



**Formování tloušťky filmu v elastohydrodynamicky mazaných poddajných kontaktech.**

Formation of fluid film thickness in elastohydrodynamically lubricated compliant contacts.

Projekt disertační práce

**OBSAH**

<b>Obsah</b>	<b>1</b>
<b>1 Název v češtině a angličtině</b>	<b>3</b>
<b>2 Klíčová slova česky a anglicky</b>	<b>4</b>
<b>3 Anotace</b>	<b>5</b>
<b>4 Úvod</b>	<b>6</b>
<b>5 Shrnutí současného stavu poznání</b>	<b>8</b>
5.1 Plastové ozubení	8
5.1.1 Vliv mechanických a tribologických vlastností na plastové ozubení	8
5.1.2 Vliv teploty na plastové ozubení	13
5.2 EHL kontakt	17
5.2.1 Režimy EHL	17
5.2.2 Isovizkozni režim EHL	18
5.3 Tloušťka mazacího filmu v režimech EHL	20
5.3.1 Vliv viskoelastického chování polymerů na tribologické vlastnosti	20
5.3.2 Studie zaměřené na měření tloušťky mazacího filmu v isovizkozni režimu a přechodová oblasti TR EHL	22
<b>6 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě kritické rešerše</b>	<b>35</b>
6.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z rešerše	35
6.2 Zhodnocení jednotlivých vlivů	36
6.2.1 Vliv unášivé a skluzové rychlosti	36
6.2.2 Vliv zatížení	36
6.2.3 Vliv teploty	37
6.2.4 Vliv tlakově viskózního koeficientu maziva	38
6.2.5 Vliv drsnosti povrchu	38
6.2.6 Vliv vlastností polymeru	39
6.2.7 Zhodnocení	39
<b>7 Podstata, cíle a přínos disertační práce</b>	<b>42</b>
7.1 Podstata disertační práce	42
7.2 Cíl disertační práce	42
7.3 Přínos disertační práce	42
7.4 Návaznost na současný stav řešení	43
<b>8 Vědecká otázka a pracovní hypotéza</b>	<b>44</b>
<b>9 Způsob řešení a použité vědecké metody zkoumání</b>	<b>45</b>
9.1 Použité experimentální metody	46
9.2 Postup měření	47
9.3 Materiály pro experimenty	48
9.4 Zpracování a význam získaných výsledků	49
<b>10 Časový rozvrh a etapy řešení</b>	<b>50</b>
<b>11 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení dané problematiky v daném čase</b>	<b>51</b>
<b>12 Spolupráce s jinými institucemi</b>	<b>52</b>
<b>13 Předpokládané náklady spojené s řešením a jejich zdroje</b>	<b>53</b>
13.1 Předpokládané náklady	53
13.2 Financování výzkumu	53
<b>14 Charakteristika předpokládaného řešení disertační práce v kategoriích definovaných pro základní výzkum v souladu s platnou Metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje</b>	<b>54</b>

14.1 Předepsané výstupy disertační práce	54
14.2 Seznam vhodných periodik pro následnou publikaci výsledků	54
<b>15 Bibliografie</b>	<b>55</b>
<b>16 Vědecký životopis</b>	<b>59</b>
Obor a začátek doktorského studia	59
Vzdělání a kvalifikace pro řešení projektu	59
Praktické zkušenosti, stáže, vědecké projekty	59
Výsledky vědeckých aktivit a akademická ocenění	59
Další relevantní informace	59
<b>Seznam značek a symbolů</b>	<b>60</b>
<b>Příloha</b>	<b>62</b>
Výpočetní vztahy	62

## **1 NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ**

Formování tloušťky filmu v elastohydrodynamicky mazaných poddajných kontaktech.

Formation of fluid film thickness in elastohydrodynamically lubricated compliant contacts.

## **2 KLÍČOVÁ SLOVA ČESKY A ANGLICKY**

Elastohydrodynamické mazání, iso-vizkozni režim, přechodová oblast, polymer, ozubení, tloušťka mazacího filmu, povlak.

Elastohydrodynamic lubrication, iso-viscous regime, transition region, polymer, gears, fluid-film thickness, coating.

### 3 ANOTACE

Cílem práce je na základě experimentálního výzkumu objasnit mazací proces ozubení z polymerních materiálů, které jsou v kontaktu s kompozitním nebo ocelovým materiálem. Za těchto podmínek polymerní ozubení pracuje v isovizkozním režimu EHL, respektive přechodové oblasti TR mezi isovizkozním a piezo-vizkozním režimem EHL. Hlavní částí experimentů je analyzování rozložení tloušťky mazacího filmu při průtoku maziva kontaktem. Na tloušťku filmu mají přímý vliv kinematické podmínky, zatížení, teplota, vlastnosti maziva a materiálu, jejichž účinek je záměrem experimentálně vyhodnotit. Výsledkem výzkumu je zjištění nových poznatků o chování různých polymerních materiálů při procesu mazání. Nové zjištěné skutečnosti pomohou bezprostředně k získání hlubších poznatků o oblasti soft EHL kontaktu a globálně mohou přispět k rozšíření využití plastových ozubených převodů ve strojírenském průmyslu.

Ozubené převody jsou již přes 2000 let využívány člověkem v širokém spektru aplikací. První zmínky použití ozubených převodů se datují přibližně do doby kolem 250 B. C, kdy Archimedes navrhl konstrukci předchůdce soudobých moderních šnekových převodů. V 80 B. C se historickým milníkem stal vynález strojního kalendáře – mechanismu z Antikythery, který se sestával s více jak 30 ozubených kol a sloužil pro předpovídání pohybů slunce a měsíce.

V průběhu 19. století nastal rozvoj použití ozubených kol mimo jiné i díky průmyslové revoluci ve světovém průmyslu. Se zavedením sériové výroby a tím současně rozšíření oblastí použití ozubených kol bylo třeba zajistit požadované vlastnosti ozubených kol i za různých pracovních podmínek prostředí a zatížení. Protože nároky na ozubení se historicky neustále zvyšovaly, jak z hlediska velikosti přenášené rychlosti otáčení, tak velikosti přenášeného zatížení bylo nezbytné použití kvalitních konstrukčních materiálů. Dominantním materiálem pro výrobu ozubených kol byly v 19. a 20. století i dnes převážně kovové materiály, zejména ocel a její slitiny obsahující legující chemické prvky. Současně v průběhu tohoto období došlo rovněž k patentování nových typů ozubených převodů.

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 opotřebením ozubení a tím i zkrácená doba technického života ozubeného kola. Proto se na ocelová ozubená kola nanášejí povlaky, které mají tepelně-izolační, antikorozi, antioxidační vlastnosti a současně zvyšují hodnoty mechanických charakteristik ozubení.

V druhé polovině 20. století spolu s rozvojem technologie výroby vstřikování plastů a výzkumu kompozitních materiálů pro inženýrské aplikace se začali 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, ale současně jsou poměrně odolná vůči opotřebením 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 koeficient tření u některých polymerů velmi vysoký, což vede ke vzniku tepla, které 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 požadovaných parametrů 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. EHL mazání charakterizuje několik typů režimů, ve kterých se kontakt mezi dvěma povrchy může vyskytovat. Kontakt ocelového a plastového kola se obvykle nachází v TR přechodové oblasti isoviskozního a piezoviskozního režimu elastohydrodynamického mazání. Za účelem výzkumu je nezbytné zvolit vhodnou experimentální metodu, přičemž použití optické interferometrie se jeví jako optimální přístup pro danou oblast zájmu.

Výsledkem je zjištění pozitivního vlivu povlaků aplikovaných na plastové ozubení u výkonných převodovek. Tento výsledek bude mít přímý dopad na rozšíření použití plastového ozubení ve strojírenských aplikacích a současně i na technické parametry konkrétních výrobků. Účelem použití povlaků je zajistit rovnováhu mezi mechanickými a tribologickými vlastnostmi daného polymeru.

Důsledkem těchto skutečností bude vzestupný trend výroby a použití plastových ozubených kol a tím přechod k postupnému zvýšení zastoupení plastů u mechanických převodovek s ozubenými koly. Následkem rozšíření využití plastových ozubených kol je také pravděpodobný rozvoj metod v oblasti materiálů a technologie povlakování. 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 tradiční ocelové materiály.

## 5 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část této práce se dělí na tři hlavní podkapitoly: **plastové ozubení, EHL kontakt a tloušťka mazacího filmu v režimech EHL**. V první podkapitole jsou shrnuty základní materiálové a tribologické charakteristiky polymerních materiálů. Druhá podkapitola je zaměřena na tribologii poddajných kontaktů v režimech EHL. Poslední kapitola pojednává o tloušťce mazacího filmu v EHL režimech a vlivech, které ji ovlivňují.

### 5.1 5.1 Plastové ozubení

Plastové ozubené převody mohou pracovat buďto jako mazané nebo nemazané. Nepřítomnost nebo přítomnost maziva v kontaktu je mimo jiné přítom zohledněna konkrétní aplikací. Mazivo může být nežádoucí v aplikacích, jako jsou např. výrobní stroje potravinářského průmyslu nebo v příslušenství ke stolním počítačům jako jsou tiskárny, kde mohou způsobit ohrožení zdraví nebo majetku.

#### 5.1.1 5.1.1 Vliv mechanických a tribologických vlastností na plastové ozubení

Vývoj polymerních materiálů se v posledních 30 letech významně zvýšil. Mezi běžně používané polymery pro strojní aplikace patří např. nylony, polyacetaly, 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 [1], [2]. Tribologické vlastnosti vybraných polymerů jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Základní tribologické vlastnosti vybraných polymerů

Polymer	Tribologické vlastnosti
<b>Polytetrafluorethylene (PTFE)</b>	Nízké tření, ale vysoké míra opotřebení, obvykle smíchán s ostatními polymery
<b>Nylon</b>	Nízký koeficient tření a nízká míra opotřebení. Použití např. jako středně odolný materiál pro výrobu ložisek
<b>Polyoxymethylene (POM)</b>	Vlastnosti podobné nylonům. Vykazují vysokou životnost pro valivý kontakt (pohyb).
<b>Polyetheretherketone (PEEK)</b>	Vysoký provozní teplotní limit. Odolný vůči chemickému působení. Vhodný pro vysoké kontaktní tlaky. Nevýhodou je vysoký koeficient tření v čisté formě polymeru
<b>Polyurethane (PU)</b>	Dobrá odolnost vůči abrazivnímu opotřebení a opotřebení za podmínek valení. Relativně vysoký koeficient tření pro kluzný pohyb
<b>Polyamide (PA)</b>	Vysoce odolné (výkonné) polymery, vhodné pro vysoké kontaktní tlaky a pro vysoké pracovní teploty, odolné proti olejům
<b>Polydimethylsiloxane (PMDS)</b>	
<b>Polymethylmethakrylate (PMMA)</b>	

Výroba plastového ozubení použitím technologie vstřikování je oproti technologiím 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 nabídl 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 [1], [3].

Součástí polymerních materiálů mohou být taktéž tzv. „vnitřní tuhá maziva“, jako je např. samomazný povlak PTFE viz Tab. 1. 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<sub>2</sub>* a další [1], [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. 2.

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti vybraných polymerů pro aplikaci u ozubení

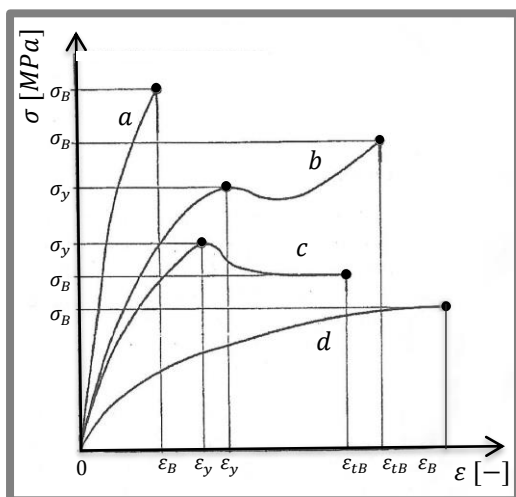
Polymer	Nejvyšší provozní teplota	Tepelná vodivost	Tepelná roztažnost	Modul pružnosti v tahu	Mez kluzu v tahu	Poissonovo číslo	Teplota skelného přechodu
	$T_{max}$	$\lambda$	$\beta$	$E$	$R_e$	$\nu$	$T_g$
-	[°C]	[W/m · K]	1/10 <sup>6</sup> · K	[GPa]	[MPa]	[-]	[°C]
PA 66	180	0,28	70	2,4	65	0,41	65
PEEK	250	0,25	60	2,2	85	0,4	143
PTFE	260	0,25	130	0,41	14	0,46	-100
PMMA	90	0,19	80	3,3	73	0,37	105
PU	70	0,06	58	1,85	20	0,48	-60
POM	140	0,31	110	2,7	65	0,35	-40
PMDS	40	0,15	10	0,75	10	0,5	-125
Ocel 100Cr6	-	46,6	12	210	700	0,3	-

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

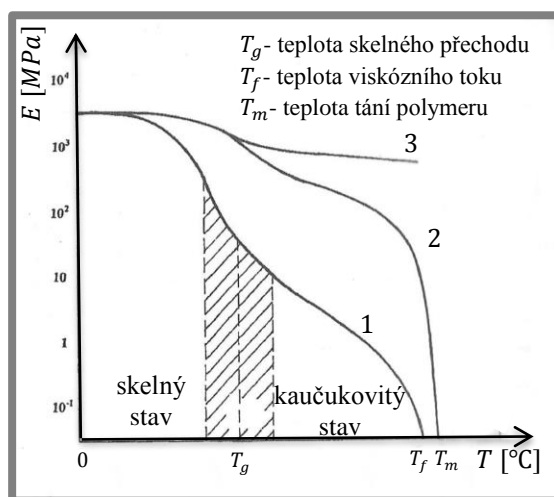
ozubených kol. V kontaktu zubů ozubených kol dochází k elastohydrodynamickému mazání EHL, které je charakteristické plným oddělením kontaktních povrchů dostatečnou tloušťkou mazacího filmu tak, že se povrchy ani v místech největších nerovností nedotýkají [3].

Nevýhodou polymerních materiálů jsou většinou nízké hodnoty mechanických charakteristik (viz Tab. 2), 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. Z experimentu, který provedl Myant et. al [4] vyplývá, že s klesající hodnotou modulu pružnosti  $E$  roste koeficient kluzného tření  $\mu$ . Nízký modul pružnosti byl však historicky považován za žádoucí, protože hluk a kontaktní síly byly redukovány již během pohybu. Modul pružnosti může také značně ovlivnit kontakt dvojice zubů, kdy může dojít k předčasnému nebo prodlouženému kontaktu zubů [3].

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. 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. [3] Vliv modulu pružnosti  $E$ , napětí  $\sigma$  a teploty  $T$  je patrný z Obr. 1 a Obr. 2. [5]



Obr. 2 Tahová zkouška-polymery.



Obr. 1 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  $\sigma_y$  nižším než napětí při přetržení  $\sigma_B$
- houževnaté materiály s napětím na mezi kluzu  $\sigma_y$  vyšším než napětí při přetržení  $\sigma_B$
- houževnaté materiály bez meze kluzu

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, které je spojeno s tím, že makromolekuly mohou obecně zaujímat různé konformace v závislosti na působícím napětí  $\sigma$ , 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. 2 lze pokládat polymer *Polyetheretherketone* (PEEK) jedním nevhodnějších pro aplikaci u ozubení. A to především kvůli vysoké provozní teplotě  $T_{max}$ , nízké tepelné roztažnosti  $\beta$  a modulu pružnosti  $E$ . Nevýhodou je však jeho cena, která je několikanásobně vyšší než např. pro polyamid (PA). Z hlediska tribologických vlastností, zejména míry opotřebení  $\delta$  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. 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].

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, zadírání, trvalou deformaci, povrchovou únavu a iniciaci trhlin a prasklin v důsledku zatěžování. Poškození lomem zubů se dělí na lom v důsledku přetížení, odstříhnutí 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. 4 je vidět opotřebení plastového ozubeného kola, jak publikoval Dearn et.al [3].

Topografie polymeru je při záběru vedena k elastickému vyhlazení nerovnosti 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 [3].

Projev opotřebení-pitting zaznamenal Dearn et. al [3] 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

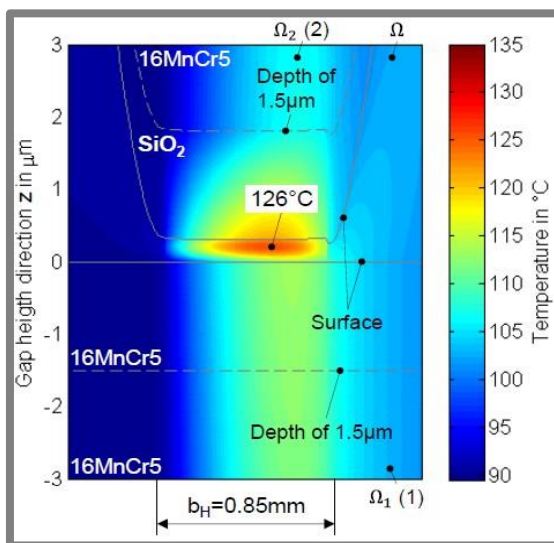
jako u soukolí OCEL/OCEL, přitom velikost důlků se u polymerů snižuje s rostoucí vzdáleností od valivé kružnice [3].

Jak uvádí Dearn et. al [3] 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  $\alpha = 30^\circ$ .

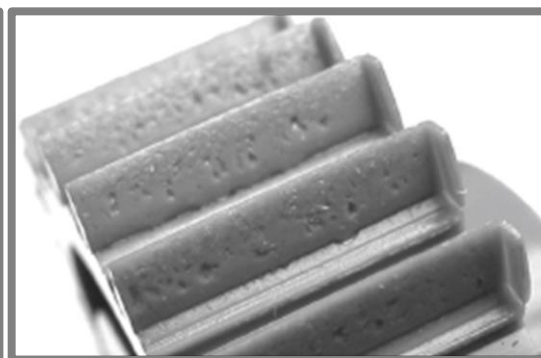
Výsledkem měření je zjištění, že u ozubení pro  $\alpha = 20^\circ$  nastalo extrémní opotřebení pittingem. Oproti tomu pro hodnoty  $\alpha = 30^\circ$  bylo pozorováno malé opotřebení a téměř žádný pitting. Z toho vyplývá, že polymerní ozubení (PEEK) má díky vyšší hodnotě úhlu záběru  $\alpha$  potenciál pro použití v aplikacích, kde se projevuje vysoké zatížení [3].

Opotřebení je projevem silového a tepelného působení. S opotřebením je spojeno tření a tvorba tloušťky mazacího filmu v kontaktu, která je předmětem kapitoly 5.2. Pro rozšíření oblasti použití plastových ozubených převodů 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 koeficient tření nebo tepelně izolovat základní materiál. Na rozložení teploty v EHL kontaktu má značný vliv tepelná vodivost  $\lambda$  aplikovaných povlaků, jak uvádí Lohner et. al [7].



**Obr. 3** Vliv izolačního povlaku  $SiO_2$  na teplotu v kontaktu pro ocel/ocel [7].



**Obr. 4** Opotřebení plastového ozubení [3].  
 $\alpha = 20^\circ$ ,  $W = 17 N \cdot m$

Nanesením povlaků s termo-izolačními vlastnostmi lze významně omezit přechod tepla z kontaktní oblasti do základního materiálu, jak je vidět z Obr. 3, který publikoval Lohner et.al [7] pro kontakt ocelového ozubení. A v důsledku těchto skutečností nanosený povlak snižuje opotřebení povrchu ozubení. Tvrdé povlaky, jak poznamenal Holmberg et.al [8] 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

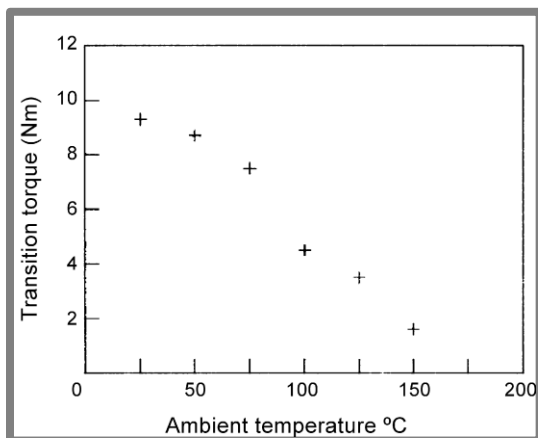
zmíněno, avšak dosud nebyl vědeckou komunitou dostatečně experimentálně ověřen pozitivní vliv chování povlaků na tribologii plastového ozubení s ohledem na změny teplot, jak uvedl Marx et. al [9].

### 5.1.2 Vliv teploty na plastové ozubení

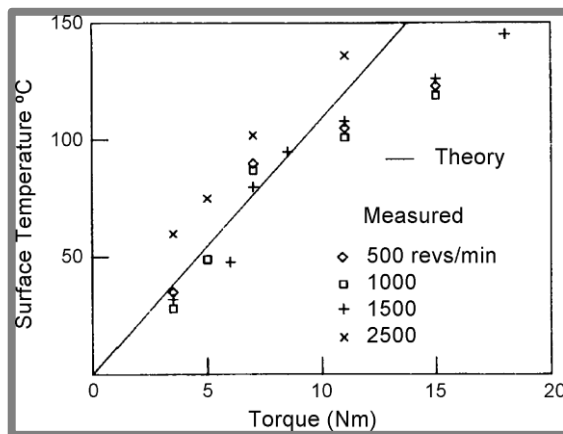
V případě polymerního ozubení má teplota přímý vliv na tloušťku mazacího filmu. Účinek teploty je rovněž spojen s poškozením ozubení, kdy po překročení kritického zatížení dochází velmi rychle ke značnému opotřebení. Hlavním důvodem vysokého opotřebení u polymerů může být skutečnost, že pracovní teplota ozubení dosahuje bodu tavení materiálu (*melting point*) při kritickém zatížení. Teplotu povrchu ozubení lze rozdělit na tři hlavní složky: okolní, bulk a flash teplotu [10].

Mao. et. al [10] 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 [10] jsou v dobré shodě s experimentálním měřením, které provedl na nylonu plněném skelnými vlákny a s obsahem interního maziva PTFE. Veškerá měření provedl bez použití maziva.

Většina dosavadních metod měření teploty povrchu byla provedena až po zastavení ozubeného soukolí. V této situaci však dochází k prudkému poklesu teploty na bocích zubů a měření se tak stává nepřesným. Z Obr. 6 je patrné, že při zvýšení teploty okolí dochází téměř k lineárnímu poklesu točivého momentu. Současně dochází k rostoucímu opotřebení, kde maximum nastává blízko teploty tavení materiálu [10].



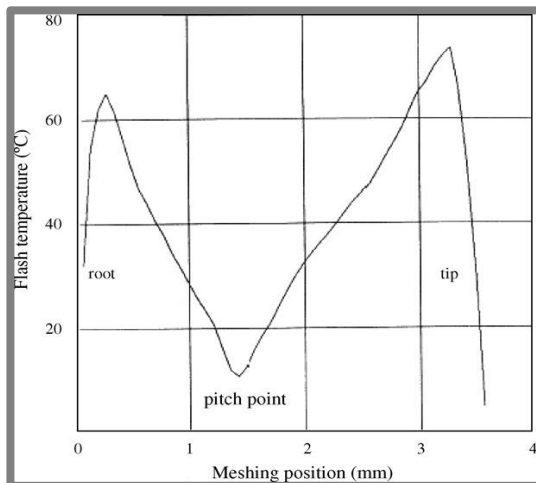
**Obr. 6** Vliv okolní teploty na točivý moment [10].



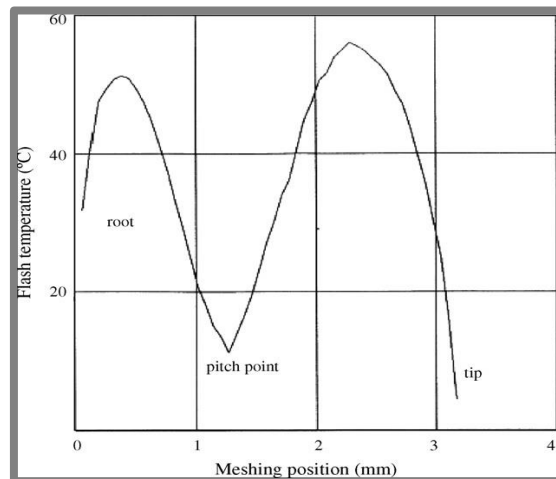
**Obr. 5** Vliv momentu na povrchovou teplotu – srovnání měření a teorie [10].

Pro měření teploty povrchu ozubení Mao et.al [10], [11] 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  $\omega$ .

Kvůli nízké teplotní vodivosti polymerů  $\lambda$  nedochází oproti ocelovému ozubení k přenosu tepla z kontaktního zuby na nekontaktní zub. Mao et. al [10] při výpočtu teploty v dotyku zubů použil řešení, které navrhl Blok et. al [12]. Z výsledků (viz Obr. 5) je patrná shoda teoretické predikce s experimentálním měřením pro povrchovou teplotu ozubení. Mao et. al [11] se své práci zaměřil na numerické řešení predikce teploty v bodu dotyku zubů u kompozitního polymerního ozubení. Numerický model, který navrhl Mao et. al [11] je porovnán s tím, co publikoval Blok et. al [12].



**Obr. 8** Průběh teploty v bodě dotyku zubů [11].  
 $M = 10N \cdot m$ ;  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$



**Obr. 7** Průběh teploty v dotyku při postupném zatěžování [11].

V experimentu bylo použito čelní ozubené soukolí s přímými zuby z materiálu polyoxymetylén (POM). Mao et. al [13] též uvádí srovnání vlastností obráběného a vstříkovaného polymeru POM. Výsledkem experimentu na Obr. 8 je stanovení průběhu změny teploty v bodu dotyku během záběrového cyklu zubů za předpokladu působení konstantního točivého momentu a sdílení zatížení mezi dvěma zuby [11].

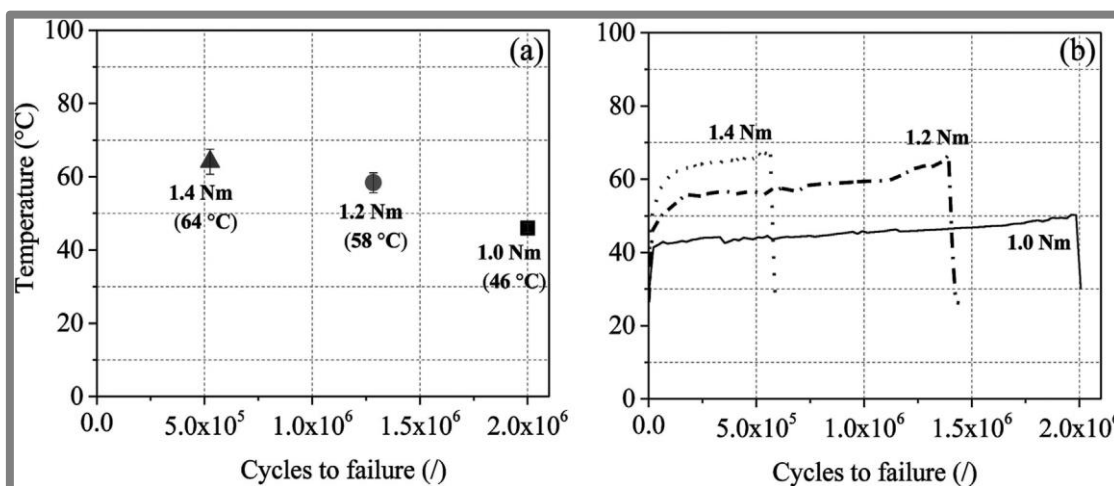
Křivka průběhu teploty vykazuje dvě maxima na začátku a konci záběru zubů, kde poloměr zakřivení zuby dosahuje nejvyšších hodnot a kde kluzná rychlost je nejvyšší. V porovnání s tím, co navrhl Blok et. al [12] jsou výsledky, které publikoval Mao et. al [11] rozdílné přibližně o 20 % zejména na počátku a na konci záběru zubů [11].

Nicméně výsledky, které získal Mao et. al [11] jsou blízké výsledkům jež publikoval Tobe a Kato et. al [14] pro ocelové ozubení. V závislosti na teplotě v dotyku zubů byl zaznamenán vliv frekvence zatěžování. Při postupném zatěžování vykazoval průběh teploty v dotyku více stejnoměrný charakter. Teplotní maxima jsou za předpokladu postupného zatěžování nižší ve srovnání s plným zatížením, jak je vidět z porovnání na Obr. 7 a Obr. 8. Ze snímků vyplývá, že průměrné maximální teploty leží v intervalu  $\langle 40, 50 \rangle$  °C.

Vlastnosti polymerů jsou velmi citlivé na změnu teploty v kontaktu, kdy při poměrně malém zvýšení teploty dochází ke značné změně mechanických a tribologických vlastností. Teploty v kontaktu se mohou velmi lišit s ohledem na kombinaci materiálů ozubených kol (ocel/polymer nebo polymer/polymer) [15].

Hlavními zdroji vzniku tepla jsou u polymerního ozubení třecí a hysterezní ztráty. Měřením bylo zjištěno, že na zvýšení teploty má vliv zejména koeficient tření, zatížení a rychlost otáčení. Tyto vlivy způsobují zvýšení míry opotřebení a pravděpodobnost únavového poškození při působení vysokého napětí. [15]

Ke většině poškození dochází především zmenšením tloušťky zubu kvůli teplotnímu nebo mechanickému přetížení. Na projev teploty, opotřebení a únavu má rovněž vliv postupu výroby ozubení, přítomnost materiálů, které slouží k vyztužení polymeru, interních maziv, geometrie ozubení a kombinace materiálů v soukolí. [15]



**Obr. 9** Průběh teploty v patě zubu při postupném zatěžování za nekontrolovaných teplotních podmínek [15].

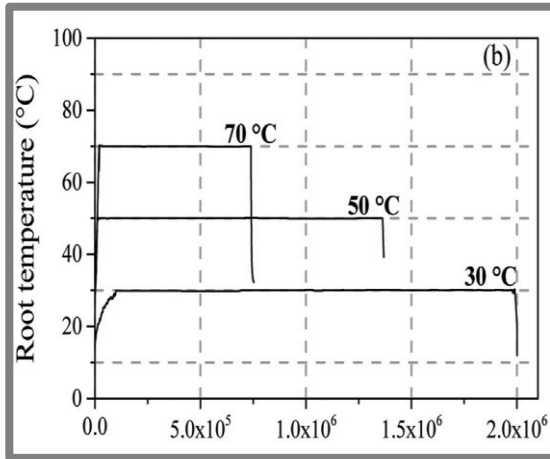
Často používaným materiálem jsou polyacetal (POM), které vykazují dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči projevům únavy, a to i bez přidání aditiv do základního polymeru. Teplota tavení POM je okolo 175 °C, nicméně maximální dlouhodobá provozní teplota je přibližně 110 °C. [15]

Doba do porušení z hlediska únavy je však silně závislá na okolní teplotě a na teplotě v patě zubu. Nicméně účinek řízené teploty v patě zubu na únavový život polymerních ozubených soukolí nebyl dosud důkladně experimentálně prozkoumán [15].

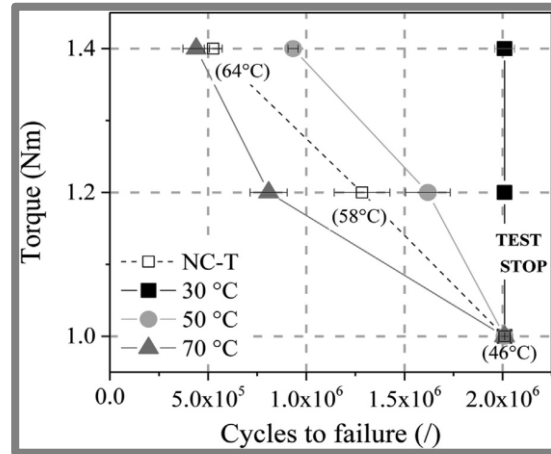
Kalin et. al [15] se ve svém článku zaměřil na porovnání vlivu točivého momentu, okolní teploty a řízené teploty v patě zubu na únavový život polymeru. V soukolí, které použil je ocelový pastorek a kolo z polymeru POM. Experiment byl proveden bez přítomnosti maziva pro velikosti momentu 1,0; 1,2; 1,4 [ $N \cdot m$ ] a s mezí maximálního měřeného počtu cyklů  $2 \cdot 10^6$ .

Při měření za okolní teploty se s klesajícím zatížením ze 1,4 na 1,2  $N \cdot m$  prodlužuje počet cyklů do porušení únavou téměř dvojnásobně. Z Obr. 9 je patrné zvýšení teploty v patě zubu a rovněž zkrácení doby do porušení únavou s rostoucím zatížením  $W$ . Rozsah teplot v patě zubu se pohybuje v intervalu 20 – 70 °C. Výsledky, které získal Kalin et. al [15] ukazují, že účinek teploty má pro polymer POM značný vliv na únavu materiálu, respektive na počet cyklů do lomu, viz Obr. 11.

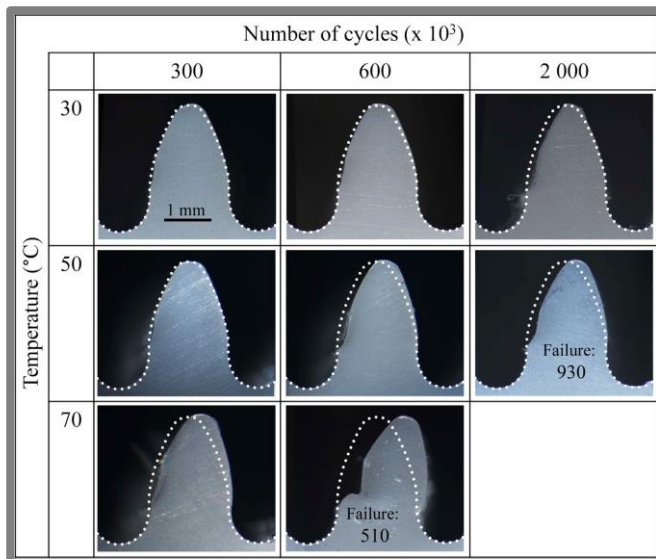
Srovnání výsledků měření získaných za nekontrolovaných teplotních podmínek prostředí (čárkovaně, při pokojové teplotě  $t = 24^\circ\text{C}$ ) a výsledků získaných z měření v atmosférické komoře pro teploty 30, 50, 70 °C a zatížení 1,0 1,2, 1,4 [ $\text{N} \cdot \text{m}$ ] je na Obr. 10. Ze snímku je patrný fatální účinek zatížení a teploty na únavové vlastnosti polymeru POM [15].



**Obr. 11** Průběhy teplot v patě zubu závislosti na počtu cyklů [15].  $W = 1, 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ .



**Obr. 10** S-N křivka-srovnání účinku teploty v patě zubu pro nekontrolované a kontrolované prostředí [15].



**Obr. 12** Změna geometrie tvaru zubu v důsledku účinku teploty a počtu cyklů za kontrolované teploty [15].  $W = 1, 4 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Z toho lze vyvodit závěr, že polymerní ozubená kola by měla být provozována za kontrolovaných teplotních podmínek prostředí v určitém teplotním intervalu, což zvýší únavovou životnost materiálu. Zvýšená teplota v nekontrolovaných podmínkách se také negativně podílela na účinnosti převodu, která o několik procent klesla [15].

Účinek teploty na tvar geometrie zubu pro konkrétní hodnoty počtu cyklů do lomu je na Obr. 12. Z výsledků vyplývá, že i při působení ekvivalentního zatížení má samotný účinek teploty markantní vliv na technický život ozubení z materiálu POM [15].

## 5.2 EHL kontakt

Elastohydrodynamické mazání (EHL) je určitou formou hydrodynamického mazání, ve kterém má prioritní význam hydrodynamika kapaliny, elastické deformace kontaktních povrchů a změna dynamické viskozity  $\eta$  s tlakem  $p$ . Přitom je minimální tloušťka mazacího filmu  $h_{min}$  několikanásobně větší než průměrná výška povrchových nerovností  $R_a$  a proto jsou kontaktní povrchy ideálně plně odděleny souvislým, relativně tlustým mazacím filmem.

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. Kontaktní plochy se elasticky deformují vlivem hydrodynamického tlaku, kterým působí vrstva mazacího filmu na povrch materiálu [3].

### 5.2.1

#### 5.2.1 Režimy EHL

Při záběru ozubených kol vznikají silovým působením po velmi malé ploše vysoké kontaktní napětí (Hertzův tlak)  $p_m$ . 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.

Hertz vytvořil modely pole napětí za předpokladu čistého valení (bez skluzu), kdy na dotykové ploše nedochází k působení smykových napětí  $\tau$ . Přičemž při záběru zubů ozubených kol se jedná zpravidla o model valení se skluzem, kdy se poměr rychlostí valení/smýkání mění v důsledku pohybu bodu dotyku po dráze záběru (přímka záběru). Poměr rychlostí valení/smýkání (*slide-to-roll ratio*) je v režimech EHL označován jako *SRR*.

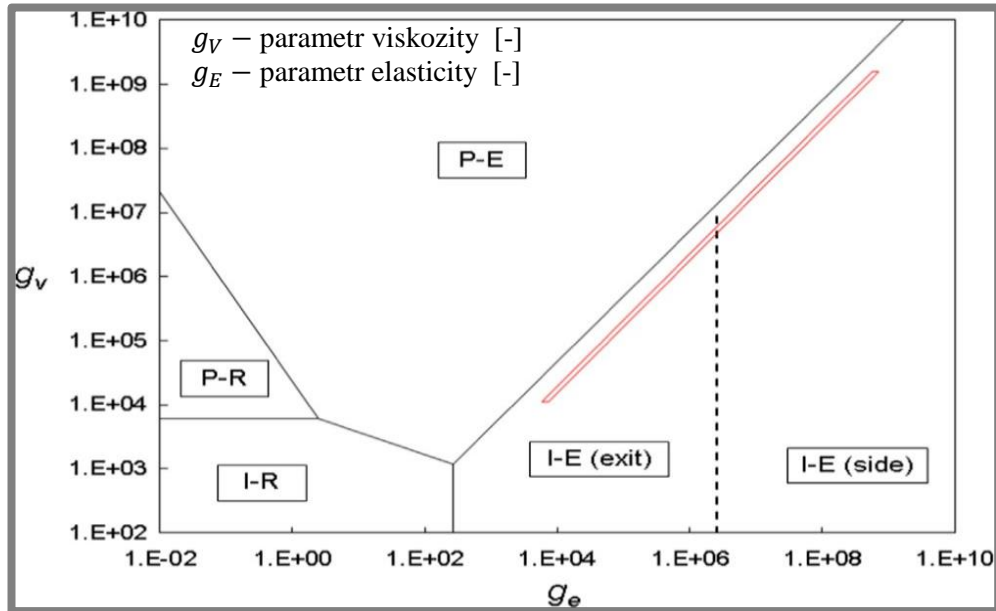
Oproti tomu v případě plastového ozubení vlivem vlastností materiálu lze považovat kontakt za teoreticky poddajný, umožňující významné elastické deformace  $\varepsilon$ . Vlivem těchto deformací se v kontaktu vytvářejí velké oblasti lokální konformity při záběru dvojice zubů. S tím jsou spojeny deformační charakteristiky polymerních materiálů, které jsou odlišné od tvrdých (tuhých) materiálů. [9], [16]

Při elastohydrodynamickém mazání lze rozlišit 4 význačné režimy mazání podle závislosti na elastických deformacích a změny dynamické viskozity  $\eta$  s tlakem  $p$ . A to isoviscous-rigid (I-R), piezoviscous-rigid (P-R), isoviscous-elastic (I-E) a piezoviscous-elastic (P-E) [9]. Hamrock a Dowson [17] vytvořili diagramy pro tyto 4 režimy. [18]

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 (parametr elipticity  $k = 1$ ) je na Obr. 13. Na vodorovné a svislé ose jsou parametry elasticity  $g_E$  a viskozity  $g_V$ , které zavedl Johnson et. al [19]. Režimy EHL jsou funkcí geometrie, normálového zatížení, kluzné a valivé rychlosti [9].

U kontaktu mezi ne-konformními povrchy s vysokým modulem pružnosti  $E$  (ocel, keramika ad.) dochází za podmínek valení se skluzem významným lokálním kontaktním tlakům  $p_m$  (0,5 – 4 GPa) [9]. Přitom nejvyšší hodnota kontaktního tlaku  $p_m$  leží v těsné blízkosti pod kontaktním povrchem.

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 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 [9].



Obr. 13 Mapa hydrodynamických režimů EHL pro kruhový kontakt [9].  $k = 1$

## 5.2.2

### 5.2.2 Isovizkozni režim EHL

První poznatky o isovizkozni režimu publikovali autoři Herrebrugh et. al [20], Johnson et. al [19], Baglin a Archrad et. al [21] a Hooke a O'donoghue et. al [22]. O několik let později autoři Hamrock a Dowson et. al [17] vytvořili metodologii pro řešení problémů „soft“ EHL na základě výsledků jejich výzkumu v oblasti „hard“ EHL. Využitím výsledků numerických simulací, které provedl Hamrock a Dowson et. al [17] byli autoři schopni stanovit výrazy pro minimální  $h_{min}$  i centrální  $h_{cent}$  tloušťku mazacího filmu.

Bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu pro eliptický kontakt [17]:

$$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 7,43 \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,21} \quad (2-1)$$

Bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu pro eliptický kontakt [17]:

$$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \quad (2-2)$$

Režim isoviscous-elastic (I-E) neboli soft EHL nastává mezi nekonformními povrchy, když kontaktní tlak  $p_m$  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  $\eta$  [23].

Tloušťka mazacího filmu  $h$  je proto méně závislá na viskozitě  $\eta$  a více závislá na elastických vlastnostech daných materiálů při vzájemném kontaktu povrchů [23]. Elastické deformace jsou relativně velké vůči tloušťce mazacího filmu. Marx et. al [9] ve svém článku uvádí, že dosud známé teorie soft EHL pro stanovení tloušťky mazacího filmu, byť existují, tak nebyly dosud důkladně experimentálně ověřeny.

Režim mazání soft EHL je typický pro polymerní materiály, které se chovají jako poddajný kontakt, u něhož lze působením relativně malých sil vyvolat značné elastické deformace povrchu  $\varepsilon$ . Tím je rovněž ovlivněn i tvar kontaktní oblasti [9]. Avšak jak uvádí Myant et. al [4] ve svém článku, základní mechanickou charakteristikou polymerních materiálů není jejich tvrdost, ale tuhost.

Před stanovením minimální  $h_{min}$  a centrální  $h_{cent}$  tloušťky mazacího filmu je nutné vyjádřit charakteristické parametry, kterými jsou redukovaný kontaktní poloměr  $R'$  a redukovaný modul pružnosti  $E'$ . V rovnicích pro výpočet  $R'$  jsou  $R_1$  a  $R_2$  největší poloměry obou kontaktních ploch ve směru unášivé rychlosti  $U$  a analogicky označené moduly pružnosti  $E_1$ ,  $E_2$ , a Poissonova čísla  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  obou kontaktních elementů.

Hodnoty  $\nu$  se u polymerních materiálů pohybují podle Tab. 2 v rozmezí intervalu  $\langle 0,35, 0,5 \rangle$ . Liší se tak oproti ocelím, kde referenční hodnota  $\nu = 0,3 [-]$ . Z hodnot modulu pružnosti  $E$  pro jednotlivé polymery uvedené v Tab. 2 je rovněž patrné, že oproti výpočtovým teoretickým rovnicím hard EHL bude nutné tyto vztahy v režimu soft EHL, respektive v přechodové oblasti TR k výpočtu tloušťky mazacího filmu a tření korigovat, jak navrhl de Vicente et. al [24].

### 5.3 Tloušťka mazacího filmu v režimech EHL

Tloušťka mazacího filmu se mění při změně jednotlivých režimů EHL. Tato kapitola je specificky zaměřena na studium rozložení mazacího filmu a hydrodynamického tlaku v kontaktu. Za tímto účelem byly shromážděny publikace, které se zabývají numerickými a experimentálními metodami, jež jsou blízké tématu disertační práce.

#### 5.3.1 Vliv viskoelastického chování polymerů na tribologické vlastnosti

Tloušťka mazacího filmu  $h_{min}$  je pro EHL režim několikrát větší než průměrná výška povrchových nerovností  $R_a$ . Přesto má přítomnost nerovností povrchu v kontaktu podstatný vliv, jak ukázal např. Masjedi et. al [16], který zabýval smíšeným elasto-hydrodynamickým mazáním v poddajných liniových kontaktech s vlivem nerovností povrchu. Nerovnosti povrchu popisuje parametr  $R_a$  a poloměr povrchových nerovností (asperity radius)  $\beta$ . Kombinací modifikovaných Reynoldsových rovnic Patirem a Chengem a Greenwood-Wilkinsonova statistického modelu mikro-kontaktu stanovil rovnice pro tloušťku minimálního  $h_{min}$  a centrálního  $h_{cent}$  mazacího filmu [16].

Výsledky ukazují, že tloušťka mazacího filmu je daleko více závislá na zatížení  $W$  než v případě hard EHL. Srovnání uvádí, že bezrozměrná minimální tloušťka filmu měla hodnotu  $\overline{H}_{MIN} = 9 \cdot 10^{-5}$  při zatížení  $\overline{W} = 1 \cdot 10^{-4}$  a po zvýšení zatížení na  $\overline{W} = 1 \cdot 10^{-2}$  se hodnota tloušťky filmu snížila 3x na  $\overline{H}_{MIN} = 3 \cdot 10^{-5}$ . [16]

Vzhledem k podstatě isoviskozního režimu, kdy viskozita není podstatně ovlivněna s kontaktním tlakem, jako tomu je u piezoviskozního režimu (hard EHL), lze vliv zatížení  $W$  považovat za hlavní faktor ovlivňující tloušťku mazacího filmu  $h$  [16].

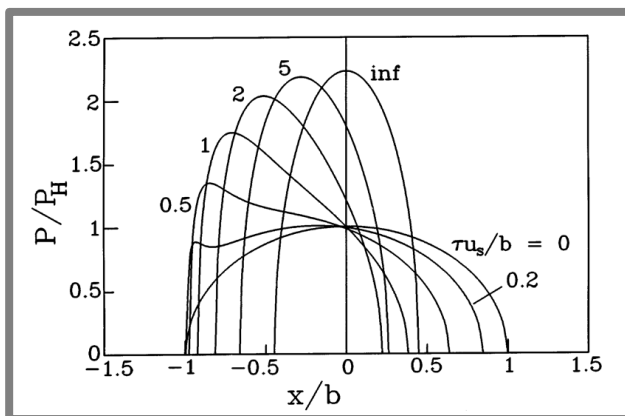
Je také zajímavé, že rozložení kontaktního tlaku odpovídá rozložení kontaktního Hertzova tlaku v průběhu zvyšování zatížení (kontaktní oblast elipsa), podobně jako u hard EHL. Celkově jsou výsledky simulace velmi blízké stanoveným rovnicím a ukazují, že drsnost povrchu  $R_a$  a asperity radius  $\beta$  jsou v soft EHL důležitými parametry [16].

Soft EHL bylo v posledních několika letech předmětem intenzivního výzkumu. Především vyšetření viskoelastického chování poddajných materiálů pro EHL kontakt, které má vliv na kontaktní tlak a profil mazacího filmu. První řešení navrhl Hooke a Huang et. al [25], následně se objevilo několik dalších studií. [16]. U poddajných materiálů, jako jsou polymery může docházet k časovému zpoždění při deformačním procesu, proto má viskoelastická podstatný vliv na kontaktní tlak a tloušťku mazacího filmu, jak uvedl Hooke et. al [25].

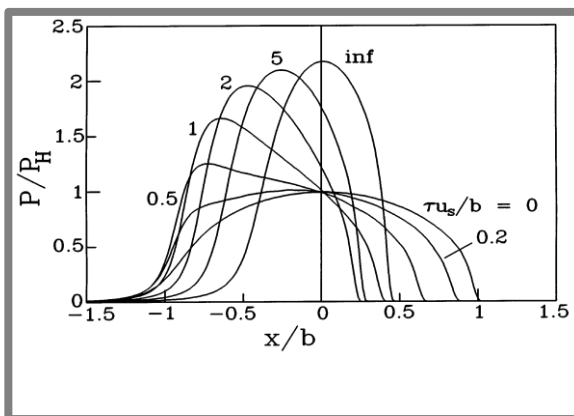
Při projevu viskoelastického chování dochází k časovým zpožděním (prodlevám) při deformaci. Vliv viskoelastické ovlivňuje tloušťku mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktu. Tyto parametry jsou dosud nedostatečně experimentálně ověřeny. Křivky na vykazují očekávaný nárůst kontaktního tlaku  $p$  a zmenšení kontaktní šířky  $b$  při zvětšení Debořina čísla  $\tau \cdot u_s/b$ . Debořino číslo charakterizuje viskoelastické chování polymerů.

$$DEB = \frac{\tau \cdot u_s}{b} \quad (2-3)$$

Z Obr. 15 je patrný prudký nárůst tlaku na vstupu do kontaktu s výjimkou poměru  $DEB = 0$ , kdy se jedná o elastický model. Rozložení tlaku je pro nízké hodnoty Debořina poměru blízké průběhu Hertzova tlaku s výjimkou na vstupu a výstupu z kontaktu. Na výstupu z kontaktu dochází k vytvoření konstriktce, která běžně nastává u hard EHL kontaktu.

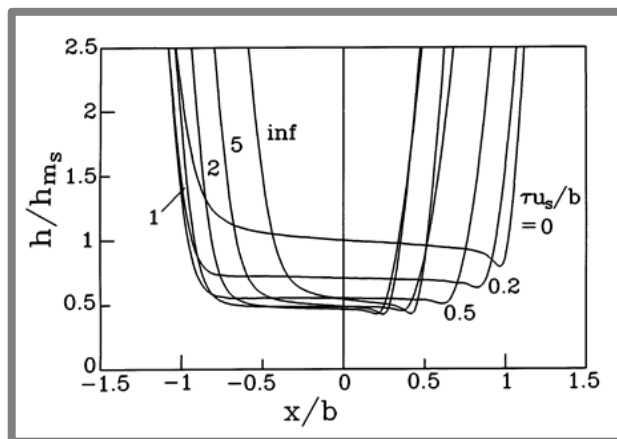


**Obr. 15** Změna tlaku v nemazaném kontaktu pro různé debořina čísla [25]. Vstup filmu nalevo.



**Obr. 14** Změna tlaku v mazaném kontaktu pro různé debořina čísla [25]. Vstup filmu nalevo.

Pro hodnotu  $DEB = 0,2$  nastává vrchol tlaku na vstupu do kontaktu před vstupem za nemazaných podmínek. Tloušťky filmu pro různá debořina čísla dle Obr. 16 vykazují téměř konstantní průběh tloušťky mazacího filmu po celé délce kontaktu s výjimkou konstriktce na výstupu. Pro hodnotu  $DEB = 0$  průběh odpovídá elastickému modelu. Jakmile se hodnota  $DEB$  zvýší na 0,5 dochází k prudkému úbytku mazacího filmu v kontaktu. Pro hodnoty 0,5 – 2 se stává průběh tloušťky filmu téměř konstantní s konstrikcí na výstupu, která je značně menší oproti nízkým nebo vysokým hodnotám debořina čísla. Přesto je průběh tloušťky velmi podobný průběhu v oblasti hard EHL s konstrikcí na výstupu z kontaktu. S rostoucí hodnotou  $g_E$  dochází k poklesu tloušťky filmu a délky vstupní a výstupní oblasti, přitom minimum nastává na výstupu z kontaktu.



**Obr. 16** Změna tloušťky filmu v mazaném kontaktu pro různé debořina čísla [25]. Vstup filmu nalevo.  $g_E = 30$

Vysoké hodnoty  $DEB$  čísla jsou spojeny s Hertzovým rozložením tlaku při rychlém zatěžování. Zároveň dochází při vyšších hodnotách parametru viskozity  $g_E$  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 viskoelastivity materiálu. Přitom průběh tlaku na vstupu má strmí rostoucí průběh oproti výstupu z kontaktu. Tento vliv se projevuje na průběhu tloušťky, kdy dochází k narovnání profilu v centrální oblasti. Viskoelasticitu má významný vliv na proces mazání. Rozhodujícím parametrem, zda kontakt je elastický nebo viskoelastický je Debořino číslo, přitom k přechodu dochází pro  $DEB \sim 1$ .

## 5.3.2

### 5.3.2 Studie zaměřené na měření tloušťky mazacího filmu v isoviskozním režimu a přechodová oblasti TR EHL

Přechodová oblast TR mezi E-P a E-I je podle výsledků, které získali Greenwood et. al [27], Hooke et. al [26] a další autoři aplikovatelná na polymery mazané minerálním olejem, u kterých se objevil typický tlakový hrot na výstupu z kontaktu. Přechodová oblast TR je přibližně ohraničena hodnotami  $g_4 \in (0,1,2,2)$ , jak navrhl Johnson et. al [19], přiblížením k oblasti R-I může  $g_4$  hodnotu 2,2 překročit dříve, než se objeví tlakový hrot [28].

Parametr viskozity  $g_V$ :

$$g_V = g_1 = \frac{\bar{G} \cdot \bar{W}^3}{\bar{U}^2} = \left( \frac{\alpha^2 \cdot W^3}{\eta_0 \cdot \bar{U} \cdot R'^2} \right)^{1/2} \quad (2-4)$$

Parametr elasticity  $g_E$ :

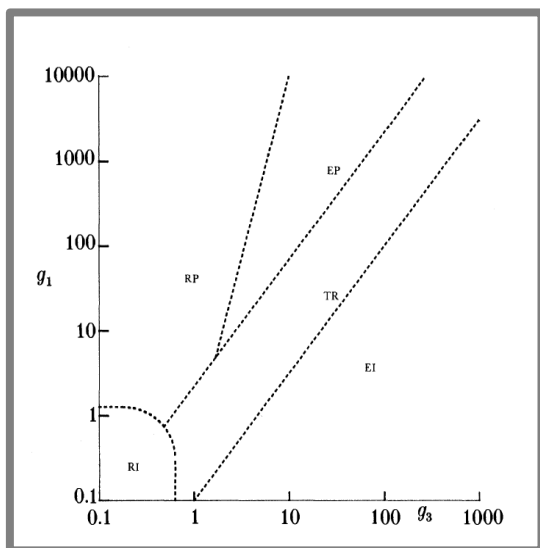
$$g_E = g_3 = \frac{\bar{W}^{8/3}}{\bar{U}^2} = \left( \frac{W^2}{\eta_0 \cdot \bar{U} \cdot E' \cdot R'} \right)^{1/2} \quad (2-5)$$

Parametr „character of the system“  $g_4$ :

$$g_4 = \left( \frac{\alpha^4 \cdot \bar{U} \cdot \eta_0 \cdot E'^3}{R'} \right)^{1/4} \quad (2-6)$$

Pro zkoumání přechodové oblasti TR použil Myars et. al [28] výsledky, které získal Hall a Savage et. al [29] na základě použití Chebyshev metody aplikované na isoviskozní kontakty. Tato metoda se značně liší, jak uvádí Myars et. al [28] od přístupu, který použil Hooke et. al [26]. Výhodou použití této metody široký rozsah kontaktu od velmi zatížených po méně zatížené válce, u kterých není vhodné zavést předpoklad Hooke et. al [26], že kontaktní tlaky jsou blízké Hertzovým tlakům. Podobnost k Hertzovým tlakům  $p_m$  se zvyšuje, pokud roste hodnota parametru elasticity  $g_3$  [28].

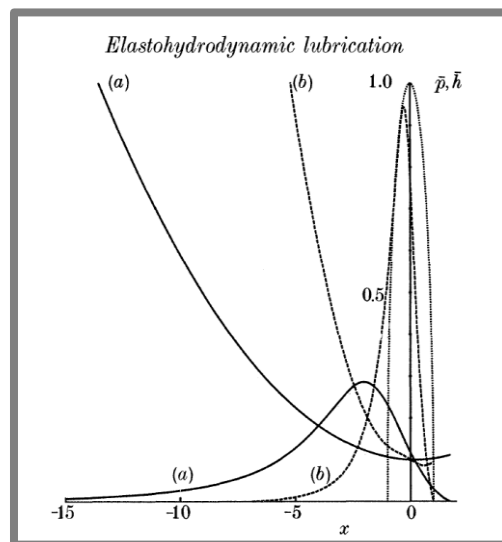
Při dotyku zubů ozubení mají hlavní vliv dva fyzikální jevy. První je elastická deformace povrchů při působícím zatížení  $W$ , která značným způsobem ovlivňuje tvar (rozložení) mazacího filmu. Druhý je vliv rozdílné viskozity  $\Delta\eta$  s kontaktním tlakem, který často způsobuje tlakový hrot („spike“), který vede k poklesu tlaku na výstupu z kontaktu [18].



**Obr. 18** Johnsonova mapa – TR přechodová oblast EI a EP [28].

$g_V, g_1$  – parametr viskozity;

$g_E, g_3$  – parametr elasticity;



**Obr. 17** Průběh tloušťky filmu  $h$  a tlaku  $p$  [28].

(a)  $g_3 = 0,5$ ;  $g_4 = 15,0$ ;

(b)  $g_3 = 2,0$ ;  $g_4 = 6,0$ ;

Výška tlakového hrotu se zvyšuje spolu s hodnotou  $g_4$  a nejvyšší hodnota odpovídá začátku na výstupní konstrikci. Se zvyšující se hodnotou  $g_3$  se tlakový hrot vytváří blíže k výstupu z kontaktu a zkracuje se jeho šířka, jak potvrdil Archard et.al [21], [28].

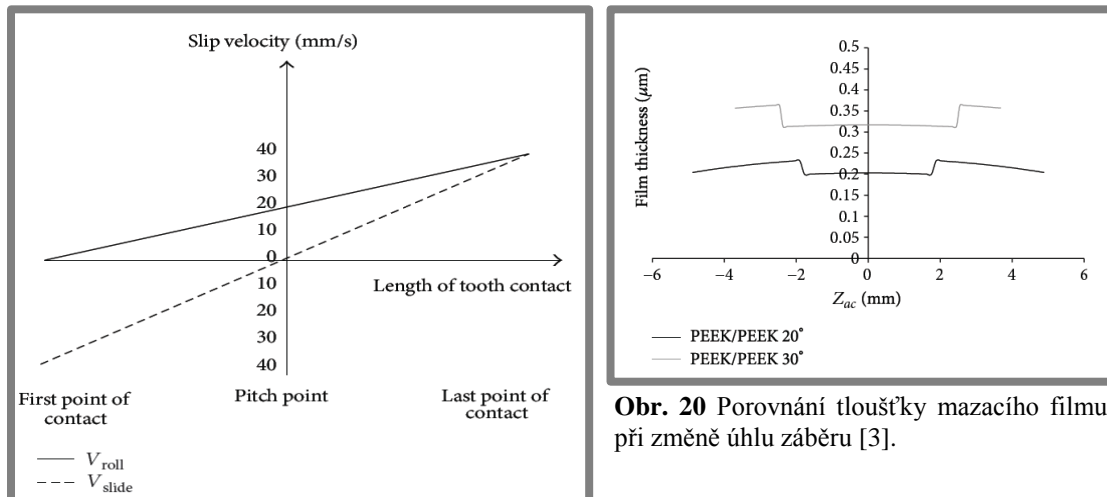
Kontaktní tlak má při nižších hodnotách  $g_3$  pozvolnější nárůst a maximum posunuté před maximum tlaku Hertzova suchého kontaktu, jak ukazuje Obr. 17. Zároveň Obr. 17 znázorňuje malou deformaci téměř válcovitého tvaru mazacího filmu pro případ (a). [28] Roberts a Tabor [zdroj] zjistili, že v kontaktu pryžové kuličky a disku leží tlakové maximum v centrální oblasti kolem podélné osy (Y) kuličky. Během stlačování poddajného materiálu centrální tloušťka filmu klesá s časem. Stlačováním kuličky vznikají v důsledku elastických deformací na jejich hranách kavitace. Nízký modul pružnosti pryže vede na nízké kontaktní tlaky, tak že je materiál snadno deformovatelný a tím umožňuje vytvoření vhodného tvaru pro EHL mazání.

Myers et. al [28] ve svém článku uvádí, že bezrozměrná tloušťka mazacího filmu  $H_{MIN}$  nikdy neklesla pod 4,9, což je výsledek, který získal Martin pro R-I EHL režim a že poměr  $h_{min}/h_m$  se nezvýšil přes Martinem publikovanou hodnotu 0,8158. Z grafů, které publikoval, je patrná lineární závislost  $g_4$  na  $h_{min}$ ,  $h_m$ ,  $g_3$ . Stanované rovnice tloušťky mazacího filmu pro hodnoty  $0 < g_3 < 100$  jsou porovnány s výsledky, jež učinil Hooke a O'Donoghue et. al [22], a které jsou však platné v rozsahu  $20 < g_3 < 100$ . [28]

Na téma externě mazaných ozubených převodu se zaměřil Song et. al [30] ve svém článku, kdy porovnával dvojici ozubených soukolí. V prvním soukolí byla

kombinace OCEL/OCEL a druhou kombinací pak byla OCEL/POLYMER. Následně byla u obou soukolí porovnána tloušťka mazacího filmu  $h$  a tlak v mazacím filmu  $p$ . Výsledkem je zjištění, že větší tloušťka mazacího filmu  $h$  byla pozorována pro kombinaci ocel/polymer, zatímco maximální tlak  $p$  v mazacím filmu byl pro kombinaci ocel/ polymer nižší oproti kombinaci ocel/ocel. Tyto poznatky dále rozvíjí Dearn et.al [3] ve svém článku.

Dearn et.al [3] ve svém článku aplikuje řešení, které navrhl Myers et. al [28] s uvažováním dokonale hladkých povrchů a čistého valení ve valivém bodě. Vzhledem k složitosti kinematiky záběru by bylo obtížné aplikovat EHL teorii u čelních ozubených kol s evolventním plastovým profilem. Proto v jakémkoli okamžiku v průběhu cyklu záběru může být geometrie interakčních ploch aproximována jako dva válce, mající poloměry zakřivení evolventních profilů  $R_{xi}$ , jež se dotýkají v kontaktním bodě (v bodě dotyku, který se posouvá po přímce záběru). Pokud není zohledněna viskoelastická povaha polymerů, uvádí Dearn et al [3] stanovení ekvivalentního modulu pružnosti  $E'$  pro předpoklad prosté deformace a nekonečně širokého „flat“ kontaktu. V případě plastového ozubení, ozubená kola jsou pružná, předpokládá se lineární chování izotropního materiálu.



Obr. 19 Velikosti rychlostí kluzných a valivých [3].

Obr. 20 Porovnání tloušťky mazacího filmu při změně úhlu záběru [3].

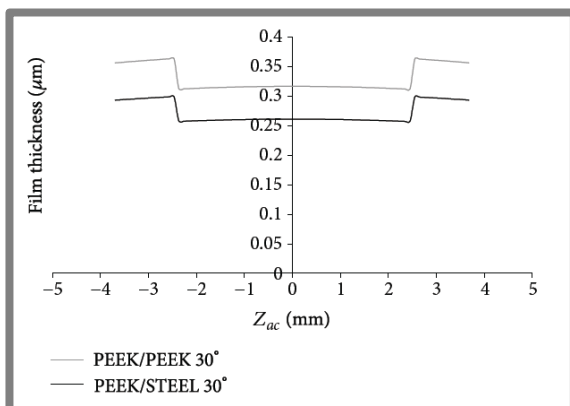
Dearn et. al [3] provedl experiment, kdy pastorek i kolo jsou se stejného polymerního materiálu PEEK a mají shodné veškeré parametry ozubení s hodnotou drsnosti povrchu  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$  ( $\Lambda < 1$ ). Testy byly provedeny u ozubení pro úhel záběru  $\alpha = 20^\circ$  a  $\alpha = 30^\circ$  s použitím maziva 15W50. Náhlá změna v křivce označuje účinek sdílení zatížení, ke kterému dochází při každém záběrovém cyklu. Očekávaný výsledek vyšší tloušťky  $h_{min}$  pro větší z úhlů záběru  $\alpha$  je z Obr. 20 znatelný.

Tato skutečnost je ovlivněna velikostí unášivé rychlosti. Navíc u soukolí s hodnotou  $\alpha = 30^\circ$  je patrná převládající valivá rychlost oproti kluzné rychlosti viz Obr. 19, kdy výsledkem je snížení teplot v kontaktu. Navíc se zvyšující se hodnotou úhlu záběru  $\alpha$ , se zkracuje dráha záběru zubů.

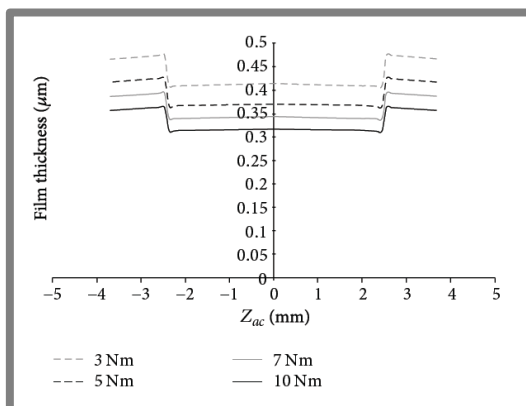
Vliv úhlu záběru  $\alpha$  na tloušťku mazacího filmu  $h$  pro PEEK/PEEK je patrný z Obr. 20. Oproti případu, kdy  $\alpha = 20^\circ$  je tloušťka mazacího filmu řádově o  $0,1 \mu\text{m}$  vyšší.

Srovnání tloušťky mazacího filmu nabídl Dearn et. al [3], kdy zkoumal polymer PEEK, přičemž se zajímal o vliv kombinace použitých materiálů v soukolí PEEK/OCEL a PEEK/PEEK. Tloušťka mazacího filmu v případě dvojice ozubených kol PEEK/PEEK byla větší oproti ekvivalentní dvojici PEEK/OCEL viz Obr. 21. To je dáno především deformací obou polymerních kol, vzhledem k dvojici PEEK/OCEL, kdy se deformuje především plastové ozubené kolo. [3]

Rovněž je dle Obr. 22 patrný vliv zatížení 3, 5, 7, 10  $[N \cdot m]$ , kdy se zvyšujícím se zatížením klesá tloušťka mazacího filmu  $h$ . Oproti tomu tloušťka mazacího filmu roste se zvyšujícími se otáčkami  $n$   $[s^{-1}]$ . [3]



**Obr. 21** Minimální tloušťka mazacího filmu pro liniový kontakt [3]. PEEK/PEEK  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\alpha = 30^\circ$



**Obr. 22** Minimální tloušťka mazacího filmu v závislosti na různých velikostech zatížení [3].  $\alpha = 20^\circ$

Optická interferometrie je nepřesnější a nevhodnější metoda pro měření tloušťky mazacího filmu za piezo-viskozních podmínek pro hard EHL. Zde je v kontaktu mezi průhledným diskem a kuličkou určena tloušťka filmu  $h$  díky rozhraní (interferenci) mezi dvěma světelnými paprsky odraženými od dvojice povrchů, mezi nimiž je mazací film. [9]

Práce, kterou uvedl Marx et. al [9] zachycuje vývoj konvenční metody optické interferometrie za účelem vytvoření hydrodynamické mapy pro soft EHL kontakty a ověření platnosti již existujících regresivních rovnic pro výpočet tloušťky mazacího filmu v režimu „soft“ EHL, které navrhli Johnson [19], Esfahanian [18], Hamrock [17], Myers [28] a de Vicente [24]. Kontaktní tlak  $p_m$  se v oblasti soft EHL pohybuje běžně v rozmezí 1 – 50  $[MPa]$ . [9]

Jak poznamenal Hooke [26], isovizkozní režim (soft EHL) by měl být rozdělen do dvou oblastí podle toho, zda minimální tloušťka mazacího filmu  $h_{min}$  je na výstupu z kontaktu (I-E exit) nebo na bočních lalocích (I-E side). [9]

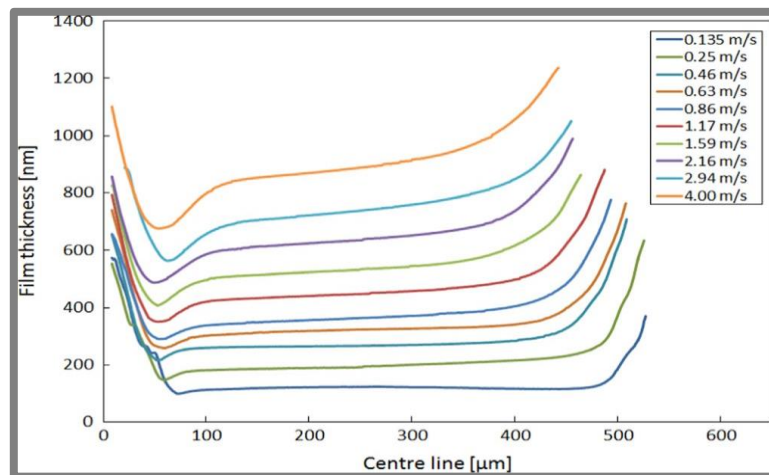
V porovnání s hard EHL, je velmi málo vztahů pro validaci tloušťky filmu v režimu soft EHL, pravděpodobně kvůli obtížnosti použití optické interferometrie v kontaktech, kde je jedno nebo obě tělesa z polymerního materiálu. A to především z hlediska vlastností odrazu světla povrchem polymeru, zejména kvůli drsnosti povrchu materiálu. [9]

U hard EHL se často používá odrazivých (např. chromových) povlaků na skleněných nebo safírových discích, které pozitivně ovlivňují kvalitu získaných interferogramů.

Marx et al.[9] získal kvalitní interferometrické snímky za podmínek valení, valení se skluzem a čistého skluzu ( $SRR = 2$ ) v kontaktu polymerního disku

(PDMA, PU) s polo-odrazivým chromovým povlakem a ocelové kuličky. V případě všech měření provedených za různých unášivých rychlostí byla minimální tloušťka mazacího filmu  $h_{min}$  na bočních lalocích. U některých polymerů jako např. PDMS bylo zjištěno, že aplikované povlaky vykazovaly křehké chování. [9]

Vliv parametru unášivé rychlosti  $U$  na tloušťku mazacího filmu  $h$  je zřejmý z Obr. 23. Zejména pro nízké rychlosti je průběh změny tloušťky filmu v centrální oblasti téměř konstantní. Se zvyšující unášivou rychlostí  $U$  dochází k vytváření klínového tvaru profilu filmu na výstupu z kontaktu. [9]



**Obr. 23** Vliv rychlosti na tloušťku mazacího filmu pro PMMA disk [9];  $W = 10N$ ;  $SRR = 0$ . Tok maziva zprava doleva

Marx et.al [9] ukázal, že pro konstantní unášivou rychlost  $U = 1,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $SRR = 0$  se velikost kontaktní oblasti značně zvětšuje s rostoucím zatížením  $W$  (5, 10, 15N), přitom se centrální  $h_{cent}$  a minimální  $h_{min}$  tloušťka filmu mění velmi nepatrně, jak znázorňuje Obr. 24. [9]

V dalším srovnání, které provedl Marx et.al. [9] je závislost centrální tloušťky mazacího filmu  $h_{cent}$  na unášivé rychlosti  $U$  pro oba polymery (PMMA a PU) a obě maziva (GTL4 a GTL8, kdy  $\eta_{GTL4} < \eta_{GTL8}$ ). Z výsledků vyplývá, že pro oba polymerní materiály PMMA a PU je při použití maziva GTL8 tloušťka centrálního mazacího filmu  $h_{cent}$  vyšší oproti mazivu s nižší viskozitou GTL4. [9]

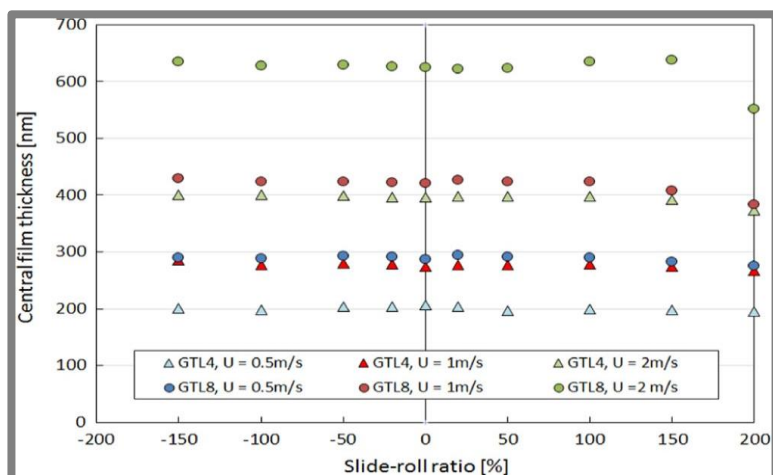
Vliv  $SRR$  (u PMMA) na centrální tloušťku mazacího filmu  $h_{cent}$  pro různé velikosti unášivých rychlostí  $U$  zachycuje Obr. 24. Jak je vidět z Obr. 24 tloušťka filmu by měla záviset pouze na unášivé rychlosti, ne na kluzné rychlosti, a to prakticky v celém rozsahu  $SRR$ . POM [9]

Výjimka platí pro vysoké hodnoty  $SRR$ , kdy vzniká účinkem smykového působení oteplení (povrchu). Oteplení má negativní dopad na zvýšení teploty povrchu na vstupu do kontaktu, což ve výsledku vede ke snížení viskozity maziva  $\eta$  a následně ke snížení tloušťky mazacího filmu  $h$ . [9]

U piezoviskozního režimu k tomuto značnému ovlivnění dochází po překročení hodnoty  $SRR > 0,5$ . V případě isoviskozního režimu je tloušťka mazacího filmu  $h$  převážně neměnná pro celý rozsah hodnot  $SRR$ . Tuto skutečnost lze vysvětlit menší produkcí tepla v souvislosti s nižším kontaktním tlakem  $p_m$ , kvůli zanedbatelnému vlivu změny viskozity  $\eta$  s tlakem  $p$ . [9]

Značný pokles tloušťky mazacího filmu je vidět z Obr. 24 pro hodnotu  $SRR = 2$ , kdy je kulička statická. Teplota na vstupu do kontaktu působí na povrch

kuličky, na výstupu však nedochází k disipaci tepla vzhledem k absenci rotace kuličky. Následkem může být zvýšení teploty na vstupu do kontaktu a pokles centrální tloušťky mazacího filmu. [9]

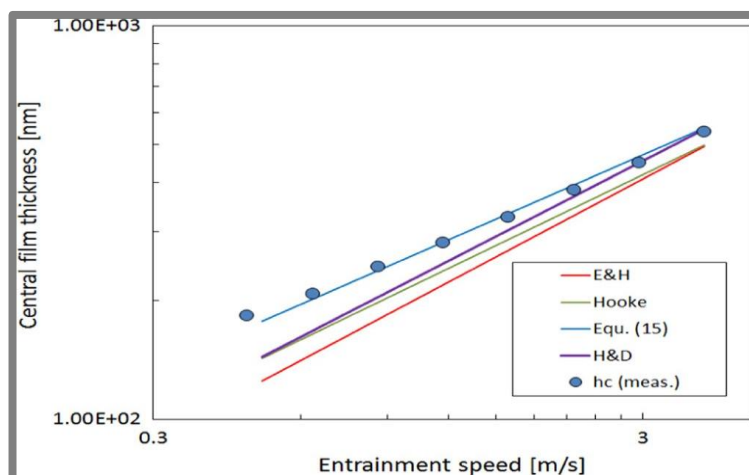


**Obr. 24** Vliv  $SRR$  na centrální tloušťku mazacího filmu  $h_{cent}$  pro PMMA disk [9];  $W = 10N$ .

Marx et. al. [9] stanovil vztahy pro výpočet centrální a minimální tloušťky mazacího filmu, které se liší oproti dosavadním publikovaným výsledkům, jež uvedli Dowson a Hamrock et. al. [17], Esfahanian et. al. [18] a Hooke et. al. [22], kdy všichni autoři predikovali tenčí mazací film za nižších rychlostí  $U$ . Tato skutečnost je znázorněna na Obr. 25. [9]

Hooke et.al [26] uvedl, že absolutní tloušťka mazacího filmu se vlivem zvyšování unášivé rychlosti  $U$  nebo snižování zatížení  $W$  může relokovat z oblasti bočních laloků na výstup z kontaktu. [9]

Tento přechod byl zaznamenán Marxem et. al. [9] při nízkých zatíženích  $W$  se vzrůstající velikostí unášivé rychlosti  $U$ , v ostatních případech byla minimální tloušťka  $h_{min}$  pozorována v oblasti bočních laloků. [9]



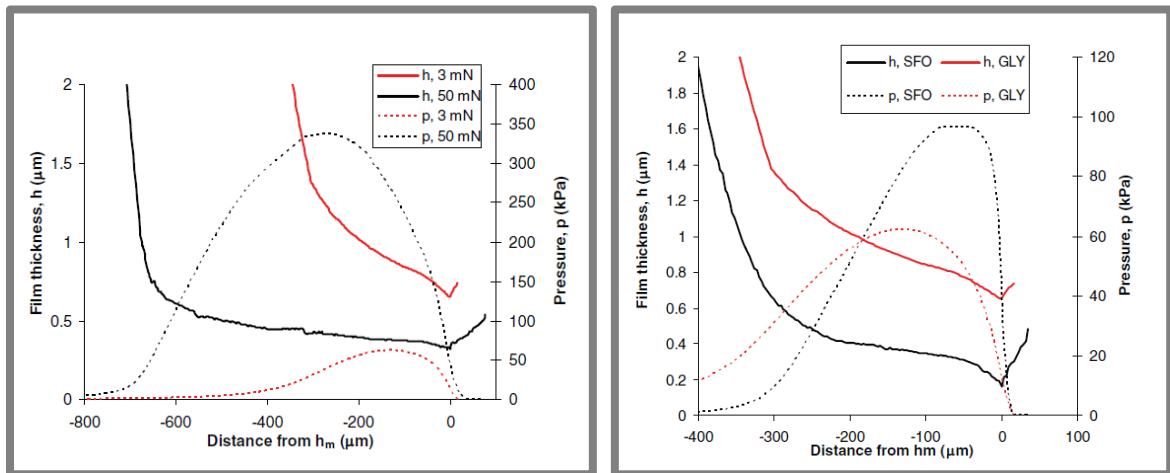
**Obr. 25** Srovnání výsledků teorie a měření centrální tloušťky mazacího filmu  $h_{cent}$  pro PMMA disk [9].  $W = 10N$ ,  $SRR = 0$ , mazivo GTL4.

Myant et. al [23] při měření tloušťky filmu v kluzných poddajných kontaktech použil ocelovou kuličku s nanesenou tlustou vrstvou polymeru PDMS a skleněný disk BK7. Mazivy byly GLY (Glycerol-water solution) a SFO (lab-grade sun-flower oil), kdy  $\eta_{GLY} > \eta_{SFO}$  [23].

Bezrozměrná centrální tloušťka mazacího filmu [23]:

$$H_{cent} = \frac{h_{cent}}{R'} = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,63} \cdot \bar{W}^{-0,13} \quad (2-7)$$

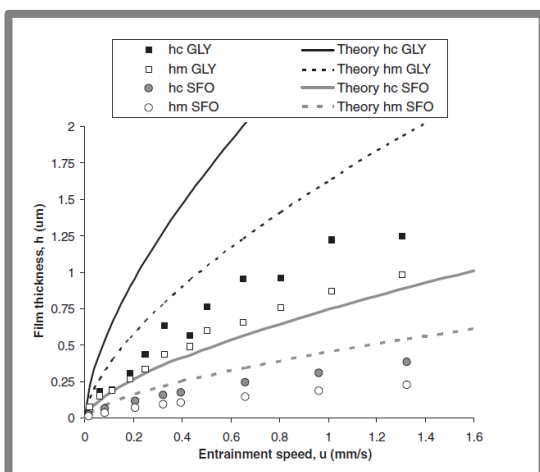
Z výsledků měření pro mazivo GLY je patrné, že minimální tloušťka filmu  $h_{min}$  se nachází za středem kontaktu. Při nižších rychlostech  $U$  se oblast s minimální tloušťkou  $h_{min}$  posunuje blíže ke středu kontaktu. Tloušťky filmu z rovnice (2 – 7) jsou nižší v porovnání s tím, co predikoval Hamrock et. al [17] rovnicí (2 – 2). [23]



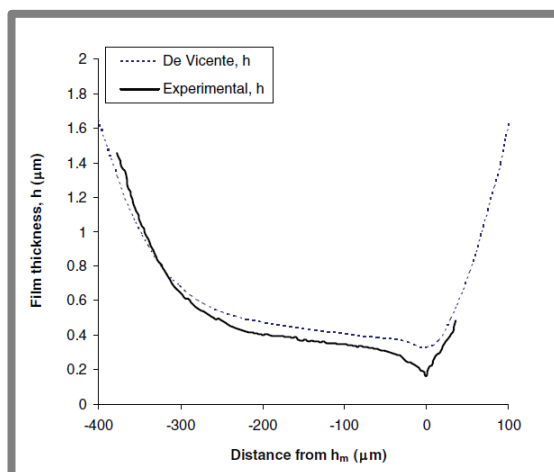
**Obr. 26** Tloušťka mazacího filmu a velikost tlaku **Obr. 27** Srovnání tloušťky mazacího filmu a [23].  $W = 3 \text{ m} \cdot N$  a  $50 \text{ m} \cdot N$ , při  $U = 0.65$  a velikosti tlaku pro mazivo GLY a SFO [23].  $0.61 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ ; GLY.

Z porovnání tlouštěk filmu při různých zatíženích  $W$  a rychlostech  $U$  vyplývá, že pro nízké zatížení dosahuje tloušťka filmu vyšších hodnot a současně s tím se také zmenšuje kontaktní oblast, která se zde liší, až o  $100 \mu\text{m}$ , jak uvedl Myant et. al. [23]. Vlivem rostoucí velikosti rychlosti  $U$  lze pozorovat přírůstek tloušťky mazacího filmu, přitom minimum nastává na výstupu maziva z kontaktu. Ve všech měřeních byla tloušťka maziva  $h$  vyšší než výška povrchových nerovností  $R_a$ . [23]

Srovnání účinku zatížení ( $3, 50 \text{ mN}$ ) je na Obr. 27 provedeno pro podobné rychlosti ( $0,61$  a  $0,65 \text{ mm} \cdot s^{-1}$ ). V případě zatížení  $3 \text{ mN}$  nastává tlakové maximum za středem blíže k výstupu z kontaktu. Pro zatížení  $50 \text{ mN}$  nastává tlakové maximum blíže ke středu Hertzova kontaktu, jak předpověděli Hamrock et. al [31] a Dowson [17]. Na Obr. 26 je vidět několikanásobné zvětšení tlaku  $p$  vlivem zatížení  $W$ . Rozdíl tloušťky filmu pro obě zatížení zde není tolik výrazný [23]. Persson et. al [32] uvádí, že pokles kontaktního tlaku při kontaktu kuličky a disku nastává za nízkých kluzných rychlostí, kdy je rozložení tlaku v kontaktu blízké Hertzovu tlaku.

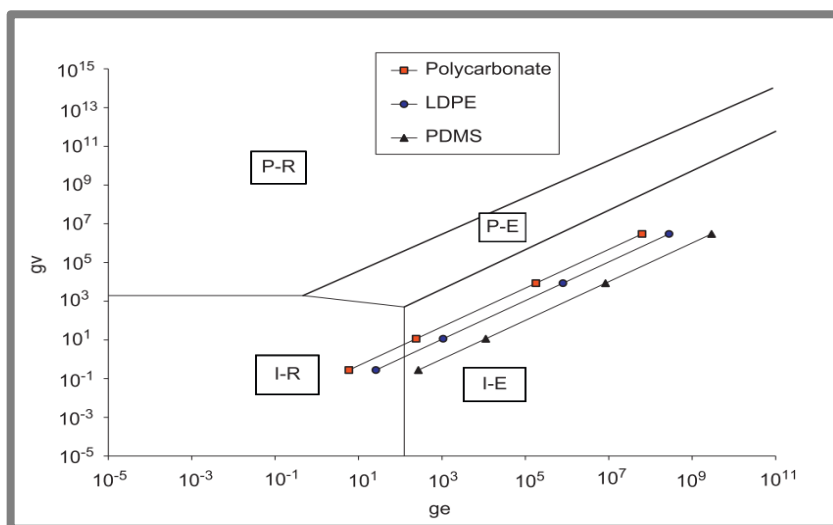


**Obr. 28** Porovnání teoretických a experimentálních výsledků tloušťky maziva [23].



**Obr. 29** Porovnání měření s modelem predikovaným de Vicente et.al [23].

Jak uvádí Myant et. al [23] změřené hodnoty tloušťky filmu v porovnání s teoretickými predikcemi vychází nižší. U maziva SFO byly změřeny vyšší tlaky při nízkých rychlostech a s redukcí unášivé rychlosti  $U$  a tloušťky filmu  $h$  se tlakový profil blíží Hertzovu tlakovému profilu. V případě maziva GLY nastává tlakové maximum blízko středu Hertzova kontaktu. U SFO je tlakové maximum již před výstupní kontaktní oblastí viz Obr. 27. [23]



**Obr. 30** Mapa hydrodynamických režimů EHL pro kruhový kontakt [4].

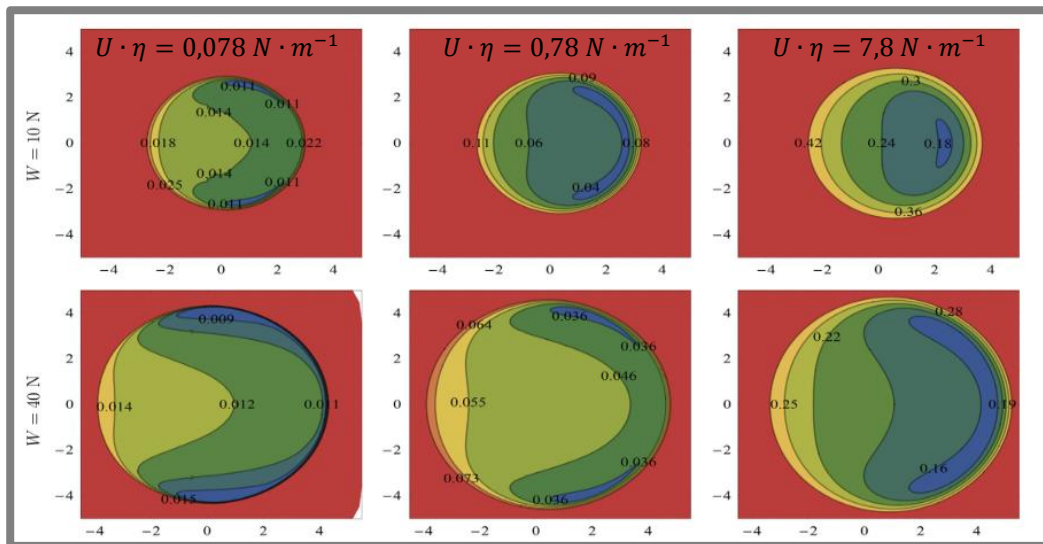
U obou maziv GLY a SFO jsou hodnoty tloušťky minimálního i centrálního filmu pocházející z teoretické predikce vyšší než naměřené hodnoty, jak ukazuje Obr. 28. [23]

Změřená tloušťka mazacího filmu je svým průběhem ve shodě s modelem, který predikoval de Vicente et. al [24], avšak predikované hodnoty tloušťky vycházejí v porovnání experimentem přibližně o  $0,08 \mu\text{m}$  vyšší. Největší rozdíl je na výstupu maziva z kontaktu v oblasti minimální tloušťky, kde rozdíl činí přibližně  $0,2 \mu\text{m}$ , jak ukazuje Obr. 29. [23]

Výsledky se mohou lišit, protože model, který publikoval de Vicente et. al [24] předpokládá plně polymerní PDMS kuličku na rozdíl od experimentu, který provedl Myant et. al [23] pro ocelovou kuličku s nanesenou vrstvou polymeru.

V další studii Myant et. al [4] získal za daných podmínek měření mapu hydrodynamických režimů EHL pro polymery polykarbonát (PC), polyetylén (LDPE) a polydimethyl-siloxane (PDMS). Při hodnotách  $g_E < 10^2$  dochází u materiálu LDPE a PC ke změně EHL režimu mazání z isoviscous-elastic na isoviscous-rigid, zatímco PDMS leží v oblasti isoviscous-elastic. Měření je ve shodě s numerickými predikcemi režimu I-EHL [19], [31], ve kterém by měly polymery dle svých vlastností pracovat viz Obr. 30. [4]

Stupkiewicz et. al. [33] provedl experiment zaměřený na měření 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  $h$ .



**Obr. 31** Rozložení tloušťky mazacího filmu  $h$  pro různé kinematické podmínky a zatížení (vstup maziva zleva). [33]

Z výsledků Stupkiewicz et. al. [33] 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. 31. K druhému případu dochází při působení vyššího zatížení  $W$  za nižších unášivých rychlostí  $U$  v souladu s výsledky, které publikoval Hooke et. al. [34]. V případě vyššího zatížení dochází ke zvětšení kontaktní oblasti. [33]

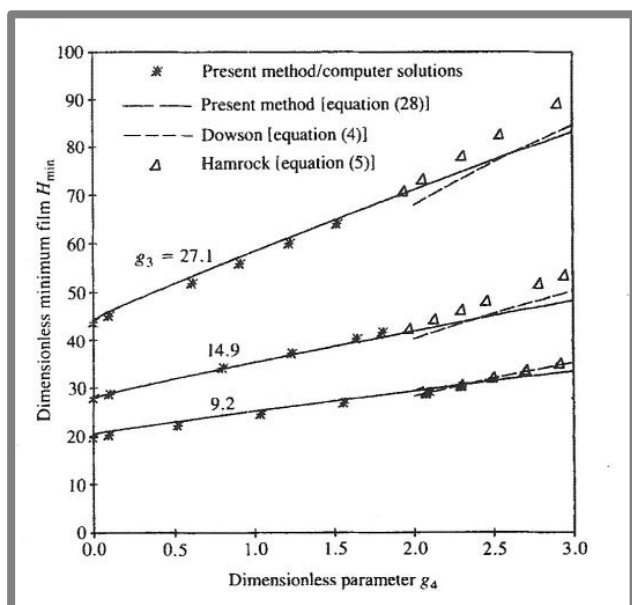
Bongaerts et. al [35] ve svém experimentu zaměřil na vliv drsnosti povrchu na tloušťku mazacího filmu pro konfiguraci kulička/disk v poddajném kontaktu PDMS/PDMS. Z experimentu vyplývá, že tlustý mazací film byl pozorován pro hodnotu  $U \cdot \eta > 10^{-3} [N \cdot m^{-1}]$ , kde se kontakt nachází v režimu I-EHL. Zvýšení rychlosti a viskozity vede k nárůstu vizkozního odporu, jeho následkem je zvýšení koeficientu tření  $\mu$ . [35]

Jak však uvádí Bongaerts et. al [35], I-EHL režimu nemá drsnost povrchu žádný vliv na koeficient tření  $\mu$ . Přesto platí, že minimum na Stribekově křivce pro hrubší drsnost povrchu  $R_a$  disku je posunuto doprava, kde součin  $U \cdot \eta$  nabývá vyšších hodnot. [35]

Predikci tloušťky filmu v přechodové oblasti I-EHL a E-EHL pro líniový kontakt provedl Jaffar et. al. [36]. Porovnání s modely, které publikoval Dowson a Hamrock [31] je pro  $2 \leq g_4 \leq 3$  znázorněno na Obr. 34, ze kterého je patrná dobrá shoda výsledků studie Jaffara et. al [36] s výše uvedenými modely. Z Obr. 33 a Obr. 32 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. [36]

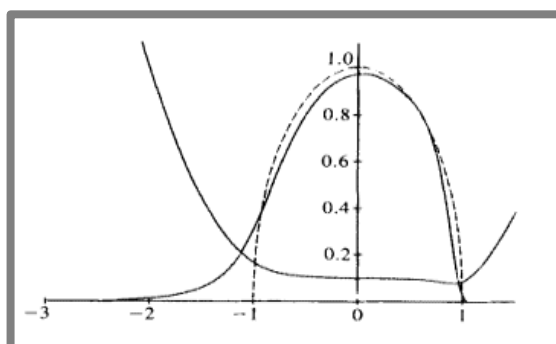
Minimální tloušťka mazacího filmu  $h_{min}$  [36]:

$$h_{min} = 3,5 \cdot g_3^{0,77} + 0,4 \cdot g_1^{0,92} \cdot g_3^{-0,3} \quad (2-8)$$

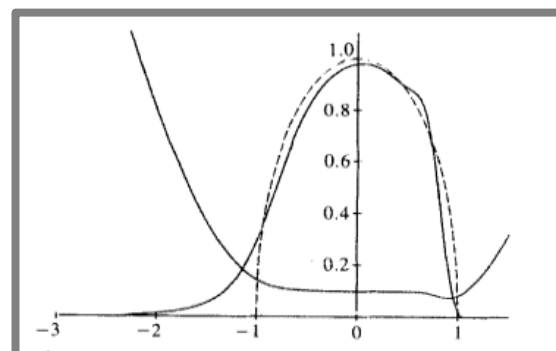


Obr. 34 Změny minimální tloušťky filmu s parametrem  $g_4$  pro hodnoty  $g_3 = 9, 2; 14, 9; 27, 1$ . [36]

----- Hertzův tlak  
 ————— Tlak maziva a tloušťka filmu

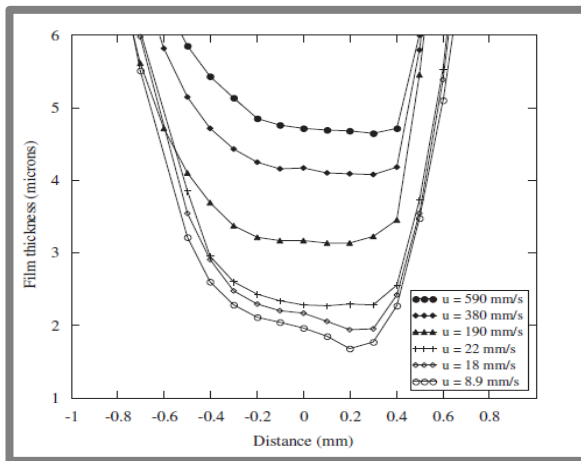


Obr. 33 Průběh minimální tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty  $g_4 = 1, 0$ . [36]

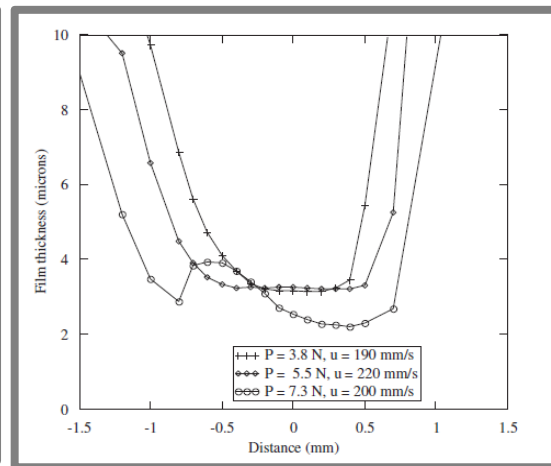


Obr. 32 Průběh minimální tloušťky filmu a tlaku pro hodnoty  $g_4 = 2, 3$ . [36]

Gasni et.al [37] porovnal tloušťky filmu s predikcemi, které provedl Hamrock a Dowson et. al [17] a experimentem Myanta. et. al.[23], [38], který použil metodu optické interferometrie a laser induced fluorescence (LIF). Velikosti tloušťky získané Myantem et. al [23], [38] a Gasnim et.al [37] vychází v porovnání s predikcí Hamrocka a Dowsona et. al [17] podstatně menší, přitom s predikcí jsou ve shodě pouze tloušťky získané za nízkých unášivých rychlostí  $U$ . Gasni et. al [37] uvádí porovnání výsledků s prací Myanta et.al [23], [38], ze kterých vyplývá, že všechny získané hodnoty jsou menší než predikce Hamrocka a Dowsona et. al [17], tudíž v obou případech byl experiment proveden v oblasti soft EHL.

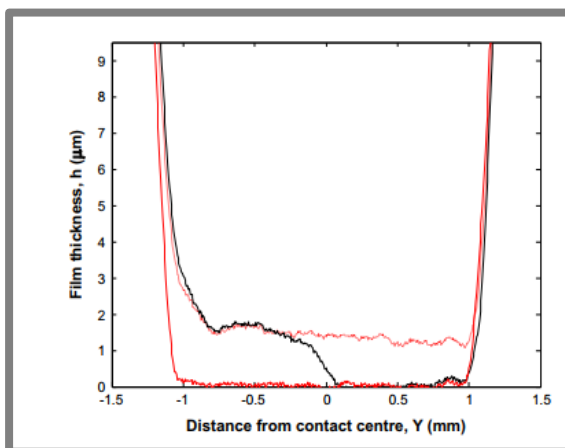


**Obr. 36.** Průběh tloušťky mazacího filmu v kontaktu [37]. Zatížení  $W=3,8\text{N}$  (odpovídá kontaktnímu tlaku  $1,04\text{MPa}$ ). Směr vtoku maziva zleva.

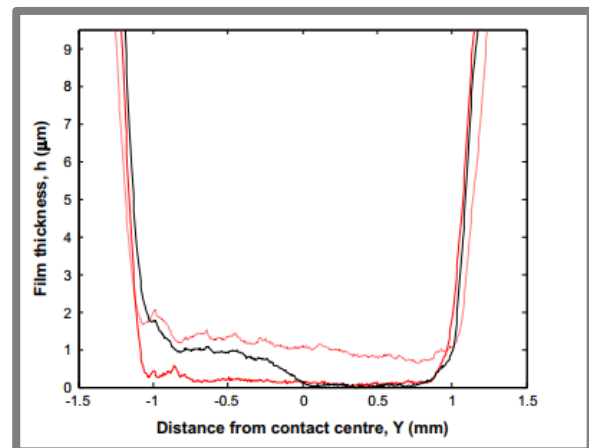


**Obr. 35.** Průběh tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro různá zatížení [37]. Směr vtoku maziva zleva.

Klínový tvar profilu je patrný na vstupu do kontaktu a konstrikce na výstupu z kontaktu zejména za nižších tlouštěk mazacího filmu  $h$ , jak je vidět z Obr. 36 podobně jak uvedl Myant et al [38], 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. et. al [37] vyplývá, že z rostoucím zatížením klesá tloušťka filmu. Navíc je za vyšších rychlostí pravděpodobnější vznik kavitací v mazivu. Dokonce i pro nízké rychlosti je patrný značný přírůstek tlaku  $p$ , jak predikoval de Vicente et. al [24]. Hamrock et. al. [17] uvedl, že v isovizkozním režimu se tlakový hrot na výstupu z kontaktu neobjevuje. Za příčinu lze považovat absenci piezo-viskozního účinku kapaliny v kontaktu poddajných materiálů [37].



**Obr. 38.** 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. [38]



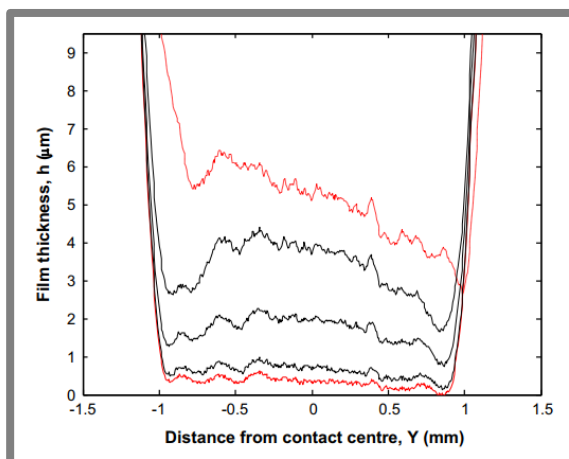
**Obr. 37.** Průběh formování tloušťky mazacího filmu v kontaktu pro  $a = 5\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ . Statický kontakt červeně, stabilizovaný mazací film-čárkovaně červeně, průběh tloušťky ve středu kontaktu-černě. Mazivo proudí zleva doprava. [38]

V porovnání s konvenčním EHL kontaktem je v režimu soft EHL tloušťka filmu méně závislá na tlakově-viskozních vlastnostech (parametr  $\alpha$ ) a více závislá na

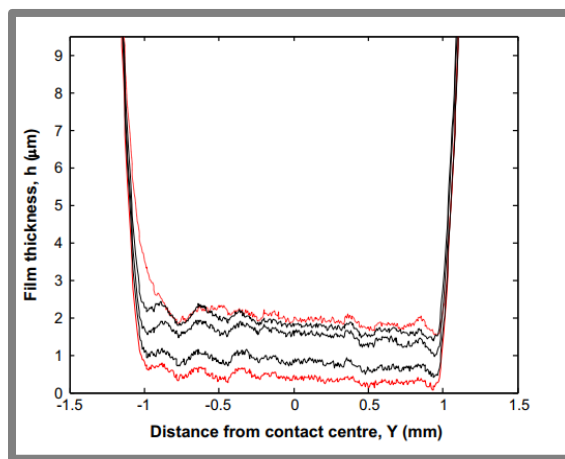
elastických vlastnostech kontaktních povrchů. Myant et. al [38] použil metodu laser induced fluorescence (LIF), kdy se zaměřil změnu tloušťky filmu  $h$  v přechodných podmínkách pohybu: startu a náhlého zastavení. Experiment byl proveden pro dvě hodnoty zrychlení ( $a = 5$ ;  $a = 1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ) za podmínek čistého smýkání pro statickou PDMS kuličku a otočný skleněný disk BK7.

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 výraznější, zatímco u menšího zrychlení je tato skutečnost méně výrazná a průběh více odpovídá ustálenému profilu filmu, jak ukazuje Obr. 38 a Obr. 37.

Druhým případem je náhlé zastavení po intervalu, kdy se vytvořil stabilní mazací film. Z experimentu, který provedl Myant et. al [38] je patrné vytvoření podkovy s minimální tloušťkou filmu 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. 39 a Obr. 40 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. Zejména při nižších zrychlení je pozorována postupná tvorba tloušťky filmu. Myant et. al. [38] uvádí, že rychlost tvorby mazacího filmu je silně závislá na počátečním zrychlení. Při nízkých zrychleních dochází ke změně tloušťky filmu za středem kontaktu. V režimu I-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.



**Obr. 40** 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. [38]



**Obr. 39** 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. [38]

Při náhlém zastavení tloušťka filmu postupně klesala po několik sekund. Změna rozložení filmu nastává ve dvou odlišných fázích, kdy v první dochází

k rychlé elastické relaxaci kontaktních povrchů na vstupní oblasti a kontaktní hrany zachycují mazivo uvnitř středu kontaktu. Mazivo je v druhé fázi poté pomalu vytlačeno z kontaktu, kdy množství zachyceného maziva závisí na počáteční kluzné rychlosti  $U$ .

Podstatný vliv na tloušťku mazacího filmu má obecně teplota. 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 [1].

Změnu teploty v kontaktu ocelového a polymerního kola pozoroval Sukumaran et.al [39]. 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  $\lambda$  do ocelového ozubeného kola, jak uvedl Sukumaran et.al [39].

## 6 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ KRITICKÉ REŠERŠE

6

### 6.1 Zhodnocení poznatků plynoucích z rešerše

6.1

Rešerše uvedená v předchozí kapitole podává přehled o problematice plastového ozubení v závislosti na pracovním režimu mazání. Vhodné materiály pro použití u ozubení jsou vybrány na základě jejich chování při mazacím procesu a mechanických vlastností, které tento mazací proces přímo či nepřímo ovlivňují. Rešerše je specificky zaměřena na měření tloušťky mazacího filmu 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 elasto-hydrodynamického mazání (EHL), kde jsou kontaktní povrchy vzájemně odděleny souvislou tloušťkou mazacího filmu [17], [18], [19], [20], [21].

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. V tomto režimu je podstatná závislost změny dynamické viskozity maziva s kontaktním tlakem, kterou charakterizuje tlakově-viskozí koeficient  $\alpha$ . Přitom běžné kontaktní tlaky jsou u tohoto materiálu pozorovány v řádech jednotek GPa [3], [9], [18], [19], [36].

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). Tyto pracovní oblasti polymerů jsou typické především s ohledem na mechanické vlastnosti polymerů, zejména modul pružnosti v tahu. 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 [9], [28], [36]. Kvůli velké kontaktní ploše není v tomto režimu významná změna dynamické viskozity maziva s kontaktním tlakem. V přechodové oblasti TR již však není změna dynamické viskozity s kontaktním tlakem při průchodu kontaktem zanedbatelná a je nutné tuto skutečnost zohlednit [3], [4], [9], [16], [17], [22], [24], [28], [35], [36], [37].

Výzkum zaměřený na objasnění procesu elasto-hydrodynamického mazání u polymerních materiálů je v současné době aktuální téma [3], [9], [16], [33]. A to s ohledem na dosud nedostatečně experimentálně prozkoumanou přechodovou oblast pro vysoce zatížené mazané polymery, které mají potenciál v budoucnu nahradit konvenční ocelové materiály. Za těchto podmínek pracují vysoce zatížené polymery v přechodové oblasti TR mezi I-E a P-E EHL.

## 6.2 Zhodnocení jednotlivých vlivů

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.

### 6.2.1

#### 6.2.1 Vliv unášivé a skluzové rychlosti

Vliv unášivé rychlosti dokládají experimenty [3], [9], [23], [33], [37], [38] ze kterých vyplývá, že trend rostoucí unášivé rychlosti 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 [38]. Rovněž je za vyšších unášivých rychlostí dle [23] pozorován vyšší nárůst tlaku v kontaktní oblasti. Na výstupu maziva z kontaktu se za nízkých rychlostí objevuje konstrikce [37]. Toto tvrzení je však rozporu s výsledky [9] a [23], kdy se konstrikce objevuje za vyšších rychlostí, podobně jako u hard EHL. Přitom dle [33] a [34] 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 [9] 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 [4], [9]. 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.

### 6.2.2

#### 6.2.2 Vliv zatížení

Účinek zatížení má podle provedených experimentů pro mazané i nemazané polymerní materiály negativní vliv na mechanické vlastnosti a opotřebení [2], [3], [39]. 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], [3]. Bylo však dokázáno, že na projev opotřebení pittingem má výrazný vliv geometrie ozubení, respektive úhel záběru zubů [3], [6]. 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 [13], [39].

Tloušťka mazacího filmu je v EHL režimech nepřímo úměrná zatížení, s jehož rostoucí velikostí se postupně snižuje [3], [9], [23]. V režimu soft a hard EHL se spolu s rostoucím zatížením zvětšuje kontaktní oblast, byť minimální i centrální tloušťka filmu se mění jen nevýrazně [9]. 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 [3] menší oproti kontaktu polymer/polymer, což je patrně důsledkem vyššího redukovaného modulu pružnosti materiálu  $E'$ . Výsledky dle [30] 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 [23], jak bylo předpokládáno dle [18]. 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 [16].

## 6.2.3

### 6.2.3 Vliv teploty

Rostoucí teplota v kontaktu má u nemazaného polymerního ozubení vliv na zvýšení koeficientu 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  $E$  [3]. Silná závislost mechanických vlastností polymerů na teplotě je zde patrná. Teplota byla studována především v případech, kdy se jedná o nemazané kontakty [10], [11], [12], [13], respektive u polymerů, které jsou mazány vnitřními tuhými mazivy [15].

Liší se tak od případu externě mazaných polymerů [9], [23], [39], 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 [39], avšak nedostatečná pro výraznou změnu mechanických vlastností materiálu a procesu mazání. Tloušťka filmu je v případě kontaktu polymer/polymer ovlivněna nízkou tepelnou vodivostí plastů  $\lambda$  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 [7], [8], [12], [14]. 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 kapalínového tření v mazivu. Tloušťka filmu potom není výrazně dotčena. Teplota má podstatný vliv na mechanické, tribologické vlastnosti a proces mazání [5], [10], [11], [13], [15]. 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.

## 6.2.4

### 6.2.4 Vliv tlakově viskózního koeficientu maziva

Viskozita maziva ovlivňuje tloušťku filmu, jak je patrné z experimentů dle [9], [23]. 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 a centrální tloušťku mazacího filmu tlakově viskózním koeficientem  $\alpha$ . Pro režim hard EHL je koeficient  $\alpha$  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  $\alpha$  za nulový. I přes nízké hodnoty do  $0,5 \text{ GPa}$  je tlak 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. V přechodové oblasti TR EHL, která leží mezi soft a hard EHL lze tedy hodnotu  $\alpha$  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  $\alpha$  na mazací proces. Na základě hodnot  $\alpha$  pro jednotlivé režimy, je patrná silná závislost ovlivňující tloušťku filmu, která nebyla v teorii EHL dosud uvažována.

## 6.2.5

### 6.2.5 Vliv drsnosti povrchu

Účinek drsnosti povrchu se u polymerů projevuje odlišným způsobem oproti ocelovým materiálům. Z důvodu nízkých hodnot mechanických vlastností polymerů dochází při vysokém zatížení k procesu opotřebení „vyhlazením“ povrchových nerovností tlakem maziva. Následkem je zmenšení drsnosti povrchu, což způsobí zvýšení minimální tloušťky mazacího filmu [3]. Naopak s rostoucí drsností kontaktních povrchů lze očekávat snížení minimální tloušťky mazacího filmu.

Drsnost povrchu těles omezuje použití konkrétních experimentálních metod. Metoda fluorescence (LIF) byla použita [4] 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. Oproti tomu optická interference je přesnější metoda, která umožňuje měření tloušťky filmu v řádech až jednotek  $nm$ . Podmínkou použití optická 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.

## 6.2.6

### 6.2.6 Vliv vlastností polymeru

Mezi použité materiály v experimentech [1], [2], [3], [4], [9], [23] 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  $\alpha$ . V režimu I-E EHL je považován za zanedbatelný, naopak v režimu P-E EHL je vliv  $\alpha$  zohledněn. Protože TR EHL je přechodová oblast soft a hard EHL lze v této oblasti očekávat vliv koeficientu  $\alpha$ , zejména na těsném pomezí přechodu režimů. Rovněž mají polymery nízkou tepelnou vodivost  $\lambda$ , která snižuje bulkovou teplotu tělesa a vzniklé teplo tak přechází do maziva, jež teplo odvádí a mazivo se ohřívá. Následkem zvýšení teploty maziva dochází ke snížení dynamické viskozity maziva a v důsledku toho dojde k poklesu tloušťky mazacího filmu.

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 [40], jak navrhl Hartl et. al. Přestože některé polymery, které byly použity v experimentech [1], [2], [3], [4], [9], [23] vykazují horší tribologické vlastnosti, při procesu mazání umožňují však díky optické propustnosti povrchu použití experimentální metody-optické interferometrie.

## 6.2.7

### 6.2.7 Zhodnocení

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. Na základě publikovaných článků zabývajících se režimem (oblastí) soft EHL lze konstatovat, že chybí dostatek získaných experimentálních výsledků, které by blíže objasnili proces mazání v tomto režimu EHL. A to zejména pro odlišné kinematické podmínky, zatížení a maziva o různé ambientní dynamické 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 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.

**Tab. 3** Srovnání predikcí minimální tloušťky filmu

	<b>Autor</b>	<b>Rovnice bezrozměrné minimální tloušťky</b>
<b>H-D_h</b>	Hamrock a Dowson (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>E-H_h</b>	Esfahani an a Hamrock (hard)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 178 \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,0387 \cdot k}) \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'}\right)^{1,266} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2}\right)^{-0,880} \cdot (\alpha E')^{0,386}$
<b>H-D_s</b>	Hamrock a Dowson (soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 7,43 \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'}\right)^{0,65} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2}\right)^{-0,21}$
<b>H-O_s</b>	Hooke a O'donogh hu (k=1; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,12 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'}\right)^{-0,20}$
<b>M_s</b>	Myant (k=1; soft)	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 3,3 \cdot \left(\frac{U \eta_0}{E' R'}\right)^{0,63} \cdot \left(\frac{W}{E' \cdot R'^2}\right)^{-0,13} \cdot R'$

**Tab. 4** Porovnání exponentů vstupních parametrů

	<b>Exponent</b>					
	<b>U</b>	<b>W</b>	<b>E'</b>	<b>R'</b>	<b>α</b>	<b>η<sub>0</sub></b>
<b>H-D_h</b>	0,67	-0,067	-0,073	-0,536	0,53	0,67
<b>E-H_h</b>	1,266	-0,880	-0,792	0,494	0,386	1,266
<b>H-D_s</b>	0,65	-0,21	-0,44	-0,23	0,00	0,65
<b>H-O_s</b>	0,60	-0,20	-0,40	-0,20	0,00	0,60
<b>M_s</b>	0,63	-0,13	-0,50	-0,37	0,00	0,63

Tab. 5 Srovnání predikcí minimální tloušťky filmu

	Autor	Rovnice bezrozměrné minimální tloušťky	EHL
1	Hamrock a Dowson	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 8,7 \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,0387 \cdot k}) \cdot (g_E)^{0,67}$	soft
2	Hamrock a Dowson	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 3,42 \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,68 \cdot k}) \cdot (g_E)^{0,17} \cdot (g_V)^{0,49}$	hard
3	Esfahanian a hamrock	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 8,7 \cdot (g_E)^{0,67} \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k})$	soft
4	Dowson a Higginson k=1	$H_{min} = \frac{h_{min}}{R'} = 2,65 \cdot (g_V)^{0,54} \cdot (g_E)^{0,06}$	soft
5	Hooke a O'donoghue		soft

Tab. 6 Porovnání exponentů vstupních parametrů

Parametry elasticity a viskozity			
	$g_E$	$g_V$	EHL
1	0,65	-0,21	soft
2	0,67	-0,067	hard
3	1,266	-0,880	soft
4	0,63	-0,13	soft
5			soft

## **7** 7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

---

### **7.1 Podstata disertační práce**

7.1

---

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.

### **7.2 Cíl disertační práce**

7.2

---

Cílem disertační práce je objasnění vlivu zatížení a kinematických podmínek na mazací proces, respektive na formování tloušťky mazacího filmu u soft EHL kontaktu pracujícího v přechodové oblasti EHL použitím metody optické interferometrie. Uvedené vlivy mají přímý dopad na průběh a velikost tloušťky mazacího filmu, popřípadě tlaku v kontaktu.

#### **Dílčí cíle práce:**

- Implementace optických metod pro analýzu utváření mazacího filmu v kontaktu ocel/polymer.
- Objasnění vlivu tlakově viskózního koeficientu na tvorbu tloušťky mazacího filmu.
- Objasnění vlivu kinematických parametrů a zatížení na tvorbu tloušťky mazacího filmu.
- Objasnění vlivu teploty na formování mazacího filmu.

### **7.3 Přínos disertační práce**

7.3

---

Přínosem disertační práce bude objasnění formování tloušťky mazacího filmu v přechodové oblasti elastohydrodynamického mazání u soft EHL kontaktu. Nové poznatky poskytnou vysvětlení ohledně tvorby tloušťky mazacího filmu pro různé polymerní materiály 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 vlastních provedených experimentů budou následně konfrontovány s výsledky autorů uvedených v 5. kapitole a bude vyhodnocena míra shody s již publikovanými studii. Především však budou výsledky porovnány s numerickým modelem, který je vyvíjen na TU Mnichov v rámci projektu česko-bavorské spolupráce s VUT FSJ. Na základě porovnání numerického a experimentálního řešení bude možné predikovat závislosti tloušťky mazacího filmu na ostatních veličinách v přechodové

oblasti u soft EHL kontaktu, která nebyla dosud dostatečně experimentálně prostudována. Pochopení utváření mazacího filmu může přispět ke zdokonalení inženýrského řešení mazání polymerního ozubení. Důsledkem uvedených skutečností bude rozšíření použití mazaných polymerních ozubených kol v konkrétních strojírenských aplikacích.

#### 7.4 Návaznost na současný stav řešení

7.4

---

Práce tematicky navazuje na článek, který publikoval Marx et. al [9] jež zachycuje použití metody optické 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 [17], Hooke [22] 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 [9]. S výjimkou experimentální studie [9] nebyla metoda optické interferometrie doposud aplikována u soft kontaktů v přechodové oblasti EHL za účelem analyzování tloušťky mazacího filmu.

## **8 VĚDECKÁ OTÁZKA A PRACOVNÍ HYPOTÉZA**

### **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. Jak se projeví účinek skluzové rychlosti na formování mazacího filmu vně přechodové oblasti TR EHL?“*

### **Pracovní hypotéza 1**

*„S růstem 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“*

### **Vědecká otázka 2**

*„Jak se projeví vliv unášivé rychlosti na centrální tloušťce mazacího filmu v přechodové oblasti TR EHL?“*

### **Pracovní hypotéza 2**

*„Centrální tloušťka mazacího filmu v oblasti TR EHL je při vysokém poměru skluzové rychlosti ku unášivé rychlosti více konstantní. Rozložení tlaku v mazivu je obdobné jako u hard EHL s konstrikcí na výstupu z kontaktu. Minimální tloušťka mazacího filmu se za nízkých rychlostí objeví v oblasti bočních laloků, odkud s rostoucí rychlostí přechází, do výstupní oblasti z kontaktu.“*

### **Vědecká otázka 3**

*„Jaká je závislost rychlosti, tlakově viskózního koeficientu maziva, modulu pružnosti a zatížení na minimální tloušťce mazacího filmu v TR EHL režimu?“*

### **Pracovní hypotéza 3**

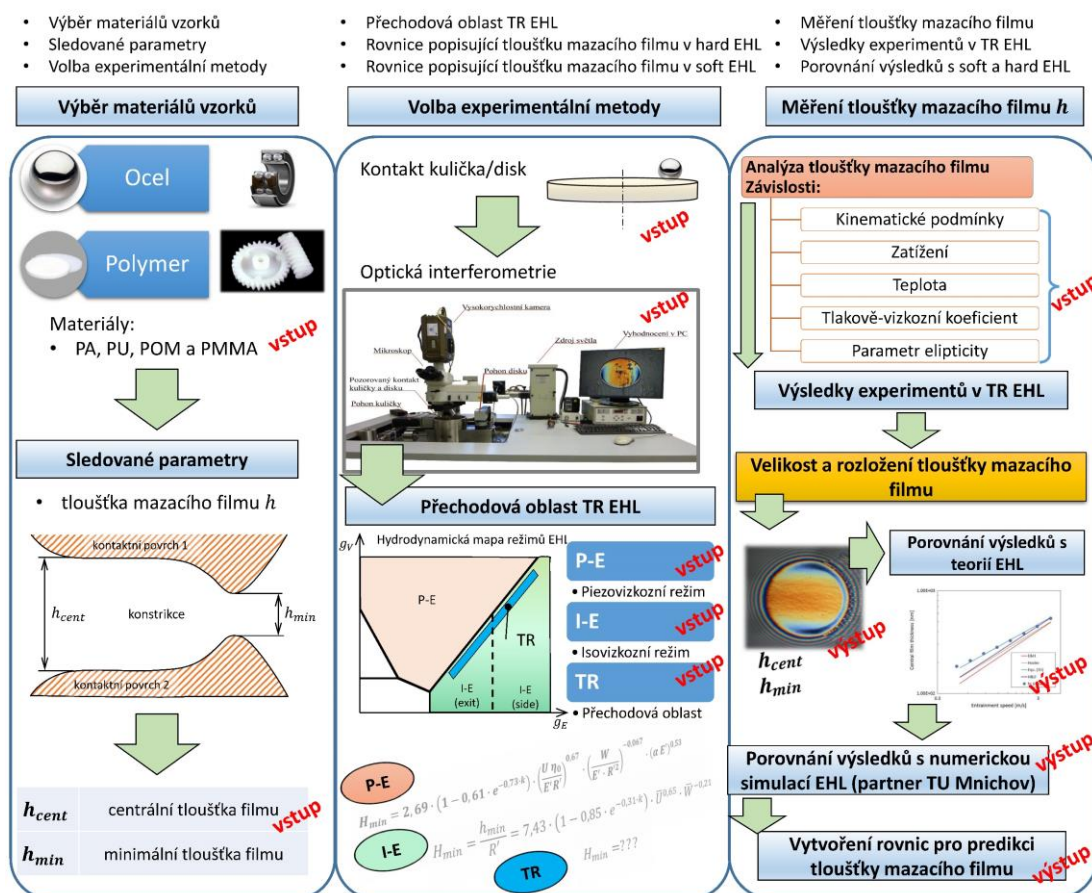
*„V TR EHL oblasti je míra vlivu rychlosti, tlakově viskózního koeficientu a zatížení někde na přechodu režimů mezi soft a hard EHL. Trend rostoucí tloušťky je spojen se zvyšující se unášivou rychlostí, kterou lze kromě hard EHL očekávat rovněž za podmínek provozu kontaktu v přechodové oblasti. Interval velikosti tlakově viskózního koeficientu pro přechodovou oblast je očekáván mezi režimy soft a hard EHL, čímž je zahrnut účinek maziva. Vlivem nízkého modulu pružnosti polymerů bude možné pozorovat zvýšení tloušťky filmu oproti hard EHL kontaktu. Oproti tomu rostoucí zatížení způsobí pokles tloušťky filmu, který bude výraznější při podmínkách blízkých soft EHL kontaktu.“*

## 9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

9

Způsob řešení a použité vědecké metody zjednodušeně znázorňuje schéma postupu řešení uvedené na Obr. 41. Polymerní materiály určené pro vzorky jsou vybrány s ohledem na jejich čtené použití v již publikovaných studiích, které se přímo vztahují k oblasti zájmu disertační práce. Současně jsou tyto materiály často používány ve strojírenství pro výrobu plastového ozubení. Dosud byly polymery studovány a provozovány převážně jako nemazané, proto chybí u mazaných polymerů, zejména v přechodové oblasti TR EHL dostatek experimentálních poznatků o hlavním sledovaném parametru, tloušťce mazacího filmu  $h$ . Při měření je kontakt dvojice zubů simulován kontaktem kulička/disk s použitím metody optické interferometrie, 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 a za použití metody optické interferometrie. Následuje porovnání a vyhodnocení míry shody s publikovanými numerickými a experimentálními studiemi, které popisují formování tloušťky filmu v oblasti TR EHL, respektive soft a hard EHL.

### Schéma postupu řešení



Obr. 41 Schéma postupu řešení disertační práce

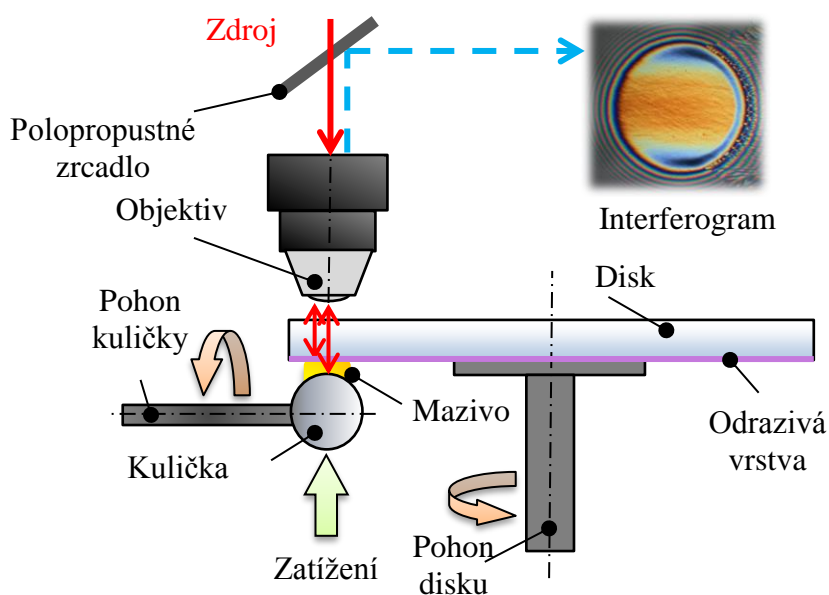
## 9.1 Použité experimentální metody

Kvůli umožnění měření tloušťky mazacího filmu a jeho rozložení v kontaktní oblasti je použita metoda optické interferometrie [40]. 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 nesou informaci o tloušťce a tvaru mazacího filmu, které se v jednotlivých místech vyskytují. Výsledkem je získání obrazových snímků-interferogramů, které poskytují data o rozložení a velikosti mazacího filmu. Jednotlivé polymery, proto budou opatřeny chromovým povlakem, aby bylo možné při měření získat snímky o vysoké kvalitě.

Na Obr. 42 je znázorněno schéma použití metody optické interferometrie pro konfiguraci „ball on disc“, která se používá pro měření tloušťky filmu v EHL kontaktu. Světlo proniká do mazaného kontaktu mezi kuličkou a diskem skrze průhledný materiál, kterým je obvykle sklo nebo safír. Některé paprsky jsou odrazeny od spodní plochy průhledného disku, zatímco některé procházejí skrz mazací film a odrážejí se od odrazivého povrchu ocelové kuličky.

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.

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.



Obr. 42 Obecné schéma použití optické interferometrie v kontaktu kulička/disk

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.

## 9.2 Postup měření

9.2

Realizace experimentů měření tloušťek mazacího filmu bude probíhat na optickém tribometru v laboratoři ÚK na FSI VUT v Brně. Schématické znázornění použité experimentální aparatury je na Obr. 43. 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 nanесena chromová vrstva z důvodu získání odrazivých vlastností povrchu. Kontakt je zatěžován přes polymerní disk, který je současně s přemístitelným zatížením (závažím) umístěn na dvojzvratné 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.

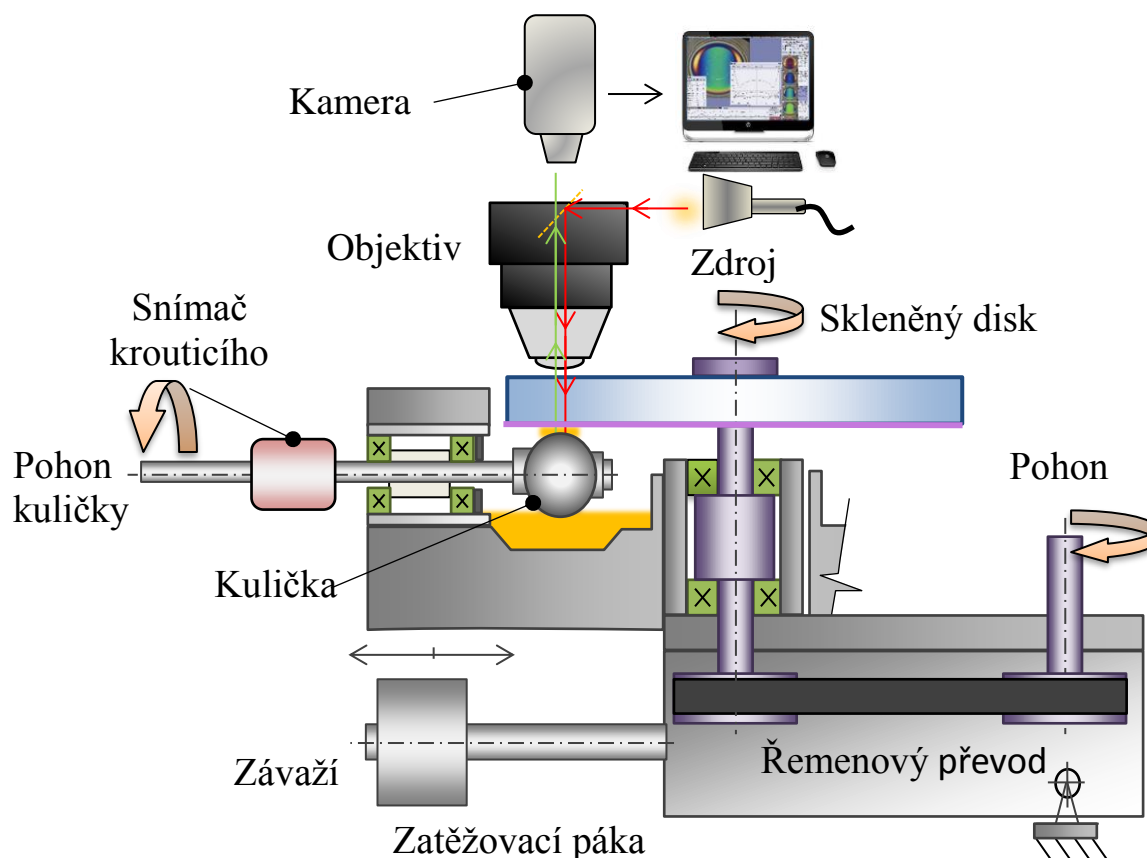
V mikroskopu je polopropustné zrcadlo, které odráží světlo ze světelného zdroje. Svazek světla vstupuje do kontaktu, kde chromová polopropustná vrstva část světla odrazí. Druhá část světla prochází do kontaktu a odrazí se od povrchu ocelové kuličky. Tyto dva svazky způsobují interferenci díky fázovému posunu světla. Tento posun je roven vzdálenosti, kterou světlo urazí od povrchu disku ke kuličce a zpět k povrchu disku. Interference je zachycena vysokorychlostní kamerou a interferenční obrazce jsou zpracovány v softwaru Achilles. Program na základě kalibrace a kolorimetrické interference dopočítává tloušťku mazacího filmu. Při kalibraci se jednotlivým barvám přiřadí odpovídající tloušťka filmu, a to v celé oblasti kontaktu.

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 tloušťky mazacího filmu pro různé materiálové kombinace 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. 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.



Obr. 43 Schéma použité měřicí aparatury

### 9.3 Materiály pro experimenty

Výběr vhodných polymerních materiálů, ze kterých budou vyrobeny experimentální vzorky, závisí na několika hlavních faktorech. Zejména se jedná o materiálové a tribologické vlastnosti. Přitom jsou zohledněny náklady vynaložené na pořízení jednotlivých vzorků. Polymerní vzorky nesmí z hlediska optických vlastností vykazovat nízkou propustnost světla, a nízkou odrazivost povrchu, protože by svými vlastnostmi znemožňovaly použití vybrané metody optické interferometrie. Z hlediska pokrytí přechodové oblasti TR EHL se předpokládá použití polymeru v kombinaci s materiálem o vyšším modulu pružnosti jako je např. ocel nebo safír. V prvním případě se jedná o kombinaci ocelové kuličky a nepovrstveného polymerního disku, na kterém je nanesen chromový povlak. Aplikací chromové vrstvy na povrch polymeru se zajistí dostatečné odrazivé vlastnosti povrchu, které jsou nezbytné pro použití metody optické interferometrie. Kontakt bude postupně realizován kombinací

dvojic materiálů, které jsou uvedeny v Tab. 7. Ocelová ložisková kulička bude v kontaktu s polymerním diskem.

**Tab. 7** Materiály experimentálních vzorků (nepovrstvené polymery)

Kulička	Disk
<b>100Cr6</b>	PMMA + Cr povlak
<b>100Cr6</b>	PU + Cr povlak
<b>100Cr6</b>	POM + Cr povlak
<b>100Cr6</b>	PA + Cr povlak

V druhém případě se jedná o použití polymerní kuličky, na níž je nanášena vrstva konkrétního povlaku a safírového disku s chromovým povlakem viz Tab. 8. Povrstvené kuličky budou dodány od mezinárodního partnera – Mnichovské technické univerzity, se kterou FSI VUT v Brně na tomto projektu spolupracuje. Povrstvená polymerní kulička bude v kontaktu se safírovým diskem.

**Tab. 8** Materiály experimentálních vzorků (povrstvené polymery)

Kulička	Disk
<b>PMMA + povlak</b>	Safír + Cr povlak
<b>PU + povlak</b>	Safír + Cr povlak
<b>POM + povlak</b>	Safír + Cr povlak
<b>PA + povlak</b>	Safír + Cr povlak

### Postup přípravy vzorků

Příprava vzorků obnáší úpravu povrchu vzorků před experimentem. Jedná se zejména o důkladné očištění povrchu vzorků chemickým prostředkem (acetone, izopropylalkoholem) a následně o jejich vyleštění. Důsledkem těchto procesů je zvýšení kvality získaných obrazových výsledků při měřeních.

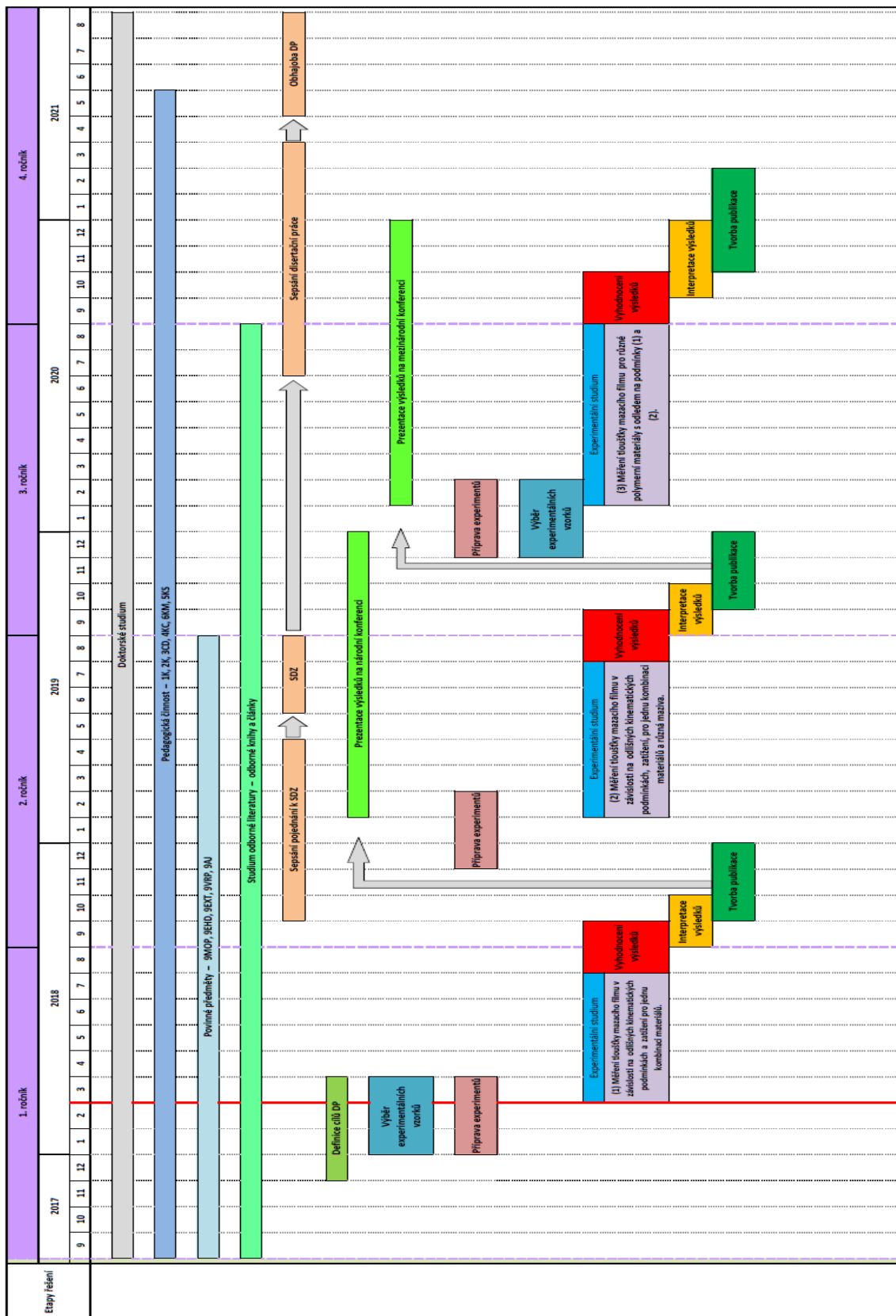
## 9.4 Zpracování a význam získaných výsledků

9.4

Po provedení jednotlivých měření na optickém tribometru bude vyhodnocena minimální a centrální tloušťka mazacího filmu ze získaných interferogramů v programu Achilles. Výsledky získané z měření 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.

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 a centrální tloušťky mazacího filmu. Uskutečněním uvedených experimentů dojde ke komplexnímu poznání mazacího procesu u plastového ozubení.

## 10 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY ŘEŠENÍ



## 11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI A POTŘEBNOSTI ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY V DANÉM ČASE

Aktuálním trendem je ve strojírenském průmyslu použití materiálů, které byly dříve nepříliš rozšířené např. s ohledem na jejich cenu, vývoj nebo nedostupnost technologie výroby. To se týká velkého množství charakteristických strojních součástí. Jednou z nich jsou ozubená kola, která byla po dlouhou dobu vyráběna kromě ostatních kovových materiálů tradičně z ocelí, respektive z jejich slitin.

Vývoj plastových materiálů pro strojírenské aplikace, přestože začal již před 70 lety. K významnému rozvoji došlo až v posledních 25 letech. S markantním vývojem různých plastových materiálů a technologie výroby je spojena snaha o jejich použití u typických strojních součástí – ozubených kol.

Se snahou o využití polymerních materiálů v oblastech, kde dochází ke značnému zatížení, což je případ ozubených kol, je podstatné znát množinu jejich projevů a chování. A to zejména s ohledem na mechanické a tribologické vlastnosti a chování při procesu mazání. V případě procesu mazání je důležitá tloušťka filmu, která se vyskytuje mezi boky zubů externě mazaných polymerních kol.

Tento kontakt je na základě kapitoly 9. proveden nahrazením zubů kontaktem kulička/disk nebo soudeček/disk. To umožní experimentálně stanovit tloušťku mazacího filmu v kontaktu pro různé polymerní materiály a různá maziva. Přitom bude docházet ke změně kinematických podmínek, které reálně při kontaktu zubů nastávají. Provedením jednotlivých experimentů, popřípadě jejich kombinací budou získána důležitá data, která popisují proces mazání různých polymerních materiálů.

Tato problematika není dosud dostatečně experimentálně prozkoumána, proto se zde nabízí prostor pro výzkum, který by přinesl nové poznatky o tribologickém chování externě mazaných polymerních materiálů. A to s ohledem na viskoelastické chování polymerů a aplikované povlaky, které mohou podobně jako u ocelového ozubení udržovat maximální teplotu na povrchu. Přitom významně omezují přístup tepla z povrchu do základního materiálu. Oproti tomu existuje větší počet publikovaných článků, které se zabývají studiem chování nemazaných polymerů, často pracujících při nízkém zatížení, kde odpadá problém externího mazání.

Zajištěním dostatečné tloušťky mazacího filmu budou kontaktní povrchy navzájem odděleny mazivem a nebude tak docházet k výraznému projevu tření, které je při kontaktu boků zubů nežádoucí. Následkem dostatečné tloušťky filmu, respektive nízkého tření nebude docházet k výraznému opotřebení a teplo z kontaktu bude odváděno vrstvou maziva. Tyto podmínky je nutné z hlediska dlouhodobé funkce polymerních ozubených kol zajistit, zvláště s ohledem na nízkou tepelnou odolnost plastů. Proto je důvodem experimentů cíl zmapovat proces mazání jednotlivých polymerů.

Změnou procesu mazání, lze výrazným způsobem ovlivnit účinnost jednotlivých ozubených soukolí stroje (např. u převodovek). A tím významně zvýšit výkon a celkovou účinnost celého stroje. To se projeví nižší mírou opotřebení a zvýšením životnosti stroje. V neposlední řadě použití plastových ozubených kol vede k podstatnému snížení hmotnosti montážních celků. A rovněž také ke snížení výrobních finančních nákladů a času, které jsou v dnešní době v mnoha ohledech klíčovými faktory.

## 12 SPOLUPRÁCE S JINÝMI INSTITUCEMI

V rámci řešení disertační práce se předpokládá spolupráce na projektu se zahraničními univerzitami a technickými instituty v Německu.

- Technical University Munich (**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl**),
- Gear Research Centre (FZG),
- RWTH Aachen University (**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin**)
- Surface Engineering Institute (IOT)

Spolupráce se předpokládá zejména v oblasti přípravy experimentálních povrstvených plastových vzorků, povlaků a vývoji numerického řešení TEHL kontaktu pro povrstvené polymery.

## **13 PŘEDPOKLÁDANÉ NÁKLADY SPOJENĚ S ŘEŠENÍM A JEJICH ZDROJE**

### **13.1 Předpokládané náklady**

• Nákup vzorků k experimentům	20000 Kč
• Nákup disků	60000 Kč
• Spotřební a laboratorní materiál	5000 Kč
• Náklady spojené s účastí na konferencích	180000 Kč
• Osobní ohodnocení studenta	900000 Kč
• Celkem	1165000 Kč

### **13.2 Financování výzkumu**

Řešení disertační práce bude financováno z projektů školitele. Financování se předpokládá ze zdrojů projektů Grantové Agentury ČR.

## **14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE V KATEGORIÍCH DEFINOVANÝCH PRO ZÁKLADNÍ VÝZKUM V SOULADU S PLATNOU METODIKOU HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝZKUMU A VÝVOJE**

### **14.1 Předepsané výstupy disertační práce**

Při doktorském studiu na Ústavu konstruování je požadavkem, aby student vytvořil disertační práci, kterou bude tvořit několik odborných článků. Tyto články budou dříve publikovány v impaktovaných časopisech. Minimální počet takto publikovaných článků je 3, což je zároveň minimální počet článků na vytvoření disertační práce. Proto se publikační činnost autora předpokládá v tomto rozsahu v impaktovaných časopisech, případně konferenčních sbornících.

### **14.2 Seznam vhodných periodik pro následnou publikaci výsledků**

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. Rovněž byly při výběru odborných časopisů zohledněny publikace ostatních autorů, kteří se podobnou tematikou zabývali.

- Wear (IF=2,531)
- Tribology International (IF=2,903)
- Tribology Transaction (IF=1,756)

**15 BIBLIOGRAFIE**

- [1] DEARN, K. D., T. J. HOSKINS, D. G. PETROV, S. C. REYNOLDS, et al. Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear*, Feb 2013, 298, 99-108.
- [2] HARRASS, M., K. FRIEDRICH AND A. A. ALMAJID Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact. *Tribology International*, Mar 2010, 43(3), 635-646.
- [3] DEARN, K. A. H. T. A. A. L. A. W. D. Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears 2013.
- [4] 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*, Jan-Feb 2010, 43(1-2), 55-63.
- [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] FERNANDES, P. J. L. AND C. MCDULING Surface contact fatigue failures in gears. *Engineering Failure Analysis*, Jun 1997, 4(2), 99-107.
- [7] LOHNER, T. A. M. J. A. S. K. EHL contact temperature - comparison of theoretical and experimental determination 2015, 1-4.
- [8] HOLMBERG, K., H. RONKAINEN AND A. MATTHEWS Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, 2000, 26(7), 787-795.
- [9] 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.
- [10] MAO, K. A new approach for polymer composite gear design. *Wear*, Feb 2007a, 262(3-4), 432-441.
- [11] MAO, K. A numerical method for polymer composite gear flash temperature prediction. *Wear*, May 2007b, 262(11-12), 1321-1329.
- [12] Blok, K., The flash temperature concept, *Wear* 6 (1963) 483–494.
- [13] 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.
- [14] T. Tobe, M. Kato, A study of flash temperature on the spur gear teeth, *ASME, J. Eng. Ind.* (1974) 78–84.

- [15] KALIN, M. AND A. KUPEC The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. *Wear*, Apr 2017, 376, 1339-1346.
- [16] 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.
- [17] HAMROCK, B. A. D. D. Minimum film thickness in elliptical contacts for different regimes of fluid-film lubrication 1978.
- [18] ESFAHANIAN, M. AND B. J. HAMROCK FLUID-FILM LUBRICATION REGIMES REVISITED. *Tribology Transactions*, Oct 1991, 34(4), 628-632.
- [19] JOHNSON, KL. Regimes of elastohydrodynamic lubrication. *J Mech Eng Sci*, 1970, 12, 9-16.
- [20] HERREBRUGH, K. SOLVING INCOMPRESSIBLE AND ISOTHERMAL PROBLEM IN ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION THROUGH AN INTEGRAL EQUATION. *Journal of Lubrication Technology*, 1968, 90(1), 262-+.
- [21] 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.
- [22] HOOKE, C. J. AND ODONOGHU.JP ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF SOFT, HIGHLY DEFORMED CONTACTS. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1972, 14(1), 34-&
- [23] 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.
- [24] DE VICENTE, J., J. R. STOKES AND H. A. SPIKES The frictional properties of Newtonian fluids in rolling-sliding soft-EHL contact. *Tribology Letters*, Dec 2005, 20(3-4), 273-286.
- [25] 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.
- [26] HOOKE, C. J. ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF HEAVILY LOADED CONTACTS. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1977, 19(4), 149-156
- [27] GREENWOOD, J. An Extension of the Grubin Theory of Elastohydrodynamic Lubrication 2002, 5, 2195.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] SONG, K. A. W. Y. A. H. B. A. W. M. Study on EHL of plastic pinion engaging with steel gear 2005, 50-51+54.
- [31] HAMROCK, B. J. AND B. O. JACOBSON ELASTOHYDRODYNAMIC LUBRICATION OF LINE CONTACTS. Asle Transactions, 1984, 27(4), 275-287.
- [32] 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.
- [33] STUPKIEWICZ, S., J. LENGIEWICZ, P. SADOWSKI AND S. KUCHARSKI Finite deformation effects in soft elastohydrodynamic lubrication problems. Tribology International, Jan 2016, 93, 511-522
- [34] Hooke CJ. The elastohydrodynamic lubrication of elliptical point contacts operating in the isoviscous region. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 1995;209:225–34.
- [35] BONGAERTS, J. H. H., K. FOURTOUNI AND J. R. STOKES Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS-PDMS contact. Tribology International, Oct-Dec 2007, 40(10-12), 1531-1542.
- [36] JAFFAR, M. J. ESTIMATION OF MINIMUM FILM THICKNESS FOR LINE CONTACTS IN THE TRANSITION REGION BETWEEN THE ISOVISCIOUS ELASTIC AND THE PIEZOVISCIOUS ELASTIC LUBRICATION REGIMES. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 1989, 203(6), 379-386.
- [37] GASNI, D., M. K. W. IBRAHIM AND R. S. DWYER-JOYCE Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime. Tribology International, Jul 2011, 44(7-8), 933-944.
- [38] 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.

- [39] SUKUMARAN, J. A. A. M. A. R. V. A. D. B. P. Friction torque, temperature and roughness in roll-slip phenomenon for polymer-steel contacts 2011, 5, 7-16.
- [40] HARTL, M., I. KRUPKA, R. POLISCUK, M. LISKA, et al. Thin film colorimetric interferometry. Tribology Transactions, Apr 2001, 44(2), 270-276.

## 16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

**Ing. Jiří Křupka**

### **Obor a začátek doktorského studia**

- Konstrukční a procesní inženýrství, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
- 27/06/2017 Převedení z přijímacího řízení
- 01/09/2017 Řádný zápis

### **Vzdělání a kvalifikace pro řešení projektu**

- 2015–2017 Automobilní a dopravní inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Brno
- 2012–2015 Strojírenství – Stavba strojů a zařízení, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Brno
- 2007–2011 Strojírenství – Počítačová grafika, Střední průmyslová škola a vyšší odborná škola, Sokolská, Brno

### **Praktické zkušenosti, stáže, vědecké projekty**

- 2017 Diplomová práce – Vývoj ventilačních turbín
- 2015 Bakalářská práce – Magnetický separátor
- 2011 Maturitní práce – Návrh AKU vrtačky

### **Výsledky vědeckých aktivit a akademická ocenění**

- 2017 Magisterský studijní obor – prospěl s vyznamenáním
- 2015 Bakalářský studijní obor – prospěl velmi dobře
- 2011 Maturitní zkouška

### **Další relevantní informace**

#### **SolidWorks certifikát:**

- Základní úroveň znalosti a schopnosti práce v CAD systému SolidWorks
- Absolvování školení CAD softwarů: AutoCAD, Inventor, Solidworks

#### **Jazyk:**

- Angličtina – Úroveň B1 dosažená jako součást kurzu bakalářského studia na Vysokém učení technickém v Brně
- Němčina – Základní volitelný kurz v průběhu magisterského studia na Vysokém učení technickém v Brně

#### **Další dovednosti:**

- Uživatelská znalost MS Windows a MS Office; pokročilá znalost aktivní práce na základě absolvování školení s programy SolidWorks, AutoCAD, Inventor, CATIA, CINEMA 4D, MATLAB, LOGO Soft Comfort, MSC Adams.
- Řidičské oprávnění – skupina B

## Seznam značek a symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
$E_1$	Modul pružnosti v tahu tělesa 1	[MPa]
$E_2$	Modul pružnosti v tahu tělesa 2	[MPa]
$E'$	Redukovaný modul pružnosti v tahu	[MPa]
$g_E, g_1$	Parametr elasticity	[-]
$g_V, g_3$	Parametr viskozity	[-]
$g_4$	Parametr „character of the system“	[-]
$\bar{G}$	Bezrozměrný parametr materiálů	[-]
$h$	Tloušťka mazacího filmu	[mm]
$h_{cent}$	Centrální tloušťka mazacího filmu	[mm]
$h_{min}$	Minimální tloušťka mazacího filmu	[mm]
$\bar{H}$	Bezrozměrná tloušťka filmu	[-]
$\bar{H}_{MIN}$	Bezrozměrná minimální tloušťka filmu	[-]
$k$	Parametr elipticity	[-]
$p$	Tlak	[MPa]
$p_m$	Kontaktní tlak	[MPa]
$n$	Otáčky	[s <sup>-1</sup> ]
$R_a$	Průměrná drsnost povrchu	[mm]
$R_1$	Největší poloměr zakřivení tělesa 1	[mm]
$R_2$	Největší poloměr zakřivení tělesa 2	[mm]
$R'$	Redukovaný poloměr zakřivení	[mm]
$R_e$	Mez kluzu v tahu	[MPa]
$SRR$	Poměr kluzných a valivých rychlostí	[-]
$t$	Čas	[s]
$T$	Teplota	[°C]
$T_{max}$	Maximální provozní teplota	[°C]
$T_g$	Teplota skelného přechodu	[°C]
$u_b$	Rychlost kuličky	[m · s <sup>-1</sup> ]
$u_d$	Rychlost disku	[m · s <sup>-1</sup> ]
$u_{slide}$	Kluzná rychlost	[m · s <sup>-1</sup> ]
$U$	Unášivá rychlost	[m · s <sup>-1</sup> ]
$\bar{U}$	Bezrozměrná rychlost	[-]
$W$	Normálové zatížení	[N]
$\bar{W}$	Bezrozměrné zatížení	[-]
$\alpha$	Tlakově vizkozí koeficient	[mm <sup>2</sup> · N <sup>-1</sup> ]
	Úhel záběru	[°]

Symbol	Veličina	Jednotka
$\beta$	Poloměr nerovností- „asperity radius“	??
	Tepelná roztažnost	$[K^{-1}]$
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	$[-]$
$\eta$	Dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\eta_0$	Dynamická viskozita při atmosférickém tlaku	$[Pa \cdot s]$
$\lambda$	Tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\Lambda$	Parametr mazání	$[-]$
$\mu$	Koeficient tření	$[-]$
$u_1$	Poissonovo číslo tělesa 1	$[-]$
$u_2$	Poissonovo číslo tělesa 2	$[-]$
$\tau$	Smykové napětí	$[MPa]$

## Příloha

Příloha obsahuje seznam výpočetních vztahů, které jsou běžně v problematice EHL kontaktu používány.

### Výpočetní vztahy

Redukovaný poloměr zakřivení	$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	(2-1)
Redukovaný modul pružnosti	$\frac{2}{E'} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2}$	(2-2)
Kluzná rychlost	$u_{slide} =  u_b - u_d $	(2-3)
Unášivá rychlost	$U = \frac{(u_b + u_d)}{2}$	(2-4)
Slide-to-roll ratio	$SRR = \frac{2 \cdot  u_b - u_d }{(u_b + u_d)}$	(2-5)
Bezrozměrná rychlost	$\bar{U} = \frac{U \cdot \eta}{E' \cdot R'}$	(2-6)
Bezrozměrné zatížení	$\bar{W} = \frac{W}{E' \cdot R'^2}$	(2-7)
Bezrozměrné parametr materiálů	$\bar{G} = E' \cdot \alpha$	(2-8)
Tlakově viskozní koeficient	$\alpha = 0 \text{ pro } I - E \text{ režim}; \alpha = \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) \cdot \frac{1}{p}$	(2-9)
Bezrozměrná tloušťka filmu	$\bar{H} = \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}}\right)^2$	(2-10)

Parametr elasticity	$g_E = g_3 = \frac{\bar{W}^{8/3}}{\bar{U}^2} = \left( \frac{W^2}{\eta_0 \cdot \bar{U} \cdot E' \cdot R'} \right)^{1/2}$	(2-11)
Parametr viskozity	$g_V = g_1 = \frac{\bar{G} \cdot \bar{W}^3}{\bar{U}^2} = \left( \frac{\alpha^2 \cdot W^3}{\eta_0 \cdot \bar{U} \cdot R'^2} \right)^{1/2}$	(2-12)
Bezrozměrný „character of the system“ parametr	$g_4 = \left( \frac{\alpha^4 \cdot \bar{U} \cdot \eta_0 \cdot E'^3}{R'} \right)^{1/4}$	(2-13)
Průměrná drsnost povrchu	$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}$	(2-14)
Bezrozměrná průměrná drsnost povrchu	$\bar{R}_q = \frac{R_q}{R'}$	(2-15)
Parametr mazání	$\Lambda = \frac{h_m}{R_q} = \frac{h_m}{\sqrt{R_{ball}^2 + R_{disk}^2}}$	(2-16)
Parametr elipticity	$k = \frac{R_y}{R_x} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left( \frac{R_y}{R_x} \right)^{2/\pi}$	(2-17)
Bezrozměrná centrální tloušťka - Hamrock Dowson	$H_c = \frac{h_c}{R'} = 7,32 \cdot (1 - 0,72 \cdot e^{-0,28 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,21}$	(2-18)
Bezrozměrná minimální tloušťka – Hamrock Dowson	$H_m = \frac{h_m}{R'} = 7,43 \cdot (1 - 0,85 \cdot e^{-0,31 \cdot k}) \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,21}$	(2-19)

Bezrozměrná centrální tloušťka – Myant	$H_c = \frac{h_c}{R'} = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,63} \cdot \bar{W}^{-0,13}$	(2-20)
Centrální tloušťka pro kruhový kontakt – Hamrock Dowson	$h_c = 3,3 \cdot \bar{U}^{0,64} \cdot \bar{W}^{-0,22} \cdot R'$	(2-21)
Minimální tloušťka pro kruhový kontakt – Hamrock Dowson	$h_m = 2,8 \cdot \bar{U}^{0,65} \cdot \bar{W}^{-0,21} \cdot R'$	(2-22)
Minimální tloušťka – Hamrock	$h_m = 2,65 \cdot g_1^{0,54} \cdot g_3^{0,06} \frac{\alpha^{0,57} \cdot R^{0,4} \cdot (U \cdot \eta_0)^{0,71}}{E'^{0,03} \cdot P^{0,11}}$	(2-23)
Minimální tloušťka – Jaffar	$h_m = 3,5 \cdot g_3^{0,77} + 0,4 \cdot g_1^{0,92} \cdot g_3^{-0,3}$	(2-24)
Minimální tloušťka – Dowson	$h_m = 2,65 \cdot g_1^{0,54} \cdot g_3^{0,06}$	(2-25)
Smykové napětí	$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$	(2-26)
Debořino číslo	$DEB = \frac{\tau \cdot u_s}{b}$	(2-27)