], [12] vykazují horší tribologické vlastnosti při procesu mazání umožňují však díky optické propustnosti povrchu použití experimentální metody-optické interferometrie.

4.4 Stěžejní závěry plynoucí z rešerše

Výše uvedené skutečnosti dokládá řada odborných článků, které se věnují kromě numerického řešení především provedení reálných experimentů, kterými lze porovnat predikce vycházející z numerického řešení. Predikční vztahy pro určení tloušťky mazacího filmu a součinitele tření v soft EHL kontaktu jsou sumarizovány v Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7, Tab. 8 a Tab. 9. Na základě publikovaných článků zabývajících se režimem (oblastí) soft EHL lze konstatovat, že chybí dostatek získaných experimentálních výsledků, které by blíže objasnili proces mazání – formování tloušťky mazacího filmu a vývoj součinitele tření v tomto režimu EHL. A to zejména pro odlišné kinematické podmínky, zatížení, teploty a maziva o různé viskozitě. Podstatnou odlišností oproti hard EHL je výrazně menší redukovaný modul pružnosti, který může za určitých podmínek způsobit navýšení tloušťky filmu. Při zohlednění účinku působení teploty vzniká množství otázek, jak se budou polymery, jež mají zvýšenou závislost mechanických vlastností na teplotě při této situaci chovat. Jak to ovlivní mazací proces, respektive tloušťku mazacího filmu a součinitel tření. A jak budou ovlivněny mechanické vlastnosti polymerů. Důležitým parametrem je rovněž drsnost (reprezentativního) povrchu, která může omezovat použití metody optické interferometrie, kvůli povrchovým nerovnostem, respektive deformovaným odrazem světla od reprezentativního nerovného povrchu. V případě přechodové oblasti TR EHL je množství známých informací a skutečností o této oblasti minimální, což představuje tzv. bílé místo v oblasti teorie EHL. Bílá místa reprezentují segmenty z jednotlivých vědeckých oblastí a teorií, které nebyly dosud dostatečně experimentálně popsány a neexistuje tak množství informací, které by danou problematiku blíže osvětlili. Přitom se jedná o problematiku, která se spolu s rozšířením polymerů v oblasti mazaných strojních součástech stala aktuální. Získané výsledky pomohou k objasnění reálného procesu mazání strojních součástí z polymerních materiálů.

Na základě současného stavu poznání byly stanoveny stěžejní závěry:

- Mezi režimy *isoviscous elastic* a *piezoviscous elastic* leží přechodová oblast TR, která představuje dle dosavadních poznatků pracovní prostor pro ozubená kola z polymerních materiálů mazané minerálním olejem. Numerické studie zabývající se touto problematikou, byť existují tak nebyly dosud dostatečně experimentálně validovány. Z tohoto důvodu je podstatné se problematikou zabývat s přihlédnutím k možnostem využití polymerních ozubených kol v reálných aplikacích.
- Proces formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktech nebyl dosud dostatečně experimentálně popsán. V současnosti existuje pouze několik studií, které se zabývají utvářením mazacího filmu v polymerních a hybridních kontaktech. Podmínky experimentů v současných studiích jsou často velmi vzdálené pracovním podmínkám, za nichž je kontakt ozubených kol provozován.

- Utváření mazacího filmu je spojeno s třením, ke kterému dochází v soft EHL kontaktu. V této problematice chybí experimentální studie, které by podobně popsaly vývoj součinitele tření v kontaktu, který je provozován v oblasti soft EHL mazání. Doposud v problematice chybí poznatky vývoji součinitele tření u polymerních materiálů, které jsou používány v oblasti ozubení a změn jejich chování za různých pracovních podmínek jako je zatížení, teplota, modul pružnosti nebo skluz.

Tab. 5 Porovnání predikčních vztahů pro výpočet minimální tloušťky filmu

-	Autor	Rovnice bezrozměrné minimální tloušťky
A)	Hamrock & Dowson ($k^*=1$; hard)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 3,63 \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}) \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,68} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,073} \cdot (\alpha E')^{0,49}$
B)	Hamrock & Dowson ($k^*=1$; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 7,43 \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,65} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,21}$
C)	Hooke ($k=1$; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,83 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'} \right)^{-0,13}$
D)	Myant ($k=1$; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,8 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,68} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,20}$
E)	Marx ($k=1$; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,9 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,62} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,16}$

Tab. 6 Porovnání predikčních vztahů pro výpočet centrální tloušťky filmu

-	Autor	Rovnice bezrozměrné centrální tloušťky
A)	Hamrock & Dowson ($k^*=1$; hard)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,69 \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}) \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,67} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,067} \cdot (\alpha E')^{0,53}$
B)	Hamrock & Dowson ($k^*=1$; soft)	$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,21}$

-	Autor	Rovnice bezrozměrné centrální tloušťky
C)	Hooke (k=1; soft)	$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 3,56 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'} \right)^{-0,13}$
D)	Myant (k=1; soft)	$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 3,3 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,63} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,13}$
E)	Marx (k=1; soft)	$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 2,6 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'} \right)^{0,55} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,07}$

Tab. 7 Porovnání exponentů vstupních parametrů minimální tloušťky filmu

Exponent - h_{min}						
-	U	W	E'	R'	α	η_0
A)	0,68	-0,073	-0,073	-0,536	0,49	0,68
B)	0,65	-0,21	-0,792	0,494	0	0,65
C)	0,6	-0,13	-0,44	-0,23	0	0,6
D)	0,68	-0,20	-0,40	-0,20	0	0,68
E)	0,62	-0,16	-0,50	-0,37	0	0,63

Tab. 8 Porovnání exponentů vstupních parametrů centrální tloušťky filmu

Exponent - h_{cent}						
-	U	W	E'	R'	α	η_0
A)	0,67	-0,067	-0,073	-0,536	0,53	0,67
B)	0,64	-0,21	-0,792	0,494	0	0,64
C)	0,60	-0,13	-0,44	-0,23	0	0,60
D)	0,63	-0,13	-0,40	-0,20	0	0,63
E)	0,55	-0,07	-0,50	-0,37	0	0,55

Tab. 9 Porovnání exponentů vstupních parametrů složek součinitele tření

-	Autor	Rovnice součinitele tření
1)	de Vicente (k=1; soft)	$\mu_{Poiseuille} = 1,46 \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,70}$
2)	de Vicente (k=1; soft)	$\mu_{Couette} = SRR \cdot (3,8 \cdot \bar{U}^{0,71} \cdot \bar{W}^{-0,76} + 0,96 \cdot \bar{U}^{0,36} \cdot \bar{W}^{-0,11})$

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Podstatou disertační práce je získání nových poznatků o tribologickém chování polymerních materiálů, které rozšíří povědomí o procesu mazání poddajných kontaktů provozovaných v režimu elastohydrodynamického mazání. Přímou aplikací mohou být externě mazaná polymerní ozubená kola v jejichž kontaktu dochází utváření tloušťky mazacího filmu a vývoji součinitele tření při záběru ozubení. S odkazem na nedostatečně experimentálně prozkoumanou oblast soft EHL mazání, je podstatné se touto problematikou zabývat.

5.1 Zaměření disertační práce

Oblast soft EHL mazání stála v minulosti dlouhou dobu na okraji zájmu. V současnosti je tato oblast atraktivní, v důsledku vývoje technických plastů v posledních letech, pro provoz mazaných polymerních strojních součástí, které byly dosud provozovány bez přítomnosti maziva. V problematice soft EHL kontaktů existuje velmi nízký počet experimentálních studií, jež by mohly validovat četné numerické modely. Disertační práce rozšíří dosavadní poznatky v oblasti soft EHL kontaktů o experimenty, které jsou zaměřeny na objasnění formování tloušťky mazacího filmu a vývoj součinitele tření při průchodu maziva poddajným kontaktem. Dalším hlediskem těchto experimentů je popis projevů chování polymerních materiálů při limitních pracovních podmínkách. Podstatou disertační práce je pochopení procesu utváření mazacího filmu u soft EHL kontaktu, který je provozován v přechodové oblasti mezi isovizkozním a piezo-vizkozním režimem elastohydrodynamického mazání. Přechodová oblast představuje část z teorie elastohydrodynamického mazání, která nebyla dosud dostatečně experimentálně popsána. Proto je opodstatněné se jejím studiem zabývat s přihlédnutím k využití získaných výsledků při reálném procesu mazání strojních součástí.

5.2 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je objasnění chování soft EHL kontaktu, který je provozován v přechodové oblasti mezi režimy I-E a P-E elastohydrodynamického mazání. Realizací experimentálních měření se zahrnutím vlivu zatížení, kinematických podmínek, viskozity maziva, teploty a modulu pružnosti budou zohledněny pracovní podmínky, které ovlivňují mazací proces polymerních ozubených kol. Realizace experimentů za náročných pracovních podmínek je cílena na stanovení limitních projevů chování polymerních materiálů při procesu mazání. Disertační práce má za cíl sledovat vliv těchto parametrů a popsat změny tloušťky filmu a součinitele tření ke kterým dochází při průchodu maziva poddajným kontaktem použitím experimentální metody optické interferometrie a tribometru *ball-on-disc*.

Pro splnění hlavního cíle disertační práce je nezbytné realizovat jednotlivé dílčí cíle uvedené níže.

Dílčí cíle práce:

- Implementace optických metod pro analýzu utváření mazacího filmu v kontaktu sklo/polymer.
- Implementace experimentálních metod pro analýzu součinitele tření v kontaktu polymer/safír a polymer/polymer.
- Objasnění vlivu tlakově viskózního koeficientu na tvorbu tloušťky mazacího filmu a součinitele tření.
- Objasnění vlivu kinematických podmínek a zatížení na tvorbu tloušťky mazacího filmu a součinitele tření.
- Objasnění vlivu teploty a modulu pružnosti na formování mazacího filmu a vývoj součinitele tření.
- Objasnění projevů chování mechanických vlastností polymerních materiálů za limitních pracovních podmínek.

5.3 Přínos disertační práce

Přínosem disertační práce bude objasnění formování tloušťky mazacího filmu a součinitele tření v přechodové oblasti elastohydrodynamického mazání u soft EHL kontaktu. Nové poznatky poskytnou vysvětlení ohledně tvorby tloušťky mazacího filmu, vývoje tření a změn mechanických vlastností v poddajných a hybridních kontaktech pracujících při rozdílných kinematických podmínkách a zatíženích. Rovněž bude dosaženo objasnění formování mazacího filmu v závislosti na teplotě, která současně způsobuje změny mechanických vlastností polymerů. Výsledky z realizovaných experimentů budou následně konfrontovány s výsledky autorů uvedených v 3. kapitole a bude vyhodnocena míra shody s již publikovanými studiemi. Především však budou výsledky porovnány s numerickým modelem, který je vyvíjen na TU Mnichov v rámci projektu česko-bavorské spolupráce s VUT FSI. Na základě porovnání numerického a experimentálního přístupu bude možné numerický model validovat a predikovat závislosti tloušťky mazacího filmu na pracovních podmínkách v přechodové oblasti u soft EHL kontaktu, která nebyla dosud dostatečně experimentálně prostudována. V rámci projektu je předpokládána validace výsledků experimentů a numerického modelu na reálném polymerním ozubení. Pochopení utváření mazacího filmu, vývoje tření a určení provozních limitů materiálů přispěje ke zdokonalení

inženýrského řešení mazání polymerního ozubení. Důsledkem uvedených skutečností může být rozšíření použití mazaných polymerních ozubených kol v konkrétních strojírenských aplikacích.

5.4 Návaznost na současný stav řešení

Práce tematicky navazuje na článek, který publikoval Marx et. al [4] jež zachycuje použití metody optické (kolorimetrické) interferometrie za účelem vytvoření hydrodynamické mapy pro soft EHL kontakty a ověření platnosti již existujících regresivních rovnic pro výpočet tloušťky mazacího filmu v přechodové oblasti u soft EHL kontaktu. Tyto poznatky rozšiřují pochopení procesu mazání u polymerních ozubených kol, avšak rozcházejí se s predikcemi tloušťky mazacího filmu, které uvedl Hamrock [20], [33], Hooke [3] a další autoři. Proto je snaha provést vlastní experimentální měření tloušťky mazacího filmu, které by potvrdilo nebo vyvrátilo výsledky získané na základě numerických predikcí, respektive výsledky publikované Marxem et. al [4]. S výjimkou experimentální studie [4] nebyla metoda optické interferometrie doposud aplikována u soft kontaktů v přechodové oblasti EHL za účelem analyzování tloušťky mazacího filmu. V případě součinitele tření práce navazuje zejména na poznatky, které uvedly Dearn [1], de Vicente [13] a Bongaerts [22] o mazaných kontaktech, které jsou provozovány v režimu soft EHL. Dle všech výše uvedených skutečností byly zformulovány vědecké otázky a pracovní hypotézy disertační práce:

Vědecká otázka 1

„Dle predikcí dochází při působení skluzové složky rychlosti ke zvýšení tření a teploty v kontaktu, což v důsledku ovlivní tloušťku mazacího filmu. V případě rostoucí unášivé rychlosti dochází ke změně pozice minimální tloušťky filmu. Jak se projeví účinek skluzové rychlosti na formování mazacího filmu vně přechodové oblasti TR EHL? Dojde při zvýšení unášivé rychlosti ke změně lokace minimální tloušťky z bočních laloků do výstupní oblasti kontaktu?“

Pracovní hypotéza 1

„S nárůstem skluzové rychlosti dochází u kontaktu v přechodové oblasti ke zvýšení množství tepla, které je disipováno uvnitř filmu a tím současně i k růstu teploty. Následkem je ovlivnění formování mazacího filmu v kontaktu. Nárůst teploty povede ke snížení viskozity maziva a tím ke snížení minimální tloušťky mazacího filmu. Při zvýšení unášivé rychlosti nedojde přesunu minimální tloušťky z oblasti bočních laloků do výstupní oblasti kontaktu, přičemž při zvýšení unášivé rychlosti dojde k náklonu profilu tloušťky ve směru toku maziva v centrální části kontaktu.“

Vědecká otázka 2

„Přechodová oblast mezi režimy I-E a P-E je dle teorie EHL pracovním prostorem polymerů mazaných minerálními oleji, přičemž doposud zůstávají neznámé závislosti plynoucích z obou režimů charakterizující tento přechod. Jaká je závislost rychlosti, tlakově viskózního koeficientu maziva, modulu pružnosti a zatížení na tloušťce mazacího filmu v TR EHL režimu?“

Pracovní hypotéza 2

„V TR EHL oblasti je míra vlivu rychlosti, tlakově viskózního koeficientu a zatížení někde na přechodu režimů mezi soft a hard EHL. Trend rostoucí tloušťky je spojen se zvyšující se unášivou rychlostí, kterou lze kromě hard EHL očekávat rovněž za podmínek provozu kontaktu v přechodové oblasti EHL. Interval velikosti nenulového tlakově viskózního koeficientu pro přechodovou oblast je očekáván mezi režimy soft a hard EHL, čímž je zahrnut vliv viskozity maziva, který ve vztazích pro soft EHL kontakty není zohledněn. Tato skutečnost může mít při rostoucím zatížení významný dopad na tloušťku filmu. Současně rostoucí zatížení způsobí pokles tloušťky filmu, který bude výraznější při podmínkách blízkých soft EHL kontaktu. “

Vědecká otázka 3

„Vysoké teploty mají v případě polymerních materiálů zásadní vliv na mechanické vlastnosti. Otázkou je, jak bude ovlivněno formování tloušťky filmu a vývoj tření při zvýšených a vysokých teplotách v poddajném elastohydrodynamicky mazaném kontaktu v oblasti TR EHL?“

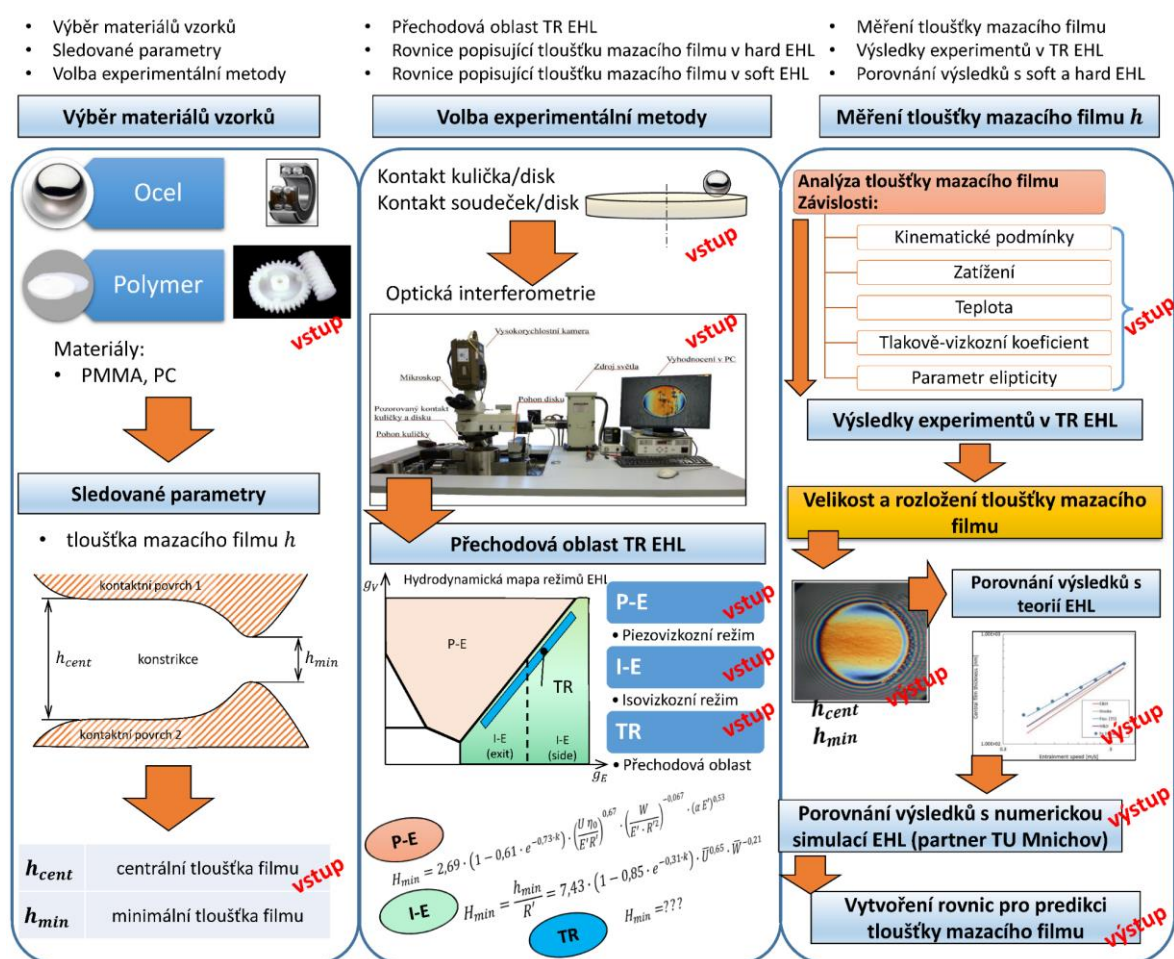
Pracovní hypotéza 3

„Vliv rostoucí teploty způsobí významné snížení mechanických vlastností, zejména modulu pružnosti, jehož redukcí dojde v přechodové oblasti ke zvýšení tloušťky mazacího filmu. Současně vliv zvýšené teploty povede k poklesu viskozity maziva a tím tloušťky filmu a zvýšení tření v kontaktu. Při provozu kontaktu za zvýšených teplot, kdy nedochází k plastické deformaci polymeru lze očekávat vliv elastického, respektive viskoelastického chování, kdy s rostoucí viskoelasticitou materiálu, dojde ke snížení tloušťky filmu a zvýšení tření. K této změně chování materiálu budou náchylnější polymery s vyšším modulem pružnosti, u kterých bude pozorována minimální tloušťka v oblasti bočních laloků. S rostoucím modulem pružnosti dojde rovněž k navýšení součinitele tření. Vysoké teploty, které překračují hodnoty pracovních teplot konkrétních polymerů vyvolají spolu s působícím zatížením nejprve projevy viskoelastického chování materiálu a následně plastické deformace, respektive creep materiálu. “

5.5 Způsob řešení a použité metody

Způsob řešení a použité vědecké metody zjednodušeně znázorňuje schéma postupu řešení uvedené na Obr. 57 a Obr. 58. Polymerní materiály určené pro vzorky jsou vybrány s ohledem na jejich četné použití v již publikovaných studiích, které se přímo vztahují k oblasti zájmu disertační práce. Současně jsou tyto materiály jako PEEK, PA66 a POM často používány ve strojírenství pro výrobu plastového ozubení. Dosud byly polymery studovány a provozovány převážně jako nemazané, proto chybí v případě mazaných polymerů, zejména v přechodové oblasti TR EHL dostatek experimentálních poznatků o hlavních sledovaných parametrech, tloušťce mazacího filmu h a součinitele tření μ .

Schéma postupu řešení - mazání

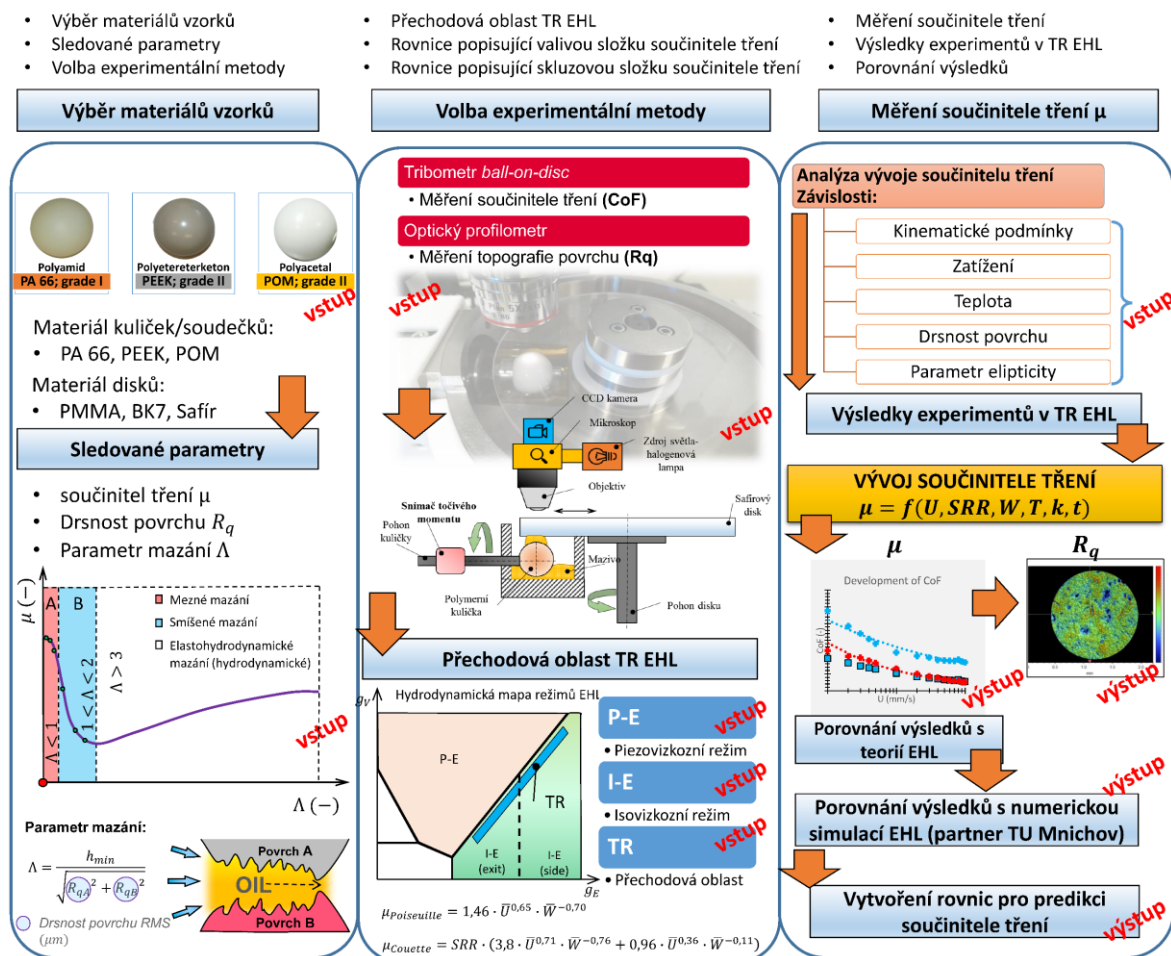


Obr. 57 Schéma postupu řešení experimentů zaměřených na mazání

Při měření tloušťky mazacího filmu je kontakt dvojice zubů simulován kontaktem kulička/disk při aplikaci metody optické interferometrie na tribometru *ball-on-disc*, která představuje experimentální přístup. Při měřeních jsou analyzovány jednotlivé vstupní parametry, jež ovlivňují formování mazacího filmu. Získanými výsledky jsou velikost a rozložení tloušťky mazacího filmu pro kontakt provozovaný v TR EHL oblasti za odlišných

vstupních podmínek použitím metody optické interferometrie. Následuje porovnání a vyhodnocení míry shody s publikovanými numerickými [20], [23], [36] a experimentálními studiemi [4], [12], které popisují formování tloušťky filmu v oblasti TR EHL, respektive soft a hard EHL. Obdobně je tomu v případě měření součinitele tření, kdy byl použit tribometr typu *ball-on-disc* se snímačem točivého momentu, díky kterému je možné určit součinitel tření μ v kontaktu mezi povrchy a porovnat jej s publikovanými studiemi [13], [22], [12]. Změny drsnosti povrchu polymerních kuliček budou vyhodnoceny před a po provedení experimentů pomocí optického profilometru Bruker.

Schéma postupu řešení - tření



Obr. 58 Schéma postupu řešení experimentů zaměřených na tření

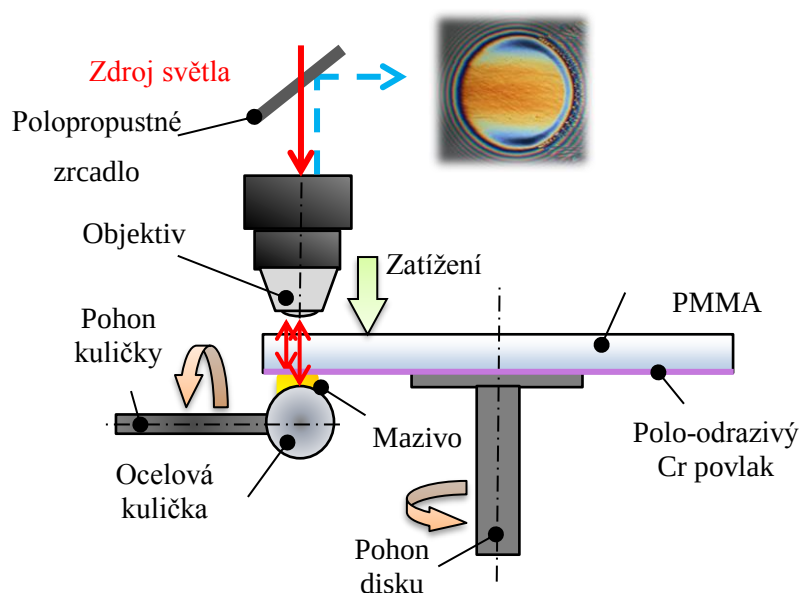
5.5.1 Fáze přípravy

Fáze přípravy zahrnuje několik činností, které je nezbytné provést před samotnou realizací plánovaných experimentů. Výběr a nákup vzorků byl uskutečněn s ohledem na používané materiály (často opticky nepropustné např. POM nebo PEEK) u plastových ozubených soukolí a možnosti aplikace zvolených experimentálních metod (podmínka vysoké světelné propustnosti např. PMMA nebo PC). Další kroky vedou k úpravě experimentálních vzorků z důvodu použití metody optické interferometrie, kdy bude na průhledný povrch nanosen

chromový Cr povlak. Následujícím krokem bude úprava zařízení – tribometru *ball-on-disc* pro měření soft EHL kontaktů. V rámci přípravné fáze bude rovněž u vzorků změřena topografie povrchu (drsnot povrchu RMS) před experimentem, čímž bude následně možné sledovat rozdíly v drsnosti povrchu R_q , ke kterým došlo v důsledku pracovních podmínek měření. Před realizací samotných experimentů budou vypočteny predikce tloušťky filmu h , respektive součinitele tření μ dle teorie soft EHL. Výsledky predikcí poslouží pro předběžný návrh pracovních podmínek plánovaných experimentů.

5.5.2 Experimentální část

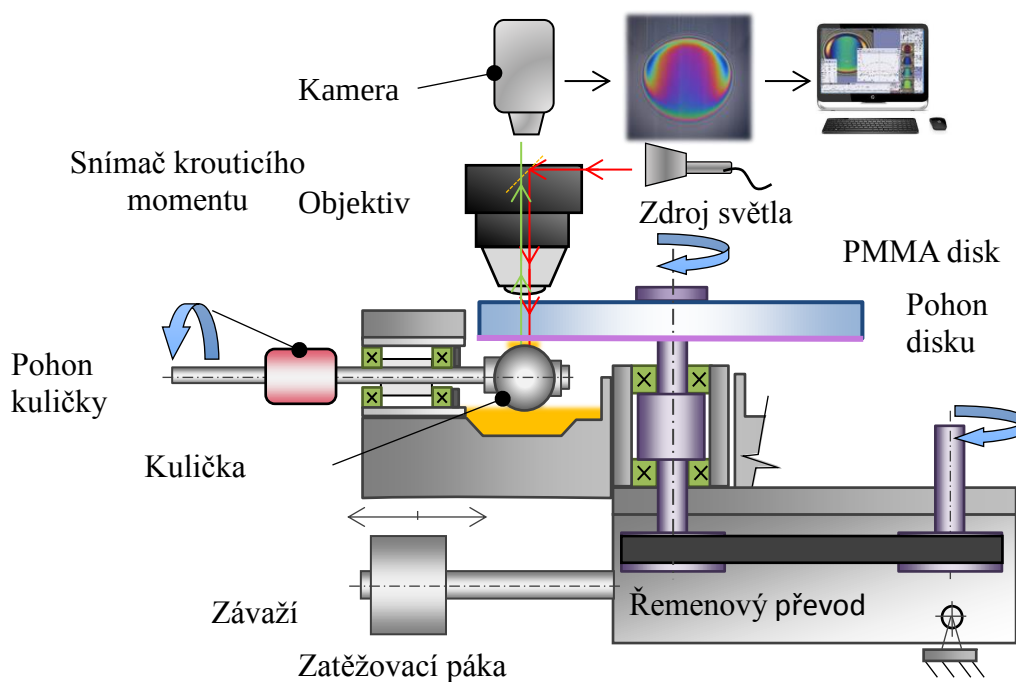
Metoda optické interferometrie umožňuje měření tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti [21]. PMMA disky budou opatřeny chromovým povlakem, aby bylo možné získat snímky o vysoké kvalitě. Na stranu polymerního průhledného disku (např. PMMA), která se stýká s mazivem, je nanesen chromový povlak, jež umožňuje odraz vlnových délek světla na povrch. První část vlny je odrazena na povrch disku a druhá část přechází přes vrstvu maziva a odráží se od povrchu ocelové kuličky. Jednotlivé vlny, respektive fázový posun mezi nimi nese informaci o tloušťce a tvaru mazacího filmu, které se v jednotlivých místech kontaktu vyskytují. Celý proces vyhodnocení tloušťky filmu je závislý na kalibraci mezi monochromatickým a chromatickým statickým snímkem porovnáním světelných intenzit, kterým je přiřazeno barevné spektrum, jenž reprezentuje velikost tloušťky filmu v kontaktu. Výsledkem je získání obrazových snímků-interferogramů, které poskytují data o rozložení a velikosti mazacího filmu h . Schéma použití metody optické interferometrie je na Obr. 59.



Obr. 59 Obecné schéma použití optické interferometrie v kontaktu kulička / disk

Pro zajištění vysoké kvality snímků by měly mít dva rušivé paprsky přibližně stejnou intenzitu. To je dosaženo použitím chromového povlaku na povrchu disku v kontaktu s mazivem. Při nepřítomnosti takového povlaku dochází od spodní strany průhledného disku k velmi malému odrazu světla, což znemožňuje použití metody optické interferometrie.

Schématické znázornění použité experimentální aparatury je na Obr. 60 pro konfiguraci *ball-on-disc*, která se používá pro měření tloušťky filmu v EHL kontaktu. Realizace experimentů měření tloušťek mazacího filmu bude probíhat na optickém tribometru v laboratoři ÚK na FSI VUT v Brně. Optický tribometr se používá k modelování reálných tribologických podmínek, ke kterým dochází při styku dvou kontaktních povrchů. Mazací film je utvářen ve styku otáčejícího se polymerního disku a ocelové ložiskové kuličky. Osy rotací obou součástí jsou vůči sobě v kolmé poloze. Na spodní straně disku je nanášena chromová vrstva z důvodu získání odrazivých vlastností povrchu. Kontakt je zatěžován přes polymerní disk, který je současně s přemístitelným zatížením (závažím) umístěn na dvojzvrtné páce. Zařízení umožňuje nezávisle pohánět obě tělesa pomocí servomotorů, jež jsou řízeny frekvenčními měniči. Tato skutečnost zajišťuje experimentální modelování provozních podmínek, a to zejména kinematických podmínek (prokluz, rozběh atd.) a zatížení.



Obr. 60 Schéma použité měřicí aparatury – rotační optický tribometr typu *ball-on-disc*

V první části vlastních experimentů bude zkoumán vliv provozních kinematických podmínek a zatížení při použití jediné kombinace materiálů pro konfiguraci kulička/disk. Při tomto měření bude použito pouze jediné mazivo o příslušné dynamické viskozitě a tlakově

viskózním koeficientu. Vyhodnocení měření spočívá v analyzování průběhu a velikosti tloušťky mazacího filmu.

V druhé části budou při experimentech navíc kromě vlivu provozních kinematických podmínek a zatížení použity různé minerální oleje. Tyto oleje budou vybrány s ohledem na velikost dynamické viskozity a tlakově viskózního koeficientu maziva. Experiment bude proveden pro jedinou kombinaci materiálů kulička/disk. Následně budou získané výsledky vyhodnoceny a vliv vlastností maziva bude porovnán s ohledem na průběh filmu v kontaktu.

Poslední částí vlastních provedených experimentů bude měření součinitele tření pro různé materiálové kombinace (viz Obr. 61) kulička /disk při působení kombinace výše zmíněných vlivů. Na základě získaných výsledků bude možné porovnat chování jednotlivých polymerů při procesu mazání za různých podmínek. To umožní komplexní srovnání s předešlými experimenty a objasní dominantní působící faktory. Přitom budou porovnány experimentálně získaná data s numerickými predikcemi a následně vyhodnocena míra vzájemné shody mezi získanými výsledky.



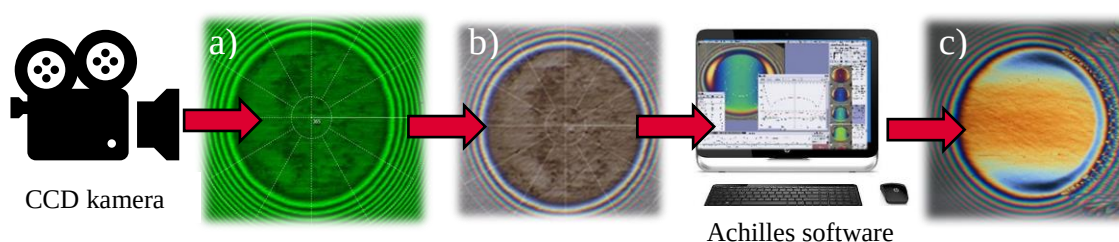
Obr. 61 Polymerní kuličky určené pro experimenty zaměřené na tření v soft EHL kontaktu

Optická (kolorimetrická) interferometrie je optická metoda, která je v dnešní době široce používána v oblasti přesných strojírenských aplikací, jako je např. 3D skenování topografie povrchu nebo měření tenkého mazacího filmu. Použité světlo slouží k nasvícení kontaktní oblasti. Chromová vrstva nanesená na disk rozděljuje světelné paprsky na dvě samostatné komponenty.

První část je odražena od chromové vrstvy a vrací se zpět do mikroskopu. Druhá část prochází chromovou vrstvou a je odražena od leštěného povrchu ocelové kuličky. Každý z těchto dvou paprsků urazí rozdílnou vzdálenost. Přitom jsou jejich fáze navzájem posunuty. Rozdílná vzdálenost mezi nimi je vypočtena na základě interference vlnových délek. Metoda umožňuje měření tloušťek filmů v řádu jednotek nanometrů a je tak z hlediska přesnosti a rozlišitelnosti velmi přesnou metodou. Navíc umožňuje opakovaně rekonstruovat tvar mazacího filmu z velkého množství chromatických interferogramů získaných pro různé experimentální podmínky.

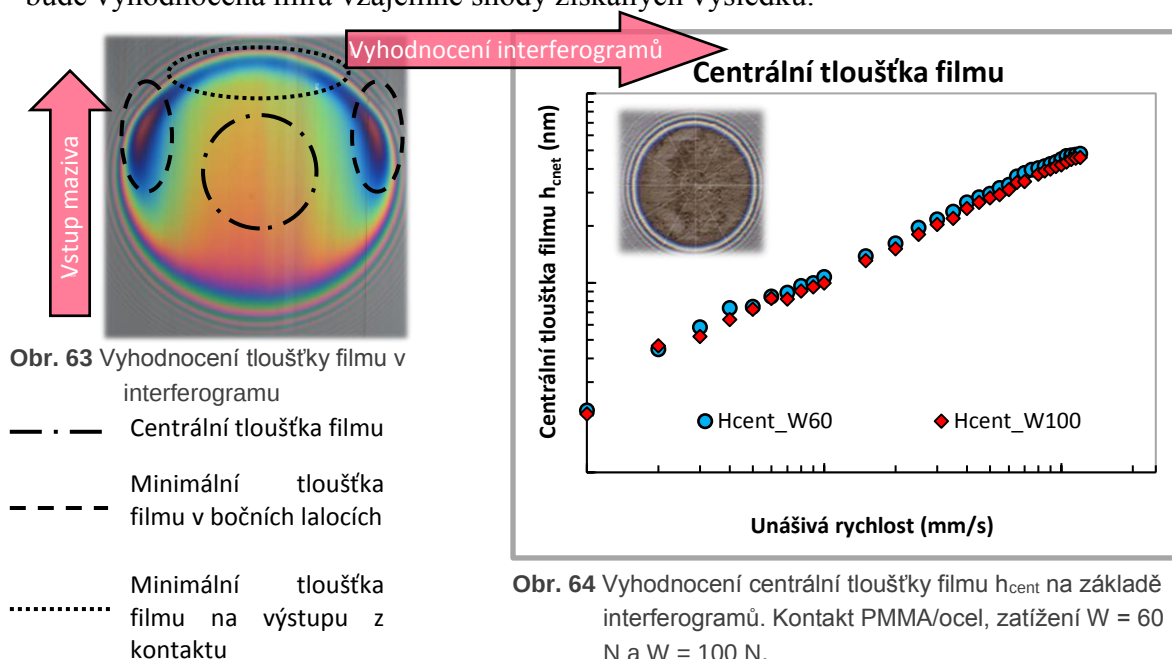
5.5.3 Zpracování a analýza získaných dat

V mikroskopu, který je součástí optického tribometru je polopropustné zrcadlo, jenž odráží světlo ze světelného zdroje, jak je znázorněno na Obr. 60. Svazek světla vstupuje do kontaktu, kde chromová polopropustná vrstva část světla odrazí. Druhá část světla prochází do kontaktu a odrazí se od povrchu ocelové kuličky. Tyto dva svazky způsobují interferenci díky fázovému posunu světla. Tento posun je roven vzdálenosti, kterou světlo urazí od povrchu disku ke kuličce a zpět k povrchu disku. Interference je zachycena vysokorychlostní (CCD) kamerou a interferenční obrazce jsou zpracovány v unikátním softwaru Achilles vytvořeném na Ústavu konstruování. Program na základě kalibrace mezi monochromatickým a chromatickým snímkem a kolorimetrické interference dopočítává tloušťku mazacího filmu h . Při kalibraci se jednotlivým barvám přiřadí odpovídající tloušťka filmu, a to v celé oblasti kontaktu. Schéma procesu kalibrace je znázorněno na Obr. 62.



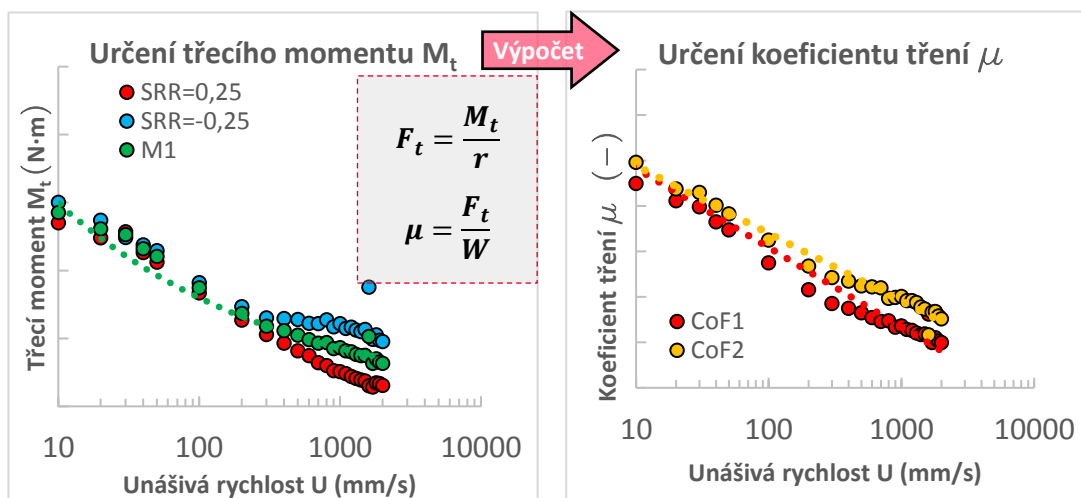
Obr. 62 Kalibrace tloušťky mazacího filmu. **a)** Interferogram-monochromatický (statický kontakt), **b)** Interferogram-chromatický (statický kontakt), **c)** Interferogram – získaný při průtoku maziva kontaktem (dynamický kontakt)

Po provedení jednotlivých měření na optickém tribometru bude vyhodnocena minimální h_{min} a centrální h_{cent} tloušťka mazacího filmu ze získaných interferogramů v programu Achilles, jak ukazuje Obr. 63. Výsledky získané z měření (Obr. 64) budou v prvním kroku porovnány s teoretickými predikcemi režimů soft a hard EHL. Následně budou získané výsledky srovnány s již publikovanými experimentálními studiemi. Přitom bude vyhodnocena míra vzájemné shody získaných výsledků.



V případě měření tření budou experimenty probíhat rovněž na rotačním tribometru *ball-on-disc*, jehož součástí je snímač točivého momentu na pohonu kuličky. Vyhodnocení probíhá podobně jako v případě tloušťky filmu v softwaru Achilles zaznamenáním snímků kamerou CCD při konkrétních podmínkách. Součástí získaných snímků jsou informace o kinematických podmínkách, teplotě oleje, ale především hodnoty třecích momentů M_t .

Na základě třecího momentu dle známého poloměru kuličky ($r = 12,7 \text{ mm}$) a normálového zatížení W byla vypočtena třecí síla F_t a dále součinitel tření μ viz Obr. 66. Při měření tření je nezbytné odečíst tření v ložiscích pohonu kuličky a disku, což je možné eliminovat průměrnou hodnotou součinitele tření na základě hodnot momentu za kladného(+) a záporného (–) prokluzu *SRR*. Tuto skutečnost reprezentuje Obr. 65, kde je tímto způsobem určen výsledný moment M_1 .



Obr. 65 Vývoj třecího momentu na unášivé rychlosti U . M_1 – výsledný třecí moment

Obr. 66 Vývoj koeficientu tření μ na unášivé rychlosti U . Kontakt POM/Safír

Dalším krokem bude srovnání vlastních získaných výsledků s numerickou simulací. Ta je v rámci partnerského projektu zpracovávána na zahraniční univerzitě – TU Mnichov. Na základě porovnání numerické studie (TU Mnichov) a experimentální studie (VUT FSI) bude možné získání vztahů pro predikci minimální h_{min} a centrální h_{cent} tloušťky mazacího filmu. Uskutečněním uvedených experimentů dojde ke komplexnímu poznání mazacího procesu u plastového ozubení. Vzájemné porovnání poskytne ucelený přehled o formování mazacího filmu u polymerních materiálů za odlišných experimentálních podmínek. Z vyhodnocených výsledků budou vyvozeny závěry, které budou spolu s daty následně publikovány

5.6 Plán publikací

S ohledem na téma a zaměření disertační práce byly vybrány odborné časopisy, které jsou svým zaměřením specificky blízké a představují potencionální prostor pro publikování dílčích částí disertační práce v odborných člancích. Rovněž byly při výběru odborných časopisů zohledněny publikace ostatních autorů, kteří se podobnou tematikou zabývali.

První publikace bude věnována objasnění základních poznatků o formování tloušťky filmu v soft EHL kontaktu při použití referenčních maziv. Pro vyhodnocení získaných výsledků bude použita metoda optické interferometrie, které umožní zjištění rozložení mazacího filmu v kontaktní oblasti. Kontakt bude simulován na tribometru *ball-on-disc* za podmínek nulového skluzu, různých unášivých rychlostí, zatížení a ambientní teploty. Součástí publikace bude porovnání experimentálních dat s predikcemi tloušťky filmu v oblasti soft EHL.

Číslo publikace 1

Cíl publikace	Experimentální verifikace formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktech použitím metody optické interferometrie.
Periodikum	Tribology Transaction
Impact factor (IF)	1,723

Druhá publikace rozšíří základní poznatky o soft EHL získané z první publikace o vliv vysokých teplot a zatížení, tlakově viskózního koeficientu a skluzu. Tím bude zhodnocen důsledek jednotlivých vlivů, které se podílejí na ovlivnění mazacího procesu. Po určení minimální a centrální tloušťky filmu dojde k porovnání se známými numerickými modely a budou určeny regresní vztahy pro určení tloušťky filmu. Získané výsledky budou dále porovnány s numerickým modelem, které je vyvíjen v rámci spolupráce s univerzitou TU Mnichov.

Číslo publikace 2

Cíl publikace	Analýza projevů jednotlivých pracovních podmínek na utváření mazacího filmu u vysoce zatížených soft EHL kontaktů.
Periodikum	Tribology International
Impact factor (IF)	3,246

Třetí publikace bude zaměřena na určení součinitele tření v kontaktu, jenž pracuje v oblasti soft EHL mazání. Ve studii budou použity různé polymerní materiály o rozličných hodnotách modulu pružnosti, které budou podrobeny náročným pracovním podmínkám na tribometru *ball-on-disc*. Z experimentů budou získány hodnoty součinitele tření v průběhu časových a Stribeckových testů v závislosti na unášivé rychlosti, zatížení, skluzu a teplotě. Výsledky experimentů budou porovnány se současným stavem poznání v problematice soft EHL.

Číslo publikace 3

Cíl publikace	Analýza vývoje součinitele tření v soft EHL kontaktu za vysokých teplot, zatížení a nenulového skluzu.
Periodikum	Wear
Impact factor (IF)	2,96

6 SOUČASNÝ STAV

Tato kapitola pojednává o zjištěných skutečnostech získaných v rámci řešení disertační práce zaměřené na soft EHL kontakty. Realizované experimenty jsou zde popsány a výsledky jsou zhodnoceny. I přes provedení četných experimentů, nebyla tato data dosud nikde publikována, proto není možné je uvést v této kapitole v plném rozsahu.

Publikované studie:

První z realizovaných experimentů byl zaměřen na vývoj tloušťky mazacího filmu. Měření tloušťky mazacího filmu probíhalo v laboratořích ÚK na tribometru typu *ball-on-disc*. Kvůli vytvoření podmínek poddajného kontaktu a současně možnosti aplikace metody optické interferometrie je použita leštěná ocelová kulička o průměru $\varnothing d = 25.4 \text{ mm}$ a průhledný PMMA disk s Cr povlakem. Před začátkem experimentů byla kulička spolu s diskem řádně očištěna izopropylalkoholem. Poté byla kulička vyleštěna pomocí brusných past, kterými bylo dosaženo snížení drsnosti povrchu a současně zajištěno zvýšení odrazivosti povrchu kvůli získání kvalitních interferenčních snímků. Před začátkem experimentů byla změřena topografie povrchů na optickém profilometru Bruker za účelem získání hodnot parametru R_q . Vlastnosti obou použitých materiálů jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Materiály vzorků pro experimenty

Materiál	Specifikace	Drsnost povrchu, R_q	Modul pružnosti, E	Poisson poměr, ν
PMMA	Polymethyl- methacrylate	0,050 μm	3,3 GPa	0,39
Ocel	100Cr6	0,005 μm	210 GPa	0,30

Mazání kontaktu je zajištěno minerálním základovým olejem FVA3, odpovídající vizkozní třídě ISO VG 100. Vlastnosti použitého maziva uvádí Liu [64]. Kontakt byl během všech měření provozován při teplotě oleje $T_{\text{oil}} = 30 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, přitom této teplotě odpovídá hodnota dynamické viskozity maziva $\eta_{30\text{FVA3}} = 0,1446 \text{ Pa s}$.

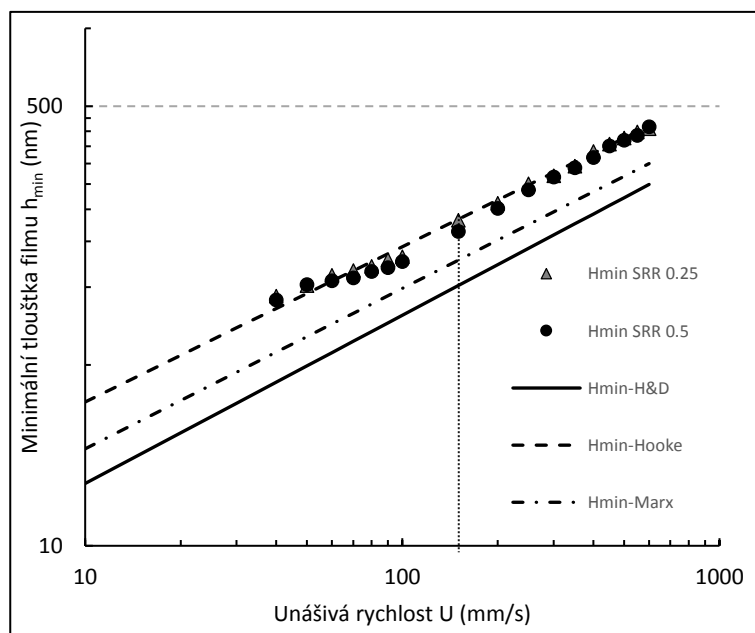
Tloušťka mazacího filmu byla měřena za podmínek, kdy unášivá rychlost $U = 0,01 - 0,6 \text{ m/s}$ a zatížení $W = 35 \text{ N}$. Tomuto zatížení odpovídá Hertzův kontaktní tlak o velikosti $p_m = 85 \text{ MPa}$ a poloměr kontaktní oblasti $a = 0,443 \text{ mm}$. Z hlediska kinematiky byly provedeny experimenty pro dva různé skluzy $\text{SRR} = 0,25$ a $\text{SRR} = 0,5$, které mohou blíže odpovídat změně valivých a skluzových složek rychlostí při záběru zubů.

Tloušťka mazacího filmu byla měřena a vyhodnocena aplikací metody optické interferometrie. Na stranu polymerního průhledného disku PMMA, která se stýká s mazivem, je nanesen chromový povlak, jenž umožňuje odraz vlnových délek světla na povrch. První část vlny je odražena na povrch disku a druhá část přechází přes vrstvu maziva

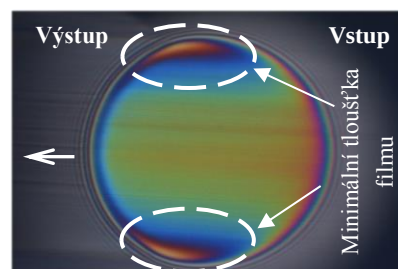
a odráží se od povrchu ocelové kuličky. Jednotlivé vlny nesou informaci o tloušťce a tvaru mazacího filmu, který se v jednotlivých místech vyskytuje. Výsledkem je získání obrazových snímků-interferogramů, které poskytují data o rozložení a velikosti tloušťky mazacího filmu. Schéma experimentálního zařízení – tribometru je v konfiguraci *ball-on-disc* znázorněno na Obr. 60.

Získané výsledky:

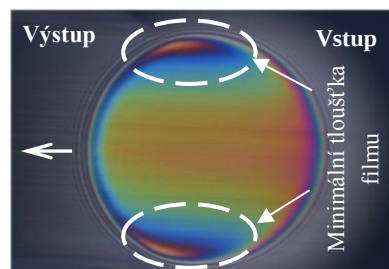
Výsledkem provedených experimentů bylo zjištění rozložení minimální a centrální tloušťky mazacího filmu v závislosti na vstupních podmínkách při změně střední rychlosti povrchů U pro různé poměry SRR. Pro účely této práce je vyhodnocena pouze minimální tloušťka filmu ve vztahu k parametru mazání Λ . Obr. 69 reprezentuje experimentálně získané výsledky, které dokládají vývoj minimální tloušťky mazacího filmu h_{min} v závislosti na střední unášivé rychlosti povrchů U .



Obr. 69 Porovnání experimentálních dat h_{min} s predikcemi. SRR=0.25; SRR=0.5; $T=30\text{ °C}$; $W=35\text{ N}$. [65]



Obr. 68 Interferogram $U=150\text{ mm/s}$; $W=35\text{ N}$; SRR=0,25. [65]



Obr. 67 Interferogram $U=150\text{ mm/s}$; $W=35\text{ N}$; SRR=0,5. [65]

Rovněž byly experimentální výsledky porovnány s predikcemi tloušťky mazacího filmu pro poddajný kontakt, které reprezentují již publikované modely [20], [23] a [4]. Z Obr. 69 je patrná velice dobrá shoda experimentálně získaných dat s analytickou predikcí, kterou publikoval Hooke [23]. To platí zejména za vyšších rychlostí u obou poměrů SRR, kdy $U > 50\text{ mm/s}$. Přitom dle Obr. 69 je tloušťka mazacího filmu pro SRR=0,25 vyšší, než je tomu v případě, kdy SRR=0,5. Tento rozdíl tvoří v průměru přibližně 5%. Což je možné vysvětlit na základě menšího podílu skluzových rychlostí, díky kterým dochází ke snížení součinitele tření μ v kontaktu oproti SRR=0,5. Tření v kontaktu je spojeno s nárůstem teploty T na vstupu do kontaktu, která negativně ovlivňuje viskozitu maziva η a tím také

tloušťku mazacího filmu. Z hlediska velikosti kontaktu byla dle získaných výsledků pozorována velice dobrá shoda s Hertzovou teorií.

Největší rozdíl minimální tloušťky (černá čárkovaná čára v Obr. 69) byl pozorován při $U = 150 \text{ mm/s}$, kdy přesahoval hranici 10 %. Tento rozdíl byl rovněž patrný i pro centrální tloušťku h_{cent} , jak ukazuje dvojice snímků Obr. 67 a Obr. 68, kdy pro menší skluz je také vyšší i centrální tloušťka mazacího filmu. Rovněž je ze snímků patrné zúžení podkovitého tvaru zejména na bocích kontaktu za vyšších skluzů SRR . Parametr mazání se na základě získaných dat pohyboval v rozsahu $\Lambda \in (0,2; 2,8)$, což odpovídá přechodu ze smíšeného mazání na elastohydrodynamické mazání, kdy $\Lambda > 3$. Predikce, které provedl Hamrock & Dowson [20] a Marx [4] se od získaných experimentálních výsledků poněkud více vzdalují.

Závěry:

Tato experimentální studie zachycuje použití metody optické interferometrie u mazaných poddajných kontaktů. Díky chromové vrstvě na povrchu PMMA disku bylo možné získat kvalitní interferenční snímky, které dokládají chování poddajných kontaktů za podmínek nenulových skluzů SRR . Změřená minimální tloušťka filmu byla porovnána s predikcemi pro soft EHL kontakty, z nichž nejlepší shodu vykazuje predikce, kterou publikoval Hooke [23]. Současně nebylo pozorováno výrazné ovlivnění minimální tloušťky mazacího filmu h_{min} v závislosti na daných poměrech SRR , přestože v případě vyššího skluzu došlo u minimální a centrální tloušťky filmu k poklesu. Tuto skutečnost je možné vysvětlit zvýšením teploty na vstupu maziva do kontaktu, po které dochází ke snížení viskozity maziva a v důsledku toho i tloušťky mazacího filmu.

Z hlediska parametru mazání Λ byl kontakt za nižších rychlostí ve všech experimentech provozován ve smíšeném režimu mazání, který s rostoucí střední unášivou rychlostí přechází do režimu elastohydrodynamického mazání. Veškeré získané výsledky mohou přispět pro pochopení utváření mazacího filmu v poddajných kontaktech, jako jsou např. hybridní ozubená soukolí.

Realizované experimenty analýzy tloušťky filmu:

V oblasti mazání soft EHL kontaktů již bylo zrealizováno několik experimentů, jejichž výsledky budou v budoucnosti publikovány. Při experimentech jsou zohledněny pracovní podmínky, jako je unášivá rychlost U , teplota T , viskozita maziva η nebo zatížení W , které se podílejí na ovlivnění tloušťky mazacího filmu h . V prvotních fázích výzkumu je při experimentech opodstatněné použití referenčních maziv, jejichž tribologické vlastnosti již byly popsány s odkazem na hodnoty viskozity maziva η , respektive tlakově viskózního koeficientu α .

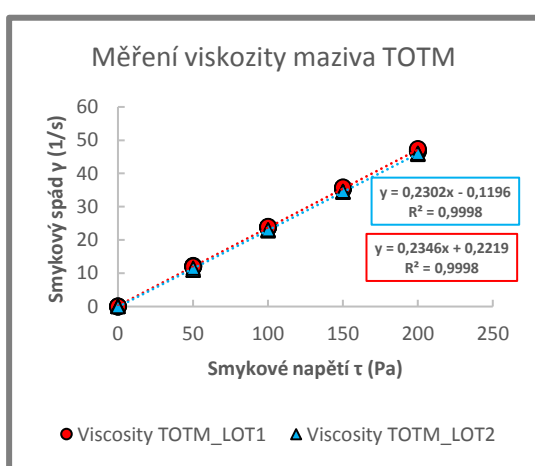
Experimenty byly uskutečněny s použitím referenčních maziv TOTM a SQL, které jsou předmětem zájmu ve studiích, které publikoval Bair [66], [67]. Současně byly u uvedených maziv provedeny měření viskozity, což je patrné z Obr. 71, které odpovídají výsledkům [66]. Vlastnosti použitých maziv spolu s podmínkami experimentů jsou uvedeny v Tab. 11. Získané výsledky byly porovnány s predikcemi [20], [23] a [4] pro centrální a minimální tloušťku filmu dle vztahů v Tab. 6.

Porovnáním dat s numerickými modely byla zjištěna nejlepší shoda s predikcí Hooka, kdy je závislost na unášivé rychlosti v rovnici tloušťky filmu popsána exponentem $\bar{U}^{0,60}$. Získaná data byla interpolována jednoduchou mocninnou funkcí $y = b \cdot x^a$ v softwaru Excel, čímž byly rovněž získány koeficienty a , b a tím závislosti na bezrozměrné unášivé rychlosti $\bar{U}^a$. Příklad (zatížení $W = 10 \text{ N}$) interpolace experimentálních výsledků je v Obr. 70, kde byla zjištěna závislost $\bar{U}^{0,6107}$.

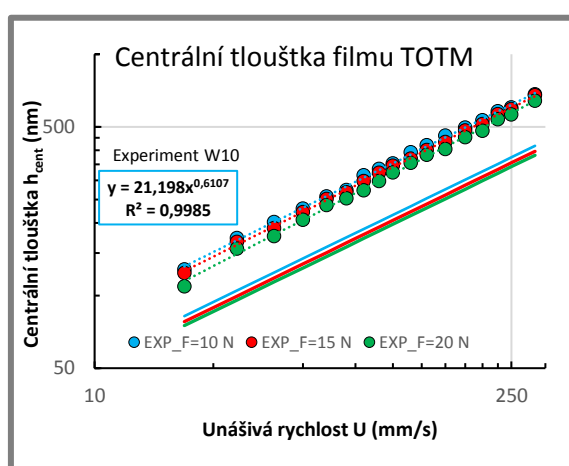
Z výsledků je patrná difference mezi predikcí Hooka [23] a získaných dat, kdy střední hodnota činí 38,9 %. To lze pokládat významný rozdíl, jehož odůvodnění je v současné době předmětem zájmu. Nicméně je možné konstatovat, že predikční vztahy pro režim *isoviscous elastic* dle Tab. 6 nezahrnují vliv tlakové viskózního koeficientu α , jehož důsledky ovlivnění tloušťky filmu h mohou být patrné v přechodové oblasti TR EHL.

Tab. 11 Podmínky experimentů pro maziva TOTM a SQL.

Veličina	Zatížení W (N)	Unášivá rychlost U (m/s)	Teplota oleje T (°C)	Poměr valení/smýk aní SRR (-)	TOTM ^{a)} viskozita η_{40} (Pa · s)	SQL ^{b)} viskozita η_{40} (Pa · s)
Hodnota	10; 15; 20	a) 0,02 – 0,3 b) 0,02 – 1,2	$24 \pm 0,5$	0	0,0820	0,0157

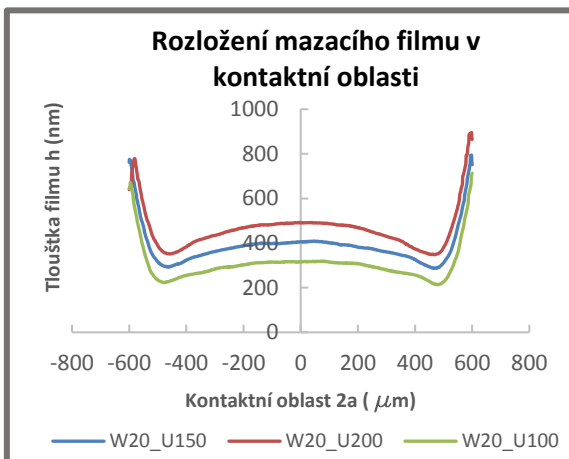


Obr. 71 Měření viskozity maziva TOTM pro různé LOT; T=30°C.

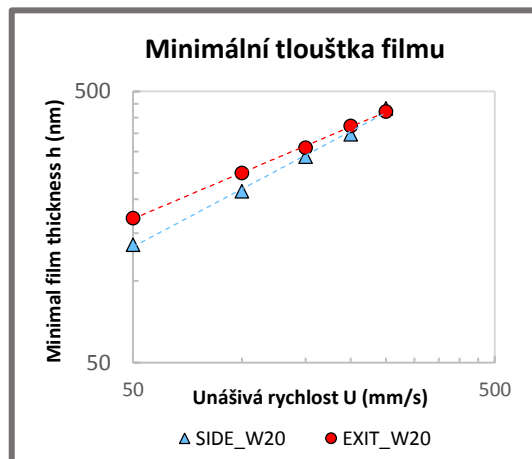


Obr. 70 Porovnání výsledků s predikcí [23] centrální tloušťky mazacího filmu v kruhovém kontaktu pro mazivo TOTM. Log-Log. $U = 0,02-0,3 \text{ m/s}$; $W = 10, 15, 20 \text{ N}$; $T = 24 \text{ °C}$; $SRR = 0$; $k = 1$.

V případě minimální tloušťky h_{min} vykazují výsledky větší míru shody s predikčním vztahem Hooka [23] pro oblast výstupu maziva z kontaktu oproti vztahu predikující minimum v bočních lalocích, přesto střední hodnota mezi predikcí a experimentem činí 16,3 %. Dle experimentálních výsledků byla pro všechna zatížení W pozorována minimální tloušťka v bočních lalocích. Přesto je dle výsledků patrný vliv rostoucího zatížení W , kdy dochází ke zvýšení rozdílu tloušťky mezi výstupem z kontaktu (rear) a bočních laloků (side),



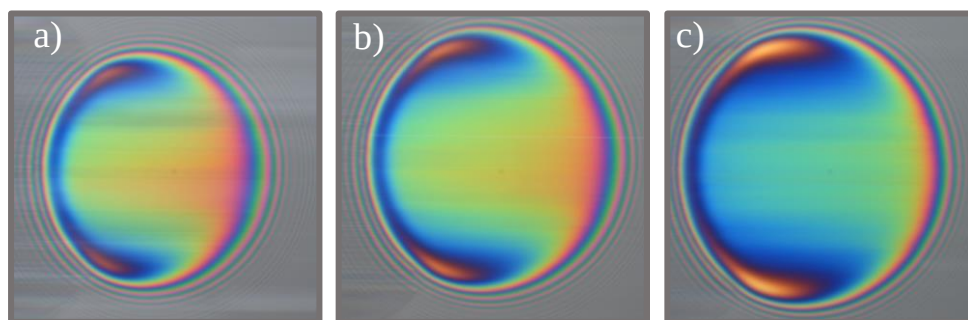
Obr. 72 Rozložení mazacího filmu v kontaktní oblasti. Podélný řez (kolmý ke vstupu maziva) Mazivo: TOTM $W=20$ N; $T=24$ °C



Obr. 73 Vyhodnocení minimální tloušťky h_{min} v kontaktní oblasti. Mazivo: TOTM $W=20$ N; $T=24$ °C

zatímco za nižších zatížení W jsou hodnoty minimální tloušťky h_{min} více uniformní. Tuto skutečnost dokládá Obr. 73, který ilustruje vývoj minimální tloušťky filmu ve výstupní oblasti a v bočních lalocích.

Při zvyšování unášivé rychlosti U dochází k navýšení tloušťky filmu v kontaktní oblasti, jak lze vidět z profilu tloušťky filmu v Obr. 72, přičemž lze rovněž identifikovat oblasti minima v bočních lalocích. Vliv rostoucího zatížení vede na zvětšení kontaktní oblasti za současného snížení centrální h_{cent} a minimální h_{min} tloušťky, jak je vidět z Obr. 74. Rovněž lze pozorovat zvětšení oblasti bočních laloků, které se posouvají ke středu kontaktu viz Obr. 74. Experimentální výsledky budou dále porovnány s numerickým modelem, který je vyvíjen s rámci spolupráce na mezinárodním projektu s TU Mnichov.



Obr. 74 Formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktu dle závislosti na zatížení W . Mazivo: TOTM; $U=100$ mm/s; $T=24$ °C. a) $W=10$ N, b) $W=15$ N, c) $W=20$ N

Realizované experimenty analýzy tření:

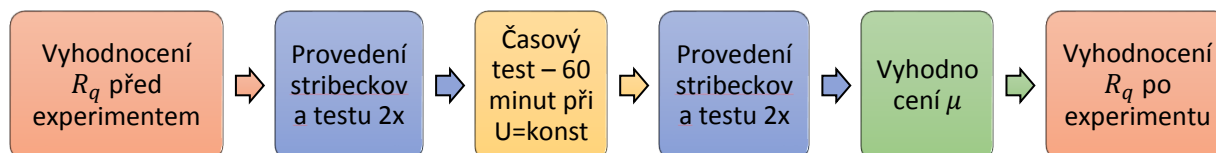
Druhou hlavní větví jsou experimenty zaměřené na tření v soft EHL kontaktu. Kontakt polymerní kuličky a safírového disku je simulován na tribometru *ball-on-disc*, opatřeným snímačem kroutícího momentu (kuličky), díky kterému bylo možné určit třecí momenty M_t za individuálních podmínek. Pro experimenty byly vybrány materiály PA 66, POM a PEEK, které jsou často používány pro výrobu ozubení. Kromě základních mechanických vlastností uvedených v Tab. 4 byly získány hodnoty drsnosti povrchu realizováním měření na optickém profilometru Bruker. Z výsledků měření byly získány hodnoty R_a a R_q jenž jsou porovnány s údaji od výrobce RGP balls. Tab. 12 sumarizuje hodnoty drsnosti povrchu, přičemž např. v případě PEEKu jsou patrné výrazné odchylky oproti hodnotám udávaných výrobcem. Přesnost kuličky – grade charakterizuje kuličky dle geometrické a rozměrové přesnosti (rozměrových úchylek a sphericity), čímž se podílí na ovlivnění topografie povrchu.

Tab. 12 Topografie povrchu nových experimentálních vzorků

Materiál	Přesnost kuličky	R_a	R_q
1" kulička	Grade	(μm)	(μm)
PA 66	G I	1,7 ^{b)} ; 1,61 ^{a)}	2,01 ^{b)} ; 1,96 ^{a)}
PEEK	G II	0,36 ^{b)} ; 0,89 ^{a)}	0,37 ^{b)} ; 1,15 ^{a)}
POM	G II	0,38 ^{a)}	0,51 ^{a)}

Pozn. **a)** experiment, **b)** Výrobce RGP balls [68]

Průběh realizovaných experimentů je ilustrován na Obr. 75, kdy je prvním krokem vyhodnocení topografie kuličky před provedením měření tření μ . Následuje Stribeckův test, při kterém dochází k postupnému navyšování unášivé rychlosti U při sledování závislosti μ na U a to 2 po sobě jdoucích cyklech. V další fázi byl uskutečněn časový – hodinový test, při kterém byl kontakt provozován při konstantní unášivé rychlosti U . Následuje opět analogické provedení Stribeckova testu pro zjištění změn vývoje tření μ v kontaktu po časovém testu. Proces uzavírá provedení vyhodnocení součinitele tření μ a provedení měření na optickém profilometru za účelem získání hodnot R_q po experimentu.



Obr. 75 Schéma experimentu pro měření tření

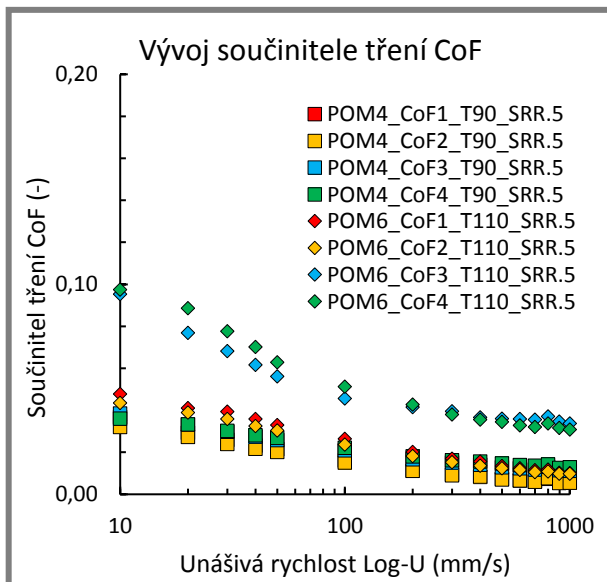
Na základě získaných momentů M_t je vypočtena třecí síla F_t a následně dle známého normálového zatížení W také součinitel tření μ . Kvůli určení součinitele tření byly realizovány Stribeckovy a časové testy, které popisují změny tření u mazaných polymerních

materiálů POM a PEEK. Testy byly dosud převážně zaměřeny na objasnění účinku teploty T na vývoj součinitele tření μ a s tím spojených změn topografie povrchu kuliček. Experimenty byly provedeny zejména pro materiál POM, u kterého byl pozorován vývoj součinitele tření v intervalu $T = (30 - 110)^\circ\text{C}$. Topografie povrchu kuličky byla změřena vždy před experimentem i po jeho ukončení, aby mohly být identifikovány změny, ke kterým v průběhu experimentu dochází. To dokládá a ilustruje Obr. 79. Podmínky experimentů jsou shrnuty v Tab. 13.

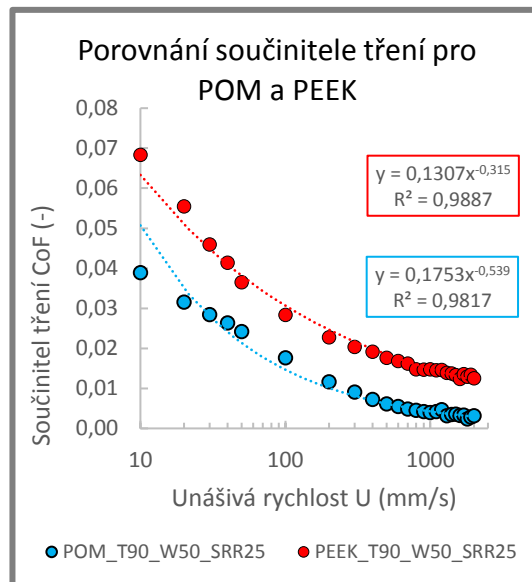
Tab. 13 Podmínky experimentu analýzy tření pro POM a PEEK

Veličina	Zatížení W (N)	Unášivá rychlost U (m/s)	Teplota oleje T ($^\circ\text{C}$)	Poměr valení/smýkaní SRR (-)	FVA3 viskozita η_{40} ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
Hodnota	50	0,01 – 1,2	$(30,50,70,90,110) \pm 0,5$	0,25; 0,5	0,0838

Z výsledků experimentů vyplývá, že k výraznému ovlivnění součinitele tření μ dochází při teplotách vyšších než 100°C , kdy byla překročena udávaná maximální pracovní teplota (viz Tab. 4) o více než 15°C . Vývoj součinitele tření za různých teplot reprezentuje Obr. 76, kde při teplotě $T = 110^\circ\text{C}$ došlo k výraznému nárustu tření po časovém testu především za nízkých unášivých rychlostí U . Pro hodnoty součinitele tření, kdy pro $T < 90^\circ\text{C}$ bylo pozorováno téměř uniformní chování trendu za setrvalého poklesu v tomto intervalu.



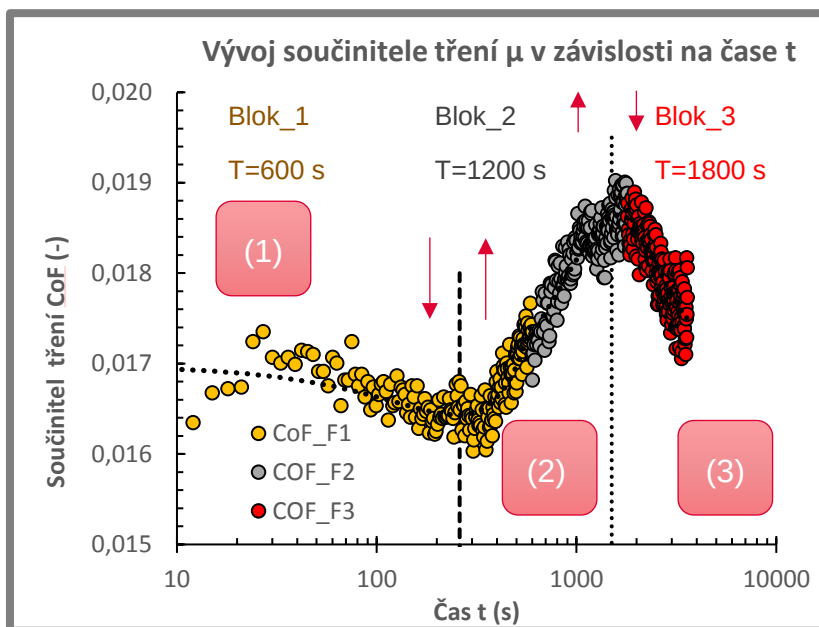
Obr. 76 Vývoj tření v soft EHL kontaktu. Mazivo: FVA3
 $W=50$ N; $T = (90,110)^\circ\text{C}$



Obr. 77 Porovnání koeficientů tření pro materiály POM a PEEK. Mazivo FVA3; $W=50$ N; $T=90^\circ\text{C}$.

V průběhu časových testů nebyly zjištěny výrazné změny součinitele tření, kromě experimentu pro $T = 110^\circ\text{C}$. Tato skutečnost je zachycena na Obr. 78, ze kterého nevyplývá výrazná změna velikosti tření, ale průběhu trendu. Dle Obr. 78 je možné

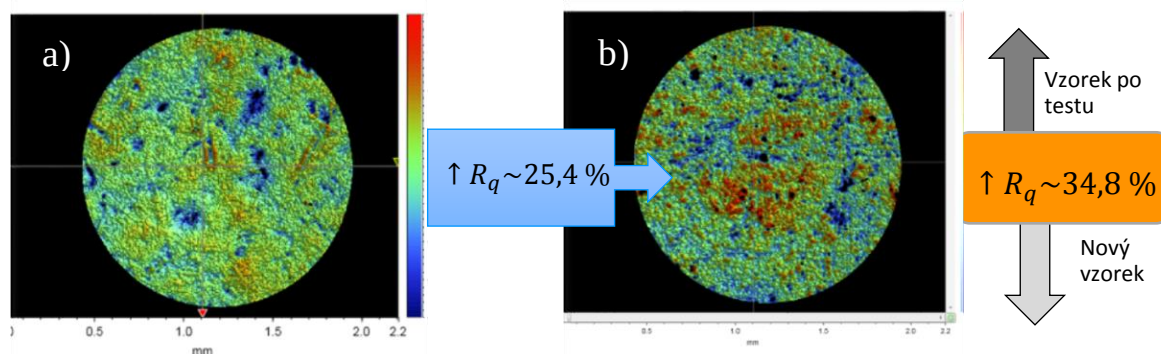
lokalizovat odlišné fáze chování mazaného kontaktu V případě ostatních pracovních teplot viz. Tab. 13 docházelo k setrvalému minoritnímu nárůstu tření v průběhu časového testu. Tezí je, že v první fázi (1) dochází k záběhu povrchu a tím dojde k poklesu tření, po kterém následuje druhá fáze (2) delaminace povrchové vrstvy materiálu, což vede naopak k nárůstu tření v kontaktu. V poslední fázi (3) nastává vyhlazení nerovností na povrchu kuličky, které vede na snížení součinitele tření, přesto lze tento interval změn považovat za nevýrazný.



Obr. 78 Průběh koeficientu tření v závislosti na čase. Mazivo FVA3; Materiál: POM; $T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W=50\text{ N}$; $U=1200\text{ mm/s}$.

Příklad vyhodnocení drsnosti povrchu je uveden na Obr. 79, kde jsou zohledněny dvě hlediska. Prvním hlediskem je změna drsnosti povrchu R_q před a po provedení experimentu u stejné kuličky. Druhým hlediskem je difference mezi drsnostmi povrchu R_q kuliček provozovaných za různých teplot T . Porovnání obou případů je zobrazeno na Obr. 79.

Na Obr. 79a je povrch kuličky provozované při $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ po experimentu, kde je tento případ porovnán s $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ viz Obr. 79b. Z výsledků vyplývá, že střední hodnota



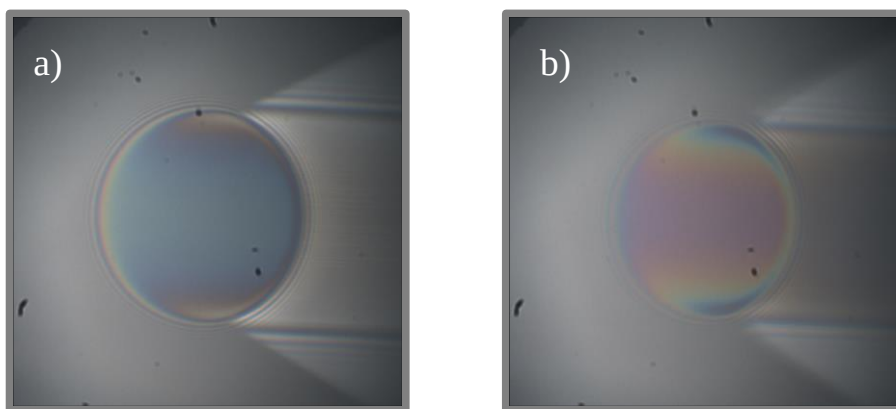
Obr. 79 Porovnání změn topografie povrchu kuliček po testu. a) POM4; $W=50\text{ N}$; $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $SRR=0.5$, b) POM6; $W=50\text{ N}$; $T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$; $SRR=0.5$

nárůstu drsnosti činí 25,4 %, což představuje výrazný rozdíl, který implikuje opotřebení vzorku při jednotlivých fázích experimentu. V případě **Obr. 79b** jsou porovnány drsnosti povrchu nové kuličky a kuličky po časovém testu z čehož pochází zvýšení drsnosti R_q přesahující 30 % za rostoucí teploty T .

V současnosti probíhají prvotní experimenty s materiály PEEK a PA 66, které rozšíří oblast studované problematiky. Jedním z prvních výsledků analýzy chování těchto materiálů je porovnání součinitele tření pro materiál POM a PEEK provozovaných za identických podmínek, jak ukazuje Obr. 77. Z obrázku Obr. 77 je patrné zejména za nízkých unášivých rychlostí U strmé zvýšení tření pro materiál PEEK, k němuž i přispívá vyšší hodnota drsnosti povrchu R_q v porovnání s materiálem POM viz Tab. 13. Chování uvedených materiálů bude v budoucnu podrobně popsáno v závislosti na kinematických podmínkách U , zatížení W , skluzu SRR , teplotě T a modulu pružnosti E při použití maziv různé viskozity η . Výsledky budou porovnány se současným stavem poznání v oblasti soft EHL kontaktů a následně porovnány s numerickým modelem vyvíjeným na univerzitě TU Mnichov. Podobně jako v případě tloušťky filmu h , nebyly získaná dosud publikována, proto zde nejsou uvedeny v plném rozsahu.

Plánované experimenty:

V současné době probíhají přípravy experimentů, jež jsou zaměřeny na změny tloušťky mazacího filmu h za vysokých teplot $T > 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ při použití referenčních maziv jako je např. Krytox (GPL 102), jehož vlastnosti byly popsány ve studii Baira [67]. Objasnění účinku teploty T má se zřetelem na mechanické vlastnosti polymerů zásadní vliv rovněž kvůli absenci publikací v této problematice. Jistou komplikací je to v tomto směru aplikace metody optické interferometrie, kdy při zvýšených teplotách T dochází k urychlení degradace polo-odrazivé chromové vrstvy napařené na povrchu PMMA disku.



Obr. 80 Pozorování kontaktu bez nanesené chromové vrstvy. Mazivo GPL 102; $U=150\text{ mm/s}$; $T=24\text{ }^{\circ}\text{C}$. **a)** $W=20\text{ N}$, **b)** 35 N .

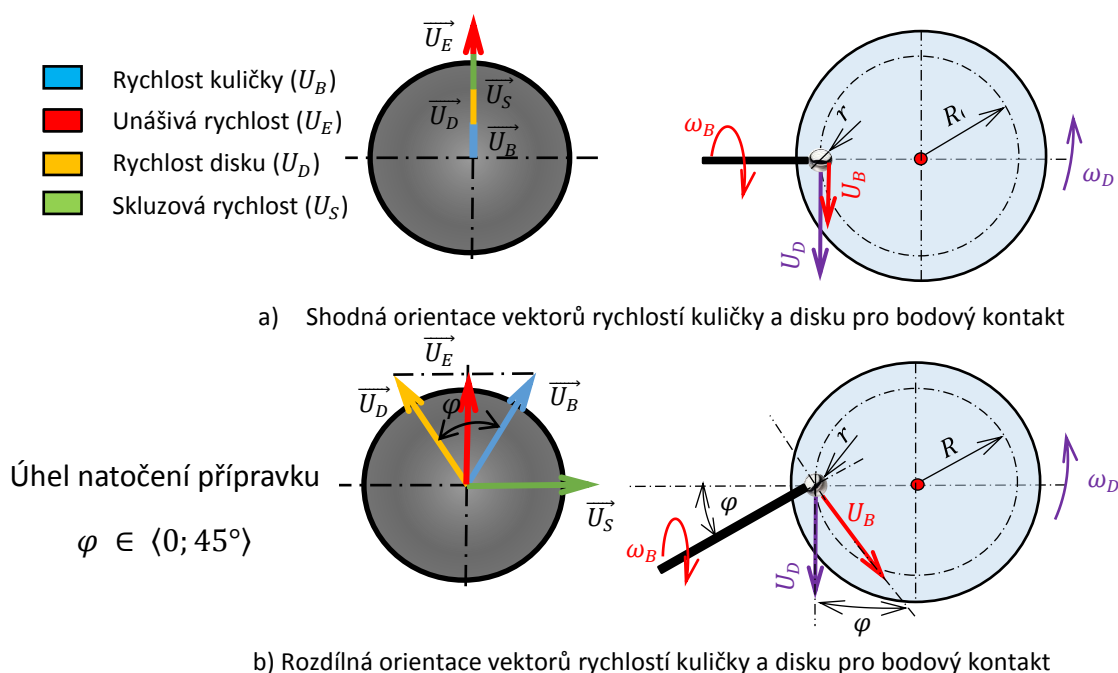
Chromová vrstva zajišťuje odraz vlnových délek světla a tím je možné získání kvalitních interferenčních snímků. Na druhou stranu představuje degradace chromové vrstvy určitou finanční zátěž vzhledem k aktuálním cenám povlakování. Proto je snahou simulovat

kontakt bez napařené chromové vrstvy, čímž se však výrazně omezí možnosti optické interferometrie. Určitým benefitem může být skutečnost, že mazací proces nebude ani minoritně ovlivněn vlastnostmi nanoseného povlaku, jehož tloušťka je menší než 10 nm.

Soft kontakt bude vystaven vysokým pracovní teplotám, kdy dojde vyhodnocení tloušťky mazacího filmu v kontaktu skleněné kuličky a čistého PMMA disku, čímž bude možné kontakt porovnat s predikcemi [20], [23] a [4] v oblasti soft EHL. První získané interferenční snímky pro tuto konfiguraci jsou uvedeny na Obr. 80a a Obr. 80b v porovnání např. s Obr. 67 nebo Obr. 68 je rozdíl evidentní. Realizace těchto experimentů pomůže při objasnění formování tloušťky filmu v soft EHL kontaktech a změn polymerních materiálů za vysokých teplot.

Dalším navrženým experimentem zaměřeným na formování mazacího filmu je zahrnutí vlivu vektorů rychlostí. Při zohlednění procesů probíhající při záběru reálných ozubených kol je známou skutečností, že dochází ke změně složek unášivé a skluzové rychlosti v průběhu záběru. Navíc u některých typů ozubení např. šnekové, respektive hypoidní je skluzová složka vektoru rychlosti závislá na úhlu stoupaní šroubovice γ

Dosud byly veškeré navržené experimenty realizovány pro případ, kdy jsou osy kuličky a disku vůči sobě orientovány kolmo Obr. 81a, čímž není možné popisovaný vliv zohlednit v měření. Za tímto účelem bude na tribometr *ball-on-disc* instalován speciální přípravek jenž umožní vychýlení kuličky v určitém omezeném rozsahu Obr. 81b. Proto vyvstává otázka, jak se projeví vliv vektorů rychlostí v podmínkách soft EHL kontaktu při utváření mazacího filmu a změnách součinitele tření. Objasnění tohoto vlivu v problematice mazaných polymerních kontaktů prozatím chybí, existují však studie, které se touto oblastí zajímaly, zejména u hard EHL kontaktů [69], [70].



Obr. 81 Návrh experimentu pro měření tloušťky filmu se zahrnutím vlivu vektorů rychlostí.

7 ZÁVĚR

Tato práce reprezentuje teze disertační práce ke státní doktorské zkoušce v problematice poddajných kontaktů, které jsou provozovány v oblasti elasto-hydrodynamického mazání. V úvodu jsou klasifikovány obecné skutečnosti, které vedou k vymezení globálního problému tématu. Vymezením řešené problematiky je téma charakterizováno z pohledu současných trendů a možností se zaměřením na plastová ozubená kola a podmínky jejich provozu jako je mazání, které jsou v inženýrských aplikacích v současnosti aktuální. Zpracováním současného stavu poznání byly studovány poznatky ostatních autorů v oblasti soft EHL mazání, přičemž byly vybrány studie, kde hlavní sledované parametry charakterizuje tloušťka mazacího filmu a součinitel tření v kontaktu. Analýzou a hodnocením zjištěných poznatků na základě současného stavu poznání byly určeny bílá místa v této problematice, které nebyly dosud dostatečně experimentálně prozkoumány. Díky provedené analýze bylo možné stanovit hlavní a dílčí cíle disertační práce, jež navážou na současný stav poznání. Způsob řešení tématu spolu s uvedením experimentálních metod byl v práci popsán jednotlivými fázemi při realizaci experimentů. Dle zaměření realizovaných a plánovaných experimentů byl sestaven plán publikací, který sumarizuje získané výsledky na základě předpokládaných publikací v odborných člancích specializovaných na oblast tribologie. Teze disertační práce uzavírá současný stav řešení, který poskytuje přehled realizovaných a plánovaných experimentů a publikovaných studií. V rámci řešení disertační práce bylo uskutečněno velké množství experimentů, jejichž mnohé výsledky nebyly dosud nikde publikovány. Realizované experimenty rozšiřují povědomí o chování poddajných mazaných kontaktů a mohou tímto přispět ke zdokonalení konstrukčního návrhu zejména u ozubených kol z polymerních materiálů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DEARN, K., T. HOSKINS, L. ANDREI AND D. WALTON. Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears. Edition ed., 2013, pp. 1-9. DOI: 10.1155/2013/987251
- [2] HARRASS, M., K. FRIEDRICH a. A. ALMAJID, 2010. Tribological behaviour of selected engineering polymers under rolling contact. Tribology International [online]. B.m.: Elsevier, 43(3), 635–646. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2009.10.003
- [3] HOOKE, C. J. AND ODOGHIU JP. Elastohydrodynamic lubrication of soft highly deformed contacts. Journal of Mechanical Engineering Science, 1972, 14(1), pp. 34-&
- [4] MARX, N., J. GUEGAN AND H. A. SPIKES Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. Tribology International, Jul 2016, 99, 267-277.
- [5] FETTERS, L. J., D. J. LOHSE, D. RICHTER, T. A. WITTEN, et al. Connection between polymer molecular-weight, density, chain dimensions, and melt viscoelastic properties. Macromolecules, Aug 1994, 27(17), 4639-4647.
- [6] MAO, K. A new approach for polymer composite gear design. Wear, Feb 2007a, 262(3-4), 432-441.
- [7] MAO, K., P. LANGLOIS, Z. HU, K. ALHARBI, et al. The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears. Wear, May-Jun 2015, 332, 822-826.
- [8] MASJEDI, M. AND M. M. KHONSARI Mixed lubrication of soft contacts: An engineering look. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology, Feb 2017, 231(2), 263-273.
- [9] PERSSON, B. N. J. AND M. SCARAGGI. On the transition from boundary lubrication to hydrodynamic lubrication in soft contacts. Journal of Physics-Condensed Matter, May 2009, 21(18), 22.
- [10] BAGLIN, K. P., ARCHARD, J. F. 1972. An analytic solution of the elastohydrodynamic lubrication of materials of low elastic modulus. In Proceedings of the In Proceedings of Second IMechE Symposium on Elastohydrodynamic Lubrication, 1972, 13–21.
- [11] JOHNSON, K L, 1970. Regimes of elastohydrodynamic lubrication. ARCHIVE: Journal of Mechanical Engineering Science 1959-1982 (vols 1-23) [online]. 12(1), 9–16. ISSN 0022-2542. Dostupné z: doi:10.1243/JMES_JOUR_1970_012_004_02
- [12] MYANT, C., M. FOWELL, H. A. SPIKES AND J. R. STOKES. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. Tribology Transactions, 2010a, 53(5), 684-694.

- [13] DE VICENTE, J., J. R. STOKES a H. A. SPIKES, 2005. The frictional properties of Newtonian fluids in rolling - Sliding soft-EHL contact. *Tribology Letters* [online]. 20(3–4), 273–286. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-005-9067-3
- [14] GASNI, D., M. K. WAN IBRAHIM a R. S. DWYER-JOYCE, 2011. Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime. *Tribology International* [online]. B.m.: Elsevier, 44(7–8), 933–944. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2011.03.010
- [15] MYANT, C., H. A. SPIKES a J. R. STOKES, 2010. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International* [online]. B.m.: Elsevier, 43(1–2), 55–63. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2009.04.034
- [16] MYANT, C., M. FOWELL AND P. CANN. The effect of transient motion on Isoviscous-EHL films in compliant, point, contacts. *Tribology International*, Apr 2014, 72, 98-107.
- [17] SUKUMARAN, Jacob, Mátyás ANDÓ, Vanessa RODRIGUEZ, Patrick D E BAETS a Patric Daniel NEIS, 2006. Friction torque, temperature and roughness in roll-slip phenomenon for polymer – steel contacts. 7–16.
- [18] GREENWOOD, J. A., 1972. An extension of the Grubin theory of elastohydrodynamic lubrication. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 5(12), 2195–2211. ISSN 00223727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/5/12/309
- [19] HOOKE, C. J. ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF HEAVILY LOADED CONTACTS. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1977, 19(4), 149-156
- [20] HAMROCK, B. J., D. DOWSON. Minimum film thickness in elliptical contacts for different regimes of fluid-film lubrication. *NASA technical paper*, Oct 1978, 1342(9), pp. 1-22.
- [21] HARTL, M., I. KRUPKA, R. POLISCUK, M. LISKA, J. MOLIMARD, M. QUERRY a P. VERGNE, 2001. Thin film colorimetric interferometry. *Tribology Transactions* [online]. 44(2), 270–276. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402000108982458
- [22] BONGAERTS, J. H, K. FOURTOUNI a J. R. STOKES, 2007. Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact. *Tribology International* [online]. 40(10-12 SPEC. ISS.), 1531–1542. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2007.01.007
- [23] HOOKE, C. J., 1995. 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]. 209(4), 225–234. ISSN 2041305X. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_PROC_1995_209_433_02
- [24] ARCHARD, J F, 1968. Non-Dimensional Parameters in Isothermal Theories of Elastohydrodynamic Lubrication. *Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. B.m.: IMECHE, 10(2), 165–167. ISSN 0022-2542. Dostupné z: doi:10.1243/JMES_JOUR_1968_010_023_02

- [25] DOWSON, D, 1967. Paper 10: Elastohydrodynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings [online]. B.m.: IMECHE, 182(1), 151–167. ISSN 0367-8849. Dostupné z: doi:10.1243/PIME_CONF_1967_182_014_02
- [26] Moes, H.; and Bosma, R.: Film Thickness and Traction in EHL at Point Contact. Symposium on Elastohydrodynamic Lubrication, Inst. Mech. Engrs., 1972, p. 149.
- [27] THEYSE, F. H. 'Contact between rolling/sliding surfaces', Wear
- [28] HERREBRUGH, K. SOLVING INCOMPRESSIBLE AND ISOTHERMAL PROBLEM IN ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION THROUGH AN INTEGRAL EQUATION. Journal of Lubrication Technology, 1968, 90(1), 262-+.
- [29] DOWSON, D, G R HIGGINSON a V WHITAKER, 1962. Elasto-Hydrodynamic Lubrication: A Survey of Isothermal Solutions. Journal of Mechanical Engineering Science [online]. B.m.: IMECHE, 4(2), 121–126. ISSN 0022-2542. Dostupné z: doi:10.1243/JMES_JOUR_1962_004_018_02
- [30] Roelands, C. J. A.: Correlational Aspects of the Viscosity-Temperature pressure Relationship of Lubricating Oils. Druk V. R. B., Groningen, Netherlands, 1966.
- [31] Hamrock, Bernard J.; and Dowson, Duncan: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. Part I Theoretical Formulation. J. Lubr. Technol., vol. 98, no. 2, Apr. 1976, pp. 223-229.
- [32] HAMROCK, B J a D DOWSON, 1977. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results. *Journal of Lubrication Technology* [online]. B.m.: ASME, 99(2), 264–275. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3453074>
- [33] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON, 1983. Film thickness for different regimes of fluid-film lubrication [online]. (May 1983). Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/19830020178>
- [34] HOOKE, C J, 1988. Calculation of Clearances in Soft Point Contacts. Journal of Tribology [online]. B.m.: ASME, 110(1), 167–173. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3261558>
- [35] BLOK, H., 1963. The flash temperature concept. Wear [online]. B.m.: Elsevier, 6(6), 483–494 [vid. 2018-02-23]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/0043-1648(63)90283-7
- [36] ESFAHANIAN, M. a B. J. HAMROCK, 1991. Fluid-film lubrication regimes revisited. Tribology Transactions [online]. 34(4), 628–632. ISSN 1547397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402009108982081
- [37] BERGNER, Lawrence a Bernard J. JENG, 1986. Piezoviscous effects in nonconformal contacts lubricated hydrodynamically. *ASLE Transactions* [online]. 30(4), 452–464. ISSN 05698197. Dostupné z: doi:10.1080/05698198708981779

- [38] MYERS, T. G., R. W. HALL, M. D. SAVAGE AND P. H. GASKELL THE TRANSITION REGION OF ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, Mar 1991, 432(1886), 467-479.
- [39] HALL, R. W. AND M. D. SAVAGE. Two-dimensional elastohydrodynamic lubrication.2. Solution of the line contact problem. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 1988, 202(5), 354-360.
- [40] HOOKE, C. J. AND P. HUANG Elastohydrodynamic lubrication of soft viscoelastic materials in line contact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology, 1997, 211(J3), 185-194.
- [41] HUNTER, S C, 1961. The Rolling Contact of a Rigid Cylinder with a Viscoelastic Half Space. *Journal of Applied Mechanics* [online]. B.m.: ASME, 28(4), 611–617. ISSN 0021-8936. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3641792>
- [42] KANETA, M, H TODOROKI, Hiroshi NISHIKAWA, Y KANZAKI a Y KAWAHARA, 2000. *Tribology of Flexible Seals for Reciprocating Motion* [online]. Dostupné z: doi:10.1115/1.1310573
- [43] POLL, Gerhard a GABELLI, 1992. *Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts: Part II—A New Measuring Principle for Lubricant Film Thickness* [online]. Dostupné z: doi:10.1115/1.2920886
- [44] D. ROBERTS, A D TABOR, 1971. *The Extrusion of Liquids Between Highly Elastic Solids* [online]. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1971.0172
- [45] SPIKES, H A, 1999. Thin films in elastohydrodynamic lubrication: The contribution of experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. B.m.: IMECHE, 213(5), 335–352. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/1350650991542712
- [46] Cameron, A. (1971), Basic Lubrication Theory, Longman: London.
- [47] SONG, K, Y WANG, B HUANG a M WANG, 2005. Study on EHL of plastic pinion engaging with steel gear. 50-51+54.
- [48] D.Walton, A. A. Tessema, C. J. Hooke, and J. M. Shippen, “Load sharing in metallic and non-metallic gears,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C, vol. 208, no. 2, pp. 81–87, 1994.
- [49] SMEETH, M a H A SPIKES, 1996. The Influence of Slide/Roll Ratio on the Film Thickness of an EHD Contact Operating Within the Mixed Lubrication Regime. In: D DOWSON, C M TAYLOR, T H C CHILDS, G DALMAZ, Y BERTHIER, L FLAMAND, J.-M. GEORGES a B T - Tribology Series LUBRECHT, ed. *The Third Body Concept Interpretation of Tribological Phenomena* [online]. B.m.: Elsevier, s. 695–703. ISBN 0167-8922. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70831-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70831-9)

- [50] STUPKIEWICZ, S., J. LENGIEWICZ, P. SADOWSKI AND S. KUCHARSKI Finite deformation effects in soft elastohydrodynamic lubrication problems. *Tribology International*, Jan 2016, 93, 511-522. Dostupné z: doi: 10.1016/j.triboint.2015.03.016
- [51] DEARN, K. D., T. J. HOSKINS, D. G. PETROV, S. C. REYNOLDS a R. BANKS, 2013. Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear* [online]. B.m.: Elsevier, 298–299(1), 99–108. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2012.11.003
- [52] MAO, K. A numerical method for polymer composite gear flash temperature prediction. *Wear*, May 2007b, 262(11-12), 1321-1329.
- [53] HAMROCK, B. J. AND B. O. JACOBSON ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF LINE CONTACTS. *Asle Transactions*, 1984, 27(4), 275-287.
- [54] KALIN, M. a. KUPEC, 2017. The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. *Wear* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 376–377, 1339–1346. ISSN 00431648. Dostupné z: doi: 10.1016/j.wear.2017.02.003
- [55] T. Tobe, M. Kato, A study of flash temperature on the spur gear teeth, *ASME, J. Eng. Ind.* (1974) 78–84.
- [56] JAFFAR, M. J. ESTIMATION OF MINIMUM FILM THICKNESS FOR LINE CONTACTS IN THE TRANSITION REGION BETWEEN THE ISOVISCOUS ELASTIC AND THE PIEZOVISCOUS ELASTIC LUBRICATION REGIMES. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 1989, 203(6), 379-386.
- [57] C.R. McClune and D. Tabor, *Trib. Intern.* 11 (1978) 219.
- [58] Z.M. Jin, D. Dowson, J. Fisher, D. Rimmer, R. Wilkinson and B. Jobbins, *Proc. I. Mech. Eng. J208* (1994) 207.
- [59] A.D. Roberts, *Trib. Intern.* 10 (1977) 115.
- [60] Hamrock, Bernard J.; and Dowson, Duncan: Numerical Evaluation of the Surface Deformation of Elastic Solids Subjected to a Hertzian Contact Stress. *NASA TN -7774*, 1974.
- [61] LOHNER, T., J. MAYER a K. STAHL, 2015. EHL Contact Temperature - Comparison of Theoretical and Experimental Determination. *Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2015*. 412–415.
- [62] FERNANDES, P. J. L. AND C. MCDULING Surface contact fatigue failures in gears. *Engineering Failure Analysis*, Jun 1997, 4(2), 99-107.
- [63] HOLMBERG, K., H. RONKAINEN a. MATTHEWS, 2000. Tribology of thin coatings. *Ceramics International* [online]. 26(7), 787–795. ISSN 02728842. Dostupné z: doi:10.1016/S0272-8842(00)00015-8

- [64] Liu, H., Jurkschat, T., Lohner, T., & Stahl, K. (2018). Detailed Investigations on the Oil Flow in Dip-Lubricated Gearboxes by the Finite Volume CFD Method. *Lubricants*, 6(2), 47. <https://doi.org/10.3390/lubricants6020047>
- [65] KŘUPKA, Jiří, Petr ŠPERKA, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL, 2019. LUBRICATION OF ROLLING - SLIDING POLYMER CONTACTS. In: *ENGINEERING MECHANICS 2019*. Prague: Institute of Thermomechanics of the Czech Academy of Sciences, 2019-05-13, s. 219-223. DOI: 10.21495/71-0-219. ISBN 978-80-87012-71-0. ISSN 1805-8256. Dostupné také z: http://www.engmech.cz/im/proceedings/show_p/2019/219
- [66] BAIR, Scott, 2006. Reference liquids for quantitative elastohydrodynamics: Selection and rheological characterization. *Tribology Letters* [online]. 22(2), 197–206. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-006-9083-y
- [67] BAIR, S, 2015. *The temperature and pressure dependence of viscosity and volume for two reference liquids: Viscosity and PVT for Two Reference Liquids* [online]. Dostupné z: doi:10.1002/ls.1302
- [68] Plastic balls. RGP balls [online]. Cinisello Balsamo (MI) - Italy: Rgpballs, 2019 [cit. 2019-06-28]. Dostupné z: <https://www.rgpballs.com/en/precision-balls/plastic/>
- [69] OMASTA, Milan, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL, 2013. Effect of surface velocity directions on elastohydrodynamic film shape. *Tribology Transactions* [online]. 56(2), 301–309. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2012.750024
- [70] STAHL, Karsten, Klaus MICHAELIS, Josef MAYER, Alexander WEIGL, Thomas LOHNER, Milan OMASTA, Martin HARTL a Ivan KŘUPKA, 2013. Theoretical and Experimental Investigations on EHL Point Contacts with Different Entrainment Velocity Directions. *Tribology Transactions* [online]. 56(5), 728–738. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402004.2013.785624

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Symbol	Veličina	Jednotka
a	Poloměr kontaktní oblasti	$[mm]$
	Zrychlení disku	$[m \cdot s^{-2}]$
b	Polovina kontaktní šířka liniového kontaktu	$[mm]$
d	Průměr kuličky	$[mm]$
DEB	Debořino číslo	$[-]$
E	Modul pružnosti v tahu	$[MPa]$
E_1	Modul pružnosti v tahu tělesa 1	$[MPa]$
E_2	Modul pružnosti v tahu tělesa 2	$[MPa]$
E'	Redukovaný modul pružnosti v tahu	$[MPa]$
F_t	Třecí síla	$[N]$
g_E, g_1	Parametr elasticity	$[-]$
g_V, g_3	Parametr viskozity	$[-]$
g_4	Parametr „character of the system“	$[-]$
$\bar{G}$	Bezrozměrný parametr materiálu	$[-]$
h	Tloušťka mazacího filmu	$[nm]$
h_{cent}	Centrální tloušťka mazacího filmu	$[nm]$
H_{min}	Bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu	$[-]$
h_{min}	Minimální tloušťka mazacího filmu	$[nm]$
$\bar{H}$	Bezrozměrná tloušťka filmu	$[-]$
$\hat{H}$	Parametr bezrozměrné tloušťky filmu	$[-]$

Symbol	Veličina	Jednotka
k	Parametr elipticity	$[-]$
M_1	Výsledný moment	$[N \cdot mm]$
M_t	Třecí moment	$[N \cdot mm]$
p	Kontaktní tlak	$[MPa]$
p_{max}	Maximální kontaktní tlak	$[MPa]$
P	Parametr tlaku	$[-]$
n	Otáčky	$[s^{-1}]$
r	Poloměr kuličky	$[mm]$
$r_{1,2}$	Poloměr valivé kružnice tělesa 1 a 2	$[mm]$
R_a	Průměrná drsnost povrchu	$[mm]$
R_q	Root mean square roughness (RMS)	$[mm]$
$R_{x,y}$	Poloměr křivosti v ose x a y	$[mm]$
$R_{1,2}$	Největší poloměr zakřivení tělesa 1 a 2	$[mm]$
R'	Redukovaný poloměr zakřivení	$[mm]$
R_e	Mez kluzu v tahu	$[MPa]$
S	Parametr rychlosti	$[-]$
SRR	Poměr kluzných a valivých rychlostí	$[-]$
t	Čas	$[s]$
T	Teplota	$[^{\circ}C]$
T_{oil}	Teplota oleje	$[^{\circ}C]$
T_{max}	Maximální provozní teplota	$[^{\circ}C]$
T_g	Teplota skelného přechodu	$[^{\circ}C]$

Symbol	Veličina	Jednotka
$u_{1,2}$	Rychlost součástí 1 a 2	$[m \cdot s^{-1}]$
u_b	Rychlost kuličky	$[m \cdot s^{-1}]$
u_d	Rychlost disku	$[m \cdot s^{-1}]$
u_{slide}	Kluzná rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
u_s	Rychlost viskoelastických povrchů	$[m \cdot s^{-1}]$
U	Unášivá rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
$\bar{U}$	Parametr bezrozměrné rychlosti	$[-]$
W	Normálové zatížení	$[N]$
W_m	Zátěžný moment	$[N \cdot m]$
$\bar{W}$	Parametr bezrozměrného zatížení	$[-]$
x	Obecná proměnná hodnota	
α	Tlakově vizkozí koeficient	$[mm^2 \cdot N^{-1}]$
	Úhel záběru ozubeného kola	$[^\circ]$
β	Tepelná roztažnost	$[^\circ C^{-1}; K^{-1}]$
ε	Poměrné prodloužení	$[-]$
η	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
η_0	Dynamická viskozita při atmosférickém tlaku	$[Pa \cdot s]$
η_{30FVA3}	Dynamická viskozita maziva FVA3 při $T=30\text{ }^\circ C$	$[Pa \cdot s]$
η_{GLY}	Dynamická viskozita maziva glycerol–water solution (GLY)	$[Pa \cdot s]$
η_{SFO}	Dynamická viskozita maziva lab-grade sun – flower oil (SFO)	$[Pa \cdot s]$
η_{40}	Dynamická viskozita maziva při $T=40\text{ }^\circ C$	$[Pa \cdot s]$

Symbol	Veličina	Jednotka
λ	Tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Λ	Parametr mazání	$[-]$
μ	Součinitel tření	$[-]$
μ_{DRY}	Součinitel tření pro nemazaný kontakt	$[-]$
$\mu_{Couette}$	Skluzová složka součinitele tření	$[-]$
$\mu_{Poiseuille}$	Valivá složka součinitele tření	$[-]$
ν	Poissonovo číslo	$[-]$
ν_1	Poissonovo číslo tělesa 1	$[-]$
ν_2	Poissonovo číslo tělesa 2	$[-]$
τ	Časová konstanta viskoelastického materiálu	$[-]$
	Smykové napětí	$[MPa]$
ω	Úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
BK7	Třída označení optického skla	
CCD	Typ čipu kamery (Charge-coupled device)	
CFD	Simulace proudění kapaliny (Computational fluid dynamics)	
CoF	Coefficient of friction	
Cr	Chemický prvek chrom	
GPL 102	Krytox – mazivo	
FEM	Simulace zaměřené na pevnostní analýzu součástí metodou konečných prvků (Finite element method)	
I-E	Isoviscous elastic režim	

Symbol	Veličina	Jednotka
P-E	Piezoviscous elastic režim	
EHL	Elastohydrodynamické mazání	
LDPE	Polyethylene	
MTM	Zařízení <i>Mini-traction machine</i>	
TR EHL	Přechodová oblast (transition region) EHL	
PA 66	Polyamid	
PBT	Polybutylene terephthalate	
PEEK	Polyether ether ketone	
PDMS	Polydimethylsiloxane	
PMMA	Poly (methyl methacrylate)	
POM	Polyoxymethylene	
PC	Polycarbonate	
PTFE	Polytetrafluoroethylene	
PU	Polyurethane	
RMS	Root mean square roughness	
S355J2	Označení oceli dle ISO EN	
SiO ₂	Chemická značka termo-izolačního povlaku	
SQL	Squalene - mazivo	
TOTM	(Tris (2-Ethylhexyl) Trimellitate) - mazivo	

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Schéma záběru ozubení. 1 - kontaktní povrch (1), 2 - kontaktní povrch (2), záběrová přímka – zeleně, valivý bod – červeně.....	8
Obr. 2 Průběh rychlostí na dráze záběru ozubených kol. [1].....	8
Obr. 3 Stribeckova křivka-režimy mazání. A) mezní, B) smíšené, C) elastohydrodynamické	9
Obr. 4 Hydrodynamická mapa režimů EHL. P-E piezoviscous elastic, I-E Isoviscous elastic, P-R piezoviscous rigid, I-R isoviscous rigid a přechodová oblast TR.....	10
Obr. 5 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu isoviscous-elastic na základě rovnic režimů. [11]	15
Obr. 6 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu isoviscous-elastic na základě výsledků Hooka. [23]	19
Obr. 7 Hydrodynamická mapa pro kruhové kontakty pracující v režimu isoviscous-elastic na základě rovnic režimů. [11]	19
Obr. 8 Kontury tloušťky filmu pro $k = 2; 1$ a $0,5$ a $PS = 0,78; 1,14$ a $1,67$. Mazivo vstupuje do kontaktu z levé části snímku (viz šipka). [23]	20
Obr. 9 Změny tloušťky filmu ve vysoce zatížených isovizkozních bodových kontaktech. [23]	20
Obr. 10 Hydrodynamická mapa pro široký eliptický kontakt. $k = 6$. [36]	22
Obr. 11 Hydrodynamická mapa pro kruhový kontakt. $k = 1$. [36]	22
Obr. 12 Hydrodynamická mapa pro kruhový kontakt. $k = 1$. [38]	23
Obr. 13 Rozložení tloušťky filmu a tlaku v kontaktu. a) $g_3 = 5,0, g_4 = 4,0$; b) $g_3 = 30,0, g_4 = 2,3$. [38]	24
Obr. 14 Rozložení tloušťky filmu a tlaku v kontaktu. a) $g_3 = 10,1, g_4 = 3,2$; b) $g_3 = 70,0, g_4 = 1,7$. [38]	24
Obr. 15 Výsledky numerické řešení dle Myerse. a) $g_4 = 10$; b) $g_4 = 2,2$; c) $g_4 = 0,1$; d) $g_4 = 0,001$; [38]	25
Obr. 16 Změna tlaku v mazaném kontaktu pro různé deformační čísla. [40] Vstup maziva nalevo.....	26
Obr. 17 Změna tlaku v nemazaném kontaktu pro různé deformační čísla. [40].....	26
Obr. 18 Změna tloušťky filmu v mazaném kontaktu pro různé deformační čísla [40]. Vstup maziva nalevo. $gE = 30$	27

Obr. 19 Porovnání centrální tloušťky maziva s predikcí Hamrocka & Dowsona. $W=3$, 35, 50 mN; $U=0-1,8$ mm/s. Mazivo GLY. [12]	29
Obr. 20 Průběh tloušťky filmu a tlaku v kontaktu $W=3$ a 50 mN; $U=0,65$ a 0,61 mm/s. Mazivo GLY. [12].....	29
Obr. 21 Rozložení tloušťky filmu v kontaktu. $W=3$ mN; $U=0,66$ mm/s. Mazivo GLY. [12]	29
Obr. 22 Průběh tloušťky filmu a tlaku v kontaktu $W=3$ mN; $U=0,66$ mm/s. Mazivo SFO a GLY. $\eta_{SFO} < \eta_{GLY}$. [12]	29
Obr. 23. Porovnání tloušťky filmu v závislosti na rychlosti U a zatížení W . [14].....	31
Obr. 24. Průběh tloušťky mazacího filmu v kontaktu [14]. Zatížení $W=3,8$ N (odpovídá kontaktnímu tlaku 1,04 MPa). Směr vtoku maziva zleva.	31
Obr. 25. Průběh formování tloušťky mazacího film v kontaktu pro $a = 1000 \text{ mm} \cdot \text{s} - 2$. Statický kontakt červeně, stabilizovaný mazací film-čárkovaně červeně, průběh tloušťky ve středu kontaktu-černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16].....	32
Obr. 26. Průběh formování tloušťky mazacího film v kontaktu pro $a = 5 \text{ mm} \cdot \text{s} - 2$. Statický kontakt červeně, stabilizovaný mazací film-čárkovaně červeně, průběh tloušťky ve středu kontaktu-černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16].....	32
Obr. 27 Průběh poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $U = 10 \text{ mm} \cdot \text{s} - 1$. Mazací film pro $t = 5$ [s]-červeně, stabilizovaný mazací film před náhlým zastavením-čárkovaně červeně, průběh tloušťky pro jednotlivé časy t -černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]	33
Obr. 28 Průběh poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro $U = 75 \text{ mm} \cdot \text{s} - 1$. Mazací film pro $t = 5$ [s]-červeně, stabilizovaný mazací film před náhlým zastavením-čárkovaně červeně, průběh tloušťky pro jednotlivé časy t -černě. Mazivo proudí zleva doprava. [16]	33
Obr. 29 Porovnání tloušťky filmu pro kombinaci: PEEK/STEEL a PEEK/PEEK. [1] ...	34
Obr. 30 Porovnání tloušťky filmu v závislosti na zatížení pro kombinaci: PEEK/PEEK. [1]	34
Obr. 31 Závislost součinitele tření μ na úhlové rychlosti ω pro PEEK/STEEL. [1]	34
Obr. 32 Závislost součinitele tření f na úhlové rychlosti ω pro PEEK/PEEK. [1].....	34
Obr. 33 Vliv unášivé rychlosti na centrální profil tloušťky filmu. Mazivo: GTL8; $W=10$ N; $SRR=0$. [4].....	36
Obr. 34 Vliv SRR na centrální tloušťku mazacího filmu h_{cent} . Kontakt: ocel/PMMA; $W=10$ N. [4]	36

Obr. 35 Porovnání publikovaných a experimentálních výsledků pro <i>hcent</i> . SRR=0. [4]	36
Obr. 36 Vliv zatížení <i>W</i> na centrální tloušťku mazacího filmu <i>hcent</i> . Kontakt: ocel/PMMA; SRR=0. [4].....	37
Obr. 37 Vývoj minimální tloušťky mazacího filmu <i>hcent</i> . Kontakt: ocel/PMMA; SRR=0, <i>W</i> =5 N. [4].....	37
Obr. 38 Rozložení tloušťky mazacího filmu <i>h</i> pro různé kinematické podmínky a zatížení (vstup maziva zleva). [50].....	38
Obr. 39 Průběh minulání tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty $g_4 = 1,0$. [56]	39
Obr. 40 Průběh minulání tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty $g_4 = 2,3$. [56]	39
Obr. 41 Stribeckova křivka – změna součinitele tření v mazaném kontaktu pro různé viskozity maziv. Kontakt STEEL/NDA. [13]	41
Obr. 42 Hydrodynamická mapa – pracovní oblast experimentu. Kontakt STEEL/NDA. [13]	41
Obr. 43 Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé <i>Rq</i> . Kontakt STEEL/NDA. [13]	42
Obr. 44 Závislost vzdálenosti od vstupu maziva do kontaktu na vývoji koeficientu tření. Kontakt OCEL/NDA. [13].....	42
Obr. 45 Vývoj drsnosti povrchu v průběhu časového testu pro nemazaný kontakt. [17] .	43
Obr. 46 Vývoj třecí síly v průběhu časového testu pro nemazaný kontakt. [17]	43
Obr. 47 Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé <i>Rq</i> . Kontakt PDMS/PDMS. [22].....	45
Obr. 48. Stribeckova křivka – změna koeficientu tření v mazaném kontaktu pro různé η . Kontakt PDMS/PDMS. [22].....	45
Obr. 49 Vývoj součinitele tření μ v režimech mazání pro různé zatížení <i>W</i> . [15].....	46
Obr. 50 Vývoj součinitele tření μ v režimech mazání s použitím maziv o různé viskozitě η . [15]	46
Obr. 51 Porovnání vývoje součinitele tření μ s teorií EHL s použitím různých materiálů. [15]	47
Obr. 52 Pracovní oblast použitých polymerů v hydrodynamické mapě režimů EHL. [15]	47
Obr. 53 Tahová zkouška-polymery.	50
Obr. 54 Schématické průběhy závislosti modulu pružnosti <i>E</i> polymeru na teplotě <i>T</i>	50

Obr. 55 Opotřebení plastového ozubení [1]. $\alpha = 20^\circ$, $Wm = 17 \text{ N} \cdot \text{m}$	53
Obr. 56 Vliv izolačního povlaku SiO_2 na teplotu v kontaktu pro ocel/ocel [61].	53
Obr. 57 Schéma postupu řešení experimentů zaměřených na mazání.....	70
Obr. 58 Schéma postupu řešení experimentů zaměřených na tření	71
Obr. 59 Obecné schéma použití optické interferometrie v kontaktu kulička / disk.....	72
Obr. 60 Schéma použité měřicí aparatury – rotační optický tribometr typu <i>ball-on-disc</i> .	73
Obr. 61 Polymerní kuličky určené pro experimenty zaměřené na tření v soft EHL kontaktu	74
Obr. 62 Kalibrace tloušťky mazacího filmu. a) Interferogram-monochromatický (statický kontakt), b) Interferogram-chromatický (statický kontakt), c) Interferogram – získaný při průtoku maziva kontaktem (dynamický kontakt)	75
Obr. 63 Vyhodnocení tloušťky filmu v interferogramu	75
Obr. 64 Vyhodnocení centrální tloušťky filmu h_{cent} na základě interferogramů. Kontakt PMMA/ocel, zatížení $W = 60 \text{ N}$ a $W = 100 \text{ N}$	75
Obr. 65 Vývoj třecího momentu na unášivé rychlosti U . M_1 – výsledný třecí moment....	76
Obr. 66 Vývoj koeficientu tření μ na unášivé rychlosti U . Kontakt POM/Safir.....	76
Obr. 67 Interferogram $U=150 \text{ mm/s}$; $W=35 \text{ N}$; $\text{SRR}=0,5$. [65]	80
Obr. 68 Interferogram $U=150 \text{ mm/s}$; $W=35 \text{ N}$; $\text{SRR}=0,25$. [65]	80
Obr. 69 Porovnání experimentálních dat h_{min} s predikcemi. $\text{SRR}=0.25$; $\text{SRR}=0.5$; $T=30^\circ\text{C}$; $W=35 \text{ N}$. [65]	80
Obr. 70 Porovnání výsledků s predikcí [23] centrální tloušťky mazacího filmu v kruhovém kontaktu pro mazivo TOTM. Log-Log. $U = 0,02\text{-}0,3 \text{ m/s}$; $W=10, 15, 20 \text{ N}$; $T=24^\circ\text{C}$; $\text{SRR}=0$; $k=1$	82
Obr. 71 Měření viskozity maziva TOTM pro různý LOT; $T=30^\circ\text{C}$	82
Obr. 72 Rozložení mazacího filmu v kontaktní oblasti. Podélný řez (kolmý ke vstupu maziva) Mazivo: TOTM $W=20 \text{ N}$; $T=24^\circ\text{C}$	83
Obr. 73 Vyhodnocení minimální tloušťky h_{min} v kontaktní oblasti. Mazivo: TOTM $W=20 \text{ N}$; $T=24^\circ\text{C}$	83
Obr. 74 Formování tloušťky mazacího filmu v soft EHL kontaktu dle závislosti na zatížení W . Mazivo: TOTM; $U=100 \text{ mm/s}$; $T=24^\circ\text{C}$. a) $W=10 \text{ N}$, b) $W=15 \text{ N}$, c) $W=20 \text{ N}$	83
Obr. 75 Schéma experimentu pro měření tření.....	84
Obr. 76 Vývoj tření v soft EHL kontaktu. Mazivo: FVA3 $W=50 \text{ N}$; $T = (90,110)^\circ\text{C}$	85

Obr. 77 Porovnání koeficientů tření pro materiály POM a PEEK. Mazivo FVA3; W=50 N; T=90°C.....	85
Obr. 78 Průběh koeficientu tření v závislosti na času. Mazivo FVA3; Materiál: POM; T=110 °C; W=50 N; U=1200 mm/s.....	86
Obr. 79 Porovnání změn topografie povrchu kuliček po testu. a) POM4; W=50 N; T=90 °C; SRR=0.5, b) POM6; W=50 N; T=110 °C; SRR=0.5	86
Obr. 80 Pozorování kontaktu bez nanesené chromové vrstvy. Mazivo GPL 102; U=150 mm/s; T=24 °C. a) W=20 N, b) 35 N.	87
Obr. 81 Návrh experimentu pro měření tloušťky filmu se zahrnutím vlivu vektorů rychlostí.	88

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Bezrozměrné parametry U, W, G	16
Tab. 2 Pracovní podmínky MTM experimentů.....	40
Tab. 3 Základní tribologické vlastnosti vybraných polymerů	48
Tab. 4 Fyzikální vlastnosti vybraných polymerů pro aplikaci u ozubení	49
Tab. 5 Porovnání predikčních vztahů pro výpočet minimální tloušťky filmu	63
Tab. 6 Porovnání predikčních vztahů pro výpočet centrální tloušťky filmu	63
Tab. 7 Porovnání exponentů vstupních parametrů minimální tloušťky filmu	64
Tab. 8 Porovnání exponentů vstupních parametrů centrální tloušťky filmu	64
Tab. 9 Porovnání exponentů vstupních parametrů složek součinitele tření	65
Tab. 10 Materiály vzorků pro experimenty	79
Tab. 11 Podmínky experimentů pro maziva TOTM a SQL.....	82
Tab. 12 Topografie povrchu nových experimentálních vzorků.....	84
Tab. 13 Podmínky experimentu analýzy tření pro POM a PEEK.....	85

12 PŘÍLOHA

Příloha představuje dodatek obsahující vybrané výpočetní vztahy, které jsou používány při analytických výpočtech v problematice EHL mazání.

Výpočetní vztahy

Redukovaný poloměr zakřivení	$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	(12-1)
---------------------------------	--	--------

Redukovaný modul pružnosti	$\frac{2}{E'} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2}$	(12-2)
-------------------------------	--	--------

Skluzová rychlost	$u_{slide} = u_b - u_d $	(12-3)
-------------------	---------------------------	--------

Unášivá rychlost	$U = \frac{(u_b + u_d)}{2}$	(12-4)
------------------	-----------------------------	--------

Sliding-rolling ratio	$SRR = \frac{2 \cdot u_b - u_d }{(u_b + u_d)}$	(12-5)
-----------------------	---	--------

Tlakově viskózní koeficient	Pro I-E režim $\rightarrow \alpha = 0$; $\alpha = \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) \cdot \frac{1}{p}$	(12-6)
--------------------------------	---	--------

Smykové napětí	$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$	(12-7)
----------------	-----------------------------------	--------

Poloměr kontaktní oblasti – bodový kontakt	$a = \left(\frac{3 \cdot W \cdot R}{2 \cdot E'} \right)^{1/3}$	(12-8)
---	---	--------

Hertzův kontaktní tlak – bodový kontakt	$p = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot a^2}$	(12-9)
--	---	--------
