



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## STUDIUM TŘENÍ PODDAJNÝCH KONTAKTŮ

FRICTION OF COMPLIANT CONTACTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Vala

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Nečas, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Martin Vala</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	<b>Ing. David Nečas, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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

## Studium tření poddajných kontaktů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Poddajné kontakty se nachází v mnoha technických i biologických aplikacích. Jako příklad lze uvést pryžová těsnění, kontakt pneumatiky a vozovky, synoviální kloub, kontakt oka a kontaktní čočky či tření jazyka při zpracování potravy. V posledních letech se studiu těchto typů kontaktů věnuje stále větší pozornost. Tato skutečnost souvisí zejména s vývojem nových experimentálních zařízení a měřicích metod. Tato bakalářská práce se zaměří na zpracování přehledu literatury zabývající se hodnocením součinitele tření a utvářením mazacího filmu v poddajných kontaktech.

Typ práce: rešeršně syntetická

**Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je provést kritickou rešerši aktuální literatury zabývající se problematikou tření a mazání poddajných kontaktů. Pozornost bude věnována jednak experimentálním přístupům a dále identifikací zásadních aspektů ovlivňujících tyto tribologické procesy.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých publikací zabývajících se třením poddajných kontaktů,
- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých publikací zabývajících se mazáním poddajných kontaktů,
- identifikovat zásadní ovlivňující parametry,
- identifikovat potenciální výzkumné směry s ohledem na aktuální výzkum.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>.

**Seznam doporučené literatury:**

SADOWSKI, P. a S. STUPKIEWICZ, 2019. Friction in lubricated soft-on-hard, hard-on-soft and soft-on-soft sliding contacts. *Tribology International*. 129, 246-256.

MYANT, C., H.A. SPIKES a J.R. STOKES, 2010. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International*. 43(1-2), 55-63.

DE VICENTE, J, J. R. STOKES a H. A. SPIKES, 2006. Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 220(2), 55-63.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá studiem tření poddajných kontaktů a parametry je ovlivňující. První část této práce poskytuje analýzu aktuální problematiky tření a poddajných materiálů. V další části se nachází základní definice tření, poddajných materiálů a poddajných kontaktů spolu se samotnou studií aktuálních článků. Poslední část této práce je diskuze zabývající se všemi články a ovlivňujícími parametry, které z těchto článků vychází. Následována potenciálními výzkumnými směry.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tření, poddajný kontakt, koeficient tření, mazání, mazací film

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the study of the friction of compliant contacts and parameters affecting it. First section of this thesis provides analysis of current problematics with friction and compliant materials. In the next section basic definition of friction, compliant material and compliant contacts is provided with an actual study of up-to-date articles. Last section of this thesis is discussion dealing with all the articles and pointing out the influencing parameters. Followed by potential research pathways.

## KEYWORDS

Friction, compliant contact, coefficient of friction, lubrication, lubrication film

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALA, Martin. Studium tření poddajných kontaktů. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132110>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce David Nečas.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Davida Nečase Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Martin Vala

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Davidu Nečasovi, Ph.D. za poskytnutí a svěření zajímavého tématu, cenné rady, opravy, a připomínky. Zároveň také za poskytnuté rešeršní materiály. Dále bych rád poděkoval svým rodičům, sourozencům, přátelům a všem, kdo mě podporovali při vypracování této práce a pokračování ve studiu.



## OBSAH

Úvod.....	9
<b>1 Analýza problému a cíl práce .....</b>	<b>10</b>
1.1 Analýza problému .....	10
1.2 Cíl práce .....	10
<b>2 Přehled současného stavu poznání .....</b>	<b>11</b>
2.1 Tribologie .....	11
2.2 Tření .....	11
2.2.1 Typy tření dle pohybu .....	12
2.2.2 Typy tření dle prostředí .....	12
2.3 Poddajný kontakt.....	13
2.4 Studie tření poddajných kontaktů.....	14
2.4.1 Studie technické .....	14
2.4.2 Studie biotribologické .....	19
2.5 Studie mazání poddajných kontaktů.....	20
2.5.1 Studie technické .....	20
2.5.2 Studie biotribologické .....	29
<b>3 Diskuze .....</b>	<b>32</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>36</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>40</b>

## ÚVOD

Tření existuje s lidstvem víceméně odjakživa, počínaje Egypťanů a jejich soupeření s třením při budování pyramid, přes da Vinciho nadčasové pokusy o létající stroje, kde se musel zabírat vnitřním třením vzduchu, nemluvě o jeho dodnes využívané koncepci ložisek. Proto pravděpodobně nikoho nepřekvapí, že první systematická studie tření nese právě jeho jméno. [31]

Ačkoliv se zde bavíme o historii tření je třeba poukázat na poměrně nový vědecký obor, který kvůli tření vznikl – Tribologie. Přestože výše zmíněné počátky tribologie trasují až do dob starého Egypta a dávno před ním, oficiálně tento obor vznikl ve Velké Británii v roce 1966, kde se vláda dozvěděla o dopadu tření, opotřebení a mazání na průmysl a ekonomiku. Tento obor měl tedy za úkol studovat interakci dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu. [30]

Vlivem neustále se vyvíjející technologie je třeba stejně tak vyvíjet nové materiály vyhovující novodobým požadavkům a vlastnostem. Momentální doba proto upřednostňuje polymery, které jsou lehké, levné a nenáročné na výrobu. Tyto polymery patří mezi poddajné materiály, to znamená, že podléhají elastickým deformacím více než například oceli.

Z důvodu využití poddajných materiálů a v tom případě i jejich kontaktů s tuhými ale i poddajnými materiály je třeba porozumět této problematice. Poddajné kontakty se totiž vyskytují nejen například u těsnících prvků strojírenství ale i v biotribologii, kde se koncepce poddajného kontaktu zkoumá u synoviálního kloubu nebo u očních čoček při kontaktu oka se samotnou čočkou.

# 1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

## 1.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Tření se v současné době stává velkým problémem kvůli spotřebě energie. U silničních vozidel, které pokrývají 75 % spotřeby energie v celém dopravním sektoru je pak zvlášť důležité kontrolovat spotřebu energie pro překonání tření. Například u osobních automobilů, kde dochází ke spálení zhruba 15 % paliva pro překonání tření v samotném motoru. Celkově pak silniční vozidla spotřebují 32 % své dodané energie na překonání tření. Dalšími zástupci v dopravním sektoru je lodní doprava zároveň s vlakovou, které spotřebují až 20 % své energie na překonání tření. V oblasti průmyslu existuje studie poukazující na papírenské stroje, které spotřebují až 32 % své celkové, dodané energie pro překonání tření. Dále pak například v hornictví, kde je třeba štěpit, rozbít a přepravovat těžké kameny, pak dochází až k ztrátě 40% dodané energie na překonání tření. Kupodivu i energetický průmysl spotřebovává energii. Z důvodu mnoha pohybujících se součástí ať už u vodních turbín, generátorů, pump, plynových turbín nebo také dopravníků, strojů pro těžbu uhlí a vrtání. Z důvodu těžkého nalézání těchto dat v otevřené literatuře se pro tento sektor odhaduje 20 % energie pro překonání tření. [28]

Velký pokrok při nacházení nových způsobů, jak překonávat a neustále zmenšovat koeficienty tření za pomoci různých kombinací materiálů a maziv. Tento pokrok podporuje vzestup polymerů a 3D tiskáren, také může znamenat využití těchto nových materiálů ve výše zmíněných sektorech a nahrazení tuhých konstrukcí poddajnými materiály, a to například použitím gumou potažených povrchů namísto lité oceli. Výměna ocelových komponent za polymerové zpravidla sníží jejich cenu a hmotnost. Snížení těchto hodnot má pro momentální minimalistické sklony lidstva velký vliv.

## 1.2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem je provést kritickou rešerši aktuální literatury zabývající se problematikou tření a mazání poddajných kontaktů. Pozornost bude věnována jednak experimentálním přístupům a dále identifikací zásadních aspektů ovlivňujících tyto tribologické procesy.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých publikací zabývajících se třením poddajných kontaktů,
- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých publikací zabývajících se mazáním poddajných kontaktů,
- identifikovat zásadní ovlivňující parametry,
- identifikovat potenciální výzkumné směry s ohledem na aktuální výzkum.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

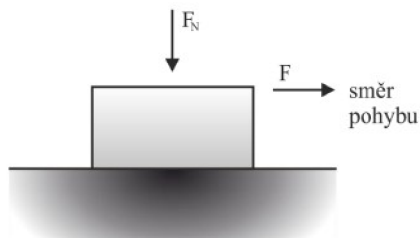
Následující část se bude věnovat tomu, co je to tribologie, tření a poddajný kontakt. Kde se s těmito pojmy setkat a jaké je jejich využití v dopravním, ale i biologickém inženýrství. Následuje zpracování článků zabývajících se třením a mazáním v poddajných kontaktech.

### 2.1 TRIBOLOGIE

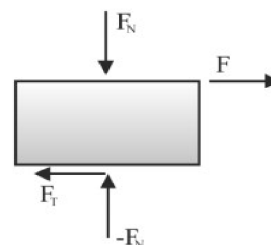
Tribologie je věda zabývající se třením, opotřebením, mazáním a kontaktními procesy. Zabývá se vzájemným, relativním pohybem dvou nebo více povrchů a jejich kladenému odporu proti tomuto pohybu. Tento odpor nazýváme třením a jeho vliv způsobuje opotřebení na jednotlivých površích. Tribologie je umění využít operační analýzy k řešení problémů, které mohou mít značný ekonomický dopad na spolehlivost, údržbu nebo opotřebení strojních součástí. Ať už mluvíme o vesmírných lodích nebo běžných domácích přístrojích. Vzájemná interakce povrchu je v tribologii velmi komplexní záležitostí, pro kterou je třeba porozumění několika různých oborů. Těmito obory jsou Fyzika, Chemie, Aplikovaná matematika, Mechanika pevných těles, Hydromechanika, Termomechanika, Materiálové technologie, ale i Reologie, Konstruování a předměty zabývající se výkonem, mazáním a spolehlivostí strojů. [9]

### 2.2 TŘENÍ

Tření je definováno jako pasivní odpor tělesa proti relativnímu pohybu v místě kontaktu dvou těles. Velikost tohoto odporu se udává pomocí bezrozměrného koeficientu tření. Ten závisí na materiálových vlastnostech a profilu kontaktní plochy dotýkajících se těles. Koeficient tření se určuje laboratorně pro každý materiál zvláště za pomoci tribometru. Takové tribometry lze rozdělit na Ball-on-disk, dále BOD, Pin-on-disk jako nejzákladnější typy. Další tribometry jsou již modifikace pro specifické využití jako například mikro/nano tribometr, který dokáže měřit na atomické úrovni, dále existují také tribometry zajišťující vakuové podmínky pro nutnost měření tření ve vakuu nebo tribometry modifikované pro vysoké teploty 1200 až 1500 °C, a naopak nízké teploty 0 až -120 °C. Tření využíváme například u šroubových a klínových spojů, řemenových a třecích převodů, třecích spojek, brzd u automobilů apod. Zpravidla je ale tento jev považován za nežádoucí, kvůli vzniku energetických ztrát ve strojích, opotřebení na součástech může mít vliv i na poruchy u strojů. Základním prvkem pro snížení tohoto nežádoucího jevu je využití mazání. Základními rozděleními tření, se kterými se můžeme potkat jsou statické a dynamické, smykové a valivé, suché a kapalinové, vnitřní (působení tření uvnitř tekutiny) a vnější (tření u brzd u automobilů) tření. [9],[10],[29]



Obr. 2 Těleso konající smykové tření  
Kde:  $F_N$  je Normálová síla,  
 $F$  je tangenciální síla působící ve  
směru pohybu tělesa [11]



Obr. 1 Síly působící na těleso  
při smykovém tření [11]  
kde:  $F_T$  je třecí síla

### 2.2.1 TYPY TŘENÍ DLE POHYBU

#### STATICKÉ TŘENÍ

Pro uvedení tělesa do pohybu je zapotřebí překonat odporovou sílu tzn. sílu statického tření. Tuto sílu lze vyjádřit za pomoci její přímé úměrnosti s normálovou silou působící na těleso. [9] Platí vztah:

$$F_S = \mu_S \cdot F_N, \quad (1)$$

Kde:  $\mu_S$  – Koeficient statického tření

#### DYNAMICKÉ TŘENÍ

Pro udržení tělesa v pohybu je zapotřebí neustále překonávat odporovou sílu tzn. sílu dynamického tření. Tato síla bývá zpravidla buďto větší nebo stejná jako síla statického tření. Platí sílu dynamického tření. [9] Platí vztah:

$$F_D = \mu_D \cdot F_N, \quad (2)$$

Kde  $\mu_D$  – koeficient dynamického tření

### 2.2.2 TYPY TŘENÍ DLE PROSTŘEDÍ

#### SUCHÉ TŘENÍ

Suché tření nebo někdy také nazýváno Coulombovo tření vzniká při vzájemném bezprostředním dotyku ploch těles. Při tomto jevu vzniká velké opotřebení a zahřátí materiálu. Při suchém tření může vznikat zadření. Suché tření, zobrazeno na obr. 3a, vzniká nejčastěji při rozbíhání strojů a jejich zastavování. Při tomto tření může z důvodu mikroskopických sil dojít ke svaření těles. [9], [15], [16]

#### MEZNÍ MAZÁNÍ

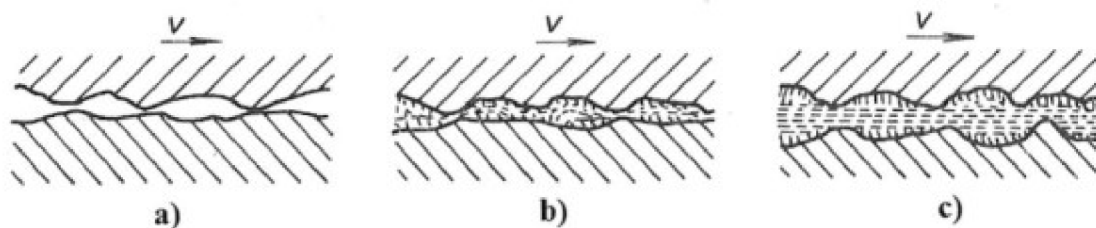
Mezní mazání, zobrazeno na obr. 3b, nazýváme takové tření, u kterého mezi kontakty existuje vrstva filmu maziva. Šířka této vrstvy se pohybuje v řádu mikrometrů. Tento tenký mazací film funguje na základě mezimolekulárních sil. Tato vrstva nedokáže zamezit vzájemnému kontaktu nerovností, ale dokáže zabránit vzniku svarů. [11], [12], [15], [16]

#### HYDRODYNAMICKÉ MAZÁNÍ

Hydrodynamické mazání, zobrazeno na obr. 3c, vzniká při úplném oddělení kontaktních ploch za pomoci maziva. Při tomto druhu tření nezáleží na materiálech jednotlivých těles a nedochází zde k opotřebení. Vrstva maziva je schopna přenášet zatížení. Na únosnost této vrstvy má vliv viskozita maziva. [14], [15], [16]

#### SMÍŠENÉ MAZÁNÍ

Smíšené mazání je kombinací mezního a hydrodynamického mazání. Je charakterizováno menší tloušťkou maziva než hydrodynamické mazání, ale větší tloušťkou než mazání mezní. Zároveň tedy dochází k bezprostřednímu styku nerovností a úplnému oddělení třecích ploch. K přechodu z hydrodynamického mazání na smíšené může dojít například při velkém zatížení, ale malé smykové rychlosti ploch. Při použití maziva s nízkou viskozitou hraje významnou roli mikrogeometrie funkčních ploch. [13], [17]



Obr. 3 Zobrazení jednotlivých typů tření a) suché b) mezní c) hydrodynamické

## 2.3 PODDAJNÝ KONTAKT

Poddajný kontakt je uspořádání dvou dotýkajících se těles, respektive jejich povrchů, při kterém má jedno nebo obě tělesa materiál o výrazně nižším modulu pružnosti, řádově se tento modul pružnosti pohybuje na hodnotě nižší, než je 1 GPa. Zásadním zastáncem poddajných materiálů jsou polymery, lépe řečeno elastomery. Bohužel viskoelastické a hysteretní vlastnosti, které jsou pro elastomery typické způsobují nevyzpytatelné a těžko popisovatelné třecí chování. Pro tyto materiály se na pokraji smíšeného a hydrodynamického mazání vyskytuje ještě isoviskózní-elastohydrodynamické mazání. Pro tento typ mazání je charakteristické, že kontaktní tlak mezi dotyky je dost velký, aby způsobil elastické deformace, ale nedostatečně velký na to, aby způsobil výrazné změny ve viskozitě maziva. Příkladem poddajných materiálů mohou být různé polymerové sloučeniny jako je například nitrilová pryž (NBR) nebo polydimethylsiloxan (PDMS), [2], [4] [6]

Typickým příkladem tření poddajných kontaktů jsou například stěrače u auta, kde dochází ke kontaktu gumové stírací lišty se skleněným povrchem skla za pomoci maziva – kapaliny do ostřikovačů. Dalším příkladem jsou těsnící o-kroužky, kde dochází k využití elastického chování gumy. Kontakt pneumatiky s vozovkou se také dá označit za poddajný kontakt díky použití syntetické gumy jako hlavního materiálu. Dále můžeme tření poddajných kontaktů hledat i na člověku samotném, kde se tření poddajných kontaktů vyskytuje například uvnitř synoviálního kloubu. Zde funguje jako dotykové spojení kostí přes kloubní mazivo dalším příkladem biologické aplikace je arteficiální nahrazení kloubů, kde poddajné kontakty vystupují jako mazání kloubu. Dalším z mnoha využití těchto kontaktů je mazání oční čočky, která ovlivňuje tření mezi očním čočkou a samotným očním víčkem. [4], [6]

## 2.4 STUDIE TŘENÍ PODDAJNÝCH KONTAKTŮ

### 2.4.1 STUDIE TECHNICKÉ

#### TŘECÍ VLASTNOSTI NEWTONSKÝCH TEKUTIN VE VALIVÉM A KLUZNÉM PODDAJNÉM ELASTOHYDRODYNAMICKY MAZANÉM KONTAKTU [18] 2005

de Vicente J., Stokes J.R., Spikes H.A.,

#### Popis studie

Tato studie kombinuje použití experimentálních a numerických metod pro zjištění tření v poddajném hydrodynamickém kontaktu. V experimentální části studie jsou provedena měření na přístroji zvaném mini-traction machine, dále MTM. Tento přístroj dokáže vyhodnotit koeficient tření v kontaktu a vykreslit graf závislosti tohoto koeficientu na unášivé rychlosti (rychlosti mezi kontakty). MTM byl vybrán pro tuto studii z důvodu umožnění kombinace kluzného a valivého tření. Pro toto měření byl zvolen kontakt nepoddajné kuličky zatěžující poddajný hladký disk. Testovaným subjektem v této studii jsou různé newtonské tekutiny použité jako mazivo v kontaktu. Numerická část studie pak spočívá v matematickém modelování co nejpodobnějšího kontaktu. Tento model nadále poslouží pro vypočítání odhadovaných hodnot koeficientu tření a tloušťky vytvořeného filmu. Tyto hodnoty byly následně porovnány naneseny do grafu a porovnány s experimentálním měřením.

Měření probíhalo zatížením kovové kuličky a jejího rotování proti hladkému povrchu disku. Tento disk byl ponořen v mazivu. Teplota tohoto maziva byla neustále kontrolována a udržována. Každé těleso – kulička, disk, měl svůj vlastní pohon pro umožnění libovolných kombinací rychlostí. Tření je pak odečítáno za pomoci siloměru připevněného k motoru kuličky a přístroje MTM.

Jednou z hlavních podmínek bylo použití nového elastomerového disku pro každý test. Přesný materiál tohoto disku nebyl zveřejněn. Tento disk byl opláchnut v destilované vodě, dodecylsiranu sodném a opět opláchnut za pomoci destilované vody. Tuto sekvenci následovala ultrasonická lázeň v isopropanolu. Disky nebyly ošetřeny plazmou, takže nebyla změněna jejich nátura vůči vodě. Použité disky proto byly hydrofobní. Kulička z nerezové oceli AISI 440 prodělala ultrasonické očištění toluenem následovaný isopropanolem. Veškerá zatížení v této studii byla konstantní 3 N, teplota při měření byla konstantní 35 °C, slide-to-roll ratio, dále SRR, bylo také udrženo konstantní 0,5. Použité tekutiny byly destilovaná voda a její koncentráty s 17; 44; 50; 64; 72; 86; 92; 93; 95 % kukuřičného sirupu. Díky této rozmanitosti koncentrátů dochází k obsazení širokého rozsahu viskozit od 0,000754 po 3,12 Pa s.

V případě vynesení koeficientů tření v dekadickém logaritickém grafu proti unášivé rychlosti uvidíme jistou korelaci, kdy tekutiny s nižší viskozitou začínají na vyšší hodnotě koeficientu tření, ale tato hodnota se se zvyšující unášivou rychlostí snižuje. Opačné tvrzení pak platí pro tekutiny s vyšší viskozitou v případě vynesení koeficientu tření do grafu, také v dekadicky logaritickém měřítku proti unášivé rychlosti vynásobené viskozitou tekutin. Pomocí této úpravy dosáhneme grafu, kde se všechny naměřené hodnoty schylují k jedné, hlavní Stribeckovo křivce. Pro porovnávání predikcí s experimentem je potřeba si uvědomit, že při experimentálním měření bylo měřeno jen Coutteho (kluzné) tření. Pro spolehlivější určení je třeba tyto hodnoty aproximovat čímž zamezíme ovlivnění výsledku silami, které nemění směr při změně směru kluzné rychlosti. Nicméně těmito úpravami anulujeme i vliv

Poiseuilleho (valivé) tření. Numerická část však poukazuje na vysokou váhu valivého tření i při čistě kluzných podmínkách, a proto toto tření nelze zanedbat.

Ve své podstatě by mohlo být možné měřit obojí tření, Coutteho i Poiseuilleho. Toto měření by ale vyžadovalo 4 měření pro každou hodnotu unášivé rychlosti a nastavení SRR. Následně by se musela kulička nastavit na vyšší rychlost než disk a opačně. Tento postup je zatím zkoumán. Přístroj MTM se osvědčil pro měření Coutteho tření, nicméně do svých kalkulací nezahrnuje Poiseuilleho tření a tření vlivem hystereze. Numerické výpočty pak dokázali značný vliv valivého tření na celkovou hodnotu tření tzn. koeficientu tření.

## **VALIVÉ A KLUZNÉ TŘENÍ V PODDAJNÉM KONTAKTU S VLIVEM MAZÁNÍ [7] 2006**

**de Vicente J., Stokes J. R., Spikes H. A.,**

### **Popis studie**

Tato studie se zabývala měřením tření mazané, ocelové kuličky proti elastomerové ploše. Zároveň v této studii dochází k měření jak kluzného, tak valivého tření. A to pomocí využití nové experimentální metody pro měření a vykreslování Stribeckových křivek jak pro kluzné, tak valivé tření. Tyto křivky se následně porovnávají s jejich teoretickými, numerickými predikcemi. Dále tato studie zkoumala vliv „SRR“ na samotné tření.

Výzkum probíhal na zařízení zvaném MTM modifikovaném pro oddělení valivého a kluzného tření. Na tomto přístroji byla výše zmíněná ocelová kulička zatížena a rotována proti vodorovnému povrchu taktéž rotujícího elastomerového disku ponořeném v mazivu. Obě tělesa jsou nezávisle hnaná tak, aby dosáhli jakékoliv kombinace rychlostí.

Všechna měření probíhala pod konstantním zatížením disku 3 N a konstantní teplotě v místnosti 35 °C. Další podmínkou byla snaha o udržení „SRR“ v percentilových hodnotách 50 % tzn. poměr absolutní hodnoty kluzné rychlosti ku unášivé rychlosti. Tyto rychlosti dosahovali hodnot od 0,004 m/s do 1,2 m/s. Po každém měření následovalo očištění jednotlivých prvků. Pro ocelovou kuličku to bylo ultrasonické čištění v toluenu následující isopropanolem. Pro elastomerový disk pak platilo využití nového disku pro každé měření. Každý nový disk byl opláchnut v destilované vodě, sodíku, dodecylsíranu sodném a opět opláchnut v destilované vodě. Následně byl disk ponořen do isopropanolové ultrasonické lázně.

Výsledkem této studie bylo porovnání experimentálně naměřených hodnot s teoretickými predikcemi. V případě měření kluzného tření dosahoval koeficient tření hodnoty až ~0,15 za nejnižších rychlostí při mezním mazání. Se zvyšující se rychlostí koeficient tření klesá až do dosažení smíšeného ma, kde část zatížení nese mazivo. Dále hodnota koeficientu tření stoupá lineárně (na logaritmickém grafu) souběžně s její teoretickou predikcí podle Coutteho. valivého tření pak dosahují experimentální hodnoty jiných hodnot než numerické predikce dle Poiseuilleho křivky. Autoři z toho usuzují, že je toto tření ovlivněno ještě dalším vlivem. Závěr vypovídá, že tato metoda měření pro valivé tření je z tohoto důvodu lepší než měření jen valivého tření. Výsledkem poslední části této studie je pak vliv „SRR“ na koeficient tření. V případě kluzného tření bylo dle numerické predikce dokázáno, že je velmi závislé na „SRR“ při hydrodynamickém mazání. Za nízkých rychlostí při mezním mazání pak bylo zjištěno, že při tomto typu mazání nemá SRR vliv. Dále bylo dokázáno, dle predikcí, že valivé tření není závislé na SRR ani při nízkých rychlostech ani při vysokých.



Jednotlivá měření ukázala jistý doposud nepopsaný jev při valivém tření, který má vliv na koeficient valivého tření.

### **VLIV ZATÍŽENÍ A ELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ NA VALIVÉ A KLUZNÉ TŘENÍ MAZANÉHO PODDAJNÉHO KONTAKTU [3] 2009**

**Myant C., Spikes H.A., Stokes J.R.,**

#### **Popis studie**

Tato studie se zabývala vlivem působícího zatížení a vlivem elastických vlastností materiálu na tření mezi mazanými povrchy. Tyto měření byly provedeny při široké škále rychlostí a za pomoci rozdílných viskozit použitých maziv. Z těchto měření pak byly vyneseny Stribeckovy křivky. Elastické vlastnosti byly měřeny za pomoci dynamicko-mechanické analýzy takzvané DMA. Naměřené hodnoty tření byly porovnány s teoretickými modely viskoelastické ztrátové energie z důvodu deformace kontaktů.

Měření probíhala na přístroji MTM, který byl modifikován pro měření jak kluzného, tak valivého tření. Tento přístroj nám umožní vyobrazit trakci pro hydrodynamické, smíšené i mezní mazání. Měření probíhalo za stanovení kontaktu mezi leštěnou kovovou kuličkou a plochým povrchem polymerového disku. Kulička byla vždy stejná, zatímco pro disk byli použity tři polymerové materiály. Každý tento materiál měl jiný elastický modul, který se lišil o jeden řád. Při měření se pak použilo několik různých tekutin jako maziv. Jednou z těchto tekutin byl například kukuřičný sirup. Tyto tekutiny měly vždy rozdílné hodnoty viskozity. Řádově se u těchto tekutin měnila viskozita o jeden až dva řády. Vlastnosti polymerového disku byli měřeny metodou DMA, kde byla aplikována oscilující síla na jednotlivé zkušební vzorky. Tyto vzorky byly vyřezány z materiálů polymerových disků jako kvádry 3x3x10 mm. Po aplikaci síly byla následně měřena deformace těchto vzorků, čímž autoři zjistili tuhost materiálu. Za pomoci znalosti časového intervalu a aplikované síly lze pak určit tlumící schopnost materiálu.

Jednou z pravidel této studie bylo použití nového polymerového disku po každém měření. Tyto disky byli před měřením řádně opláchnuty destilovanou vodou, dodecylsíránem sodným a znovu destilovanou vodou. Poté byl disk vložen do isopropanolové ultrasonické lázně na dobu tří minut. Kovová kulička byla ultrasonicky vyčištěna toluenem a následně isopropanolem. Celá studie probíhala za konstantní teploty 35 °C, konstantního SRR 0,5 a za čtyř různých velikostí zatížení 0,5; 1; 3; 5 N.

Prvním zjištěním této studie bylo nestabilní chování kuličky při unášivé rychlosti vyšší než 600 mm/s a kulička začala poskakovat. Při tomto jevu pak koeficient tření za hydrodynamického mazání náhle klesl. Jev se pak projevuje jak u kluzného tření, tak valivého. Proto bylo měření omezeno na unášivou rychlost o hodnotách 5–600 mm/s. Zjištěné hodnoty koeficientů valivého a kluzného tření se zapsali do tabulky a porovnali s predikovanými hodnotami. Co se týče kluzného tření, tak autoři dokázali závislost zatížení na koeficientu kluzného tření. Z naměřených hodnot vznikl graf, ve kterém se nachází křivka pro každou hodnotu zatížení. Tyto křivky jsou pak porovnány s numerickými predikcemi. Porovnání těchto křivek bylo úspěšné, křivky spolu líčují. V mezním a smíšeném mazání pak autoři očekávají a potvrzují chování zvyšujícího se koeficientu tření se snižujícím se zatížením. Tento jev je u velmi poddajných kontaktů předvídan. Jelikož jejich kontaktní plocha záleží spíše na plastické shodě než na plastických nerovnostech v povrchových drsnostech. Dalším zkoumaným prvkem pak byl vliv elastických vlastností na kluzné tření.

Zjištěním pak byl nulový efekt povrchové drsnosti při hydrodynamickém mazání. V případě mezního a smíšeného mazání byl dokázán vliv povrchové drsnosti na koeficient tření. Ohledně valivého tření autoři došli k zjištění, že původ tření vychází z deformačních ztrát. Tyto ztráty pak vznikají z důvodu použití poddajných materiálů. Vliv zatížení na valivé tření je pak autory označen jako zanedbatelný. Zároveň je mezi naměřenými a predikovanými hodnotami rozdíl. Dalším zkoumaným jevem byl vliv frekvence zatěžování. Tento jev lze popsat jako čas, kdy je kontaktní plocha zatížena a odlehčena vlivem rotace disku pod kuličkou. Analýza DMA dokázala závislost mechanických vlastností materiálu na frekvenci deformace. Například vliv velikosti zatížení na tření byl zanedbatelný, ale při zvýšení frekvence zatěžování bylo zjištěno zvýšení elastického modulu. S tímto zjištěním pak následovalo přepočítání a zjištění že tyto hodnoty se již přibližují predikovaným hodnotám.

Tato studie byla omezena rozsahem zatěžujících hodnot. Zvýšením těchto hodnot by pak mohlo ukázat závislost koeficientu tření na drsnosti povrchu.

### **VLIV VISKOZITY TEKUTINY A SMÁČENÍ NA VÍCEÚČELOVÉ VISKOELASTICKÉ MAZÁNÍ PODDAJNÉHO TRIBOLOGICKÉHO KONTAKTU [21] 2017**

**Selway N., Chan V., Stokes J.R.,**

#### **Popis studie**

Tato studie za pomoci měření na tribometru Ball-on-disk, dále BOD dokazuje vliv viskozity maziva a smáčení na mazání viskoelastického kontaktu. Toto tvrzení je podpořeno měřeními na poměrně hladkém a tvrdém elastomerovém kontaktu. První kapitola této studie se zabývá sestavením Stribeckovy křivky a porovnání naměřených hodnot s predikovanými. Druhá kapitola hovoří o vlivu viskozity na mazání u různých koncentrátů glycerol-vody s podobnými smáčejícími vlastnostmi. Třetí kapitola objasňuje důvod, proč má viskozita vliv na mazání hladkých/drsných kontaktů. Čtvrtá kapitola se zabývá použitím koncentrátů glycerol-ethanol-voda pro posouzení vlivu statického smáčení na vlastní mazání nezávisle na viskozitě.

Všechny tribologické vlastnosti v této studii jsou měřené pomocí BOD tribometru. Měření probíhala klasicky zajištěním jednotlivých kontaktů – kulička, disk a jejich umístění do nádoby s mazivem. Dalším krokem bylo zatížení kuličky a nastavením SRR. Průměrné drsnosti jednotlivých kontaktních ploch byly změřeny za pomoci profilometru Dektak 150. Hustoty zkušebních tekutin byly zadány od dodavatele, zatímco viskozity si autoři změřili za pomoci kapilárního viskozimetru Canon-Fanske za konstantní teploty ve vodní lázni.

Měřené kontaktní dvojice byly označeny za pomoci jejich elastomerových zkratk jako hladká PTFE kulička proti hladkému a následně drsnému PDMS disku a hladká PDMS kulička proti hladkému a následně drsnému PDMS disku. Tekutiny zahrnuté v tomto měření byly: koncentrát glycerol-voda v rozsahu obsahu glycerolu 0-60 %, koncentrát glycerol-ethanol-voda obsahující 10 % glycerolu a ethanol v rozsahu 30-90 %, posledním koncentrátem byl glycerol-ethanol-voda obsahující 40 % glycerolu a ethanol v rozsahu 20-60 %. Pro všechna měření bylo použito zatížení 2 N a SRR 0,5. Maziva byla uchovávána při teplotě 35 °C v silikon olejové lázni. Polydimethylsiloxanové kontakty bylo nutné vždy očistit ubrouskem na brýle za pomoci jednoprocenního roztoku dodecylsírany sodného. Tento roztok se následně použil pro ultrasonickou lázeň tohoto disku. Poslední úpravou je reverzní osmóza pro odstranění povrchově aktivních látek.

Při sestavení Stribeckovy křivky je v této studii poukázáno na náhlé snižování tření, které začíná po překonání kritické rychlosti. Toto snižování je ve většině tření označováno jako přechod mezi smíšeným a hydrodynamickým mazáním. To znamená přechod z tření, které probíhá mezi nerovnostmi kontaktních ploch na tření, které je převážně závislé na tekutině mezi kontakty. Odůvodnění tohoto jevu je pak popsáno numerickým modelem Scaraggi a Persson [25]. V této numerické studii je popsáno, že přechod mezi jednotlivými třenímí nemusí nutně vycházet z maxima a minima Stribeckovy křivky. Toto řešené snížení koeficientu tření pak může mít za vinu ztuhnutí vlivem elastické deformace. Vliv viskozity maziva na tření i při velmi malých rychlostech poukazuje na přítomnost maziva v kontaktu. S tímto faktem numerický model Scaraggi a Persson pro podobné viskozity nepočítá. Lze to odůvodnit malým množstvím fyzikálních modelů pro popsání úniku tekutiny z nerovností v kontaktu. Snižování tření se zvýšením povrchové drsnosti lze popsat pomocí několika vlivů. Od kluzného tření pevného kontaktu se očekává snížení se zvyšující drsností z důvodu snížení kontaktní plochy kvůli mezi povrchovým interakcím. Další snížení valivého tření pevného kontaktu je také kvůli zvýšení povrchové drsnosti. Zde ale dochází ke zvětšení nerovností, které potřebuje těleso při valení překonat. Co se týče úniku maziva z kontaktu, kdy u drsného povrchu dochází k rychlejšímu úniku tekutiny z kontaktu. K tomu dochází kvůli větším „kanálkům“, které jsou dané právě v závislosti na hodnotách drsnostních profilů. U hladkých profilů pak spíše může dojít k vytvoření dutin naplněných mazivem, redukcí schopnosti úniku tekutiny z kontaktu. Izolace viskozity a efektů smáčení je zapotřebí více prozkoumat a podložit tento pokus více měřeními dynamického vytékání tekutiny z povrchu. Tyto měření kombinovat s teoretickými a numerickými modely, které budou kvůli složitosti tématu nutné.

Vliv viskozity maziva a statického smáčení byl prozkoumán, nicméně je třeba věnovat další pozornost těmto vlastnostem, protože hrají svoji roli ve viskoelastickém mazání kontaktu. Odlišnosti mezi predikcemi a experimenty při zkoumání vlivu povrchové drsnosti na viskozitu jsou autory odvolávány na nedostatek teorie a numerického modelování. Jedná se zde o průběh výstupu tekutiny z kontaktu.

## **TŘENÍ PŘI POUŽITÍ MAZÁNÍ PRO RŮZNÉ KONFIGURACE PODDAJNÉHO KONTAKTU [2] 2019**

**Sadowski P., Stupkiewicz S.,**

### **Popis studie**

Tato studie se zabývala měřením koeficientu tření za pomoci tribometru typu BOD. Hlavním zaměřením této studie byl vliv různých konfigurací na samotné tření, respektive koeficient tření. Tyto uspořádání spočívali ve vytvoření poddajného kontaktu. Tyto konfigurace byly – kontakt mezi zatíženým, poddajným materiálem – gumové kuličky a rotujícím, nepoddajným materiálem – ocelový disk, dále kontakt zatížené ocelové kuličky a gumového disku, a nakonec kontakt gumové kuličky s gumovým diskem. Studie dále zkoumala vliv povrchové drsnosti na přechod z hydrodynamického mazání na smíšené mazání.

Jak již bylo zmíněno měření probíhalo na tribometru BOD. Na tomto zařízení je vzorek – kulička umístěn do držadla a zatížen proti rotujícímu disku. Tento disk je stabilizován podporou (podpůrný disk umožňující rotaci), přičemž obě tělesa se nacházejí v nádobě s mazivem. Kulička na tomto zařízení nemůže rotovat, díky tomu jsou zajištěny čistě kluzné podmínky. Kluzná rychlost je pak nastavována za pomoci úhlové rychlosti rotujícího disku. Díky tomuto zařízení můžeme na kuličky působit relativně vysokým

zatížením. Měření pak vypadalo následovně: Po očištění jednotlivých vzorků byl disk připevněn k podpůrnému disku, kulička umístěna do držadla a následně bylo do nádoby nalito mazivo. Následovalo nejnižší zatížení a změření třecí síly pro celou škálu kluzných rychlostí. Pokračovalo se zvýšením zatížení a opět změření třecí síly pro všechny rychlosti. Tato sekvence se opakovala pro všechny konfigurace a pro všechny použité maziva.

Primární podmínkou této studie bylo opláchnutí každé kontaktní dvojice v ethanolu pro poddajné materiály a acetonu pro nepoddajné materiály. Použité materiály byly nitrilová pryž pro „gumové“ kontakty, nerezová ocel pro nepoddajný materiál kuličky a nízkouhlíková ocel pro nepoddajný materiál disku. Všechny použité materiály se prokázaly jako hydrofilní. Použité maziva byla destilovaná voda a šest silikonových olejů s odlišnými hodnotami viskozity. Použitá zatížení byla 0,25; 0,98; 5,13; 19,3 N. Posledním faktorem měření byla povrchová drsnost, kdy autoři pro gumovou kuličku použili průměrnou drsnost 1,30  $\mu\text{m}$ , pro gumový disk 0,70; 3,30  $\mu\text{m}$ , pro ocelovou kuličku pak 0,06; 2,87  $\mu\text{m}$  a nakonec ocelový disk 0,17; 1,00; 3,20  $\mu\text{m}$ . Tyto drsnosti se vždy spočítali dohromady pomocí vektorového součtu.

Vliv povrchové drsnosti byl vyhodnocen na dohromady devíti kontaktních dvojicích. Každá z těchto dvojic má svou specifickou kompozitní drsnost. V souladu s předchozími studiemi i tato studie dokazuje vliv drsnosti povrchu na přechod z hydrodynamického mazání na smíšené mazání. Se zvyšující drsností pak posune tento přechod na vyšší hodnoty rychlosti v kontaktu. Nemá, ale vliv na samotný koeficient tření při hydrodynamickém mazání. Vliv konfigurace na jev drsnosti byl zanedbatelný. V podstatě nezáleželo na tom, zda je drsnost na poddajném kontaktu nebo na nepoddajném. Efekt zatížení a kluzné rychlosti na koeficient tření je v podstatě v první kapitole vysvětlen pod pojmem hydrodynamické mazání. Při zkoumání vlivu konfigurace na koeficient tření pak autoři došli k zjištění rozcházejících se hodnot. Následně ale zjistili, že při kontaktu nepoddajný-poddajný a poddajný-poddajný vznikají také hysterezní ztráty. Tyto ztráty pak zahrnuli do výpočtu a došli k závěru, že neexistuje žádné závažné ovlivnění koeficientu tření kvůli konfiguraci. Mírné rozptýlení v grafech má pak za vinu povrchová drsnost.

Studie dokázala zanedbatelný vliv konfigurace na koeficient tření. Zajímavé by ovšem bylo použití větších sil pro úplnou kontrolu vlivu konfigurace na poddajný kontakt.

## 2.4.2 STUDIE BIOTRIBOLOGICKÉ

### MĚŘENÍ KOEFICIENTU TŘENÍ ČOKOLÁDY [27] 2018

Masen M., Cann P.M.E.,

#### Popis studie

V této studii je rozebíráno měření koeficientu tření roztavené čokolády za pomoci modelu jazyk-patro s různým obsahem kakaá na škále od 5 % do 85 %. Pro měření tření v kontaktu bylo použito modifikované vysokofrekvenční reciproční měřidlo. V tomto měření nebylo použito maziva.

Za pomoci vysokofrekvenčního recipročního měřidla probíhalo měření následovně: Využití disku z polydimethyl silikonu, který v této studii vystupoval jako simulace jazyka. Na tento disk bylo vyvíjeno zatížení o síle 1 N, protože toto zatížení odpovídá kontaktnímu tlaku 30 000 Pa, který působí v reálném kontaktu jazyka s patrem. Tento disk byl tlačěn proti zahřivanému skleněnému povrchu 35 °C, který v tomto kontaktu představuje patro dutiny

ústní. Doba trvání tohoto kontaktu byla nastavena na 240 sekund a velikost kontaktní plochy byla 1 mm<sup>2</sup>. Po uplynutí tohoto času následovalo změření zbylého materiálu pomocí interferenčního mikroskopu a infračerveného spektroskopu. Nakonec byla zhodnocena ztráta materiálu při otěru metodou porovnání otírané čokolády s rozehřátou neotíranou čokoládou.

Základní podmínkou tohoto měření bylo použití nového skleněného povrchu, díky vyčištění pomocí isopropanolu. Elastomerový disk byl po každém měření otřen a očištěn isopropanolem. Tento disk byl vždy po několika měřeních vyměněn úplně. Po měření byly elastomerové povrchy disků zkoumány kvůli poškození vzniklé vlivem tření. Na začátku měření byla na zahřívavý disk nanášena a po dobu 30 sekund ponechána čokoláda, kvůli jejímu roztátí. Měřené čokolády byly rozděleny do skupin na „rodinné“ - A a luxusní - B. Vzniklé skupiny byly Dark A, Milk A, White A. Tyto rodinné čokolády byly vyrobeny stejným výrobcem a jsou klasické pro Spojené království a Kanadu, další rodinnou čokoládou byla Candy EU, od belgického výrobce, kvůli evropským normám povolujícím obsah 5 % rostlinného tuku. Mezi luxusní pak patřili 85 %B, 70 %B, MilkB, WhiteB.

Pro „rodinné“ čokolády lze říct, že vykazovali podobné charakteristiky křivek. Charakteristické pro tyto křivky byla vyšší hodnota koeficientu tření pro čokolády s vyšším obsahem kakaa. Všechny čokolády po deseti vteřinách měření dosáhli svého maximálního koeficientu tření a všechny křivky začali klesat. Po čtyřiceti až šedesáti vteřinách měření byl zaznamenán nejnižší koeficient tření a tento koeficient už se do konce měření nezměnil. Zajímavým jevem v tomto měření byla čokoláda Candy EU, která se svým obsahem kakaa 5 % dosáhla maximálního koeficientu tření 0,22 a tam se konstantně držela až do konce měření. Tento jev je zajímavý, protože všem ostatním čokoládám po dosažení maxima koeficientu tření začal v závislosti na čase koeficient klesat. Pro luxusní čokolády byly rozdíly viditelné v závislosti na obsahu kakaa. Zajímavým jevem pro tuto kategorii pak byla čokoláda 85 %B, která je přesný opak čokolády Candy EU z předchozí kategorie. Čokoláda 85 %B vykazovala podobné chování jako její přesný opak – dosažení maximálního koeficientu tření a následný konstantní průběh na této hodnotě až do konce měření. Dá se tedy hovořit o způsobení tohoto jevu buďto příliš nízkým obsahem kakaa nebo naopak příliš vysokým. Posledním zjištěním studie byla závislost tření na složení materiálu, k tomu dochází z důvodu vylučování cukru z kontaktní plochy. Absence cukru následně vede k degradaci čokolády a snížení tření.

Vliv extrakce cukru jako látky v čokoládě mělo zásadní vliv na koeficient tření. Zajímavý efekt by mohlo mít přidání slin do tohoto kontaktu. Sliny by pak jako zastávce mazací složky mohli mít značný vliv na výsledný koeficient tření.

## 2.5 STUDIE MAZÁNÍ PODDAJNÝCH KONTAKTŮ

### 2.5.1 STUDIE TECHNICKÉ

#### MAZÁNÍ V PODDAJNÉM STEJNORODÉM (PDMS) KONTAKTU [1] 2007

Bongaerts J.H.H., Fourtouni K., Stokes J.R.,

#### Popis studie

Tato studie se zabývala vyšetřováním vlivu dvou aspektů elastomerového povrchu na tribologické vlastnosti. Jedním z těchto aspektů je hydrofobicita a druhým povrchová drsnost. Dále se zabývá tím, jaké mají tyto aspekty vliv na výše zmíněné režimy mazání. Následně studuje přechod PDMS povrchu z hydrofobního na hydrofilní a následné změny koeficientu tření.

Výzkum probíhal na zařízení MTM. Na tomto zařízení byla opět přítomná kulička a disk zatíženy normálovou silou, přičemž kulička a disk začali rotovat za různých rychlostí, kvůli vytvoření SRR. Postranní síla vynaložená na kuličku je dále změřena siloměrem a převedena na koeficient tření. Pro každou hodnotu SRR pak proběhli dvě měření pro rychlejší rotaci disku a pro rychlejší rotaci kuličky. Pro měření drsnosti povrchu pak autoři použili stejnou kuličku, ale jinak drsné povrchy disků.

Všechna měření probíhala pod konstantním zatížením disku 1,3 N, konstantním SRR 0,5 a za konstantní teploty 35 °C. Všechny vzorky byly očištěny v isopropanolu a poté několikrát opláchnuty demineralizovanou filtrovanou vodou pro odstranění všech možných kontaminací. Některé PDMS povrchy byly záměrně ošetřeny kyslíkovou plazmou kvůli vzniku negativního náboje a uvedení povrchu do hydrofilního stavu. Tento stav ale není permanentní. Proto byly tyto prvky použity ihned po ošetření.

V případě hydrodynamického mazání mezi dvěma PDMS elastomery je vliv povrchové drsnosti a hydrofobicity zanedbatelný. Hlavním vlivem zvyšování drsnosti povrchu se ukázal být bod přechodu ze smíšeného na hydrodynamické mazání. V případě mezního mazání pak zvýšení povrchové drsnosti znamenalo snížení tření a prodloužení tohoto tření pro vyšší rychlosti. Hydrofobicita má velký vliv na mezní a smíšené mazání, kde hydrofilní povrchy mají řádově menší koeficient tření. Nicméně ani povrchová drsnost ani kontaktní úhel (hydrofobicita) nemají vliv při hydrodynamickém mazání.

Důležitým poznatkem této studie bylo zjištění značného vlivu kontaktního úhlu vody na povrchu (hydrofobicity). Budoucí možný vliv povrchově aktivních částic, olejů, polymerů na smáčecí vlastnosti povrchů. S tím související vliv kontaktního úhlu maziv na mazání poddajných kontaktů.

#### **LASEREM INDUKOVANÁ FLUORESCENCE PRO MAPOVÁNÍ TLOUŠŤKY FILMU V ČISTĚ KLUZNÉM, MAZANÉM PODDAJNÉM KONTAKTU [4] 2010**

**Myant C., Reddyhoff T., Spikes H.A.,**

##### **Popis studie**

V této studii dochází k použití laserem indukované fluorescence (LIF) k mapování tloušťky filmu tekutiny (maziva) v poddajném kontaktu. Fluorescence je optický jev, kde dochází k absorbování dopadající radiace, která je pak znovu vyzařována s většími vlnovými délkami. Tento jev lze využít pro charakterizaci jakéhokoliv skaláru ovlivnitelného fluorescencí použitého barviva. Fluorescenční intenzita tohoto měření závisí na vlastnostech a koncentraci použitého barviva, intenzitou vyzařujícího světla a měřeným skalárem. Díky tomuto měření vytvořili barevně poukazující mapu různé tloušťky vrstev. Tyto hodnoty pak porovnali s predikcemi a určili spolehlivost LIF. Studie dále řeší modifikaci způsobu mazání na zaplavení kontaktu mazivem a použití minimálního možného množství maziva.

Poddajný kontakt byl vytvořen za pomoci elastomerové hemisféry (polokoule) a skleněným diskem. Tyto prvky jsou umístěny pod fluorescenční mikroskop s kamerou. Pro funkčnost fluorescenčního mikroskopu je do maziva přimícháno fluorescenční barvivo. Kontakt je osvětlen, aby při vniknutí maziva do kontaktu mohl vzniknout obraz (mapa) s různými intenzitami. Jednotlivé intenzity pak po minimální kalibraci na obraze přímo poukazují na tloušťku filmu. Při měření je použita elastomerová polokoule jako vzorek. Mazivo pak vniká do kontaktu za pomoci rotace skleněného disku. Materiál použitého disku

je hydrofilní a byl použit tak jak byl dodán od výrobce. Testovací vzorek je pak zespuďu přitlačen na skleněný disk, ozářen pomocí paprsku o vlnové délce 532 nm a zkoumán fluorescenčním mikroskopem.

Pro každý test byl použitý nový elastomerový vzorek. Tento vzorek byl vždy opláchnut dodecylsíránem sodným a destilovanou vodou. Tuto operaci vždy následovala ultrasonická lázeň v isopropanolu. Skleněný disk byl očištěn za pomoci čistidla na oční čočky a poté acetoneu. Všechna měření proběhla za konstantní teploty 22 °C. Použitý, testovací maziva byla glycerol, destilovaná voda a jejich 50 % koncentrát.

Z počátku autoři provedli několik experimentů pro ověření schopnosti měření tloušťky filmu za pomoci LIF. Toto měření bylo provedeno při hydrodynamickém (plně zaplaveném) kontaktu. Tyto měření vynesli do grafu a porovnali s teoretickými predikcemi. V případě destilované vody a koncentrátu byl zřejmý rozptyl pro nízké rychlosti a filmové tloušťky. Naměřené hodnoty po zvýšení rychlosti lícuji s predikovanými hodnoty. Zároveň během tohoto měření došlo ke zjištění minimální zjištitelné tloušťky filmu 300 nm. Pro samotný glycerol pak bylo z naměřených hodnot zřejmé, že jsou značně nižší než ty predikované. Použitím predikovaných hodnot pro nižší dynamickou viskozitu pak ale autoři dosáhli úplného lícování hodnot. V druhém případě pak bylo zkoušeno použití minimálního množství maziva. Autoři zde poukazuji na měření množství přítomného barviva v kontaktu, ale ne na oddělení povrchů. Z toho vyplývá že nedostatek maziva nebo přítomnost kavitace se může projevit snížením intenzity a tím pádem i zhoršení kvality získaných obrazů.

Hlavním příspěvkem této studie je ověření funkčnosti laserem indukované fluorescence pro měření tloušťky filmu maziva. Díky této metodě nejsou třeba žádné nátěry na kontaktní povrchy. Tato metoda je zároveň schopna, v porovnání s jinými, velmi rychlého zjištění tloušťky filmu. V případě použití jiných, lepších barviv by bylo možné měření nižších rozeznatelných tlouštěk než 300 nm. Například použití přístroje, který umožňuje použití více barviv najednou. Ten by umožnil kvalitnější obraz a zároveň měření velmi nízkých profilů.

## **VYŠETŘOVÁNÍ TLOUŠŤKY FILMU MAZIVA V KLUZNÉM PODDAJNÉM KONTAKTU [8] 2010**

**Myant C., Fowell M., Spikes H.A., Stokes J.R.,**

### **Popis studie**

V této studii byla využita optická interferometrie pro vyšetření tloušťky filmu tekutiny v kluzném hydrodynamickém kontaktu. Výsledkem této studie jsou vlivy zatížení, rychlosti v kontaktu a viskozity na tloušťku filmu. Naměřené hodnoty autoři porovnávají s predikovanými teoretickými hodnotami.

Poddajný kontakt byl vytvořen mezi rotující elastomerovou kuličkou a plochým, skleněným diskem. Kulička byla dále zatížena, respektive natlačena na disk. V této studii byla použita modifikace, kde rotuje kulička, zatímco disk zůstává stacionární. Tato modifikace byla použita z důvodu zajištění čistě kluzných podmínek. Následně byl tento kontakt ozářen monochromatickým světlem a došlo k pořízení obrazu při různých rychlostech za pomoci kamery. Z těchto obrazů pak byli za pomoci počítačových analýz vyprodukovány mapy. Které díky intenzitě zobrazení poukazovali na tloušťku filmu přítomného v kontaktu.

Pro každý test byla použita nová elastomerová kulička, která byla opláchnuta v destilované vodě, dodecylsíránem sodným a znovu ve vodě. Kulička byla poté ponořena do

ultrasonické lázně v isopropanolu. Nakonec byla ponořena do dionizované vody na ultrasonickou lázeň. Skleněný disk (hranol) byl také ultrasonicky očištěn v isopropanolu a následně v acetonu. Pro tuto studii platila konstantní teplota 22 °C spolu s konstantním zatížením vzorku. Dohromady byly použity tři zatížení 3; 35; 50 mN, ale vždy zůstávaly konstantní po celé měření. Použité tekutiny jako maziva byly 95 % koncentrát glycerolu a 5 % vody a laboratorní slunečnicový olej. Tyto tekutiny byly vybrány z důvodu stejného refrakčního indexu ale rozcházející se dynamické viskozity.

Při zkoumání vlivu zatížení byla při 50 mN zjištěna odlišnost mezi jednotlivými rychlostmi v kontaktu. Tato odlišnost mezi kontaktní dvojicí se pohybuje okolo 100  $\mu\text{m}$ . Pro zatížení 3 mN se tato odlišnost pohybuje okolo 40  $\mu\text{m}$ . Na rozdíl od těchto dvou měření pak pro zatížení 35 mN vykazuje zanedbatelné odlišnosti. Lze pak z grafů ve studiích říct, že se zvyšujícím zatížením se zvětšuje mezera mezi jednotlivými křivkami. V případě několikanásobného zvětšení zatížení by pak ale mohla vstoupit do hry samotná drsnost povrchu. V případě zkoumání vlivu unášivé rychlosti (rychlosti mezi kontakty) autoři využili slunečnicového oleje a zatížení 3 mN. Při tomto měření došli k závěru, že oproti použití glycerolu se mezi jednotlivými křivky grafu nacházejí mnohem větší rozptyly. Rozptylem pak myslíme vzdálenost mezi jednotlivými křivky s podobnými unášivými rychlostmi. Autoři dále poukazují na možnost přítomnosti povrchově aktivních částic v mazivu. Protože dodané mazivo bylo použito tak, jak bylo poskytnuto – bez úprav. Přítomnost těchto částic by mohla narušit kvalitu pořízených obrazů. Efekt viskozity je značný, zatímco rozdíl viskozit tekutin je roven řádově desetině, jejich naměřené tloušťky se liší o dvounásobek.

Tato studie prokázala využití monochromatické optické interferometrie jako užitečný nástroj pro měření tloušťky filmu maziva v poddajném kontaktu. Metoda byla vyzkoušena za poměrně nízkých zatížení a unášivých rychlostí. Nicméně se ukázala časově úsporná a mapování tlouštěk pomocí této technologie nebylo náročné. Vyhodnocená data tlouštěk filmu pak víceméně lícovali s numerickými predikcemi. Naměřené hodnoty sahali na škále od nano do mikro světa.

#### **STUDIUM TLOUŠŤKY FILMU MAZIVA V PODDAJNÉM KONTAKTU ELASTOMEROVÉHO TĚSNÍČÍHO MATERIÁLU ZA POMOCÍ LASEREM INDUKOVANÉ FLUORESCENCE [5] 2014**

**Fowell M.T., Myant C., Spikes H.A., Kadiric A.,**

#### **Popis studie**

Tato studie se zabírala laserem indukovanou fluorescencí a jejím využitím pro sledování nárůstu tloušťky filmu maziva. Mazivo se nacházelo v poddajném kontaktu a způsob tření byl hydrodynamický. Pro toto sledování bylo použito optimalizované optické uspořádání pro mapování velmi široké škály tlouštěk. Tato měření probíhala za různých unášivých rychlostí a zatížení. Zároveň zde došlo k použití tří různých konfigurací a dvou elastomerových materiálů. Jednou z konfigurací byl bodový dotyk elastomeru a skleněného disku. Pro druhou a třetí konfigurací byly vyrobeny vlastní o-kroužky z fluorovaného kaučuku.

Principem tohoto měření bylo umístění testovacích vzorků (PDMS polokoule, o-kroužek) do nádoby s mazivem a jejich stabilizace. Následné napuštění nádoby mazivem, přitlačení testovacího vzorku na skleněný disk (konkávní čočku) a následná rotace disku. Zachycení obrazů probíhalo za pomoci kamery na mikroskopu. Jednotlivé obrazy se lišili



v unášivé rychlosti, kdy měření začínalo na rychlosti 0 mm/s a zvyšovalo se exponenciálně až na 1200 mm/s. Po měření se vzorek nechal odpočinout kvůli vyloučení maziva z kontaktu. Následovalo pak poslední zachycení obrazu stacionárního stavu vzorku bez maziva. Všechna měření byla předem zkalibrována za pomoci teoretických výpočtů. Poslední statický obraz pak sloužil jako kontrola, zda byl přístroj správně zkalibrován. Jestliže poslední statický obraz lícoval s predikovaným obrazem pro dané rychlosti, zatížení a materiál, pak byly teoretické poznatky zvoleny správně.

Hlavní podmínkou tohoto měření bylo použití nového elastomerového vzorku pro každý test. Tento vzorek a v této studii i jeho protikus – skleněný disk a konkávní čočky byly opláchnuty isopropanolem, uloženy po dobu dvaceti minut do toluenové lázně, opláchnuty isopropanolem a uloženy do isopropanolové lázně taktéž na dvacet minut. Poslední částí přípravy prvků pak bylo jejich vysušení v bez prachové místnosti. Testovacím mazivem byl koncentrát 75 % glycerolu a 25 % vody. Do tohoto koncentrátu bylo následně přimíseno 0,01 % Rodamínu 6G. Díky této příměsi vysoce fluorescenčního barviva lze použít fluorescenční mikroskop. Všechny měření probíhala za konstantní teploty 25 °C.

Při měření první konfigurace tzn. bodového dotyku PDMS polokoule se skleněným diskem autoři zjistili lineární závislost mezi tloušťkou filmu maziva a unášivou rychlostí. Vzniklá křivka experimentálních hodnot je pak ve studii porovnána s dvěma teoretickými predikcemi. Autoři tohoto experimentu se trefili přímo mezi ně a díky tomu usuzují, že teoretické predikce převážně závisí na rozmanitosti použitých podmínek pro kontakt. Při druhé konfiguraci tzn. použití o-kroužku z fluorovaného kaučuku zatíženého proti skleněnému disku za čistě valivých podmínek. Tato konfigurace byla také doplněna o výše zmíněné mazivo. Výsledkem vlivu této konfigurace bylo zjištění zvyšující se tloušťky filmu při zrychlující unášivé rychlosti. Maximum filmu se pak uskupuje v místě dotyku. V tomto místě pak konfigurace také vykazuje lineární závislost tloušťky filmu na unášivé rychlosti. Tato závislost ale začíná platit pro rychlosti vyšší než 100 mm/s. Experimentální hodnoty vyšly vyšší než obojí numerické predikce. Pro třetí konfiguraci o-kroužku proti konkávní čočce pak taktéž platí lineární závislost tloušťky filmu s unášivou rychlostí. Predikované hodnoty závisí na definovaných podmínkách pro kontakt.

Za závěr této práce považuji poznatek o teoretických predikcích, kdy je třeba jasně definovat pojem kontakt a jeho podmínky. Z důvodu nerovných podmínek pak vznikají odlišnosti v grafickém porovnání.

## **VLIV PROMĚNNÉHO POHYBU NA ISOVISKÓZNÍ ELASTO-HYDRODYNAMICKÝ FILM MAZIVA V PODDAJNÉM, BODOVÉM KONTAKTU [6] 2014**

**Myant C., Fowell M., Cann P.,**

### **Popis studie**

V této studii byla použita metoda laserem indukované fluorescence k měření filmu poddajného bodového kontaktu při proměnném pohybu. Tato studie zkoumala dva typy pohybu – počátek a jeho zrychlování, a následně náhlé zastavení z dosažené rychlosti. Dále byl zjišťován vliv míry zrychlování a kluzné rychlosti na utváření tvaru filmu a jeho zhroucení v kontaktu. Jak lze usoudit z názvu studie typ tření v kontaktu byl elasto-hydrodynamický tento způsob tření je definován jako oddělení povrchu vrstvou maziva, které je větší než nerovnosti povrchů, elastická deformace povrchů je pak plně srovnatelná s tloušťkou filmu. V rámci měření autoři zaznamenali pomocí kamery na mikroskopu obrazy

stavu maziva v jednotlivých fázích zrychlování/zpomalování. Za pomoci mapovacích přístrojů pak autoři porovnávají kontakt ve statické poloze s kontaktem za různých rychlostí. Následně je ve studii porovnáno měření s nejvyšším a nejnižším zrychlováním.

V této studii byla z důvodu vysokých rychlostí zakomponována metoda laserem indukované fluorescence. Dále bylo z téže důvodu zapotřebí zajistit kameru s vysokou senzitivitou. Každé měření trvalo cca 6,7 sekundy a bylo při něm pořízeno 100 obrazů. Kontaktní dvojice byla složena ze staticky uložené elastomerové polokoule a rotujícího skleněného disku. Materiál disku je hydrofilní a nebyl plasticky upravován. Polokoule byla přilepena k distanční vložce kvůli zajištění čistě kluzných podmínek. Následně byl testovací vzorek přitisknut na skleněný disk a zatížen. Rotační protikus byl připojen na vysokofrekvenční krokový motor schopný rychlého zrychlení i zastavení.

Hlavní podmínkou této studie bylo používání nového elastomerového vzorku pro každé měření. Každý vzorek byl opláchnut dodecylsíránem sodným a destilovanou vodou. Následovala ultrasonická lázeň po dobu tří minut v isopropanolu a následné opláchnutí destilovanou vodou. Elastomerový materiál byl hydrofobní a v tomto stavu byl také použit pro měření. Skleněný disk byl očištěn za pomoci přípravku na čištění kontaktních čoček a následně acetonem. Použitá tekutina (mazivo) byl koncentrát z 90 % glycerol a 10 % voda. Tento koncentrát byl použit z důvodu jeho schopnosti rozpustit velké množství veřejně přístupných fluorescenčních barviv. Jako přimíchané fluorescenční barvivo byl použit sulforhodamin G ve složení 0,05 %. Tato tekutina (mazivo) se do kontaktu dostává za pomoci rotačního pohybu disku. Proto je vana maziva naplněna až po spodní hranu disku. Během celého měření bylo použito konstantní zatížení 0,8 N a udržována konstantní teplota 22 °C. Použité hodnoty zrychlování v této studii byly 1000; 10; 6,6; 5 mm/s<sup>2</sup>.

Na počátku kluzného pohybu, vlivem adheze, elastomerový vzorek přilne ke skleněnému disku a se zvyšující se rychlostí roste síla snažící se pohnout vzorkem po směru rotace. Při překročení kritické rychlosti se pak kontakty vlivem překročení tangenciální síly odtrhnou a v rámci jednoho měření už se k sobě nevrátí, tato mezera je zaplněna mazivem. Při velkém zrychlení je pak tato mezera z jakéhosi důvodu větší než u pomalého rozjezdu. Tento jev v žádném případě není předvídan žádným klasickým předpokladem. Lze z toho tedy předpokládat, že odtrhávání maziva závisí na okamžitosti rychlosti. Z měření je pak zjevné, že počáteční zrychlení má vliv na počáteční formování filmu. Nicméně se ale filmy u všech variant zrychlení po cca 5 sekundách usadili na stejné hodnotě. Toto chování bylo také pozorováno u nepoddajných kontaktů v čistě kluzných podmínkách. Chování při zrychlování by se tak dalo popsat za pomoci čtyř fází. Zprvu jako elastické deformace vlivem vznikající tangenciální síly proti adhezním silám spojujícím kontakt. Druhá fáze nastala po překročení adhezních sil následným odtrhnutím povrchů a vnikem maziva do kontaktní dvojice. Ve třetí fázi vlivem zrychlení a rotace disku pak nastalo nadměrné navýšení filmu v kontaktu. Poslední fází je pak usazení tloušťky filmu v jedné rovině. K tomuto usazení dochází cca po 5 sekundách za všech měřených zrychlení. Při tomto měření v místech kontaktu kupodivu nedošlo k žádnému kmitání ve vrstvě filmu. Absence tohoto kmitání může být zapříčiněna naturou poddajných kontaktů a jejich tlumící schopností. Co se týče náhlého zastavení to lze popsat za pomoci dvou fází. Jednou z nich je rychlé elastické obnovení kontaktu, kdy se opět spojí hrany elastomerového vzorku se skleněným diskem. Z důvodu tohoto spojení pak dojde k uvěznění zbylého maziva v tomto kontaktu. Dále pak dochází k uvolnění této tekutiny. Pro všechny testované kluzné rychlosti bylo zpozorováno zachování tloušťky filmu několik vteřin po začátku zastavování. Následně pak ale všechny filmy graduálně začali klesat. U náhlého

zastavování pak dochází k souhlasným výsledkům mezi experimentálním a predikovaným chováním filmu při tomto pohybu.

Tato práce přinesla další úspěch do řady laserem indukované fluorescence, kdy bylo možné za pomoci tohoto zařízení měřit různá zrychlení a jejich vliv na tloušťku filmu. Tato studie bude pravděpodobně velmi prospěšná pro strojírenství, kde bývá interakce mezi různými prvky zajišťována či podporována právě filmem maziva. Schopnost studovat tyto prvky díky této metodě pak může být užitečná pro zlepšení kvality a životnosti těchto prvků.

## **MAZÁNÍ PODDAJNÉHO MATERIÁLU: ZÁLEŽÍ NA VISKOELASTICITĚ? [20] 2017**

**Putignano C., Dini D.,**

### **Popis studie**

Tento článek se, na rozdíl od ostatních v této práci zmíněných, zabývá numerickými metodami pro řešení mazání poddajného materiálu. Klasická teorie mazání tuhých kontaktů bohužel nedokáže plně popsat jevy vznikající u poddajných materiálů. Mezi tyto jevy patří nečekané trhliny v mazacím filmu a závislost na rychlosti třecího procesu. Tyto jevy nelze popsat za pomoci konvenčních metod. Které nedokážou popsat časově závislé napěťové vypětí, které se nachází u poddajných materiálů. Ve článku se mluví o nové modelovací metodě, potvrzené experimentálními pokusy za pomoci interferometrie, která by měla řešit tento problém. Navzdory vyvíjejících se analýz, poukazujících na vliv viskoelastivity ve dvoudimenzionálních kontaktech, ale chybí teoretické studie a numerické modely poukazující na chování těchto kontaktů v třidimenzionálním kontaktu. Nedostatek těchto modelů pak zanedbává vliv povrchové drsnosti a viskoelastivity na mazací režim. Bohužel ve světě vědy zabývající se mazáním v klasických (tuhých) kontaktech jsou numerické modely vyvinuty pro časově závislé elastické, hyper-elastické nebo elastoplastické deformace. Tyto modely ovšem nedokážou objasnit řadu přírodních a experimentálních jevů vyskytujících se u poddajných kontaktů. Klasické mazací modely pak predikují takzvané Stribeckovy křivky, kde u malých rychlostí nastávají mezní a smíšené režimy, zatímco u vyšších rychlostí jsou nahrazeny elasto-hydrodynamickým a hydrodynamickým mazáním. V těchto predikcích je koeficient tření kontrolován za pomoci viskózních ztrát a závisí na rychlosti. Nicméně ale tyto predikce úplně zanedbávají hysterezní disipaci probíhající u mazaného tělesa z viskoelastického, (poddajného) materiálu. Aplikace této hysterezní disipace by pak mohla značně ovlivnit nebo pozměnit prozatímní stav Stribeckovy křivky.

Tato studie dále poukazuje na měření mazání tuhé koule v čistě valivém kontaktu s viskoelastickým poloprostorem. Podmínkami kvůli snížení počtu parametrů je pak SRR 0. Zavedeny byly ze stejného důvodu také zjednodušující podmínky pro modul elasticity, dynamickou viskozitu a zatížení.

Pro malé rychlosti se zde koule chová jako pevné elastomerové těleso. Mazací film pak splňuje kruhovitý tvar a žádné mazivo neodtéká. Při zrychlení pak ale nastává změna, kdy kontaktní plocha postupně zmenšuje svou velikost a mění svůj tvar. Začíná se zde také vytvářet napěťový vrchol, který má za vliv asymetrii při vtoku maziva do kontaktu. Touto asymetrií vzniká jisté lokální minimum v tloušťce filmu. Dalším zrychlením tento efekt převládá a absolutní filmové minimum se postupně pohybuje směrem ke vtoku maziva. Pro řešení tohoto jevu bude třeba vzít v potaz více teoretických úvah a studií. Při suchém pohybu tuhé koule pohybující se po viskoelastickém poloprostoru dochází k vrcholu kontaktního tlaku v místech, kde viskoelastický materiál nebyl deformován. V místě odtokové hrany, kde

tento tlak není tak veliký, došlo u viskoelastického materiálu k elastické deformaci. V případě použití tekutiny (maziva) pak dochází k podobnému jevu: u vtoku tekutiny nedochází k deformaci, zatímco u výtoku dochází k elastické deformaci, proto pak film vzniká s minimální tloušťkou u vtoku maziva do kontaktu a jeho tloušťka se zvětšuje směrem k výtoku z kontaktu. Experimentální část spolu s numerickými výsledky této studie dokázali, že efekt viskoelastivity může být za jistých podmínek značný. Tyto podmínky jsou v závislosti na viskozitě tekutiny a rozsahu frekvence nebo rychlosti ve které je viskoelastivita tohoto materiálu prominentní. Při splnění těchto podmínek je pak vliv viskoelastivita na tloušťku značný.

Vliv viskoelastivity může být predikován za pomoci poměru minimální tloušťky filmu a penetrace tuhého tělesa. Kde minimální tloušťku lze určit vyřešením Reynoldsových rovnic. Penetrace tuhého tělesa může být aproximována za pomoci Hertzova vztahu. V případě poměru těchto dvou veličin rovno jedné, hrozi při použití viskoelastického materiálu přechod do visko-elasticky-hydrodynamického režimu. Při tomto režimu mohou nastat deformace viskoelastického tělesa.

### **VLIV KINEMATICKÝCH PODMÍNEK NA TLOUŠŤKU FILMU V PODDAJNÉM MAZANÉM KONTAKTU [23] 2018**

**Nečas D., Jaroš T., Dočkal K., Šperka P., Vrbka M., Křupka I., Hartl M.,**

#### **Popis studie**

Tato studie vyšetřuje vliv kinematických podmínek, unášivé rychlosti a SRR na tloušťku filmu maziva přítomného v poddajném kontaktu. Kontaktní dvojicí v tomto experimentu je gumová kulička a disk vyrobený z optického skla. Každý z těchto kontaktů byl individuálně poháněn pro dosažení libovolných unášivých rychlostí a hodnot SRR. Měření probíhalo za pomoci konfigurace BOD tribometru. Na tribometru byl přidělán fluorescenční mikroskop s kamerou pro odebrání snímků. Naměřené hodnoty byli sepsány a porovnány s dvěma teoretickými predikcemi pro isoviskozní-elastohydrodynamické mazání vyjádřenými Hamrock and Downson (HaD) a Nijenbannin et al. (NEA).

Měření probíhalo, jak již bylo zmíněno, na BOD konfiguraci. Tato konfigurace obsahovala rtuťovou lampu, jako zdroj buzení a fluorescenční mikroskop, pro až šest různých fluorescenčních filtrů, jako přístroj pro zkoumání tloušťky v kontaktu spolu s kamerou pro snímání těchto měření. Součástí měření byla nejdříve kalibrace staticky lehce zatíženého kontaktu. Díky čemuž je pak možné odvodit tloušťku filmu z intenzity fluorescence. Poté následovalo samotné měření/pořízení obrazů podle definovaných podmínek. Posledním krokem je pak porovnání nasnímaných obrazů s kalibračními a určení tloušťky filmu ve zvoleném bodě/místě kontaktu.

Podmínkami tohoto měření bylo použití filtru s vlnovou délkou 535 až 555 nm. Další podmínkou byla vysilací vlnová délka v rozmezí 573 až 638 nm, zatížení kontaktu bylo zajištěno pákovým mechanismem. Vlastnosti sférického gumového vzorku, kuličky, byly průměr 25,4 mm, Youngův modul pružnosti dle dodavatele 3,5 MPa a Poissonova konstanta 0,485. Drsnost povrchu materiálu byla změřena za pomoci profilometru Bruker Contour GT-X, který funguje na bázi interferometrii bílým světlem. Zjištěná průměrná povrchová drsnost kuličky byla 2  $\mu\text{m}$ . Skleněný disk měl modul pružnosti 81 GPa a Poissonovu konstantu 0,209 jeho povrch byl opticky hladký. Testovacími mazivy byl glycerol s dynamickou viskozitou

0,8 Pa·s, do kterého bylo přidáno fluorescenční barvivo v koncentraci 0,03 %. Druhým mazivem byl polyglycol jehož dynamická viskozita byla 1 Pa·s, byla do něho přidána koncentrace toho samého barviva ale s jiným percentilem 0,01 %. Mazání kontaktu je zajištěno rotací kuličky, ta je ponořena cca do poloviny svého průměru v mazivu. Měření nejdříve probíhalo za čistě valivých podmínek, poté byl přidán i kluzný efekt. Rozsah SRR byl od -200 % až po 200 %, jeden krok činil postup o 40 %. Použité rychlosti byly v rozmezí 10 až 400 mm/s. Měření probíhalo za konstantního zatížení 0,2 N, při konstantní teplotě 24 °C.

V případě čistě valivých podmínek tzn. stejné rychlosti pro oba kontakty, je z naměřených hodnot zřejmé, že tloušťka filmu roste se zvyšující se rychlostí. Nicméně se tyto hodnoty podobají spíše predikci NEA. To je pravděpodobně zapříčiněno odlišnými materiálovými vlastnostmi. Pro vyšší rychlost 200 mm/s je pak pro glycerol zaznamenán mírný pokles naměřených hodnot tloušťky. Tento jev je pravděpodobně způsoben odstředivými silami, které neumožní dostatečný přísun maziva do kontaktu. Dalším jevem je zjevná formulace hydrodynamického klínu mezi kluznými kontakty, který je dokázán rostoucím sklonem při vyšších rychlostech. Při zakomponování negativně definovaných kluzných podmínek (kulička rotuje rychleji než disk) se obecně očekává snížení tloušťky filmu oproti čistě valivým podmínkám. V této studii jsou ukázány výsledky pro čistě negativní klouzání, kdy je disk stacionární a kulička rotuje. Výsledkem je očividné zmenšení tloušťky filmu, která je velmi podobná pro obě maziva. Pro vyšší rychlost pak tloušťka filmu vykazuje lehký nárůst. Velikost hydrodynamického klínu je za negativní podmínky nižší než u čistě valivého měření. Tento jev je vázán ke zvýšení teploty uvnitř kontaktu což navazuje na snížení viskozity maziva a tím pádem i zúžení tloušťky filmu maziva. Pro pozitivní kluzné podmínky (disk je se pohybuje rychleji než kulička) byla celková tloušťka filmu vyšší v porovnání s čistě valivými podmínky. Vývoj tloušťky filmu při této podmínce je zobrazen na grafu a odpovídá numerickým predikcím HaD. Při vyšších rychlostech se pak se tloušťka oproti predikcím začíná snižovat stejně jako u čistě valivých a čistě negativně kluzných podmínkách. Naměřené tloušťky u kluzných podmínek se pohybovali mezi 9,5 až 64,8  $\mu\text{m}$  pro polyglycol a 7,2 až 51,5  $\mu\text{m}$  pro glycerol. Zatímco u čistě valivých podmínek byly tyto hodnoty mezi 6,4 až 38  $\mu\text{m}$  pro polyglycol a 4,3 až 53,2  $\mu\text{m}$  pro glycerol. Z toho vyplývá, že glycerol s nižší viskozitou dokáže vytvořit užší film. Zajímavým poznatkem této studie je nulový vliv rychlosti při SRR 0 (čistě valivé podmínky). U této hodnoty je jak při použití glycerolu, tak polyglycolu nulové rozptýlení měřených hodnot. Dalším zajímavým poznatkem je, že u glycerolu při nízké hodnotě SRR -0,40 dochází ke zvýšení a u SRR +0,40 ke snížení tloušťky. U polyglycolu pak tento jev funguje přesně obráceně. Toto může být způsobeno buďto odlišností viskozit tekutin, nebo schopností glycerolu absorbovat vlhkost. Při vysokém pozitivním SRR 1,6 pak dochází k náhlé ztrátě tloušťky filmu, to nastává kvůli velmi malé rychlosti kuličky, která není schopna dodávat mazivo do kontaktu.

Dalšími zajímavými výzkumnými oblastmi by mohl být několikrát zmiňovaný efekt teploty v kontaktu při kluzných podmínkách. Definice, zdroj a experimentální měření této teploty by pak mohl upřesnit odlišností v grafických křivkách. Testování glycerolové absorbce vlhkosti a vliv vlhkosti na tloušťku filmu nebo viskozitu maziva by mohl vysvětlit další nesrovnalosti v grafech.

## 2.5.2 STUDIE BIOTRIBOLOGICKÉ

### ADAPTIVNÍ MULTIFUNKČNÍ MAZÁNÍ V PŘÍRODNÍM SYNOVIÁLNÍM A ARTIFICIÁLNÍM KLOUBU [19] 1998

Murakami T., Higaki H., Sawae Y., Ohtsuki N., Moriyama S., Nakanishi Y.,

#### Popis studie

V této studii bylo sledováno chování tření prasečího ramenního kloubu při kyvadlovém pohybu. Zjišťování zakomponovaných typů mazání v kloubu při tomto pohybu a za různých funkčních podmínek. Například lehké zatížení ramenního kloubu, simulace klouzání kloubní chrupavky při chození. Následuje rozprava o použití proteinových látek ve vztahu k závažnosti tření a typu mazání. Dále ve studii probíhá simulace klouzání mezi materiály nerezové oceli a kloubní chrupavky pro hydrodynamické mazání pak klouzání mezi vrstvou polyvinylvého alkoholu jako maziva a nerezové oceli.

Kyvadlové testování synoviálních kloubů probíhalo nejdříve změřením vzorků. K tomuto měření bylo využito metody otisknutí těchto vzorků do sádrové formy. Plocha kloubu byla následně aproximována na elipsoidní tvar. Velký a malý poloměr této elipsy byl změřen za pomoci souřadnicového měřicího přístroje. Následně bylo spuštěno měření za pomoci zatíženého kyvadla. Střed rotace byl kloub a na konci kyvadla byla zátěž. Nádoba konkávního tvaru, ve které se nacházel kloub byla napuštěna mazivem. Po prvním testu proběhla očista vzorku definována v odstavci níže. Po již zmíněné očištění se vzorek otestoval podruhé, kvůli nepřítomnosti ochranného povlaku vlivem očištění. V tomto měření bylo zaznamenáno zvýšení tření kvůli odstranění ochranného filmu chrupavky. Po tomto měření následovalo opláchnutí. Měření tření bylo rozděleno na dvě, kdy v jednom bylo použito mazivo s obsahem lidských proteinů a lipozomů. V druhém již tyto látky neúčinkovali. Dalším testem bylo klouzání mezi ocelovým sférickým předmětem a kloubní nebo umělou chrupavkou. K tomuto testování byl použit kloubní simulátor kolene a dva typy kluzných dvojic. Za pomoci kloubového simulátoru byla simulována chůze. V této simulaci bylo zapotřebí zajistit potřebné holení osově zatížení flexi s extenzí stehenní komponenty. Tyto pojmy jsou u kolene anatomicky definovány jako flexe – přiblížení kotníku k hýždím, extenze pak znamená narovnání dolní končetiny. [24] Pohyb a zatížení bylo zajištěno za pomoci hydraulického systému programovaného za pomoci osobního počítače. Pro vyhodnocení typu mazání co nejbližší k mazání v reálném kolenním kloubu bylo třeba použít pouze polovinu plánovaného zatížení kvůli distribuci zatížení v reálném kloubu. Tření bylo neustále měřeno za pomoci momentu v řídicí ose díky tenzometru připevněného k hřídeli. Tento moment pak odpovídá hodnotě třecího momentu.

Zásadní podmínkou měření bylo udržování čerstvých vzorků kloubů v hydratovaném stavu. Prasata, z kterých byly pořízeny klouby byly zpravidla kolem 6 měsíců staré a vážili vždy cca 100 kg. Použitá zatížení při měření byla 100 N a 1000 N. Teplota v místnosti byla udržována konstantní, 20 °C. První zkoušky kloubů probíhali pomocí maziva hyaluronátu sodného. Po prvním zkoušce byly vzorky opláchnuty solným roztokem obsahující Triton X-100. Následně byly vloženy do ultrasonické lázně a opět opláchnuty solným roztokem. Tímto procesem prošli kvůli odstranění ochranného filmu na kloubních chrupavkách. Nicméně tímto procesem došlo ke změně kontaktního úhlu povrchu a tím pádem ke změně chování povrchu z hydrofobního na hydrofilní. Po druhém měření byly klouby opláchnuty v solném roztoku. Pro měření klouzání mezi ocelovým předmětem a chrupavky byl použit materiál oceli s průměrnou drsností 0,06 μm. Pro dosažení kontaktu mezi holenní a chrupavkou byla použita

holenní kloubní chrupavka z prasete. Druhým povrchem byl polyvinyl alkoholový hydrogel o tloušťce 2 mm, který byl opřen o cylindrický rukáv z polymethylmethakrylát. Do maziva byl přidán delta globulin z důvodu sledování vlivu proteinu v těle na tření. Měření proběhlo pro všechny podmínky po dobu tisíce odsimulovaných chodících cyklů.

Třecí chování v prvním a druhém měření za pomoci kyvadla bylo zaznamenáno do grafu. V grafu prvního testování, při zatížení 100 N, lze vidět, jak koeficient tření formuje typický tvar Stribeckovy křivky. Při zatížení 1000 N je pak ale pozorována konstantní nízká hodnota koeficientu tření. Tento jev je dle autorů způsoben elasto-hydrodynamickým mazáním u poddajného kontaktu, při kterém dochází k elastické deformaci jednoho z povrchů. Tato deformace vyústí ve zvýšení viskozity maziva. Při lehkém zatížení dojde k přímému kontaktu v místě tenkého filmu. Při větším zatížení pak dochází k deformaci kloubních povrchů z důvodu zlepšení dosednutí kontaktů. To pak vyústí ve zvýšení efektivity filmu, který pak přenáší více zatížení. Při druhém měření, kde již nebyli přítomny ochranné filmy lze pozorovat zvýšení tření. Třetí měření ukázalo vliv přidaného proteinu a lipozomů na snížení tření v přírodních kloubech. Nicméně bylo zapotřebí přidat více aditiv, než je fyziologicky přítomno v mazivech. Po testování kontaktu ocelového povrchu chrupavky lze úspěšně říct, že na ocelovém povrchu, stejně jako na původním povrchu chrupavky, vzniká ochranný film. Účinnost tohoto filmu pak závisí na jeho kompatibilitě s párovaným materiálem a závažností tření v kontaktu. Na chrupavce ani na polyvinyl alkoholovém povrchu se tento ochranný film nevytvořil. Optimální kompozice maziva je proměnná v závislosti na třecích podmínkách a na typu mazání v kontaktu.

Ačkoliv byla tato studie úspěšná v odhalení vytváření ochranného filmu za pomoci proteinů, je třeba udělat více experimentů a studií ohledně fosfolipidů a jiných synoviálních složek zajišťující ochrannou funkci.

## **MAZÁNÍ KLOUBNÍ CHRUPAVKY [22] 2016**

**Jahn S., Seror J., Klein J.,**

### **Popis studie**

Tento článek se zabývá shrnutím informací ohledně mazání kloubní chrupavky. Hovoří zde například o maximálním zatížení synoviálních lidských kloubů 100 atmosfér. Dále například o značné ztrátě energie disipací při mezním mazání. Svůj prostor v tomto článku má i vznik disipace při tření. Tento jev vzniká jak vytvořením, tak hysterezním odrhnutím molekulových vazeb. Autoři také hovoří o koeficientu tření vyskytujícím se v kloubech a o jeho neskutečně malé velikosti 0,001 až 0,03. Přírodní mazání kloubu je totiž natolik výhodné a promyšlené, že při jeho měření dochází k měření samostatných disipačních jevů, které pak koeficient tření zastíňují. Článek poukazuje na výskyt hydrodynamického ale i mezního mazání u kontaktu kloubní chrupavky. Nedostatek maziva nebo jeho vada pak může vést k odebirání materiálu vlivem tření a následným nemocem jako je chondropatie. Realistický model takového kontaktu musí splnit kritéria velmi nízkého koeficientu tření, možnost unést velká zatížení pod velkou škálou smykových rychlostí a za velmi různých časových intervalů. Hlavním tématem tohoto článku jsou tedy typy mazání, při kterých chrupavka operuje. Důležitý vliv na budoucí zkoumání chrupavky bude mít mezní mazání. Toto mazání se zdá být nejvíce podobné reálnému mazání v kloubní chrupavce.

Mezní mazání je v tomto článku vyzdvihováno jako pravděpodobně nejbližší a bude bezpochyby hrát zásadní roli v porozumění chrupavce. Pochopení povahy molekulární mezní

vrstvy a mechanismu, který umožňuje značně nízké koeficienty tření. Ve studii je také zmíněn hyaluronan jakožto zásadní prvek synoviálních tekutin. Tento prvek jakožto polysacharid s vysokou molekulární hmotností je nedílnou součástí synoviálních tekutin, kde je zodpovědný pro jejich vysokou viskozitu při malých smykových rychlostech. Bohužel bylo zjištěno, že tento prvek nedokáže udržet nízké hodnoty koeficientu tření při vysokých zatíženích, které jsou jednou z podmínek pro synoviální tekutinu. Při dalším zkoumání frakce synoviální tekutiny, z které byl vypreparován hyaluronan, byl také vybrán glycoprotein, který byl následně pojmenován Lubricin. Toto mazivo přítomné u povrchu chrupavky a v synoviálních tekutinách dokázalo svůj vliv na koeficient tření oproti hyaluronanu. Když koeficient tření v tekutinách obsahujících lubricin a těch obsahujících hyaluronan se lišili téměř dvounásobně. Nicméně jako již zmíněný hyaluronan, při vyšších zatíženích koeficient tření stoupa v řádu desetin (desetinásobek hodnoty pro malé zatížení). Dalším zajímavým konceptem je pak na bázi povrchově aktivních fosfolipidů. Tyto fosfolipidy jsou pak hlavní součástí lipidů přítomných v synoviálních tekutinách a v molekulárním složení povrchu chrupavky. Tyto lipidy pak fungují podobně jako povrchově aktivní látky používané v strojní tribologii. Nicméně koeficient tření těchto látek se také pohyboval na příliš vysokých hodnotách. Dalším pojmem vyzdviženým v tomto článku je pak hydratační mazání. Toto mazání funguje na principu vody v hydratační skořápce. Takováto skořápka je pak velice houževnatá a dokáže se velmi rychle elasticky vrátit do původního stavu. Obtížnost vymáčknutí kvůli skořápkám spolu s přijatelností velkých zátěží a zároveň umožnění kluzného pohybu pak vyobrazuje hydratační mazání jako excelentní mazivo při vodnatém prostředí. Posledním faktem je pak zjištění, že kombinace povrchové vrstvy hyaluronanu spolu s fosfolidy dokáží za pomoci hydratačního mazání přinést tolik žádaný efekt nízkého tření při velkém zatížení.

Budoucností by pak mohla být kombinace všech tří prvků – Hyaluronan, lubricin a fosfolipidů, kde každý plní svou roli pro dosažení mezního typu mazání pro kloubní chrupavky.



### 3 DISKUZE

Tato kapitola bude věnována diskuzi o studovaných člancích, identifikaci jejich ovlivňujících parametrů a možnému budoucímu vývoji, vzhledem k pokrokovému využívání elastomerových součástí a novodobé snaze o minimalismus a snahu mít vše co nejmenší.

Pro porozumění poddajným kontaktům bylo studováno a vypracováno několik výše zmíněných studií. Tyto studie se dělí svým zaměřením na ty, řešící mazací film vystupující v kontaktu ale i na formování tohoto filmu a jeho vlivy na samotné tření. Hlavním studovaným aspektem je tedy samotné tření. Dále se dělí na studie, které za pomoci experimentálního měření na tribometru určují hodnotu bezrozměrného koeficientu tření, který v kontaktu disponuje.

Pro porozumění poddajným kontaktům je třeba uvažovat, jak samotné poddajné materiály, disponující v těchto kontaktech, fungují. Následně pak zjistit k jakým interakcím dochází v kontaktu, ve kterém se nachází. Při samotném kontaktu pak vlivem zvyšující se unášivé rychlosti mezi kontakty dochází k jednomu z druhů mazání. Při vstupu maziva do kontaktu nás pak zajímá vliv tohoto maziva na změnu koeficientu tření. Tímto vlivem se zabývala první studie této práce, kde De Vicente a spol. [18] v roce 2005 experimentálně řeší vliv vlastností maziva na koeficient tření v kontaktu. Zde autoři dochází ke zjištění, že čím nižší viskozitu mazivo má, tím vyšší má koeficient tření počáteční hodnotu na začátku měření. Dokazují tedy vliv tekutinové vlastnosti – viskozity, na koeficient tření. Dále autoři upozorňují na další možné využití přístroje MTM. Kde by byli schopni dávat dohromady kluzné tření dle Coutteho i valivé tření dle Poiseuilleho, tyto metody by ale vyžadovali náročné měření. Další studie, o rok později, kde ten samý tým, De Vicente a spol. [7], zkouší výše zmíněnou metodu měření obou tření najednou. Zde autoři zjišťují, že pro tento typ měření je důležitým parametrem SRR. Tento poměr vyjadřuje kluznou rychlost ku valivé rychlosti a určuje, zda kontakty kloužou nebo se po sobě odvalují. Vliv tohoto parametru autoři přezkoumali a došli k závěru, že u klouzavého pohybu, při hydrodynamickém tření je vliv SRR na koeficient značný. Zatímco pro mezní tření při nízkých rychlostech bylo SRR neznatelné. Pro valivý pohyb byl pak vliv SRR nulový. Zatížením v poddajných kontaktech se zabýval Myant a spol. [3], který se svými kolegy dokázali vliv zatížení na kluzné tření. Při mezním a smíšeném tření pak dokazují snížení koeficientu tření při zvýšeném zatížení. Valivé tření vychází z deformačních ztrát, které vznikají použitím poddajného materiálu, tyto změny v koeficientu valivého tření jsou nicméně označeny za zanedbatelné. Posledním pokusem těchto autorů bylo vyzkoušení frekvenčního zatížení. Při zvýšení frekvence zatížení se zvýšil elastický modul materiálu. Tato studie byla ovšem velmi omezena rozsahem zatížení. Větší zatížení by mohlo přivodit zajímavější výsledky co se povrchové drsnosti týče. O několik let později v roce 2017 pak Selway a spol. [21] dochází ke zjištění, že v povrchových nerovnostech kontaktu zůstává mazivo i po odlehčení vlivem adhezních vlastností elastomerů. Přichází proto s možností vlivu úplné eliminace maziva z povrchových nerovností v kontaktu, nezávisle na tom prezentují i možnost vlivu ztuhnutí materiálu pod vlivem elastické deformace. Dalším zkoumaným vlivem se zabývali Sadowski a Stupkiewicz [2], kteří se zabývali vlivem konfigurace měření na koeficient tření. Dvojice autorů zkoumala rozdíl mezi kontaktem poddajný-tuhý, tuhý-poddajný a poddajný-poddajný, tyto kontaktní dvojice měly i jiné drsnosti, dohromady tak existovalo devět různých konfigurací. Nicméně vliv konfigurace na koeficient tření nebyl identifikován, ačkoliv byli v tomto zkoumání autoři neúspěšní dokázali poukázat na nový bod zájmu – povrchová drsnost. Který v této studii pravděpodobně zastínil vliv konfigurací. Tato studie byla ovšem provedena za relativně malých sil a vliv zatížení by také mohl účinkovat v tření poddajného kontaktu.

Z biotribologických aplikací řešících tření lze jmenovat Masen a Cann, [27], kteří řeší koeficient tření při kontaktu jazyka s patrem dutiny ústní pro různé typy čokolád. Zajímavostí této studie je, že probíhala bez jakéhokoliv mazacího prvku, i když v dutině ústní se nachází například sliny. Koeficient tření zde zůstal konstantní, nezávislý na čase, pro čokoládu s nejnižším i nejvyšším obsahem kakaá.

Při sledování změny koeficientu tření bylo dosaženo závěru, že velký vliv na tento koeficient má použité mazivo. Popřípadě dosažený typ mazání, kterému kontakt podléhá. Nicméně dalším pokusem byl Bongaerts a spol. [1], kteří se pokusili o změnu vlastností materiálu, kde proběhla chemická změna povrchu materiálu z hydrofobní na hydrofilní. Při mezním a smíšeném tření došli k závěru, že hydrofobicita má velký vliv na koeficient tření, nicméně při hydrodynamickém, je efekt hydrofobicity nulový. Nicméně práce svým závěrem hydrofobicity pro mezní a smíšené tření dokázala možnost povrchově aktivních částic na smáčecí vlastnosti povrchů. Při přechodu například z mezního tření na smíšené a dále na hydrodynamické by pak mohla mít vliv tloušťka takového filmu. Myant a spol. [4], se právě o měření této tloušťky snaží za pomoci laserem indukované fluorescence, kde dokazují účinnost této metody a možnosti dalšího použití v tomto směru. Myant a kolektiv [8] pokračují snahou o vyšetření vlivů zatížení a viskozity na tloušťku filmu. Zjišťují, že při násobných zvětšeních zatížení by mohla do hry vstoupit povrchová drsnost, vlivem této drsnosti by mohla nastat změna v tloušťce filmu. Z důvodů malých zatížení je pak tato práce diskutabilní, lze říct, že by měla vyšší zatížení vliv na drsnost, nicméně jak je to u poddajných materiálů známo není to jisté. Vliv viskozity ovšem opět mezi jednotlivými vlivy dominuje, kde při desetinné změně viskozity dochází ke dvounásobným rozdílům v tloušťkách. Z výše dokázané funkčnosti laserem indukované fluorescence vychází Fowell a spol [5], kteří využívají tuto technologii pro zkoumání vlivu konfigurace kontaktů na tloušťku utvořeného filmu při různých rychlostech v kontaktu. Při bodovém dotyku PDMS polokoule se skleněným diskem byla zjištěna lineární závislost mezi tloušťkou filmu a rychlostí mezi kontakty. Při použití o-kroužku a skleněného disku docházelo k nárůstu tloušťky s narůstající rychlostí. Nakonec zjištění, že za konfigurace o-kroužku a konkávní čočky platila lineární závislost jako u první. Při řešení tření došlo ke zkoumání vlivu frekvence zatížení pravděpodobně z podobného důvodu Myant a spol. [6] zkouší pomocí předem zpracované laserem indukované fluorescence zjistit vliv proměnného pohybu tzn. rozjezd a náhlé zastavení. Počáteční formace filmu je závislá na počátečním zrychlení kontaktu. Nicméně tloušťka filmu se vždy po časovém intervalu srovná na stejné hodnotě. Dalším vlivem se zabývali Nečas a spol. [23], kteří zkoumali vliv kinematických podmínek na tloušťku filmu v poddajném kontaktu. Hodnotili například vliv čistě valivých podmínek na tloušťku tření, kdy při zvyšující se rychlosti rostla tloušťka filmu. Pro negativní kluzné podmínky došlo ke snížení tloušťky filmu, zatímco pro pozitivní kluzné podmínky došlo ke zvýšení tloušťky filmu, tyto tloušťky jsou brány vzhledem k čistě valivým podmínkám. Vliv SRR na tloušťku filmu je tedy zjevný. Nicméně je třeba brát v potaz viskozitu tekutiny, kvůli formulaci hydrodynamického klínu mezi kluznými kontakty a jeho vázání na zvýšení teploty v kontaktu tzn. snížení viskozity maziva a z toho vyvozeného zúžení tloušťky maziva.

Pro biotribologické aplikace byly pak studovány následující články. Murakami a spol. [19], jakožto skupina zabývající se mazáním v přírodním synoviálním a artifičním kloubu v jejich studii vysvětlují a dokazují, jaký má hydrodynamické tření nosné účinky. Při hydrodynamickém tření, jak je vysvětleno na začátku této práce, může docházet a dochází k přenosu zatížení za pomoci maziva. Při elasto-hydrodynamickém mazání, které předchází hydrodynamickému mazání pak dochází i k elastickým deformacím jednoho z povrchů. Na tuto

deformaci jednoho z povrchů se autoři odvolávají kvůli zvýšení viskozity maziva. Tato studie byla dále spíše biologicky orientována na ochranné filmy kloubních chrupavek. Dále Jahn a spol. [22], který se zabývá teoreticky orientovanou prací srovnávající nejnovější oborové postupy a dosažené cíle jako, konkrétně v této studii, přechod z obecného smýšlení mazání kloubní chrupavky jako hydrodynamické, přičemž větší smysl dává mazání mezní. Práce dále vysvětluje funkci jednotlivých molekul a prvků fungujících v přírodním mazivu kloubní chrupavky a jejich roli v tomto mazivu. Poslední část práce je pak věnována inovativní metodě hydratačního mazání. Tato metoda využívá vody a její přirozené vlastnosti, a to její vytrvávající tekutost. Zjednodušeně řečeno voda ve formě velmi tenkého filmu neustále teče, narozdíl od organických rozpouštědel a olejů, které mají tendenci vejít do tuhého stavu. Voda si tedy ponechává svojí objemovou tekutost i při objemovém omezení (přitlačení těles na velmi blízkou vzdálenost) na 1 molekulu. Takto tenká vrstva vody má velkou tendenci se seskupit kolem náboje. Tato konfigurace náboje, na kterém se nachází molekulová vrstva vody, je následně schopná velmi rychlé regenerace a zároveň je schopna přenášet velké zatížení. Pod smykovým zatížením se tato konfigurace chová jako tekutina. Tato kombinace vlastností velkého odolávání normálovému zatížení spolu s tekutinovou reakcí na smykové namáhání je považována za hydratační mazání.

Jakožto numericky zaměřený článek je pak vypracován článek Putignano, Dini [20], kteří popisují chování poddajného materiálu v kontextu s pevným materiálem a jejich odlišností. Uvádí v povědomí numerické modely použité pro tyto výpočty a v neposlední části uvádí viskoelasticitu a nedostatky v její analýzy a pochopení v třidimenzionálním prostoru. Ve kterém lze brát v potaz povrchové drsnosti poddajných materiálů. Vliv viskoelasticity jsou zpravidla deformace na povrchu kontaktu, tento jev je přítomný pro viskoelastické materiály. Přítomnost viskoelasticity záleží na rychlosti dodané do kontaktu a viskozitě tekutiny.

S ohledem na studii Sadowski a Stupkiewicz [2], kde byla autory zmíněna možnost překrytí vlivu konfigurace vlivem povrchové drsnosti kvůli nedostatečnému zatížení by bylo zajímavé provést podobnou studii s větším rozsahem zatížení.

S ohledem na studii Jahn a spol. [22], kde zmiňují úspěšnou studii kombinující dva prvky – hyaluronan a fosfolipidy jako úspěšné složení mezní vrstvy pro mazání. Tato vrstva splňuje obě potřebné podmínky, koeficient tření v řádu tisícín a odolnost vůči zatížení řádově stovek atmosfér. Autoři zde doporučují kombinaci všech tří prvků – hyaluronanu, fosfolipidů a lubricinu jako pokus o vytvoření povrchové vrstvy kloubu.

S ohledem na studii Masen a Cann [27], kteří řešili tření v dutině ústní, a tedy kontakt jazyka a patra s rozteklou čokoládou. V této studii chybělo použití slin, které se v dutině ústní běžně nachází. Dalším výzkumem by tedy mělo být měření za stejných podmínek při použití slin a následné porovnání s předchozím.

S ohledem na studii Nečas a spol. [23], bylo rozptýlení hodnot mezi numerickými predikcemi a experimentálními výsledky označeno jako způsobené vlivem tepelných jevů. Proto by se jako další výzkumný směr jevilo dobré vyzkoušet toto měření například za jiných podmínek při nižších / vyšších teplotách a toto tvrzení dokázat.

S ohledem na studii Putignano, Dini [20], kteří navrhují využít jejich numerické predikce viskoelasticity pro návrh strojírenského prvku, jako je např.: ložisko nebo těsnění. V podstatě čehokoli, kde se využívá viskoelastického materiálu a je nutné udržet tento jev pod kontrolou.

S ohledem na studie poddajných kontaktů je třeba uvědomit si značný vliv pochopení viskoelasticity, jakožto stavebního kamene poddajných kontaktů. Po pochopení podstaty jednoho z hlavních nepředvídatelných jevů poddajných materiálů bude určitě možné za jejich pomoci vylepšit každodenní život. Ať už náhradou ocelových komponent v osobních automobilech za pomoci elastomerových, u kterých dosáhneme požadovaného rozsahu únosnosti za pomoci zatížení přenášejícího hydratačního, elasto-hydrodynamického nebo hydrodynamického mazání. Tato konfigurace by pak mohla bez problému nahradit její ocelové konkurenty. Vliv pochopení jevů vznikajících v poddajném kontaktu by pak zajisté nezůstal jen u automobilů, ale přenesl by se také do neustále rozvíjející biotribologie, kde by pomohla s vyřešením problematiky mazání kloubu, ale i vyřešení tribologie oka.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce *Studium tření poddajných kontaktů* bylo provedení kritické rešerše literatury zabývající se problematikou tření a mazání v poddajných kontaktech. Dílčí cíle této práce byly: kritická rešerše aktuálních vědeckých publikací zabývajících se třením a mazáním poddajných kontaktů, identifikace zásadních ovlivňujících parametrů, identifikace potenciálních výzkumných směrů s ohledem na aktuální výzkum.

První kapitola této práce – analýza problému a cíle práce, kde bylo nastíněno proč by mělo být tření problémem. Po nastudování faktů o vlivu tření na průmysl a ekonomiku by se dalo říct, že vliv tření na ztrátu energie je značný. Byť jen v samotném motoru osobního automobilu dochází ke ztrátě skoro šestininy získané energie z paliva. Pro překonání veškerého tření silničního vozidla se pak ztráta energie pohybuje na jedné třetině. V této kapitole je také vymezen poddajný materiál a jeho výhodné vlastnosti jako je levná výroba, malá hmotnost, které jsou důležité pro dnešní dobu.

Druhá kapitola – přehled současného stavu poznání, v této kapitole je nejdříve krátká definice tribologie, tření a jeho základní rozdělení a poddajný kontakt. Následuje hlavní část této práce – rešerše jednotlivých, doporučených článků zabývajících se tématem třením nebo mazáním poddajných kontaktů. U každého článku byla dodržena následující struktura: Čím se zabývali? Jak to měřili? Za jakých podmínek? Co zjistili? Potenciální budoucnost? Články jsou dále rozřazeny na ty zabývající se třením poddajných kontaktů a na články zabývající se mazáním poddajných kontaktů. Dalším rozdělením je pak podle jejich využití na technické a biotribologické. Články jsou řazeny chronologicky podléhající dříve zmíněnému rozdělení. Hlavním tématem třecích článků je koeficient tření, zatímco u mazacích článků je to tloušťka filmu maziva.

Třetí kapitola – Diskuze se zabývá identifikací ovlivňujících parametrů, kde hlavními ovlivňujícími parametry byly pro koeficient tření z kontextu určeny viskozita maziva, SRR (slide-to-roll ratio) pro hydrodynamické mazání, elastické ztuhnutí materiálu, povrchová drsnost a zatížení pro mezní a smíšené mazání. Pro tloušťku filmu maziva jsou těmito parametry hydrofobicita materiálu pro mezní mazání, zatížení, viskozita, unášivá rychlost, počáteční zrychlení na tvorbu prvotního filmu, povrchové nerovnosti a SRR. Na konci této kapitoly jsou sepsány potenciální výzkumné směry vycházející ze zpracovávaných studií. Spolu se specifikací možného dopadu konečného pochopení poddajných materiálů a jeho možný vliv na každodenní život.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BONGAERTS, J.H.H., K. FOURTOUNI a J.R. STOKES. Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS–PDMS contact. *Tribology International*. 2007, 40(10-12), 1531-1542. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2007.01.
- [2] SADOWSKI, Przemysław a Stanisław STUPKIEWICZ. Friction in lubricated soft-on-hard, hard-on-soft and soft-on-soft sliding contacts. *Tribology International* [online]. 2019, 129, 246-256 [cit. 2021-02-20]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2018.08.025
- [3] MYANT, C., H.A. SPIKES a J.R. STOKES. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International* [online]. 2010, 43(1-2), 55-63 [cit. 2021-02-24]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2009.04.034
- [4] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International* [online]. 2010, 43(11), 1960-1969 [cit. 2021-02]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2010.03.013
- [5] FOWELL, M.T., C. MYANT, H.A. SPIKES a A. KADIRIC. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. *Tribology International* [online]. 2014, **80**, 76-89 [cit. 2021-02-26]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2014.05.028
- [6] MYANT, Connor, Mark FOWELL a Philippa CANN. The effect of transient motion on Isoviscous-EHL films in compliant, point, contacts. *Tribology International* [online]. 2014, **72**, 98-107 [cit. 2021-03-02]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2013.11.019
- [7] DE VICENTE, J, J. R. STOKES a H. A. SPIKES. Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2006, **220**(2), 55-63 [cit. 2021-02-14]. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET90
- [8] MYANT, Connor, Mark FOWELL, Hugh A. SPIKES a Jason R. STOKES. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions* [online]. 2010, **53**(5), 684-694 [cit. 2021-03-15]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402001003693109
- [9] BHUSHAN, Bharat. Introduction to tribology. New York: John Wiley, c2002. ISBN isbn04-711-5893-3.
- [10] ČERNOCH, Svatopluk. Strojně technická příručka. 11. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1959. Řada strojírenské literatury.

- [11] KRÁL, Lukáš. Metody a zařízení pro zjišťování koeficientu tření [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124296>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.
- [12] WILLIAMS, J.A. Advances in the modelling of boundary lubrication. *Boundary and Mixed Lubrication - Science and Applications, Proceedings of the 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Elsevier, 2002, 2002, , 37-48. Tribology Series. ISBN 9780444509697. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8922(02)80005-0
- [13] STREATOR, J.L. A model of mixed lubrication with capillary effects. *Boundary and Mixed Lubrication - Science and Applications, Proceedings of the 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. Elsevier, 2002, 2002, , 121-128. Tribology Series. ISBN 9780444509697. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8922(02)80013-X
- [14] Lubricants. *Smithells Metals Reference Book* [online]. Elsevier, 2004, 2004, s. 24-1-24-15 [cit. 2021-04-19]. ISBN 9780750675093. Dostupné z: doi:10.1016/B978-075067509-3/50027-0
- [15] PRIESTER A KOLEKTIV. Kluzné ložiská. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1981.
- [16] ŠAFR, Emil. Technika mazání. 2. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1970.
- [17] OBRUČNÍK, Daniel. Tribologické hodnocení třecích dvojic dílců odstředivých čerpadel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 51, příloh 5. Ing. Karel Osička.
- [18] DE VICENTE, J., J.R. STOKES a H.A. SPIKES. The Frictional Properties of Newtonian Fluids in Rolling–Sliding soft-EHL Contact. *Tribology Letters*. 2005, 20(3-4), 273-286. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-005-9067-3
- [19] MURAKAMI, T, H HIGAKI, Y SAWAE, N OHTSUKI, S MORIYAMA a Y NAKANISHI. Adaptive multimode lubrication in natural synovial joints and artificial joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 1998, 212(1), 23-35. ISSN 0954-4119. Dostupné z: doi:10.1243/0954411981533791
- [20] PUTIGNANO, Carmine a Daniele DINI. Soft Matter Lubrication: Does Solid Viscoelasticity Matter?. 2017, 9(48), 42287-42295. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.7b09381
- [21] SELWAY, Nichola, Vincent CHAN a Jason R. STOKES. Influence of fluid viscosity and wetting on multiscale viscoelastic lubrication in soft tribological contacts. *Soft Matter*. 2017, 13(8), 1702-1715. ISSN 1744-683X. Dostupné z: doi:10.1039/C6SM02417C
- [22] JAHN, Sabrina, Jasmine SEROR a Jacob KLEIN. Lubrication of Articular Cartilage. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2016, 18(1), 235-258. ISSN 1523-9829. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-bioeng-081514-123305

- [23] NEČAS, David, Tomáš JAROŠ, Kryštof DOČKAL, Petr ŠPERKA, Martin VRBKA, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL. The Effect of Kinematic Conditions on Film Thickness in Compliant Lubricated Contact. *Journal of Tribology*. 2018, 140(5), 235-258. ISSN 0742-4787. Dostupné z: doi:10.1115/1.4039529
- [24] Anatomical-terminology: terms-of-movement [online]. 2020 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://teachmeanatomy.info/the-basics/anatomical-terminology/terms-of-movement/>
- [25] M. Scaraggi and B. N. J. Persson, *Tribol. Int.*, 2014, 72, 118–130.
- [26] *Tribology Letters*. 66. 2018. ISSN 1023-8883. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-017-0958-x>
- [27] MASEN, M. a P. M. E. CANN. Friction Measurements with Molten Chocolate. *Tribology Letters*. 2018, 66(1). ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-017-0958-x
- [28] HOLMBERG, Kenneth a Ali ERDEMIR. Global Impact of Friction on Energy Consumption, Economy and Environment. *FME: Transactions*. 2015, 43(No 3), 181-185.
- [29] Tribometers: Classification and types of tribometers. *Tribonet* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.tribonet.org/tribometer/>
- [30] Oddanost tribologii [online]. 2015 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://evolution.skf.com/cs/oddanost-tribologii/>
- [31] BLAU, Peter J. *Friction Science and Technology: From concepts to applications*. Second edition. USA: © 2009 by Taylor & Francis Group, 2009. ISBN 978-1-4200-5404-0.
- [32] KLEIN, Jacob. Hydration lubrication. *Friction*. 2013, 1(1), 1-23. ISSN 2223-7690. Dostupné z: doi:10.1007/s40544-013-0001-7



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

BOD		Ball-on-disk
DMA		Dynamic mechanical analysis
MTM		Mini-traction machine
<i>NDR</i>		Nitrilová pryž
<i>PDSM</i>		Polydimethylsiloxan
PTFT		Polytetrafluorethylen
SRR	[-]	Slide-to-roll ratio